

УДК 621.365.5

УСТАНОВКИ СВЧ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАГРЕВА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

А.В. Федоров

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Рассматриваются вопросы применения генераторов, перестраиваемых по частоте, в установках СВЧ диэлектрического нагрева. Приведены классификация рабочих камер установок СВЧ диэлектрического нагрева и результаты расчетов параметров рабочих камер с бегущей волной и камер лучевого типа в одночастотном и широкополосном режимах. Показано, что изменением частоты СВЧ-генератора в процессе нагрева диэлектрика в камере с бегущей волной, построенной на нерегулярном отрезке прямоугольного волновода, достигается лучшее, чем в одночастотном режиме, согласование СВЧ-генератора с рабочей камерой на всем протяжении нагрева, а в камере лучевого типа с рупорным излучателем удается зафиксировать глубину проникновения электромагнитной волны в диэлектрик на постоянном уровне.

Ключевые слова: камера с бегущей волной, камера лучевого типа, установка СВЧ диэлектрического нагрева, длина волны, относительная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, одночастотный режим, широкополосный режим, глубина проникновения электромагнитной волны.

Исследования и разработки в области нагрева диэлектрических сред, материалов и изделий в сверхвысокочастотном электромагнитном поле (СВЧ диэлектрический нагрев) начались в середине пятидесятых годов XX века. От нагрева конвекцией, теплопроводностью и тепловым излучением этот способ нагрева отличает объемное тепловыделение и, как следствие, ускорение процесса термообработки и большая равномерность нагрева обрабатываемого диэлектрика по объему. СВЧ диэлектрический нагрев широко используется для термообработки пищевых продуктов (СВЧ или микроволновые печи) [1, 2], а также во многих других технологических процессах, таких как нагрев, сушка, дефростация, пастеризация, стерилизация, упрочнение, разрушение, вулканизация и иная модификация полимеров [3, 4].

Структурная схема установки СВЧ диэлектрического нагрева (У СВЧ ДН) приведена на рис. 1. Основными элементами У СВЧ ДН являются рабочая камера, где происходит технологический процесс, и источник СВЧ-энергии, традиционно работающий на одной из частот, установленных для технологических установок.

Рабочие камеры подразделяются на камеры с бегущей волной (КБВ), со стоячей волной (КСВ) и камеры лучевого типа (КЛТ) [5].

Существенным недостатком термообработки диэлектриков энергией СВЧ электромагнитных колебаний является неравномерность распределения теплоты в диэлектрике в процессе нагрева. Это происходит в связи с зависимостью диэлектрических параметров (относительной диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$) обрабатываемого объекта от температуры [5].

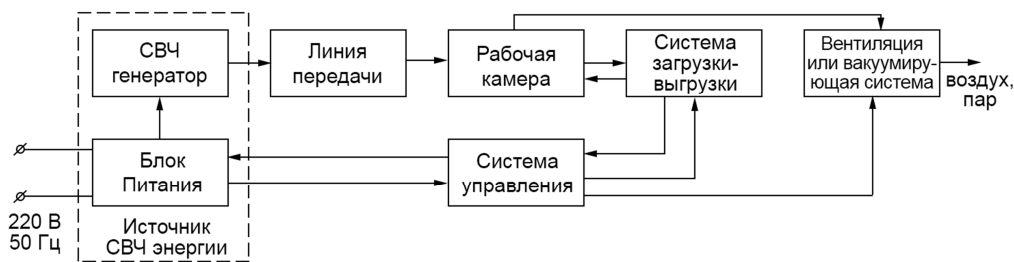


Рис. 1. Структурная схема У СВЧ ДН

У нагреваемого объекта $\varepsilon'(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ при проектировании У СВЧ ДН на КБВ (рис. 2а, б) профиль неоднородного волновода, обеспечивающий равномерный нагрев и согласование КБВ с СВЧ генератором, обычно рассчитывается на средние значения ε' и $\operatorname{tg} \delta$ в рабочем диапазоне температур [6]. При изменении этих параметров в процессе нагрева происходит рассогласование рабочей камеры с СВЧ-генератором, отчего снижается энергетическая эффективность, возникает неравномерность нагрева. КБВ рассчитывают для конкретного обрабатываемого диэлектрика, что делает их неуниверсальными, но КБВ обладают наибольшим КПД и наилучшей равномерностью термообработки в сравнении с другими типами рабочих камер.

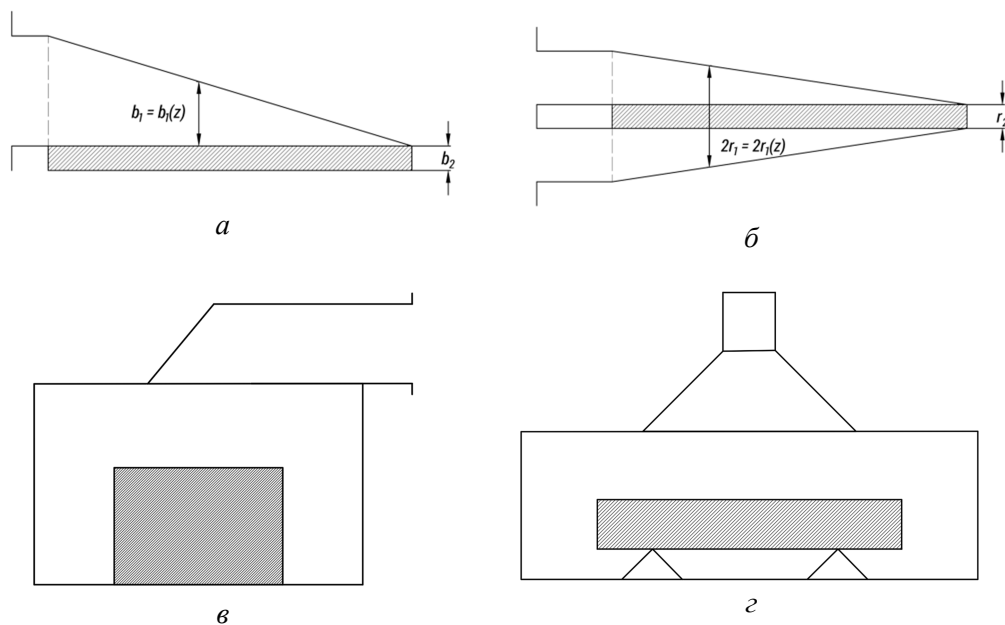


Рис. 2. Рабочие камеры У СВЧ ДН:

а – КБВ на прямоугольном волноводе; б – КБВ на круглом волноводе;
в – КСВ на прямоугольном резонаторе; г – КЛТ с излучающим рупором

КСВ представляет собой обычно прямоугольный резонатор, работающий в режиме стоячей волны. Из-за этого неравномерность нагрева в КСВ значительно больше, чем в КБВ. В определенной степени ситуацию спасает применение в КСВ металлического диссектора или диэлектрического поддона с $\operatorname{tg} \delta = 0$, вращающихся от отдельных электроприводов, но в КСВ можно обрабатывать

диэлектрики разной формы, с разными ε' и $\operatorname{tg} \delta$, а потому У СВЧ ДН на КСВ получили широкое распространение (бытовые СВЧ или микроволновые печи). Разумеется, зависимости $\varepsilon'(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ обрабатываемого диэлектрика в процессе нагрева влияют на равномерность поглощения диэлектриком энергии СВЧ электромагнитного поля, но это не меняет общей картины термообработки в таких рабочих камерах.

В У СВЧ ДН на КЛТ (рис. 2з) изменение ε' и $\operatorname{tg} \delta$ обрабатываемого диэлектрика в процессе нагрева приводит к изменению глубины проникновения электромагнитной волны в обрабатываемый диэлектрик:

$$\partial_E = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}},$$

где λ – длина волны СВЧ-генератора.

Изменяется и КПД по использованию СВЧ энергии:

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2, \quad (1)$$

где $\Gamma = \Gamma(\varepsilon', \operatorname{tg} \delta, \lambda)$ – коэффициент отражения от поверхности обрабатываемого диэлектрика.

Улучшить равномерность нагрева в КБВ и КЛТ, повысить КПД по использованию СВЧ-энергии в У СВЧ ДН можно, перестраивая частоту СВЧ-генератора У СВЧ ДН синхронно с изменением диэлектрических параметров обрабатываемого диэлектрика в процессе нагрева. Как правило, в У СВЧ ДН в качестве генераторов используются магнетроны. Эти электровакуумные приборы работают на фиксированной частоте. Для перестройки частоты СВЧ-генератора вместо магнетрона можно использовать широкополосные СВЧ-генераторы высокой мощности (ЛБВ-генератор, ЛОВ, полупроводниковые приборы).

Рассмотрим имеющиеся здесь возможности.

Для примера в качестве обрабатываемого диэлектрика выберем один из пищевых продуктов – филе трески. Зависимости $\varepsilon'(T)$ и $\operatorname{tg} \delta(T)$ этого продукта приведены в работе [7] и показаны на рис. 3.

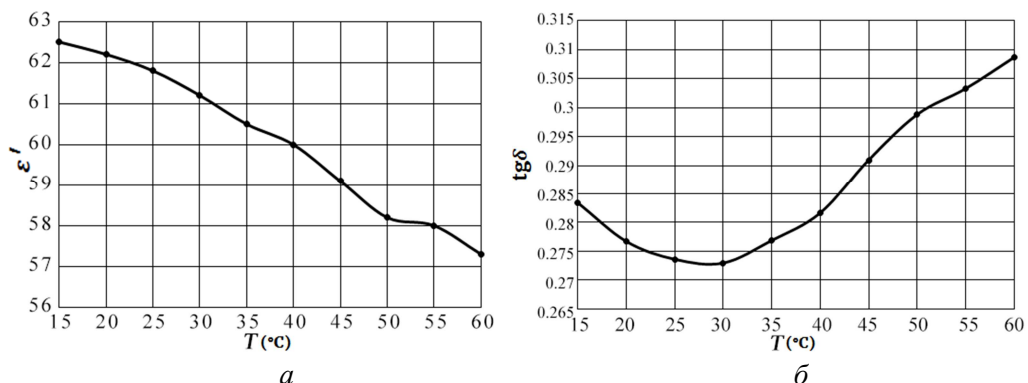


Рис. 3. Зависимости диэлектрических параметров филе трески от температуры (влажность 81,2 %):
а – $\varepsilon'(T)$; б – $\operatorname{tg} \delta(T)$

Пусть КБВ представляет собой отрезок нерегулярного прямоугольного волновода сечением на входе $4,5 \times 9$ см со слоем обрабатываемого диэлектрика на 108

широкой стенке. Расчет такой КБВ с применением теории цепей приведен в работе [8]. КПД по использованию СВЧ-энергии такой рабочей камеры определяется соотношением (1), в котором

$$|\Gamma| = \left| \frac{Z_{in}(T) - Z_{00}}{Z_{in}(T) + Z_{00}} \right|. \quad (2)$$

Здесь $Z_{in}(T)$ – входное сопротивление КБВ, Z_{00} – волновое сопротивление линии передачи (прямоугольного волновода), соединяющей СВЧ-генератор с КБВ, причем

$$Z_{00} = \frac{60\pi^2 b}{a \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}}, \quad (3)$$

$$Z_{in}(z) = \int_0^z [R_p(T) + jX_p(T)] dz + j\beta \int_0^z \left(\frac{Z_0^2(z) - [R_p(T)z]^2}{Z_0(z)} \right) dz, \quad (4)$$

где a – величина широкой стенки волновода;

b – величина узкой стенки волновода;

$Z_0(z)$ – волновое сопротивление прямоугольного волновода КБВ со слоем обрабатываемого диэлектрика в сечении z , отсчитываемом от короткого замыкания КБВ;

$R_p(T)$, $X_p(T)$ – погонные сопротивления эквивалентной схемы КБВ, рассчитываемые на среднюю температуру нагрева T_{cp} [8].

Для полного согласования рабочей камеры с линией передачи необходимо, чтобы

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z_{in}(l) &= Z_{00}, \\ \operatorname{Im} Z_{in}(l) &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Условия (5) выполняются при

$$Z_0(z) = -\frac{\Lambda}{4\pi} X_{pr} + \sqrt{\left(\frac{\Lambda}{4\pi} X_{pr}\right)^2 + (R_{pr}z)^2},$$

где R_{pr} , X_{pr} – значения погонных сопротивлений эквивалентной схемы КБВ при температуре, на которую рассчитывается профиль рабочей камеры;

$\Lambda = \lambda / \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ – длина волны в волноводе.

При проектировании У СВЧ ДН часто характеризуют КПД по использованию СВЧ-энергии и неравномерность нагрева одним показателем – коэффициентом стоячей волны по напряжению K_{stU} : чем больше K_{stU} , тем меньше КПД η и тем больше неравномерность нагрева. На рис. 4 показаны зависимости K_{stU} КБВ, работающей в одночастотном режиме и с изменяемой в процессе нагрева частотой СВЧ-генератора.

Профиль прямоугольного волновода КБВ, работающей в одночастотном режиме, рассчитывается по соотношению (4) для средних в рабочем диапазоне частот значений ε' и $\operatorname{tg} \delta$ фила трески, так что в этом случае рабочая камера в середине температурного диапазона имеет меньший K_{stU} , чем в начале и конце технологического процесса.

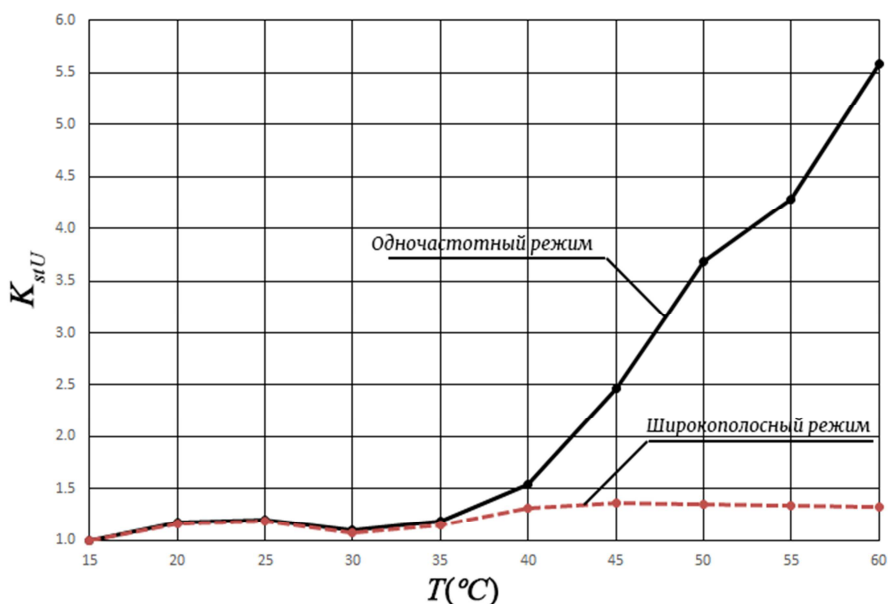


Рис. 4. Зависимость $K_{stU}(T)$ КБВ при нагреве фила трески:
 1 – одночастотный режим ($f = 2450$ МГц); 2 – широкополосный режим ($b_2 = 9,2$ мм)

Расчет профиля волновода КБВ, работающей в широкополосном режиме, проводится для ϵ' и $\text{tg } \delta$, соответствующих начальной температуре фила трески, так что наилучшее согласование КБВ с генератором наблюдается в начале технологического процесса (рис. 4). Затем для каждого следующего значения температуры обрабатываемого диэлектрика T_n определяется оптимальное значение λ генератора, при котором с учетом изменения значений R_p и X_p из-за изменения ϵ' и $\text{tg } \delta$ фила трески K_{stU} минимально возможно. Согласно рис. 4, изменяя $\lambda(T)$, обеспечить $K_{stU} = 1$ не удастся, так как длина рабочей зоны КБВ задана конструкцией рабочей камеры, а Z_{00} согласно соотношению (3) изменяется с изменением длины волны λ . Вместе с тем рис. 4 свидетельствует, что в широкополосном режиме параметры КБВ значительно лучше, чем в одночастотном.

Говоря о широкополосном режиме работы КБВ на прямоугольном волноводе, важно отметить, что изменение длины волны генератора ограничено частотным диапазоном волновода, подводящего СВЧ-мощность к рабочей камере на волне H_{10} : длина волны должна находиться в диапазоне $a < \lambda < 2a$, где a – размер широкой стенки волновода. Рассчитанная зависимость длины волны СВЧ-генератора от температуры обрабатываемого диэлектрика для КБВ с параметрами, показанными на рис. 4, приведена на рис. 5.

Широкополосный генератор нельзя рекомендовать к применению в У СВЧ ДН на КСВ (рис. 2б), так как резонаторы таких рабочих камер рассчитываются на определенную (резонансную) частоту СВЧ-генератора.

Широкополосный режим можно рекомендовать в У СВЧ ДН на КЛТ (рис. 2г). Изменяя синхронно с изменением $\epsilon'(T)$ и $\text{tg } \delta(T)$ длину волны СВЧ-генератора, можно, например, обеспечить постоянство глубины проникновения электромагнитной волны вглубь диэлектрика. Действительно, если плоская СВЧ электромагнитная волна падает перпендикулярно на поверхность плоского ди-

электрика, то прошедшая в диэлектрик СВЧ мощность P_0 поглощается обрабатываемым диэлектриком неравномерно, так как

$$P(z, \tau) = P_0 \exp \left\{ -2 \int_0^z \alpha [T(z, \tau)] dz \right\}, \quad (6)$$

где τ – время нагрева;

α – коэффициент затухания СВЧ электромагнитной волны в диэлектрике, причем

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}. \quad (7)$$

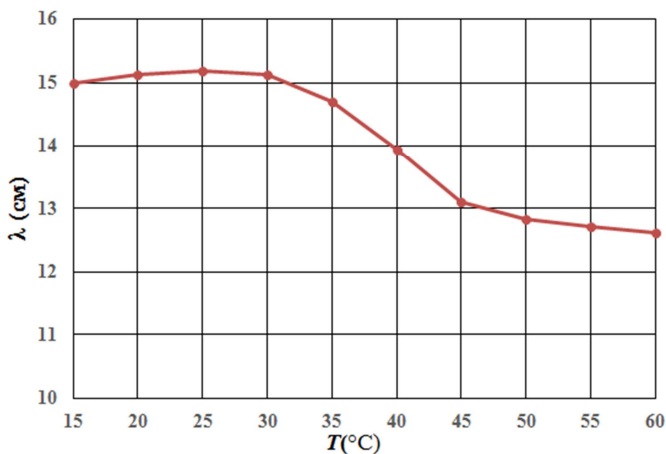


Рис. 5. Зависимость $\lambda(T)$ широкополосного режима работы КБВ при нагреве филе трески

За глубину проникновения СВЧ электромагнитной волны δ_p примем, как обычно [6], толщину слоя обрабатываемого диэлектрика, на которой СВЧ-мощность P уменьшается в e раз ($P(\delta_p) = P_0 e^{-1}$), тогда

$$\delta_p = \frac{0.5\lambda}{\pi \sqrt{2\varepsilon'(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1)}}. \quad (8)$$

Разбив слой диэлектрика δ_p на N тонких слоев толщиной δ_p/N , перепишем соотношение (6) в виде

$$P(n, \tau) = P_0 \exp \left[-\frac{2\pi\delta_p}{\lambda(\tau)N} \sum_{i=1}^n \sqrt{2\varepsilon'_i(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_i} - 1)} \right], \quad (9)$$

где n – номер слоя;

ε'_i и $\operatorname{tg} \delta_i$ – диэлектрические параметры i -того слоя диэлектрика.

Тогда $P(\delta_p) = P_0 e^{-1}$, если

$$\frac{2\pi\delta_p}{\lambda(\tau)N} \sum_{i=1}^N \sqrt{2\varepsilon'_i(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_i} - 1)} = 1, \quad (10)$$

где ε_i' и $\operatorname{tg} \delta_i$ должны быть определены для каждого слоя с учетом температуры T на каждом интервале термообработки τ , причем

$$T_i = T_{i,st} + \frac{\Delta P \tau}{c\rho V}, \quad (11)$$

здесь $T_{i,st}$ – температура i -того слоя диэлектрика в начале рассматриваемого интервала нагрева;

c – удельная теплоемкость диэлектрика;

ρ – плотность нагреваемого диэлектрика;

$V = a_p b_p \delta_p / N$; a_p, b_p – размеры апертуры излучающего рупора.

Результат расчета зависимости $\lambda(\tau)$ по соотношению (10), при котором глубина проникновения в обрабатываемый диэлектрик на всей продолжительности нагрева остается постоянной, приведен на рис. 6а, а зависимости $\delta_p(\tau)$ – на рис. 6б.

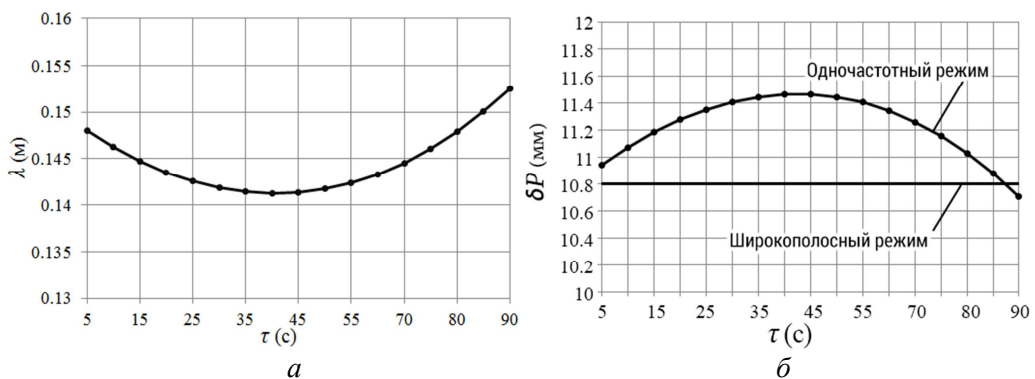


Рис. 6. Характеристики КЛТ:

а – $\lambda(\tau)$ при широкополосном режиме; б – δ_p в одночастотном и широкополосном режимах ($P_0 = 1000$ Вт, обрабатываемый диэлектрик – филе трески)

Для расчета δ_p при одночастотном режиме работы КЛТ соотношение (10) следует записать в виде

$$\frac{2\pi\delta_p}{\lambda N} \sum_{i=1}^N \sqrt{2\varepsilon_i'(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_i} - 1)} = 1, \quad (12)$$

откуда определяется N при заданной длине волны СВЧ генератора λ и толщине слоя l . Тогда $\delta_p = lN$. Результат расчета приведен на рис. 6б.

Приведенные результаты расчетов показывают возможность улучшения параметров У СВЧ ДН применением широкополосных СВЧ-генераторов. Приведенные соотношения могут быть использованы при проектировании широкополосных У СВЧ ДН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рогов И.А., Некрутман С.В. Сверхвысокочастотный и инфракрасный нагрев пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 210 с.
2. Рогов И.А., Некрутман С.В., Лысов Г.В. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 199 с.
3. Толстов В.А., Архангельский Ю.С. Эффективность электротехнологических установок. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2000. – 148 с.

4. СВЧ модификация полимеров / Ю.С. Архангельский, Е.М. Гришина, В.А. Лаврентьев, С.К. Слепцова. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2012. – 288 с.
5. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ электротермии. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
6. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1998. – 408 с.
7. Sipahioglu O., Barringer S.A., Bircan C. The Dielectric Properties of Meats as a Function of Temperature and Composition. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. – 2003. – № 38 (3). P. 161–169.
8. Архангельский Ю.С. Применение теории цепей при синтезе рабочих камер СВЧ электротермических установок и математическом моделировании термообработки в СВЧ электромагнитном поле // Вопросы электротехнологии. – 2015. – № 3(8). – С. 9–15.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2017 г.

INSTALLATION OF MICROWAVE DIELECTRIC HEATING WITH TUNABLE FREQUENCY

A.V. Fedorov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
77, Politechnicheskaya st., Saratov, Russian Federation, 410054

Discusses the use of the generators, tunable in frequency in installations of dielectric heating. The results of calculations of the parameters of the working chambers with a traveling wave and the radiation camera of the type in a single frequency and wide broadband modes. The principle of controlling the frequency of the radiation to compensate for changes in dielectric properties during heating of the dielectric. It is shown that changing the frequency of the microwave generator during the heating of the dielectric in the chamber with a traveling wave is achieved better than in the single frequency mode matching of the microwave generator with the operation of the camera for the duration of the heating and in the chamber of the radial type, it is possible to fix the depth of penetration of electromagnetic wave in the dielectric constant.

Keywords: *chamber with a traveling wave, the ray type cavity, installation of microwave dielectric heating, wavelength, relative dielectric permittivity, tangent of dielectric loss, single frequency mode, wideband mode, the penetration depth of electromagnetic waves.*