

Ю.И. Бохан

Технологическое применение СВЧ полей для обработки материалов

Введение. Проблема взаимодействия излучений различной природы с веществом представляется одной из наиболее актуальных в физике и химии. Особенно это касается такого интересного раздела, как воздействие переменных полей на материалы, находящиеся в различных агрегатных состояниях вещества и претерпевающие различные превращения под воздействием лазерного, сверхвысокочастотного (СВЧ) излучений [1]. Подобный интерес обусловлен тем фактом, что под действием электромагнитных излучений (полей) ряд химических превращений протекает совершенно иначе, чем в обычных условиях. Это открывает широкие перспективы для использования концентрированных потоков энергии переменных электрических и магнитных полей для управления и стимулирования технологическими процессами обработки материалов. В работе рассмотрен ряд эффектов, возникающих в материалах под действием СВЧ полей различной интенсивности и частоты.

Тепловое воздействие. Изучение процесса нагрева СВЧ полями материалов необходимо предварить анализом количества поглощаемой энергии. Самое общее выражение для этого:

$$P = 0,556 \times 10^{-12} \times \omega \times \varepsilon \times \operatorname{tg} \delta \times E^2, \quad (1)$$

где ε – действительная часть диэлектрической проницаемости, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь, E – напряженность переменного поля, ω – частота действующего поля.

Коэффициент затухания плоской волны в несовершенном диэлектрике

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon \operatorname{tg} \delta}, \quad (2)$$

где λ – длина волны СВЧ поля, ε – действительная часть диэлектрической проницаемости, $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь. Тогда поток поглощаемой мощности на глубине z в диэлектрике будет:

$$P(z) = 2(1-R)\alpha P_0 \exp(-2\alpha z), \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения СВЧ волны. К.п.д. резонаторной рабочей камеры

$$\eta = \frac{P_0}{P_0} = \frac{Q_0 - Q_d}{Q_0}, \quad (4)$$

где $Q_0 = 2K_t V / S \zeta$ – добротность пустого резонатора, K_t – коэффициент технологического качества камеры, V – объем, S – площадь внутренней поверхности, ζ – глубина скин-слоя, Q_d – добротность заполненного резонатора. При этом для оценки Q_d следует брать $K_t = 0,4 \div 0,5$ и добротность незаполненной камеры $\approx 10^4$. Тогда для достижения к.п.д. камеры 90% необходимо иметь $Q_d = 1,1 \times 10^3$ (рис. 1).



Резонатор

Регулятор

Рис. 1. Общий вид СВЧ резонатора с блоками регулировки мощности и измерения температуры.

При спекании керамических материалов в рабочей камере развиваются большие (~1300–1700°C) температуры. Поэтому энергетический баланс СВЧ обработки можно записать в следующем виде:

$$P_1 = P_2 + P_3, \quad (5)$$

где P_1 – мощность, поглощенная телом, $P_2 = mc_p \frac{dT}{dt}$ – мощность нагрева тела,

$P_3 = \sigma ST^4$ – мощность радиационного излучения, m, c_p, S, T – масса, усредненная удельная теплоемкость, площадь излучающей поверхности и температура нагреваемого тела, σ – постоянная Стефана–Больцмана. Поглощенная мощность может быть представлена в виде двух слагаемых:

$$P_1 = \eta P_{rf} + P_{refl}, \quad (6)$$

где P_{rf} – СВЧ мощность генератора, η – коэффициент передачи СВЧ мощности рабочему телу, $P_{refl} = \gamma_{eff} P_3 = \gamma_{eff} \sigma ST^4$ – мощность, отраженная от стенок резонатора и поглощенная телом. Тогда из общего баланса мощности (5) получим уравнение, описывающее зависимость температуры нагреваемого тела от времени:

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \eta P_{rf} - (1 - \gamma_{eff}) \sigma ST^4. \quad (7)$$

Полагая P_{rf}, c_p, η постоянными, запишем решение (7):

$$t = \frac{mc_p}{(1 - \gamma_{eff}) \sigma S} \times \frac{F(T) - F(T_0)}{2T_{max}^3}. \quad (8)$$

$$F(T) = \left\{ \arctg \frac{T}{T_{max}} + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{T + T_{max}}{T - T_{max}} \right| \right\},$$

где T_0 – начальная температура. Характерной особенностью решения (8) является наличие предельной температуры T_{max} , которая определяется выражением

$$T_{max} = \sqrt[4]{\frac{\eta P_{rf}}{(1 - \gamma_{eff}) \sigma S}}. \quad (9)$$

При температуре T_{max} вся мощность P_{rf} уходит на нагрев стенок резонатора. Предельная температура определяется формой и размерами нагреваемого тела. Для достижения максимальной величины T_{max} при заданных P_{rf} и η



Рис. 2. Структура керамики на основе оксида алюминия, полученная обжигом в СВЧ поле в течение 20 мин.

необходимо минимизировать $A = (1 - \gamma_{eff}) S$. На начальной стадии нагрева температурная зависимость (8) практически линейна и пропорциональна массе и удельной теплоемкости тела.

Таким образом, при расчете процесса нагрева материала СВЧ полем необходимо учитывать не только электрические параметры падающего излучения, но и тепловые условия. На начальной стадии нагрева требуется учет кондуктивного переноса тепла за счет теплопроводности. В целом задача становится

ся существенно сложнее и требует машинных расчетов [1–5]. Экспериментально при обжиге керамических материалов образуется мелкозернистая структура (рис. 2), которая подтверждает вывод о том, что одновременный нагрев материала по всему объему приводит к качественно другой структуре материала [6].

Пондеромоторное воздействие. Пондеромоторное (нетепловое) воздействие [6] связано с тем, что вблизи частиц, составляющих вещество при данной температуре, происходит существенное изменение конфигурации поля вблизи частицы. На рис. 3 представлен вид эквипотенциальных кривых в зависимости от диэлектрических проницаемостей частицы и окружающего вещества [7].

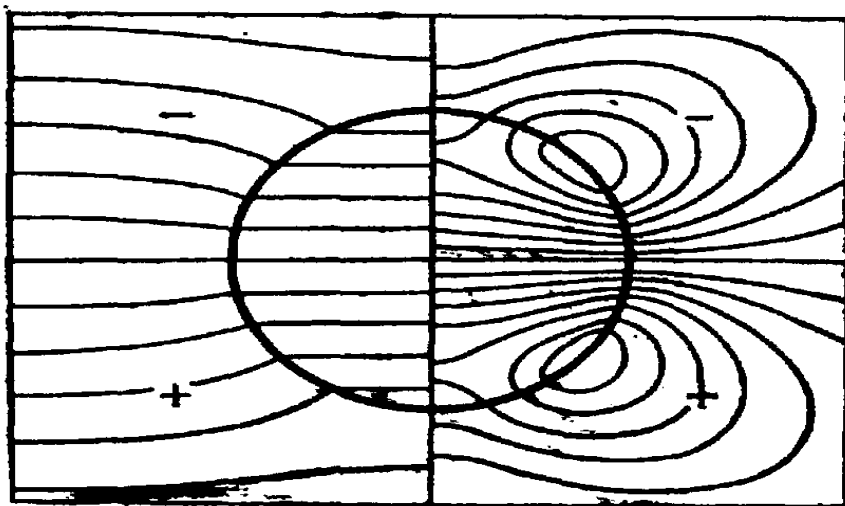


Рис. 3. Распределение эквипотенциальных поверхностей вблизи частицы сферической формы в случае, когда диэлектрическая проницаемость среды больше, чем частицы (в левой части рисунка линейный случай).

Особенностью нетеплового воздействия концентрированных высокочастотных полей является использование частотной зависимости (дисперсии) электрических свойств веществ [8]. Так, коэффициент поглощения высокочастотного поля водой имеет максимум в районе 20–100 МГц, что позволяет селективно обезвоживать продукты. При использовании наведенного высокочастотным полем электрострикционного момента возможно создание больших механических напряжений в замороженной воде за счет пондеромоторных сил. Такой эффект используется при холодной дефростации замороженной рыбы, птицы, овощей и фруктов. Самым известным способом обработки пищевых веществ является сушка. В отличие от традиционной конвективной, сушка в переменных полях обладает рядом особенностей и преимуществ. Так, при высокочастотной сушке за счет нагрева всего объема образца развиваются повышенные давления внутри образца. Поэтому, как правило, высокочастотную сушку применяют вместе с конвекционной (обдув воздушными потоками), что приводит к увеличению съема влаги с поверхности и сохранению качества продукта. Использование высокочастотных полей различной частоты позволяет проводить сушку селективно, т.е. удалять последовательно свободную и связанную влагу. В свою очередь такое воздействие приводит к увеличению удельного содержания питательных веществ и значительному сокращению времени сушки. Процесс сушки во многом определяется зависимостью фактора потерь $\varepsilon \operatorname{tg} \delta$ от частоты для различных материалов. При этом, в

продукта также заряжается. Это, в свою очередь, приводит к направленному потоку копильных компонент дыма к соответствующим местам на поверхности продукта, приводящим к улучшению питательных свойств продукта. При электрофлотации происходит образование кислорода и водорода на поверхности частиц. Пузырьки газов увлекают частицы и происходит селективное разделение фракций. Следует отметить, что, подбирая параметры электромагнитного поля, удастся произвести разделение фракций, недостижимое при обычном способе флотации. Такой метод особенно существенен при очистке сточных вод. Так, при использовании метода электрофлотации удается извлечь до 90–95% жира из сточных вод мясокомбинатов.

Селективность действия концентрированных электромагнитных полей на пищевые продукты используется для пастеризации и стерилизации пищевых продуктов [10]. При этом следует отметить, что, как правило, стерилизация и пастеризация продуктов происходят одновременно с другими видами обработки. Так, при дефростации замороженных куриных окороков происходит уменьшение количества микрофлоры на поверхности окорока в 2–4 раза.

Особенно актуальной такая проблема является для переработки морепродуктов [11–12]. Как известно, Беларусь закупает порядка 100 тыс. тонн морепродуктов, которые поступают на разделку и переработку в замороженном виде. Существующие способы переработки приводят к тепловому воздействию на продукт (размораживание), что резко сокращает срок годности. Использование ВЧ поля позволяет разделить замороженный блок продуктов на составные части, не подвергая его разморозке. Тем самым решаются одновременно две задачи: получение полуфабриката без уменьшения сроков хранения и существенная экономия тепловой энергии, достигающая величины 1,5 кВт/час на кг продукта.

Другой немаловажной задачей является сушка и предпосевная обработка семян зерновых культур [10]. Для решения этой задачи разработан метод СВЧ стимуляции традиционной конвекционной тепловой сушки зерна, применяемый к многопроходным технологиям, используемым в обоих основных типах существующего зерносушильного оборудования. Суть этого метода сводится к тому, что относительно небольшими дозами микроволновой энергии (составляющими всего 1–1,5% от используемой в техпроцессе сушки зерна энергии сгорания топлива) в объеме подвергаемых сушке объектов создается температурный градиент, противоположный по направлению температурному градиенту, возникающему в процессе поверхностной тепловой сушки. Экспериментальная проверка этого метода показала возможность экономии за счет него ~ 30–35% топлива на единицу испаренной влаги и обезвоживаемой продукции.

СВЧ обработка семян предлагается как один из способов повышения качественных характеристик сельскохозяйственных культур и, в конечном счете, повышения урожайности. Преимуществами СВЧ обработки являются экономичность и простота. Так, на обработку 1 т зерна затрачивается около 200 кДж электроэнергии. Но главное достоинство СВЧ обработки заключается в возможности улучшения показателей роста и развития за счет мобилизации внутренних резервов самих семян, без химической обработки или методов генной инженерии. После обработки семян в режиме биостимуляции с помощью биохимических анализов установлено, что в них происходит заметная стимуляция синтеза белка и активности фермента кислая фосфатаза.

ЛИТЕРАТУРА

1. , СВЧ–энергетика. Теория и практика / А.Н. Диденко. – М.: Наука, 2003. – 446 с.
2. Лазерная термохимия / Н.В. Карлов, Н.А. Кириченко, Б.С. Лукьянчук. – М.: Наука, 1992. – 295 с.
3. , Термодинамическая модель синтеза BaTiO₃ в высокочастотном поле / Ю.И. Бохан // Докл. АН БССР. – 1992. – Т. 36, № 5. – С. 422–425.
4. **Bokhan, Yu.I.** Ceramic materials fabricated by microwave synthesis and sintering / Yu.I. Bokhan [and other] // 3rd ISTC Korea Workshop on Material Science (June 27 – July 2, 2004, Chang-Won, Korea). Reports. – P. 83–94.
5. , Нелинейные эффекты при нагреве сред электромагнитным излучением / И.Л. Хабибуллин // ИФЖ. – 2000. – Т. 73, № 4. – С. 832–838.
6. **Вуков, Ю.В.** High-temperature microwave processing of materials / Yu.V. Vukov, K.I. Rybakov, V.E. Semenov // J. Phys D: Appl. Phys. 34. (2000) R55-R75.
7. Электростатические задачи в нелинейных средах / П. Бритто, К. Гроссе, К. Халлой // Сб.: Физика за рубежом. Б. – 1988. – С. 24–32.
8. , Электрофизические методы обработки пищевых продуктов / И.А. Рогов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272 с.
9. , Дезинсекция и биостимуляция семян в СВЧ электромагнитном поле / Л.Г. Калинин // Вопросы радиоэлектроники. – 1993. – № 3. – С. 4.
10. , Термообработка пищевых продуктов с применением СВЧ энергии / В.Н. Удалов [и др.] // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. – 1985. – Вып. 9(1124).
11. , Использование высокочастотных полей для обработки пищевых продуктов / Ю.И. Бохан, Н.И. Бохан, Е.Ф. Турцевич // Современные технологии и комплексы технических средств в сельскохозяйственном производстве: матер. межд. конф. – Минск, 2005. – С. 33–35.
12. , Методы обработки пищевых продуктов потоками электромагнитной энергии / Ю.И. Бохан, М.Н. Сарасеко // Современные технологии и комплексы технических средств в сельскохозяйственном производстве: матер. межд. конф. – Минск, 2005. – С. 57–58.

S U M M A R Y

In the work the brief review of technological application of the MICROWAVE fields for processing materials is presented. Scopes are divided on temperatures of processing from -30 up to +1500°C. Possible methods and ways of processing of organic substances, ceramic materials are analyzed. Physical mechanisms of influence of the MICROWAVE fields on various materials are considered.

Поступила в редакцию 14.11.2006