

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СВЧ-НАГРЕВА

Развитие мощных магнетронов и научные исследования воздействия микроволновой энергии на различные материалы открыли широкие перспективы для промышленного применения СВЧ-техники и технологии. Еще недавно микроволновый нагрев не слишком привлекал российских инвесторов. Однако стремительный рост энергозатрат, стоимости энергии, ужесточение требований к охране окружающей среды постепенно изменяют ситуацию.

Можно выделить основные области применения СВЧ-нагрева – пищевая, резинотехническая и текстильная отрасли промышленности. Здесь важную роль играют такие характеристики, как КПД процесса, возможность автоматизации и высокое качество продукта. Имеются перспективы внедрения СВЧ-нагрева и сушки в фармацевтическую промышленность, обработку древесины и сельское хозяйство. Расширяется применение технологии быстрого нагрева в столовых, больницах, школах и т.п., массовое использование микроволновых печей в быту уже хорошо известно нашим читателям.

Эффект микроволнового нагрева основан на поглощении электромагнитной энергии в диэлектриках. Поля СВЧ проникают на значительную глубину, которая зависит от свойств материалов. Взаимодействуя с веществом на атомном и молекулярном уровне, эти поля влияют на движение электронов, что приводит к преобразованию СВЧ-энергии в тепло.

СВЧ-энергия – очень удобный источник тепла, обладающий в ряде применений несомненными преимуществами перед другими источниками. Он не вносит загрязнений при нагреве, при его использовании отсутствуют какие-либо продукты сгорания. Кроме того, легкость, с которой СВЧ-энергия преобразуется в тепло, позволяет получить очень высокие скорости нагрева, при этом в материале не возникает разрушающих термомеханических напряжений. Генераторное оборудование полностью электронное и работает практически безинерционно, благодаря чему уровень мощности СВЧ и момент ее подачи можно мгновенно изменять. Сочетание СВЧ-нагрева с другими методами нагрева (паром, горячим воздухом, ИК-излучением и др.) дает возможность конс-

О.Морозов, А.Каргин, к.т.н.,
Г.Савенко, В.Требух, И.Воробьев
magratep@mail.ru

труировать оборудование для выполнения различных функций, т.е. СВЧ-нагрев – позволяет создавать новые технологические процессы, увеличивать их производительность и повышать качество продукции.

Для правильной оценки применимости СВЧ-энергии в специальных процессах требуется детальное знание свойств материала на различных частотах и на всех стадиях процесса. Поглощенная мощность и глубина, на которую эта мощность проникает, определяется тремя факторами: диэлектрической проницаемостью, частотой и геометрией СВЧ-системы.

Диэлектрическая проницаемость материалов с потерями – это комплексная величина:

$$\epsilon_k = \epsilon_0 (\epsilon - j\epsilon_1) = \epsilon_0 \epsilon (1 - j \cdot \operatorname{tg} \delta),$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость, $\operatorname{tg} \delta = \epsilon_1 / \epsilon$ – коэффициент диэлектрических потерь материала, или тангенс угла потерь.

Под глубиной проникновения в СВЧ-энергетике понимают расстояние d , на котором плотность мощности уменьшается до 37% от значения на поверхности, т.е. другими словами, 63% начальной энергии электромагнитной волны поглощается в материале и превращается в тепло. При малой величине $\operatorname{tg} \delta$ глубина проникновения определяется простым выражением [1]:

$$d = \frac{15}{\pi \cdot f \sqrt{\epsilon} \cdot \operatorname{tg} \delta},$$

где d – глубина проникновения, см; f – частота, ГГц.

Мощность, поглощенная в единице объема, составит:

$$E = 2,87 \cdot 10^{-4} \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f^2, \text{ Вт/см}^3$$

где E – напряженность электрического поля, В/см; f – частота, ГГц.

Расчетные значения глубины проникновения СВЧ-энергии в продукты питания на широко используемой частоте 2,45 ГГц приведены в табл.1. Если $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается с температурой, то процесс нагрева стабилен (поглощение СВЧ-энергии падает с температурой). Такое автоматическое ограничение температуры происходит при нагреве диэлектриков, в которых потери обусловлены содержанием воды с ее особенной зависимостью диэлектрических свойств от температуры.

Таблица 1. Глубина проникновения СВЧ-энергии (2,45 ГГц) в продукты питания

Продукт	°С	ε	$\operatorname{tg} \delta$	d, см
Говядина сырая	-15	5,0	0,15	5,8
Говядина жареная	23	28,0	0,2	1,8
Горох вареный	23	9,0	0,5	1,3
Свинина	-15	6,8	1,2	0,7
Картофель вареный	-15	4,5	0,2	4,6
	23	38	0,3	1,1
Шпинат вареный	-15	13,0	0,5	1,1
	23	34	0,8	0,4
Каша	-15	5,0	0,3	2,9

Таблица 2. Характеристики некоторых отечественных и зарубежных промышленных магнетронов

Тип магнетрона	Фирма	Частота, МГц	$P_{\text{вых}}$, кВт	U_a , кВ	КПД, %
M-116-50	Marpaten	915	50	13	75
M-116-100	Marpaten	915	100	19,5	85
M-137	Marpaten	433	50	13	75
M-168	Marpaten	2450	5	5	63
M-172	Marpaten	2450	2	5	70
YJ1600	Philips	2460	5	7,2	72
CWM-30S	California Tube Lab.	2450	30	16,5	67
NL915-50	Richardson Electronics	915	50	15	83

Нагрев инфракрасными или световыми источниками работает, в сравнении с микроволнами, на более высоких (примерно на 2–3 порядка) частотах. Соответственно, уменьшается глубина проникновения, и нагревается только поверхность обрабатываемого объекта. Остальной объем получает тепло лишь за счет более медленного процесса теплопроводности. Это может привести к термомеханическим перенапряжениям и потере качества материала. Там, где затраты времени играют важную роль (варка, сушка или разогрев), микроволны имеют решающее преимущество перед тепловым излучением. Например, при приготовлении овощей или фруктов, СВЧ-нагрев помогает сохранить свежий вид и вкус, а содержание витаминов уменьшается незначительно.

Экономически эффективен СВЧ-нагрев при сушке твердых пород дерева, так как подъем температуры со скоростью до 1000°С/с можно реализовать при напряженности поля 5 кВ/см.

По сравнению с инфракрасным нагревом применение микроволн имеет большое преимущество – почти мгновенные включение и выключение, а также точное регулирование температуры. Высокая плотность мощности и лучшая фокусировка приводит к большой экономии энергии. Бесполезное излучение и необходимость сопутствующего охлаждения окружающих деталей исключаются.

Интеграция электронного микроволнового генератора в автоматическую производственную линию достаточно проста благодаря приемлемой стоимости, экономичности и компактности. Также возможна комбинация с другими видами обработки. Например, при обработке тушек домашней птицы одновременно используются микроволны и пропаривание.

Разумеется, для конкретного применения необходимо точно оценивать такие факторы, как качество продукта, скорость обработки, требуемые площади, стоимость энергии и объем инвестиций, чтобы выяснить, будет ли микроволновый нагрев иметь преимущества перед традиционными методами.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ МАГНЕТРОНЫ

В качестве генераторов большой мощности используются магнетроны и клистроны. Благодаря более высокому КПД при мощности ниже 50 кВт доминируют магнетроны. Чаще всего применяются две частоты – 915 и 2450 МГц. Так как частота 915 МГц может использоваться не во всех случаях, то оптимальной в международной практике обычно считается частота 2450 МГц. Табл.2 дает представление о современных российских магнетронах, выпускаемых ЗАО "НПП "Магратен", в сравнении с зарубежными приборами.

Магнетрон M-116-100 (рис.1) используется в установках размораживания рыбы, разупрочнения горных пород и в других случаях, где требуется повышенная глубина проникновения в материал.

Единственный в мире магнетрон мощностью 50 кВт на частоте 433 МГц (рис.2) успешно использовался в экспериментальных установках для разупрочнения грунта в Якутии.



Рис.1. Промышленный магнетрон M-116-100

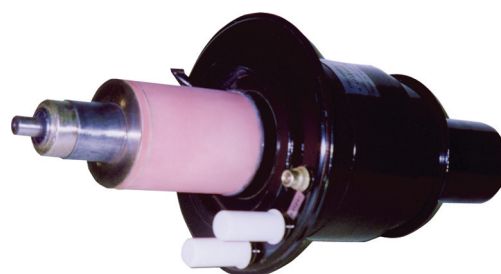


Рис.2. Промышленный магнетрон M-137



Рис.3. Промышленный магнетрон М-168

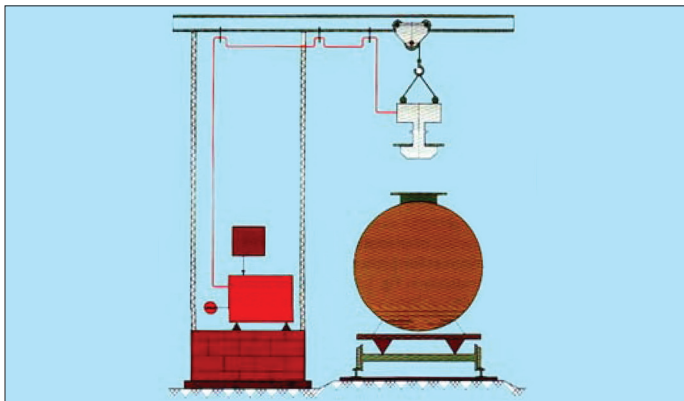


Рис.4. Схема установки для разогрева нефтепродуктов в ж/д цистернах (предприятие "Элвис", г. Н. Новгород). СВЧ-генератор опускается сверху

Столь низкая рабочая частота обеспечивает требуемую глубину проникновения микроволн в промерзшие породы.

Магнетрон М-168 мощностью 5 кВт (рис.3) широко применяется в установках для обрезаживания тросов, вулканизации резиновых деталей, полимеризации пластика.

УСТАНОВКИ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

Процессы нагрева СВЧ-энергией делят на две группы: непрерывные процессы и обработка партиями. При непрерывных процессах, например, на конвейере, "сырой" материал непрерывно проходит через зону обработки, при этом нагрузка на выводе СВЧ-генератора практически не изменяется. При обработке партиями нагреваемый материал находится в зоне обработки до достижения требуемой температуры, поэтому с изменением температуры значительно меняются диэлектрическая проницаемость и коэффициент потерь. Это приводит к изменению нагрузки (причем в широких пределах), на которую должен работать СВЧ-генератор. Даже в отработанных экономичных установках КСВН нагрузка может превышать величину 4. В данном случае отдается предпочтение магнетронам из-за их способности работать на нагрузку с высоким КСВН.

Можно отметить другие принципиальные особенности СВЧ-нагрева. Изделия обрабатываются в закрытом объеме

резонатора, поэтому энергия СВЧ используется максимально. Однако данное решение накладывает ограничение на производственный цикл – обработка должна производиться партиями. Интересный пример такого способа – удаление загустевших нефтепродуктов из железнодорожных цистерн путем СВЧ-подогрева внутренней полости (рис.4).

Для СВЧ-обработки поток зерна пропускается через круглый волновод (рис.5). Четвертьволновый отрезок на верхнем входном конце при заполнении зерном подавляет паразитное излучение до безопасного уровня.

Новая технология высокоинтенсивной тепловой обработки заключается в нагреве зерна комбинированным способом: сначала конвективным – до температуры 95оС и далее



Рис.5. Установка СВЧ-обработки зерна (ВНИИМЭСХ, г. Зеленоград)

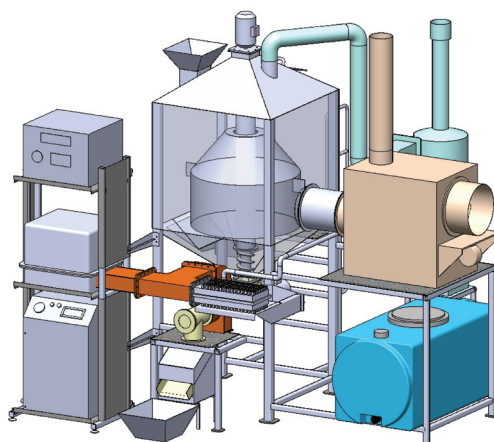


Рис.6. Установка высокоинтенсивной тепловой обработки зерновых продуктов "Декстрин-2" (проект)

– в электромагнитном СВЧ-поле до температуры 120–150°C (рис.6). При быстром нагреве зерна "изнутри" происходит закипание капиллярной влаги, нарастание парциального давления водяных паров и разрыв оболочек крахмала. При этом трудно перевариваемый крахмал расщепляется на декстрины – легко усваиваемые формы. При такой обработке зерна, содержащего около 40% крахмала, его питательная ценность повышается на 20–30% и улучшаются вкусовые качества.

Другими перспективными СВЧ-технологиями является сушка, дезинсекция и обеззараживание зерна, тепловая стимуляция зерна при предпосевной обработке, улучшение хлебопекарных качеств и ряд других. Возможны пастеризация и стерилизация жидких пищевых продуктов с использованием СВЧ-энергии. Эти методы отличает высокая производительность процесса и компактность установок. Кроме всего прочего, установки СВЧ-обработки материалов имеют возможность точного поддержания технологических режимов, что позволяет получать продукты высокого качества, например, при сушке лекарственных трав (рис.7).

В ряде случаев приходится иметь дело с такими крупногабаритными объектами, что нельзя применить резонаторы или конвейерную обработку. Тогда, например, пакет деревянного бруса для сушки загружается в бокс, внутри которого обрабатывается СВЧ-энергией с помощью системы специальных волноводно-щелевых излучателей (рис.8).

Излучающие системы особенно пригодны для нагрева тонких пленок или СВЧ гипертермии злокачественных новообразований.

Сущность метода заключается в разогреве опухоли с помощью электромагнитного излучения до уровня температур 42–44°C. Преимущества СВЧ-гипертермии состоят в том, что зона воздействия разогревается изнутри, прогрев тканей при этом равномерный, без повреждения кожных покровов.

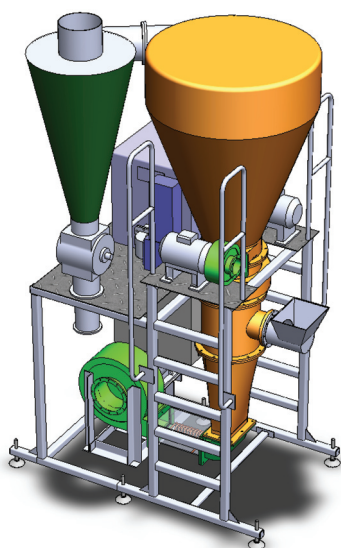


Рис.7. Установка сушки лекарственных трав "Юниор" (проект)



Рис.8. Установка сушки деревянного бруса (ООО "МолЛес", г. Кострома)

Современная установка для локальной СВЧ-гипертермии "Яхта-3" (ФГУП "НПП "Исток", г. Фрязино) [2] позволяет создавать и длительно поддерживать зону гипертермии в опухоли практически любой конфигурации с минимальным воздействием на окружающие органы и ткани. СВЧ-гипертермия используется как в самостоятельном виде, так и в качестве средства, усиливающего эффект химио- и лучевой терапии.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ

Стремление сэкономить на внедрении нового оборудования нередко создает опасность для обслуживающего персонала, особенно если СВЧ-установки эксплуатируются ненадлежащим образом.

Во-первых, существует паразитное излучение, которое особенно опасно для глаз. В настоящее время российский стандарт устанавливает допустимую плотность СВЧ-мощности на рабочих местах персонала не более 25 мкВт/см². Защитная дверца и водяная поглощающая нагрузка гарантируют полное экранирование при правильном производственном обслуживании. При поточном производстве для входа и выхода продукции конструируют специальные уплотняющие устройства защиты.

Во-вторых, опасность представляют высокие питающие напряжения 5–20 кВ не только из-за возможности поражения электрическим током, но и из-за неполного подавления рентгеновского излучения. Тщательное обслуживание и регулярный контроль персонала обеспечивают достаточную защиту.

Как правило, на рынке предлагаются микроволновые установки с полным "пакетом безопасности", в которых с помощью сенсоров производится контроль и при необходимости отключение оборудования.

В заключение следует отметить, что СВЧ-энергия уже широко применяется в промышленности развитых стран. Авторы надеются, что эти технологии получат достойное развитие и в России. Для этого имеется научно-технический потенциал

и наработки отечественных энтузиастов СВЧ-нагрева. Предприятие ЗАО "НПП "Магратеп" готово обеспечить любые потребности в мощных магнетронах и оказать необходимую поддержку при внедрении СВЧ-технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. СВЧ-энергетика. / Пер. с англ., под ред. Шлиффера Э.Д., т. 2. – М.: Мир, 1971.
2. "ИР", 2008, №12; www.hyperthermia.ru