

Особенности проведения термических процессов в СВЧ-электромагнитном поле

Натан Фельдман (г. Новосибирск)

На примере волноводной СВЧ-камеры рассматриваются особенности прохождения термических процессов в СВЧ-электромагнитном поле. Показано, что основными преимуществами сушки в СВЧ-электромагнитном поле являются увеличение КПД и управляемости процессом за счёт измерения меняющихся диэлектрических характеристик материала. Предложена методика, позволяющая определить целесообразность проведения термической обработки материала в СВЧ-электромагнитном поле и оптимизировать параметры этого процесса.

Основное отличие термического процесса в СВЧ-электромагнитном поле по сравнению с термическим процессом в тепловом поле состоит в распределении поля в области расположения материала, подвергающегося термической обработке. Если при тепловой обработке внешнее тепловое поле распределяется равномерно (при отсутствии движения воздушного потока) в воздушном пространстве, окружающем обрабатываемый материал, и только через него проникает в материал, постепенно его прогревая, то в СВЧ-электромагнитном поле вводимая в камеру энергия преобразуется в тепловую энергию только в самом материале (если нет потерь энергии в оболочке камеры, в которой проходит процесс). Окружающее воздушное пространство не поглощает СВЧ-энергию и

потому нагревается только за счёт отдачи тепла материалом. Степень поглощения материалом СВЧ-энергии зависит от его диэлектрических характеристик (диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла потерь $\tan\delta$), от конфигурации и размеров материала и от его расположения относительно электромагнитного поля, формируемого камерой.

Формирование поля в камере подробно изучено для проходных камер волноводного типа, поскольку этого требовало развитие радиолокации. Поэтому в настоящей работе для рассмотрения особенностей проведения термических процессов в СВЧ-электромагнитном поле принята камера волноводного типа.

Волноводная камера проходного типа [1] – это по существу прямоугольный волновод, в котором материал, подвергающийся термическому воздействию, расположен таким образом (см. рис. 1). При поперечных размерах волновода, создающих условия распространения в нём волны основного типа H_{10} (эти размеры [3] установлены международным стандартом и зависят только от частоты пропускаемой через волновод электромагнитной волны), такая камера обеспечивает:

- выход из камеры не поглощённой материалом СВЧ-энергии при возможности её дальнейшего использования в термическом процессе;
- малое нарушение согласования материала с СВЧ-генератором [5] ($K_{СВЧ} = 1,5...2,0$), т.е. отражённая мощность составляет $P_{отр} = (0,04...0,11)P_{пад}$

Электромагнитная волна в волноводе (как падающая, так и отражённая) распространяется только вдоль оси z волновода. Интенсивность (по мощности) электромагнитных колебаний в пустом волноводе изменяется вдоль стенки a по закону $\sin^2 u$ (см. рис. 2а), а в плоскостях, параллельных стенке b , остаётся постоянной. При введении в волновод диэлектрического материала (см. рис. 2б) поле концентрируется в зоне его расположения. При этом степень концентрации возрастает с увеличением абсолютного значения диэлектрической проницаемости материала и толщины слоя g .

Процесс термической обработки можно наглядно рассмотреть при сушке материалов, поскольку закономерности этого процесса принципиально одинаковы для большого числа различных материалов.

Как видно на рисунке 2б, в начале процесса максимум мощности приходится на середину слоя материала. Это приводит к тому, что сушка начинается именно с середины слоя (нагрев материала, испарение воды). Изначально создаются условия, благоприятствующие интенсификации процесса, поскольку совпадение по направлению градиентов температуры, концентрации и давления ускоряет выход паров воды. По мере уменьшения влагосодержания в среднем слое, в нём уменьшается диэлектрическая проницаемость, т.к. вода имеет очень высокую диэлектрическую проницаемость ($\epsilon = 80$) по сравнению с большинством материалов ($\epsilon < 25$). Это приводит к перераспределению поля (см. рис. 2б), и процесс сушки продолжается до достижения заданной влажности¹.

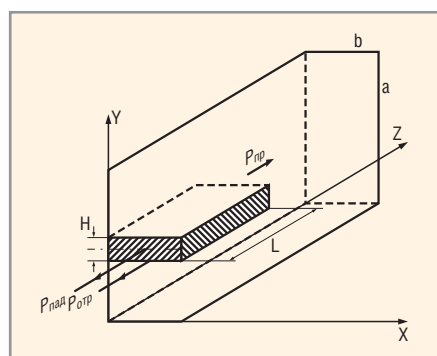


Рис. 1. Волноводная камера

a, b – размеры волновода; g, l – размеры материала; $P_{пад}$ – падающая мощность; $P_{отр}$ – отражённая мощность; $P_{пр}$ – прошедшая мощность

- ничтожно малые потери СВЧ-мощности [4] в стенках волновода (примерно 0,1%);
- концентрацию энергии в материале;

¹ Если заданная влажность $W > 1\%$ и определяется как средняя влажность материала (например, взвешиванием), то в сечении материала может иметь место неравномерность влажности с уменьшением последней в срединных слоях.

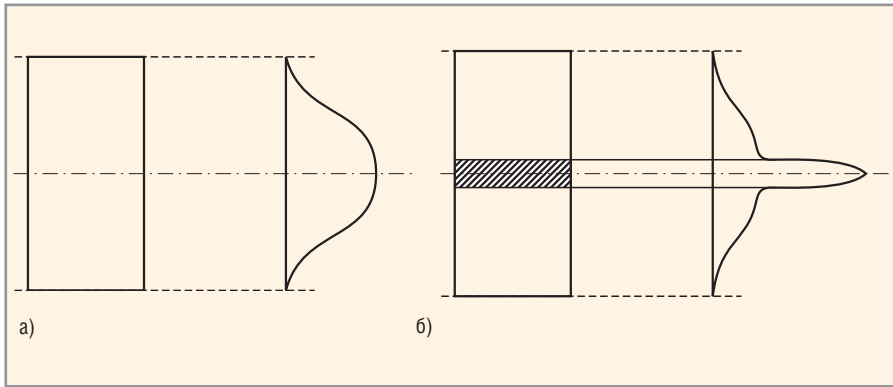


Рис. 2. Распределение поля (по мощности) в волноводе

а) Пустой волновод; б) волновод с диэлектриком

Из вышеприведённого описания процесса сушки в СВЧ-электромагнитном поле можно сделать вывод, что:

- прохождение процесса во времени зависит от совокупности теплотехнических и диэлектрических характеристик материала;
- поскольку поглощаемая материалом мощность электромагнитных колебаний в значительной степени определяет весь процесс, исследованию оптимального процесса должно предшествовать определение предельно допустимых значений СВЧ-мощности в ходе всего процесса.

Поглощаемая материалом СВЧ-энергия $Q_{\text{погл}} = P_{\text{погл}}t$ определяется поглощённой мощностью $P_{\text{погл}}$ и временем воздействия t . Однако

$$P_{\text{погл}} = (P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}) - P_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где, $P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}$ – мощность электромагнитной волны, входящей в материал; $P_{\text{пр}}$ – мощность выходящей из материала волны.

Величина $P_{\text{отр}}$ зависит от КСВН тракта в сечении ввода в него материала:

$$P_{\text{отр}} = P_{\text{пад}} \left(\frac{k-1}{k+1} \right)^2, \quad (2)$$

где k – КСВН тракта.

Тогда

$$P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} = P_{\text{пад}} \frac{4k}{(k+1)^2}. \quad (3)$$

Отношение $P_{\text{пр}}$ к входящей в материал мощности, как известно, определяется соотношением:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}}} = e^{-\alpha l}, \quad (4)$$

где l – длина участка взаимодействия волны с материалом; α – коэффициент диэлектрического поглощения материала, зависящий как от его диэлектрических характеристик ($\epsilon, \text{tg}\delta$), так

и от относительной толщины слоя материала (по отношению к размеру широкой стенки волновода a), а также от конструктивных характеристик волноводной камеры, определяемых отношением α/λ , где λ – длина электромагнитной волны.

Из выражений (1)–(4) вытекает, что поглощённая материалом мощность определяется как:

$$P_{\text{погл}} = P_{\text{пад}} \frac{4k}{(k+1)^2} (1 - e^{-\alpha l}). \quad (5)$$

Следует учесть, что диэлектрические характеристики материала зависят от его температуры, изменяющейся в процессе его термообработки, от изменения состава и структуры материала, связанных, во-первых, с изменением его влажности (при сушке) или с прохождением в нём каких-либо химических процессов (при обжиге) и, во-вторых, с изменением пористости материала, если таковая имеет место.

Изменение температуры определяется тепловыми характеристиками материала (теплоёмкостью, теплопроводностью и теплопередачей). Кроме того, прохождение термического процесса зависит от сопротивления, оказываемого материалом прохождению через него паров воды (при сушке). При этом все теплотехнические характеристики материалов изменяются с изменением температуры.

Очевидно, что для определения оптимального режима проведения термического процесса в СВЧ-электромагнитном поле необходимо знание не только диэлектрических и теплотехнических характеристик материала в начальный момент и их изменение в ходе процесса, но и их взаимного влияния друг на друга, изучаемого электротермогидродинамикой. Большой объём необходимых данных по каждому ма-

териалу и сложность их совместного анализа затрудняет развитие этого направления техники и внедрение энергосберегающих технологий.

Поэтому становится актуальной разработка комплексной методики экспериментальных исследований термических процессов, источником энергии в которых является СВЧ-электромагнитная энергия. Основными задачами таких исследований являются:

- определение принципиальных возможностей достижения в электро-

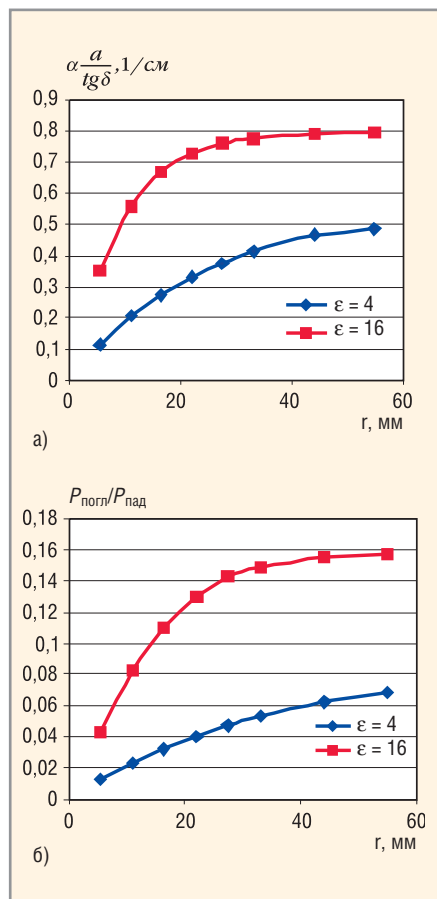


Рис. 4. Зависимость α , $P_{погл}/P_{пад}$ от толщины слоя r при $a = 220$ мм (в множителе $a/tg\delta$, $a = 0,22$ м); $l = 10$ см

а) $\alpha = f(r)$; б) $P_{погл}/P_{пад} = f(r)$

магнитном поле требуемых характеристик;

- оптимизация режима термообработки, позволяющая достигнуть максимального КПД процесса.

Показанная выше зависимость параметров процесса от конструктивного построения СВЧ-камеры, а также от длины СВЧ-волны требует проведения экспериментальных исследований в СВЧ-системе либо аналогичной используемой в рабочей установке либо в установке, параметры которой могут быть надёжно пересчитаны по полученным экспериментальным данным для рабочей установки.

Для решений первой задачи экспериментальная установка должна быть оборудована измерителями текущей температуры материала и его веса. В установке должно быть предусмотрено проведение фиксируемых во времени кратковременных перерывов, продолжительность которых может быть учтена в итоговом анализе процесса. Такие перерывы могут быть необходимы для анализа структурных изменений в материале, проводимом вне СВЧ-камеры (например, при сушке древе-

сины – отсутствие искривления волокон и др.). В совокупности все указанные измерения должны ответить на вопрос, возможно ли в электромагнитном поле провести требуемую техническую обработку материала.

Целесообразность использования электромагнитной энергии в данном процессе может быть определена только путём решения второй задачи, т.е. определением возможности оптимизации процесса для достижения высокого КПД. Основными измеряемыми параметрами процесса здесь являются: измерение времени процесса t ; поглощаемой материалом электромагнитной мощности $P_{погл}$ и конечного результата процесса (например, при сушке – количества испаренной воды Δm_B). Эти данные позволяют однозначно определить КПД процесса η . Например, при сушке

$$\eta = \frac{Q_{физ}}{Q_{факт}} = \frac{q \Delta m_B}{P_{погл} t}, \quad (6)$$

где $Q_{физ}$ – физически необходимая энергия для испарения m_B кг воды; $Q_{факт}$ – фактически израсходованная энергия; q – теплота парообразования воды 2256 кДж/кг;

Учитывая малое время протекания процесса, очевидно, что все величины, входящие в уравнение (6), должны измеряться быстродействующими приборами и результаты измерений должны (с привязкой ко времени) регистрироваться на компьютере.

Исходя из практики проведения исследований КПД процесса, основными факторами, определяющими его величину в процессе сушки, являются:

- требуемая конечная влажность материала, – чем она ниже, тем меньше КПД (это объясняется разреженностью воды в материале при снижении её количества, что снижает поглощение водой электромагнитной энергии). Обычно явное снижение КПД имеет место при влажности $W_k < 3...5\%$. Одним из путей поддержания требуемой производительности установки является увеличение, по мере снижения влажности, мощности $P_{пад}$, излучаемой генератором;
- при сушке многих материалов КПД процесса возрастает с увеличением мощности $P_{пад}$. Это определяется ускорением парообразования во внутренних слоях материала, что приводит к увеличению давления пара внутри материала, ускоряющему его выход из материала. По

всей вероятности, такой эффект характерен для материалов, обладающих большим сопротивлением проходящему пару;

- КПД процесса в значительной степени зависит от толщины r слоя в потоке материала, подвергающегося термообработке в СВЧ-камере. Эта зависимость является многофункциональной и потому требует специальной экспериментальной проверки. Физическая сущность зависимости состоит в следующем: с одной стороны, с увеличением толщины слоя растёт диэлектрический коэффициент поглощения α материала, с другой – увеличивается количество материала и, следовательно, содержащейся в нём воды, которую в процессе сушки необходимо испарить. Но если количество материала растёт пропорционально r , то α при малых значениях r растёт быстро, а с увеличением толщины слоя r скорость нарастания замедляется. При этом характер изменения зависит от диэлектрической проницаемости материала ϵ (т.е. от диэлектрических свойств материала и его влажности) и, следовательно, в процессе сушки постоянно изменяется. Для наглядности графики зависимости α от r , рассчитанные по [2] для двух значений $\epsilon_1 = 4$ и $\epsilon_2 = 16$, и соответствующие им значения $P_{погл}$ при $l = 10$ см приведены на рисунке 4. Таким образом, варьируя толщину материала r (при $P_{пад} = const$), можно найти значение $r_{опт}$, соответствующее максимальному КПД процесса;
- процесс СВЧ-обработки материала улучшается при равномерном распределении воздействующей на него мощности электромагнитных колебаний по всей длине l взаимодействия. Но воздействующая мощность, постепенно поглощаясь материалом, убывает вдоль l по экспоненциальному закону. Поэтому целесообразно проведение последовательного облучения материала с двух противоположных сторон. Равномерность суммарного потока мощности в этом случае определяется выражением:

$$\delta = \frac{P_{возд}^{max}}{P_{возд}^{min}} = cb \frac{\alpha l}{2}, \quad (7)$$

при этом $P_{возд}^{max}$ всегда приходится на плоскость ввода СВЧ-энергии в материал, а $P_{возд}^{min}$ – на срединную по l плоскость.

Задавая допустимое значение δ , из (7) определяем необходимое значение $l_{\text{опт}}$, после чего необходимо уточнить максимальный КПД процесса, полученный в экспериментах по п. 3, повторив измерение α при длине взаимодействия $l = l_{\text{опт}}/2$.

Полученные таким образом экспериментальные данные позволяют с высокой степенью точности прогнозировать процесс СВЧ-электромагнитной обработки материала, т.е. при требуемом качестве готового продукта определить энергоёмкость процесса и производительность установки в зависимости от СВЧ-мощности. Это позволяет определить целесообразность применения СВЧ-электромагнитной энергии в данном процессе. Проведённые по описанной выше методике экспериментальные исследования в лаборатории микроволновой энергетики (г. Новосибирск) показали, что использование СВЧ-электромагнитной энергии очень эффективно при сушке древесины (при сушке сосновой доски до влажности $W_k = 6...8\%$ КПД процесса составляет $70...80\%$), при сушке неко-

торых зольных материалов до $W_k = 6...8\%$ КПД процесса 90% , при сушке талька до $W_k = 1\%$ КПД процесса 70% , при $W_k = 0,5\%$ – КПД 60% . С другой стороны, использование СВЧ-электромагнитной энергии неэффективно при сушке материалов с высокой степенью пористости (при сушке базальтовой чешуи от начальной влажности $W_k = 15\%$ КПД процесса не превышает $10...20\%$, что определяется низкой концентрацией воды в рабочем пространстве камеры).

Подводя итоги рассмотрения, можно сделать выводы о наличии преимуществ СВЧ-камер волноводного типа перед камерами других типов:

- волноводные камеры имеют очень низкие потери энергии в своей оболочке;
- в волноводных камерах обеспечивается возможность измерения выходящей из материала СВЧ мощности $P_{\text{пр}}$ и изменения диэлектрических характеристик (α) материала в процессе его обработки, что существенно повышает управляемость процесса и создаёт условия для его автоматизации.

Такие преимущества делают целесообразными оптимизацию волноводных камер, их связи между собой в единой системе СВЧ-обработки, выбора частоты электромагнитных волн, мощности СВЧ-генераторов и её изменения в процессе обработки, системы защиты камер от паразитных излучений, а также построение измерительной системы СВЧ-установки и реализацию алгоритмов управления установкой в процессе термообработки материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ-энергетика. Т. 2. Под ред. Э. Окресса. Мир, 1971.
2. Бергер М.Н., Катилевич Б.Ю. Прямоугольные волноводы с диэлектриками. Советское радио, 1973.
3. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. Госэнергоиздат, 1963.
4. Справочник по радиолокации. Т. 2. Советское радио, 1977.
5. Фельдман Н.Я. Некоторые вопросы сушки древесины в микроволновом поле. Деревообрабатывающая промышленность. 1996. № 6.