

*А. И. ДОХОВ, канд. техн. наук, В. В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук,  
Н. Е. ЛУКЬЯНЕНКО, канд. техн. наук, И. Е. АНДРУС*

## **ТЕХНОЛОГИИ И УНИВЕРСАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ СВЧ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО, КАЗЕИНА, СУШЕННЫХ ФРУКТОВ, ОВОЩЕЙ И ДРУГИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ**

Электротермическая обработка СВЧ-полем является одним из перспективных методов воздействия на материалы, биологические объекты, сельскохозяйственные и пищевые продукты, и поэтому исследования в этой области в целях использования их в народном хозяйстве весьма актуальны и своевременны [1, 2].

Авторами разработаны экономичные технологии для получения высококачественного гипсового вяжущего, казеина и других стройматериалов, а также технологии и конструкции для сушки зерна, фруктов, овощей и других сельскохозяйственных и пищевых продуктов на основе использования комбинированного метода путем непосредственного воздействия на вещество нагретым воздухом и электромагнитной энергией СВЧ диапазона волн [3, 4]. Излагаются рациональные с точки зрения экономичности варианты построения установок комбинированного типа для получения некоторых видов стройматериалов, обработки сельскохозяйственных и пищевых продуктов. Ниже приведены основные характеристики предлагаемых технологий и конструкций установок.

Комбинированный метод предполагает совместную и одновременную обработку рабочего вещества СВЧ энергией и энергией горячего воздуха. В известных работах [3] в США и других странах дальнего зарубежья подобная обработка осуществляется в два этапа. На первом этапе осуществляется выдавливание влаги на поверхность частиц рабочего вещества в вакуумной камере, в которую подается СВЧ энергия, а на втором этапе – удаление влаги с поверхности частиц рабочего вещества во внешнюю среду в термической камере, в которую подается горячий воздух. В отличие от них в предлагаемых технологиях обработка рабочего вещества осуществляется в один этап путем подачи и СВЧ энергии, и горячего воздуха в одну камеру и одновременно, т. е. обрабатывается каждая частица рабочего вещества, а не вся его масса. Хотя как в этом случае, так и в случае обработки рабочего вещества в два этапа работа СВЧ энергии сводится к выдавливанию влаги на поверхность частиц рабочего вещества, а удаление ее оттуда во внешнюю среду осуществляется горячим воздухом, предлагаемый комбинированный метод имеет ряд существенных преимуществ. Попытаемся это доказать.

Согласно общей теории обезвоживания диэлектрических веществ поглощаемая ими СВЧ мощность описывается следующим соотношением [1]:

$$P_{\Pi} = 0,287 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot E^2 \cdot V_{\text{в}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon''$  – величина мнимой составляющей диэлектрической проницаемости вещества или коэффициент диэлектрических потерь;  $f$  – частота СВЧ сигнала, МГц;  $E$  – напряженность электрического поля в волноводной камере, в которой производится сушка вещества, В/см;  $V_{\text{в}}$  – объем рабочего вещества, подвергаемого сушке. Величина коэффициента потерь  $\varepsilon''$  имеет существенную зависимость от температуры и влажности [1], например, для замороженного продукта она на порядок ниже, чем при нормальной температуре. Коэффициент потерь для высушенного продукта еще меньше, чем у влажного. Таким образом, величина нагрузки, определяемая в данном случае (1) величиной коэффициента потерь  $\varepsilon''$ , в действительности меняется в широких пределах и для эффективного использования энергии СВЧ генератора требуется регулирование режимов работы установки в зависимости от величины нагрузки.

Требуемая мощность СВЧ генератора для обеспечения необходимого уровня  $E$  в волноводе с размерами  $a, b$  определяется из соотношения [5, с. 101-107]

$$P_{\Gamma} = E^2 \cdot a \cdot b \cdot K \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{\text{кр}})^2} / q, \quad (2)$$

где  $a, b$  – ширина и высота волновода;  $K = 1,5 \dots 1,7$ ;  $\lambda$  – длина волны в воздухе;  $\lambda_{\text{кр}}$  – критическая длина волны в волноводе, в котором производится сушка вещества;  $q \geq 3$  при многомодовом потоке СВЧ энергии в указанном волноводе, применяемом в СВЧ установке.

Из соотношений (1) и (2) следует, что

$$P_{II} = \frac{0,287 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot P_{\Gamma} \cdot V_B \cdot q}{a \cdot b \cdot K \cdot \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}} \quad (3)$$

Для успешного осуществления выдавливания влаги на поверхность частиц рабочего вещества необходимо одновременное выполнение двух условий: давление внутри продукта должно быть выше, чем вне его, а температура вне вещества должна быть такова, чтобы воздушная среда была сильно ненасыщенная. Для достижения такого состояния среды, т. е. на разогрев рабочего вещества от начальной температуры до температуры, при которой происходит интенсивное испарение воды, содержащейся в рабочем веществе, требуется количество тепла, определяемое соотношением [6, с. 271-277]

$$Q_{II} = C_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (4)$$

Поглощаемая мощность  $P_{II}$ , требуемая на разогрев воды в рабочем веществе массой  $m_B = m \cdot W$ , где  $W$  – влажность рабочего вещества за время  $\Delta \tau_H$  определяется соотношением

$$P_{II} = \frac{Q_{II}}{\Delta \tau} \quad (5)$$

Из соотношений (3) и (4) следует, что

$$\Delta \tau_{H(мин)} = \frac{C_p \cdot W \cdot m \cdot \Delta T \cdot a \cdot b \cdot K \cdot \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}{0,287 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot P_{\Gamma} \cdot V_B \cdot 60q} \quad (6)$$

Испарение воды, содержащейся в рабочем веществе с учетом соотношения (3) за время  $\Delta \tau_H$  при осуществлении поддува горячим воздухом и вытяжки паров, определяется соотношением вида [6]

$$\Delta \tau_{H(Мин)} = \frac{\left[ C_{II} \cdot \left( \frac{U^*}{U} \right) \right] \cdot W \cdot m \cdot a \cdot b \cdot K \cdot \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{кр})^2}}{0,287 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon'' \cdot f \cdot P_{\Gamma} \cdot V_B \cdot 60q} \quad (7)$$

где  $C_{II}$  – постоянная испарения;  $U$  – естественная скорость испарения воды, выдавленной потоком СВЧ энергии на поверхность рабочего вещества;  $U^*$  – скорость испарения указанной воды с учетом поддува горячим воздухом и вытяжки. Отношение этих скоростей определяется следующим образом [3]:

$$\frac{U^*}{U} = \frac{P_0}{P_0^*} \cdot \frac{(P_{II} - \bar{P}^*)}{(P_{II} - P)} \quad (8)$$

где  $P_{II}$  – давление насыщенного пара;  $P$  – давление паров над свободной поверхностью жидкости;  $P_0$  – внешнее барометрическое давление;  $P_0^*$  и  $P^*$  – те же величины при поддуве горячим воздухом и вытяжкой паров воды. Экспериментальные исследования подтверждают соотношения (6) и (7).

Расчеты для СВЧ установки для сушки зерна проводились по соотношениям (6) и (7) с учетом данных, заложенных в техническую разработку СВЧ установки и приведенных в ГОСТ 9353-85:

$C_p = 4,2$  ккал/кг;  $W = [(20...26) - 145] \cdot 10^{-6}$ ;  $\Delta T = 80, 50, 30^\circ \text{C}$ ;  $a = 1,08$  м;  $b = 0,51; 0,2$  м;

$K = 1,5$ ;  $\varepsilon'' = 30$ ;  $f = 915$  МГц;  $P_{II} = 5 \cdot 10^4$  Вт;  $V_B = 0,624; 0,312$  м<sup>3</sup>;  $q = 3$ ;  $\left( \frac{U^*}{U} \right) = 10; 100$ ;

$C_{II} = 2000$  ккал/кг;  $\Delta \tau = 20$  мин.

Из формулы (6) находим массу обрабатываемого вещества при предварительном нагреве его горячим воздухом до внешней температуры  $T_{OH} = 20; 50; 70^\circ \text{C}$  при исходной температуре  $20^\circ \text{C}$  и температуре испарения  $T_{исп} = 100^\circ \text{C}$ , при этом определяется  $\Delta T = 100 - T_{OH}$ . Для подогрева воздуха используются ТЕНы мощностью 6...10 кВт и вентилятор типа ВН3; для вытяжки применяется вентилятор типа ВН7. Мощность ВН3-ВН4 не превышает 3 кВт, ВН7 – 5 кВт. Мощность двигателя конвейерной ленты (или пневмоленты)  $P_{кл.} \leq 7$  кВт. КПД СВЧ генератора  $\eta = 0,7$ . Следовательно, мощ-

ность, потребляемая генератором  $P_{III}$ , равна 71,4 кВт ( $P_{нотр} = \frac{P_{СВЧ}}{\eta}$ ;  $P_{СВЧ} = 50$  кВт). Суммарная

потребляемая за 1 ч работы мощность СВЧ установки не превышает  $P \leq (92,4 \dots 96,4)$  кВт.

Масса рабочего вещества, обрабатываемого СВЧ установкой при указанных выше параметрах приведена в табл. 1. Для некоторых значений массы, полученных из формулы (6), рассчитано время, необходимое для нагрева рабочего вещества до температуры, при которой начинается интенсивное испарение влаги, выдавленной СВЧ энергией. Данные приведены в табл. 2.

Таблица 1

$\dot{A} = \frac{V_g}{W \cdot b}$	$m(\Delta T)$ , кг		
	$\Delta T = 30^\circ \text{C}$	$\Delta T = 50^\circ \text{C}$	$\Delta T = 80^\circ \text{C}$
52	Модель газа Ван-дер-Ваальса 361256	216753	135471
26	180628	108377	67735
13	90314	54188	33868
20,4	141724	85034	53146
10,2	70862	42517	26573
5,1	35431	21258	13286

Таблица 2

$\Delta \tau_n$	2	3	6	8	10	15	20	25
$m$	18063	36125	54188	72251	90314	135471	180628	225785
$\Delta \tau_n$ , мин	3,49	6,98	10,47	13,96	17,46	26,18	34,93	43,64

Технология производства гипсового вяжущего включает термическую обработку гипсового камня путем облучения преобразованным электромагнитным полем СВЧ диапазона Нпо типом волн мощностью 110-130 Вт/кг в течение 20-30 мин. Взаимодействие гипсового камня с электромагнитным полем основывается на использовании механизма передачи энергии веществу, имеющего большую диэлектрическую проницаемость. Главной особенностью этого взаимодействия является то, что оно происходит одновременно во всем объеме вещества (гипсового камня).

В результате этого взаимодействия выделяется тепловая энергия всем объемом вещества, а взаимодействие вещества с окружающей средой осуществляется только через ее поверхность. Благодаря этому температура интенсивнее растет в центре образца, чем на его поверхности. При этом в середине гипсового камня создается большое давление (до 15-16 атм.), под действием которого образуются микропоры и через них вода выжимается на его поверхность и испаряется (дегидратация) из-за дополнительного поглощения СВЧ энергии. Нагрев гипсового камня (двуводного гипса) в целях превращения его в полугидрат  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций происходит не более 10 мин (при условии предварительного подогрева поверхности гипсового камня до температуры 110-120°C). Без предварительного подогрева поверхности гипсового камня процесс дегидратации происходит за 45-50 мин.

Предлагаемая технология для получения гипса позволяет вырабатывать высококачественное гипсовое вяжущее (полугидрат гипса  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификаций) с высокой производительностью при малых энергозатратах по сравнению с известной технологией получения  $\alpha$ -гипса в автоклавах при давлении нагретого пара 6 атм. и последующей сушкой пропаренного камня в тех же автоклавах, где цикл продолжается 29 ч и не является непрерывным. В предложенных технологии и установке цикл дегидратации гипса составляет 30 мин и выход  $\alpha$ -гипса составляют 25-35 %, т. е. в сравнении с известной технологией производительность повышается приблизительно в 20 раз.

Технология получения казеина и других строительных материалов заключается в термической обработке казеина-сырца электромагнитным излучением при сопровождении обработкой горячим воздухом температурой 90...100°C. Для этого дополнительно введены камера поддува горячим воздухом и камера вытяжки водяных паров, размещенные под нижними и над верхними широкими стенками основного, входного и исходного волноводов соответственно.

В основу технологии и конструкции комбинированной СВЧ установки для сушки зерна, фруктов, овощей и других сельскохозяйственных и пищевых продуктов положена термическая обработка

путем облучения электромагнитной СВЧ энергией мощностью 50...130 Вт/кг в течение 7...30 мин при обезвоживании рабочего вещества дополнительно пневмоподдувом подогретым воздухом и пневмовытяжкой воздуха вместе с парами воды.

Технология на основе использования СВЧ энергии для сушки сельскохозяйственных и пищевых продуктов также обеспечивает высокую производительность при малых энергозатратах. Выигрыш приблизительно в 2 раза.

Для получения высококачественного гипсового вяжущего, казеина, мела и других сыпучих строительных материалов, а также для сушки зерна, фруктов, овощей и других сельскохозяйственных и пищевых продуктов предлагается универсальная конструкция СВЧ установки.

Основными элементами установки для сушки материалов являются (см. рис.): генератор СВЧ, секция передачи энергии (переходный волновод 1, уголкового отражателя 2 и рупорное устройство 3) к нагревательной камере и нагревательная камера 4 с конвейером 5 ленточного типа.

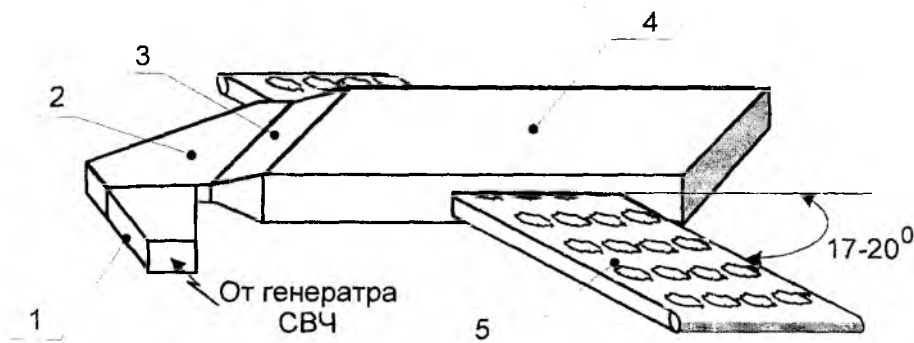


Рис.

Особенностью предлагаемой установки является то, что нагревательная камера представляет собой прямоугольный волновод с большим поперечным сечением, необходимым для получения требуемой производительности при минимальной длине волновода. Большие размеры широкой стенки волновода обеспечиваются тем, что в секцию передачи энергии в нагревательную камеру устанавливается уголкового отражатель 2 волн [7], преобразующий типовую электромагнитную волну типа  $H_{10}$  в волну типа  $H_{m0}$ . Большие размеры узкой стенки волновода обеспечиваются тем, что в секцию передачи энергии устанавливается рупорное устройство 3.

Согласование рабочей нагрузки, т. е. объем и количество высушиваемого материала, с электромагнитной волной, распространяющейся по волноводу, осуществляется благодаря тому, что рабочий конвейер проходит под углом, не превышающим  $20^\circ$ . В предлагаемых устройствах этот угол равен  $17...20^\circ$ . При этом осуществляется сглаживание неравномерности распределения СВЧ энергии в поперечном сечении волновода вследствие того, что рабочий материал находится в непрерывном движении и за время рабочего цикла много раз проходит максимумы и минимумы поля. В целях обеспечения максимума поглощения СВЧ энергии рабочим материалом (создания режима бегущей волны) волновод на конце закорочен и рабочая нагрузка подбирается так, чтобы КСВ был близок к 1.

Для создания режима адаптации работы генератора к изменениям величины нагрузки введена система непрерывного измерения КСВ, имеющая секцию с датчиком мощности СВЧ энергии в отрезке стандартного волновода, включенную между генератором и секцией передачи энергии в нагревательную камеру. В изготовленном образце электронной установки для сушки зерна измеренный коэффициент стоячей волны (КСВ) составил 1,13.

Для обеспечения максимальной производительности рассматриваемых установок СВЧ обработка рабочего вещества сопровождается обработкой его горячим воздухом. С этой целью под конвейером устанавливается внутри волновода диэлектрическая труба (или набор труб), в которую подается горячий воздух из калорифера, при этом поток воздуха осуществляется в направлении, обратном движению рабочего вещества. В этом случае наибольшую температуру и интенсивность имеет воздух на конечном участке обработки рабочего вещества. На этом же участке напряженность СВЧ поля является максимальной, так как СВЧ генератор подключается к тому входу волновода, который прилегает к выходу конвейера. На противоположном крае волновода имеется закорачивающая пластина. И этот край волновода прилегает ко входу конвейера, т. е. там, где идет подача рабочего вещества. В результате этого воздействие СВЧ поля нарастает от входа конвейера к его выходу. Это создает благоприятную обстановку для обработки

рабочего вещества, когда липкие фракции жидкости выделяются из него постепенно и не позволяют ему превращаться в слипшиеся комья. Благоприятно на этом сказывается и то, что по мере нарастания интенсивности СВЧ поля нарастает и интенсивность температуры продуваемого рабочего вещества воздуха. При этом вытяжка водяных паров – непринудительная. В противном случае, понижается температура рабочего вещества и производительность установки падает.

Экспериментально зарегистрированы следующие особые факторы работы установки. Плотность потока СВЧ энергии на конечном участке обработки рабочего вещества по сравнению с начальным в 2,5-3 раза выше. Принудительная вытяжка водяных паров уменьшает температуру водяных паров на 15° и интенсивность обработки снижается в 2-3 раза. Температура горячего воздуха, которым продувается рабочее вещество до его введения в электронную установку, достигает 60-75°, а после его введения падает до 40-55°. Для создания наиболее эффективного продува рабочего вещества горячим воздухом продув осуществляется перпендикулярно движению рабочего вещества. Экспериментально установлено, что на установках, изготовленных с применением наших разработок перпендикулярный продув горячим воздухом рабочего вещества увеличивает интенсивность его сушки в 2-3 раза.

Описанная выше работа рассматриваемых электронных установок является основанием для того, чтобы характеризовать ее как совместную и одновременную обработку рабочего вещества СВЧ энергией и энергией горячего воздуха. При этом обрабатывается каждая частица рабочего вещества, а не вся масса его. В США и других странах дальнего зарубежья осуществляется обработка всей массы рабочего вещества [2]. При этом процесс обработки рабочего вещества на первом этапе осуществляется в вакуумной камере, в которую подается СВЧ энергия, а на втором этапе – в термической камере, в которую подается горячий воздух. В результате как в этом случае, так и в случае индивидуальной обработки рабочего вещества СВЧ и пневмоэнергиями работа СВЧ энергии сводится к выдавливанию влаги на поверхность частиц рабочего вещества, а удаление ее с поверхности частиц рабочего вещества во внешнюю среду осуществляется пневмоэнергией. По производительности работы установок на единицу затраченной электроэнергии электронные установки обеих категорий близки друг к другу. Так, производительность электронных установок, разработанных нами, характеризуется следующими данными: при применении СВЧ генератора мощностью 1,5 кВт с частотой 2450 МГц производительность установки для сушки овощей и фруктов достигает 15-20 кг/ч, а при применении генератора с мощностью 50 кВт с частотой 915 МГц производительность не менее 100 кг/ч готового продукта. По казеину аналогичные данные следующие: 200-250 кг/сут и не менее чем 2 т/сут; по зерну – при 7-8 % съеме влаги в среднем 0,5 т/ч при СВЧ источнике энергии 1,5 кВт.

Сравним данные по сушке зерна в предлагаемой установке с серийной установкой VAC-U-WAVE-2200 2420 производства США. В предлагаемой опытной установке расход СВЧ энергии составляет 3 кВт/т при 5 % усушке против 1,72 кВт/т. Общий расход электроэнергии в предлагаемой установке составляет 6 кВт. Следовательно, на 1 т высушенного зерна расходуется 12 кВт электроэнергии при 7,35 кВт в зерносушилке США. При пересчете на 1 % усушки зерна в предлагаемой установке расход электроэнергии составляет для колебательной установки равен 0,43-1,375 кВт, общий расход электроэнергии – 1,71-1,5 кВт. В установках США равен соответственно 0,344 и 1,47 кВт.

Таким образом, разработанная и испытанная авторами статьи опытная установка по техническим данным близка к серийной, изготовленной в США. Однако техническое осуществление проекта опытной зерносушилки, разработанной авторами статьи, существенно проще аналогичной установки США, так как не требует в своем составе вакуумной установки.

При модернизации известных установок для сушки зерна по технологии, предлагаемой нами, можно существенно улучшить и даже превзойти технические данные серийной установки США.

**Список литературы:** [1] *Применение энергии СВЧ в промышленности: СВЧ-энергетика* / Под ред. Э.Окресса. – Т.2. – М.: Мир, 1971. – С.272. [2] *Jacques Thuery. Microwaves Industrial, Scientific, and Medical Applications* / Edited by Edward H. Grant King's College Landon. – London: Artech House, 1992. – 667 p. [3] *Пат. 2040498 Россия*. Оpubл.25.07.95. [4] *Пат. 22036 Украина*. Оpubл.22.08.97. [5]. *Справочник по элементам волноводной техники.* / Фальдштейн А.Л. и др – М.: Сов. радио, 1967. – С.651. [6] *Яворский Б.М., Демидов А.А.* Справочник по физике.– М.: Наука, 1968. - С.939. [7] *Кириленко А.А., Рудь Л.А., Ткаченко В.И.* Преобразование типов волн на угловых неоднородностях в прямоугольных волноводах // *Радиотехника и электроника*. – 1987. – Т.32. - Вып.10. – С.2060-2068.

*Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 6.12.1999*