

К. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК

Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова
E-mail: badem@rambler.ruДата поступления в редакцию
13.08 2004 г.Оппонент к. т. н. Н. Н. КОБАК
(НТУУ "КПИ", г. Киев)

МИКРОВОЛНОВЫЙ НАГРЕВАТЕЛЬ С КОНВЕКТИВНЫМ ТЕПЛООБМЕНОМ

Обсуждаются особенности построения и расчета технических параметров преобразователя электромагнитной энергии в тепловую в качестве источника потока чистого горячего воздуха.

Технология теплового воздействия на продукцию органического или неорганического происхождения с целью ее сушки, а также технология обогрева больших помещений, как правило, не обходятся без потоков горячего воздуха. В практических приложениях, там, где по технологии обработки требуется высокотемпературный воздушный поток и необходим конструктивно простой, но мощный источник нагрева сухого воздуха, весьма перспективным может оказаться применение оригинального микроволнового нагревателя воздуха [1; 2, с. 379]. Этот экономичный и экологически безопасный преобразователь электромагнитной энергии в тепловую в условиях жестких требований к чистоте воздушного потока мог бы стать альтернативой другим нагревателям — огневым, электрическим, высокочастотным, а также традиционным микроволновым [3], применяемым, например, в цехе для производства печатных плат в процессе их сушки.

Целью данной статьи является рассмотрение особенностей построения и расчета технических характеристик такого микроволнового нагревателя с конвективным теплообменом.

Выходные раскрывы питающих волноводов конструкции подключены к вершинам волноводной гипоциклоиды (в данном случае — астроида), т. е. кривой, описываемой точкой малой окружности радиуса r , которая катится без скольжения по другой окружности радиуса R_0 внутри нее. Разветвляющиеся волноводы заполнены материалом — преобразователем электромагнитной энергии в тепловую, например, на основе термостойкого слоистого алюмосиликата, наполняемого с градиентом концентрации оксидами переходных металлов.

Ветви астроида одновременно служат мощными теплоотводящими конструкциями. Кроме того, для повышения эффективности процесса теплоотвода перпендикулярно к плоскости астроида установлены металлические теплоотводящие ребра.

Методика расчета параметров (коэффициента отражения и коэффициента преобразования) волноводного кусочно-однородного преобразователя (рис. 1)

электромагнитной энергии в тепловую по значениям предварительно измеренных коэффициентов прохождения и коэффициентов отражения слоев преобразователя приводится ниже.

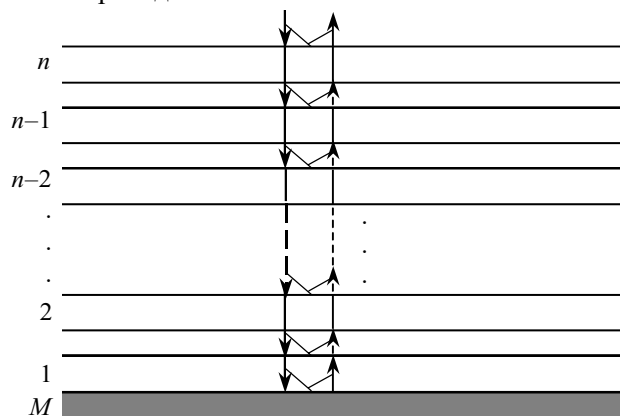


Рис. 1. Структура кусочно-однородного преобразователя электромагнитной энергии в тепловую

Ввиду малых различий в коэффициентах отражения соседних слоев, а также малых значений коэффициентов отражения верхних слоев и малых значений коэффициентов прохождения нижних слоев, целесообразно считать:

а) в n -слойной кусочно-однородной системе имеет место лишь двунаправленное распространение поля, т. е. отраженные сигналы распространяются лишь вверх (не переотражаются вниз), а прямые сигналы распространяются лишь вниз (т. е. повторных переотражений в слоях не происходит);

б) с сигналом, отраженным от металлической заглушки (M), складываются сигналы, отраженные от всех n слоев.

С учетом этих допущений, согласно рис. 1, определим максимальные (складывающиеся по мощности) значения сигнала, падающего на металлическую заглушку, и значения всех отраженных сигналов.

Прямой сигнал, падающий на поверхность металлической заглушки, равняется (по мощности)

$$A = P_0 (1 - K_{on}) \cdot K_{pn} (1 - K_{o(n-1)}) \cdot K_{p(n-1)} \cdot (1 - K_{o(n-2)}) \times \\ \times K_{p(n-2)} \cdot \dots \cdot K_{p3} (1 - K_{o2}) \cdot K_{p2} (1 - K_{o1}) \cdot K_{p1}, \quad (1)$$

где P_0 — мощность сигнала, падающего на верхний n -й слой преобразователя электромагнитной энергии в тепловую;

K_{oi} — коэффициент отражения сигнала от i -го слоя, $i = 1, n$;

K_{pi} — коэффициент прохождения i -го слоя.

Отраженный от металла заглушки сигнал равняется (по мощности)

$$B = A \cdot K_{\text{ом}} (1 - K_{\text{о}2}) K_{\text{п}2} \dots K_{\text{п}(n-3)} (1 - K_{\text{о}(n-2)}) \times \\ \times K_{\text{п}(n-2)} (1 - K_{\text{о}(n-2)}) K_{\text{п}(n-1)} (1 - K_{\text{о}n}) K_{\text{п}n} (1 - K_{\text{о}(n+1)}), \quad (2)$$

где $K_{\text{ом}}$ — коэффициент отражения от металлической заглушки;
 $K_{\text{о}(n+1)}$ — коэффициент отражения (по мощности) от границы раздела воздушного слоя и n -го слоя покрытия.

Суммарный максимальный сигнал, отраженный от всех n слоев (по мощности), равняется

$$C = P_0 (1 - K_{\text{о}(n+1)}) \sum_{i=1}^{n-1} K_{\text{о}i} K_{\text{п}(i+1)}^2 (1 - K_{\text{о}(i+1)}) \times \\ \times \prod_{j=i+2}^n (1 - K_{\text{о}j})^2 K_{\text{п}j}^2 + P_0 K_{\text{он}}. \quad (3)$$

Тогда искомая минимальная величина коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую равняется

$$K^* = 1 - \frac{B+C}{P_0} = 1 - \left[\prod_{i=2}^n (1 - K_{\text{о}i})^2 K_{\text{п}i}^2 K_{\text{ом}} (1 - K_{\text{о}1}) K_{\text{п}1}^2 (1 - K_{\text{о}(n+1)}) + \right. \\ \left. + (1 - K_{\text{о}(n+1)}) \sum_{i=1}^{n-1} K_{\text{о}i} K_{\text{п}(i+1)}^2 (1 - K_{\text{о}(i+1)}) \prod_{j=i+2}^n (1 - K_{\text{о}j})^2 K_{\text{п}j}^2 + K_{\text{он}} \right]. \quad (4)$$

Пусть требуется оценить уровни гарантированно-го наименьшего значения коэффициента преобразования для n -слойного ($n=1,10$) преобразователя.

Исходные данные, полученные экспериментально

$K_{\text{о}1}$	$K_{\text{о}2}$	$K_{\text{о}3}$	$K_{\text{о}4}$	$K_{\text{о}5}$	$K_{\text{о}6}$	$K_{\text{о}7}$	$K_{\text{о}8}$	$K_{\text{о}9}$	$K_{\text{о}10}$
0,55	0,50	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05	0,02	0,01
$1 - K_{\text{о}1}$	$1 - K_{\text{о}2}$	$1 - K_{\text{о}3}$	$1 - K_{\text{о}4}$	$1 - K_{\text{о}5}$	$1 - K_{\text{о}6}$	$1 - K_{\text{о}7}$	$1 - K_{\text{о}8}$	$1 - K_{\text{о}9}$	$1 - K_{\text{о}10}$
0,45	0,50	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	0,98	0,99
$K_{\text{п}1}$	$K_{\text{п}2}$	$K_{\text{п}3}$	$K_{\text{п}4}$	$K_{\text{п}5}$	$K_{\text{п}6}$	$K_{\text{п}7}$	$K_{\text{п}8}$	$K_{\text{п}9}$	$K_{\text{п}10}$
0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,65	0,70	0,75

Согласно исходным данным, например, представленным в **таблице**, получаем, что, в соответствии с формулой (4), значения коэффициента преобразования электромагнитной энергии в тепловую в зависимости от количества $n=1,2,\dots,10$ слоев кусочно-однородной структуры равняются:

$$K^*(1) = 0,442; K^*(2) = 0,400; K^*(3) = 0,582; \\ K^*(4) = 0,671; K^*(5) = 0,759; K^*(6) = 0,804; K^*(7) = 0,848; \\ K^*(8) = 0,878; K^*(9) = 0,905; K^*(10) = 0,923.$$

Оценим требуемый расход микроволновой энергии на нагревание потока воздуха заданной интенсивности.

Производительность нагревателя зависит от суммарной мощности всех генераторов, количество которых всегда соответствует количеству осей гипоциклоиды. Пусть задана конструкция микроволнового нагревателя из 8 волноводных ветвей, т. е. построенная в виде гипоциклоиды с параметром $m=R_0/r=8$, представленная на **рис. 2**.

Исходные данные для расчета требуемого расхода микроволновой энергии на нагревание потока воздуха заданной интенсивности до заданной температуры:

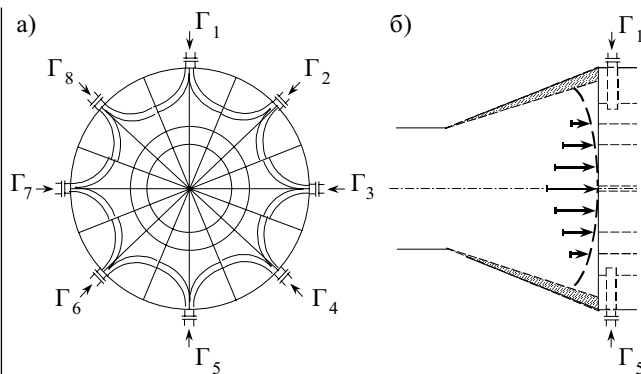


Рис. 2. Микроволновый нагреватель с конвективным теплообменом:

a — волноводная гипоциклоида-нагреватель; *б* — распределение скорости воздушного потока на входе в нагреватель; Γ — генератор

— температура воздуха на входе нагревателя, T_1 , К;
 — температура воздуха на выходе нагревателя, T_2 , К;
 — количество проходящего воздуха, q_n , м³/ч;
 — динамическое давление воздуха в питающем воздуховоде, $H_{\text{д}1}$, Па;
 — диаметр питающего воздуховода, D_1 ;
 — диаметр воздуховода на входе нагревателя, $D_2=R_0/2$;
 — мощность одного микроволнового генератора, P_1 ;
 — размер узкой стенки волноводной ветви нагревателя, b ;
 — количество волноводных ветвей нагревателя, $m_H=R_0/r$;
 — количество теплоотводящих ребер, n_p ;
 — длина канала теплообмена, h_H ;
 — толщина основания теплоотводящего ребра, δ_0 .

Оценим значение энергии, требуемой для нагревания потока воздуха.

1. Определяющая температура воздуха в теплообменном процессе:

$$T = \frac{T_1 + T_2}{2}. \quad (5)$$

2. Кинематическая вязкость воздуха с учетом его плотности ρ , коэффициента вязкости μ_0 и постоянной воздуха C_B :

$$\nu = \frac{\mu_0}{\rho} \cdot \frac{273 + C_B}{T + C_B} \cdot \sqrt{\left(\frac{T}{273}\right)^3}; \quad \mu_0 = 16,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\rho \approx 1,0 \text{ кг/м}^3; C_B = 111. \quad (6)$$

3. Средняя скорость воздуха в питающем воздуховоде:

$$\omega_1 = \frac{4q_n}{\pi(D_1)^2} \cdot \frac{1}{3600}. \quad (7)$$

4. Скорость потока воздуха ω_2 на входе нагревателя (согласно уравнению расхода газа):

$$\rho \omega_1 \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = \rho \omega_2 \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2; \quad \omega_2 = \omega_1 \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2. \quad (8)$$

5. Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega_2 D_2}{\nu} \quad (9)$$

6. Максимальная скорость воздуха на входе нагревателя-теплообменника $\omega_{2m} = \omega_2$.

7. Распределение скоростей воздушного потока в сечении воздуховода на входе нагревателя:

$$\omega_{2x} = \omega_{2m} \left(1 - \frac{x}{R_0} \right)^n; \quad \frac{1}{7} > n > \frac{1}{10} \quad \text{при } Re > 2320;$$

$$x = \left\{ 0; \frac{R_0}{2}; \frac{3R_0}{4}; \frac{9R_0}{10} \right\}.$$

8. Толщина ламинарного слоя у стенок в сечении воздуховода на входе нагревателя:

$$h_{\text{л}} = 30 D_2 / Re^{0,875}.$$

9. Площадь поперечного сечения воздуховода на выходе теплообменной конструкции:

$$S_H = 8(R_0 - r)b + n_p R_0 \delta_0 = 8(R_0 - R_0/m)b + n_p R_0 \delta_0.$$

10. Среднее значение скорости воздушного потока в сечении на входе в теплообменный канал:

$$\bar{\omega}_2 = \sum_{i=1}^4 \omega_{2i} / 4.$$

11. Скорость воздушного потока на выходе микроволнового нагревателя с учетом площади сечения воздуховода S :

$$\omega_3 = \bar{\omega}_2 \frac{S}{S - S_H} = \bar{\omega}_2 \frac{\pi D_2^2 / 4}{\pi D_2^2 / 4 - S_H}.$$

12. Удельный требуемый приток тепла в воздушный поток (т. е. тепла, приходящегося на количество воздуха, равное 1 кг):

$$\Delta W_0 = (C_V - AR)(T_2 - T_1) + A \frac{\omega_3^2 - \bar{\omega}_2^2}{2},$$

где C_V — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме;
 A — тепловой эквивалент механической работы (трения воздушного потока в теплообменнике), равный 1/427;
 R — газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/(К·моль).

13. Время экспозиции воздуха в канале нагревания:

$$\tau = h_H / \bar{\omega}_2.$$

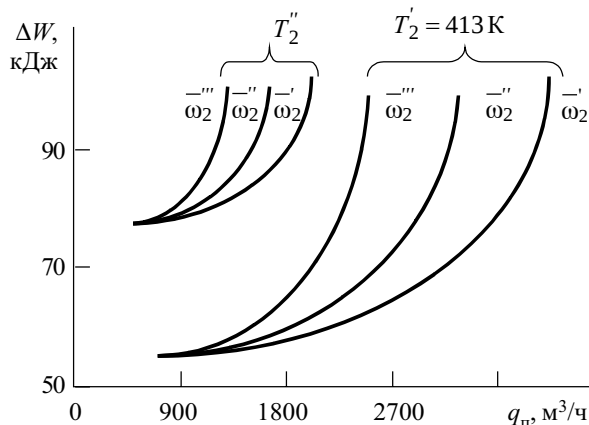


Рис. 3. Зависимость требуемого количества энергии от количества проходящего через микроволновый нагреватель воздуха (вариант $T_2'' > T_2'$; $\bar{\omega}_2''' > \bar{\omega}_2'' > \bar{\omega}_2'$)

14. Масса воздуха, нагреваемого за время экспозиции:

$$m_b = \rho \pi (D_2/2)^2 h_H.$$

15. Требуемый расход энергии электромагнитного поля на нагревание потока воздуха заданной интенсивности:

$$\Delta W = \Delta W_0 m_b = \Delta W(q_{\text{п}}). \quad (10)$$

Зависимость (10) требуемого расхода энергии поля от заданной производительности $q_{\text{п}}$ преобразователя приведена на рис. 3.

16. Требуемое количество генераторов мощностью P_1 для нагревания потока воздуха:

$$n_r = \Delta W / P_1. \quad (11)$$

Пример.

Дано: $T_1 = (20 + 273) \text{ К}$; $T_2 = (140 + 273) \text{ К}$; $q_{\text{п}} = 3600 \text{ м}^3/\text{ч}$; $H_{\text{л}1} = 15,0 \text{ Па}$; $H_{\text{л}2} = 3,8 \text{ Па}$; $D_1 = 0,56 \text{ м}$; $D_2 = 1,0 \text{ м}$; $P_1 = 15 \text{ кВт}$; $b = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $m_H = 8$; $n_p = 60$; $\delta_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_H = 1,3 \text{ м}$; $R_0 = 0,5$; $r = 0,5/8$.

Определить: ΔW ; n_r .

Решение.

Согласно (5)–(11), находим:

$$1. T = \frac{293 + 413}{2} = 353 \text{ К}.$$

$$2. v = \frac{16,7 \cdot 10^{-6}}{1,0} \cdot \frac{273 + 111}{353 + 111} \cdot \sqrt{\left(\frac{353}{273} \right)^3} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}.$$

$$3. \omega_1 = \frac{3600}{3,14 \cdot \left(\frac{0,56}{2} \right)^2} \cdot \frac{1}{3600} = 4 \text{ м/с}.$$

$$4. \omega_2 = 4 \cdot \left(\frac{0,56}{1} \right)^2 = 1,26 \text{ м/с}.$$

$$5. Re = \frac{1,26 \cdot 1,0}{2 \cdot 10^{-5}} = 63 \cdot 10^3. \quad 6. \omega_{2m} = 1,26 \text{ м/с}.$$

$$7. \omega_{2x}|_{x=0} = \omega_{2m} \cdot \left(1 - \frac{0}{R_0} \right)^{\frac{1}{9}} = 1,26 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2x}|_{x=\frac{R_0}{2}} = 1,26 \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{9}} = 1,17 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2x}|_{x=\frac{3R_0}{4}} = 1,26 \cdot \left(1 - \frac{3}{4} \right)^{\frac{1}{9}} = 1,08 \text{ м/с};$$

$$\omega_{2x}|_{x=\frac{9R_0}{10}} = 1,26 \cdot \left(1 - \frac{9}{10} \right)^{\frac{1}{9}} = 0,98 \text{ м/с}.$$

$$8. h_{\text{л}} = \frac{30 \cdot 1,0}{Re^{0,875}} \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$9. S_H = 8 \cdot \left(0,5 - \frac{0,5}{8} \right) \cdot 45 \cdot 10^{-3} + 60 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,25 \text{ м}^2.$$

$$10. \bar{\omega}_2 = \frac{1}{4} \cdot (1,26 + 1,17 + 1,08 + 0,98) = 1,12 \text{ м/с}.$$

$$11. \omega_3 = 1,12 \cdot \frac{3,14 \cdot 1^2 / 4}{3,14 \cdot 1^2 / 4 - 0,25} = 1,6 \text{ м/с}.$$

$$12. \Delta W_0 = \left(1000 + \frac{8 \cdot 310}{427} \right) \cdot (413 - 293) + \frac{1}{427} \cdot \frac{1,6^2 - 1,12^2}{2} = 120 \text{ кДж/кг}.$$

$$13. \tau = \frac{h_H}{\omega_2} = \frac{1,3}{1,12} = 1,16 \text{ с.}$$

$$14. m_B = 1,0 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{1,0}{2}\right)^2 \cdot 1,3 = 1,02 \text{ кг.}$$

$$15. \Delta W = 120 \cdot 1,02 \approx 122 \text{ кДж.}$$

$$16. n_T = \frac{122}{15 \cdot 1,16} \approx 8 \text{ ед.}$$

Заметим, что нагревание потока воздуха до 140°C с производительностью 3600 м³/ч является солидной производственной задачей и, естественно, для ее выполнения требуется суммарная мощность источника, превышающая 100 кВт.

Применение такого микроволнового нагревателя с конвективным обменом в цехе в процессе сушки продукции (например печатных плат) либо для обо-

грева производственных помещений представляется новым и весьма перспективным по уровню экологичности (чистоты) рабочего агента, гибкости управления технологическим процессом обработки продукции, малогабаритности и простоте системы теплообмена, по унифицированности источника энергии, по независимости от дефицитных источников энергии и, наконец, просто по уровню энергоэкономичности системы в подобной технологии.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 67359А Украины. Спосіб та пристрій нагріву повітря / Б. А. Дем'янчук. — 2004. — Бюл. № 6.
2. Дем'янчук Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева. — Одесса: Черноморье, 2004.
3. Княжевская Г. С., Фирсова М. Г., Килькеев Р. Ш. Высококачественный нагрев диэлектрических материалов. — Л.: Машиностроение, 1989.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 12–16 сентября 2005 года, г. Севастополь

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЮ ПРИНИМАЮТСЯ ДО 11 МАЯ 2005 г.
ПО СЛЕДУЮЩИМ НАПРАВЛЕНИЯМ

Твердотельные приборы и устройства СВЧ (в т. ч. интегрированные устройства для средств связи и локации, а также для сопряжения с оптоволоконными и цифровыми устройствами);

Моделирование и автоматизированное проектирование твердотельных приборов и устройств;

Электроракумные и микроракумные приборы СВЧ;

Системы СВЧ-связи, вещания и навигации (в т.ч. методики оценки эффективности сетей связи);

Антенны и антенные элементы (в т. ч. оптические технологии в антенной технике);

Пассивные компоненты (в т. ч. устройства на магнитостатических волнах);

Материалы и технология СВЧ-приборов, наноэлектроника и нанотехнология;

СВЧ-электроника сверхбольших мощностей и эффекты;

СВЧ-измерения;

Прикладные аспекты СВЧ-техники;

СВЧ-техника в медицине и экологии;

Радиоастрономия, дистанционное зондирование и распространение радиоволн;

История СВЧ-техники и телекоммуникаций (доклады о юбилеях университетов, НИИ, КБ, журналов, исторических событий, выдающихся ученых).

15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»
12–16 сентября 2005 г., Севастополь, Украина

КрыМиКо 2005 CrIMiCo

September 12–16, 2005, Sevastopol, Ukraine
15th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology»

**РАБОЧИЕ ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ —
РУССКИЙ И АНГЛИЙСКИЙ**

Тел./факс: +380-692-440982
e-mail: crimico-2005@sinfo.net.ua
crimico-2005@mail.com
<http://www.crimico-2005.sinfo.net.ua>
<http://ieee.orbita.ru/aps/crim05r.htm>