

УДК 621.385.6, 633.791

DOI:

**ПРОГНОЗНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАТОРОВ ХМЕЛЕСУШИЛКИ С СВЧ ЭНЕРГОПОДВОДОМ****М. В. Просвирякова<sup>1</sup>, Н. Г. Горячева<sup>2</sup>, Г. В. Новикова<sup>3</sup>, В. Ф. Сторчевой<sup>1</sup>, Д. М. Селезнева<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева,  
127550, г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup>Академия гражданской защиты МЧС России,

141435, Московская обл., г.о. Химки, мкр. Новогорск, Россия

<sup>3</sup>Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,  
606340, г. Княгинино, Россия

**Аннотация.** Для сушки свежесобранного хмеля в хмелеводческих хозяйствах разработана карусельная хмелесушилка с применением конвективного тепла и СВЧ энергоподвода и определенной скважностью технологического процесса для выравнивания температуры и влажности шишек хмеля при перемещении диэлектрической карусельной платформы через рабочую камеру, образованную радиальными сегментами коаксиального цилиндра. Хмелесушилка разработана с учетом технологических, конструкционных, эксплуатационных требований. С использованием теории электромагнитного поля, определены: основной тип колебаний в резонаторе; резонансная частота и собственная добротность; накапливаемая предельная энергия; напряженность электрического поля; коэффициент замедления электромагнитной волны. В рабочей камере, представленной как радиальные сегменты коаксиального цилиндра, расположена карусельная диэлектрическая перфорированная кольцевая платформа с диэлектрическими кольцевыми гребенками. Во внутреннем цилиндре имеются воздухоотводящие окна от каждого сегмента, на верхнем основании цилиндра расположен неферромагнитный вытяжной вентилятор. Магнетроны установлены в сегментах с чередованием с сегментами без магнетронов. Над первым сегментом расположена загрузочная емкость с неферромагнитным спиральным шнеком. Внутри последнего сегмента по диагонали основания расположен выгрузной диэлектрический безосевой винтовой шнек. Внутри каждого резонатора расположены выпуклые керамические отражатели, а воздухопроводы от тепловых пушек направлены под нижние основания резонаторов. Основным типом колебаний в резонаторе в виде радиального сегмента коаксиального цилиндра являются  $E_{010}$  с резонансной частотой 2,42 ГГц. Собственная добротность резонатора, вычисленная через накопленную предельную энергию при напряженности электрического поля (1,2 кВ/см), равна 5000.

**Ключевые слова:** диэлектрическая платформа, кольцевые гребенки, электродинамические параметры, скважность процесса, нагрев-пауза, конвективное тепло.

**Введение.** Хмелеводческим хозяйствам России (с площадью плантации до 10 га) актуально иметь хмелесушилки производительностью 100-150 кг, для того, чтобы высушить собранный хмель за 10-15 дней, сохраняя потребительские свойства, при низких эксплуатационных затратах.

В настоящее время проблемами отрасли являются – низкая энергоэффективность хмелесушилок с конвективным подводом тепла и отсутствие малогабаритных хмелесушилок непрерывно-поточного действия для хмелеводческих хозяйств. Для повышения эффективности хмелесушилки применение только конвективного подвода тепла к сырью не достаточно. При конвективном способе не всегда возможно обеспечить высокое качество высушенного хмеля по-биохимическим и органолептическим показателям (окисляются альфа-, и бета-кислоты из-за высокой температуры сушки). При повышении температуры компоненты горьких веществ легко окисляются кислородом воздуха, что отрицательно сказывается на качестве готового продукта. В течение 1 часа при температуре 110° С окисляется 67,5 % альфа кислоты, 59 % бета кислоты и 56,2 % ксантогумолы [1]. Под действием кислорода воздуха, температуры в процессе длительного нагрева, компоненты хмеля трансформируются в менее ценные вещества, тем самым происходят потери качества хмеля. Чтобы сохранить максимум ценных веществ, необходимо соблюдать особые технологические режимы, которые должны быть реализованы в конструкционных особенностях хмелесушилки, работающей по принципу эндогенно-конвективного подвода тепла.

**Материалы и методы.** Анализируя электрофизические параметры свежесобранного хмеля, учитывая основные принципы распределения электромагнитного поля сантиметрового диапазона в разных конструкционных исполнениях резонаторов, обоснованы параметры электродинамической системы «генератор-резонатор-нагрузка», и разработана радиогерметичная карусельная хмелесушилка с СВЧ энергоподводом, позволяющая сохранить потребительские свойства хмеля. Теоретические исследования собственной добротности резонатора в виде радиального сегмента коаксиального цилиндра проведены по аналогии прямоугольного резонатора.

Трехмерное моделирование конструкционного исполнения хмелесушилки проводили в программе «Компас-3D V18». Обоснование ограничения электромагнитных излучений в открытое пространство с использованием замедляющей системы в виде неферромагнитного спирального шнека проведено путем расчета коэффициента замедления электромагнитной волны [3, 10].

**Результаты и обсуждение.** Результаты предварительного исследования показывают, что применение комбинированного СВЧ-конвективного способа сушки свежесобранного хмеля позволит сохранить его потребительские свойства. В научной школе разработаны десятки хмелесушилок с СВЧ энергоподводом и разными конструкционными исполнениями объемных резонаторов, стремясь выявить самую эффективную конструкцию с учетом основных критериев проектирования СВЧ техники для переработки хмеля в фермерских хозяйствах [13, 14, 15].

Основные критерии к разработке установок с СВЧ энергоподводом – это возможность реализации:

- технологических требований: равномерность распределения электрического поля в резонаторе; равномерность нагрева всех компонентов сырья; сохранение его потребительских свойств, включая органолептические, биохимические и микробиологические показатели, путем применения низкой температуры СВЧ-конвективного нагрева, регулирования толщины слоя, соблюдения скважности технологического процесса и др.;

- требований к конструкционному исполнению: использование стандартных узлов и деталей; обеспечение непрерывно-поточного режима сушки; регулирование энергетической нагрузки, экспозиции; согласования нагрузки с мощностью генераторов; контролирование технологических параметров и автоматизация процесса термообработки; удобность монтажа узлов и ремонтпригодность конструкции;

- требований к эксплуатационным показателям: надежность при функционировании; соблюдение электромагнитной безопасности; исключение пробоев и возгораний; долговечность;

- требования к экономическим показателям: минимальные удельные энергетические и эксплуатационные затраты; максимальный годовой экономический эффект; повышение рентабельности процесса сушки хмеля.

Для реализации указанных критериев разработана очередная хмелесушилка с применением СВЧ энергоподвода и определенной скважностью технологического процесса для выравнивания температуры и влажности шишек хмеля при перемещении диэлектрической карусельной платформы с направляющими гребенками через рабочую камеру, образованной сегментами коаксиального цилиндра. Она разработана по принципу карусельной конвективной сушилки зерновых культур серии СК [2].

Карусельная хмелесушилка с СВЧ энергоподводом в сегменты коаксиального цилиндра (рис. 1) состоит из радиальных неферромагнитных сегментов 1 равного объема коаксиального цилиндра (расположенного вертикально), где чередующиеся сегменты представлены как объемные резонаторы. На боковых сторонах сегментов предусмотрены окна для карусельной диэлектрической перфорированной кольцевой платформы 9, вращающейся от электропривода. На кольцевой платформе расположены диэлектрические кольцевые гребенки 10, через две глубины проникновения волны в сырье, а во внутреннем цилиндре имеются воздухоотводящие окна от каждого сегмента, диаметром менее чем четверть длины волны. На верхнем основании внутреннего цилиндра расположен неферромагнитный вытяжной вентилятор 5. При этом с чередованием в сегменты коаксиального цилиндра со стороны трех наружных сторон, через волноводы от магнетронов 6 воздушного охлаждения направлены излучатели, образуя объемные резонаторы. Над первым сегментом расположена неферромагнитная загрузочная емкость 7 с заслонкой и спиральным неферромагнитным электроприводным шнеком 8, под которой радиально установлен диэлектрический ограничитель 14, высотой до кольцевых диэлектрических гребенок 10. Внутри последнего сегмента по диагонали основания расположен диэлектрический безосевой жесткий винтовой электроприводной шнек 11. К наружной стороне внутри каждого резонатора прикреплены выпуклые керамические отражатели 13, а к нижним основаниям резонаторов подведены воздуховоды 4 от тепловых пушек.

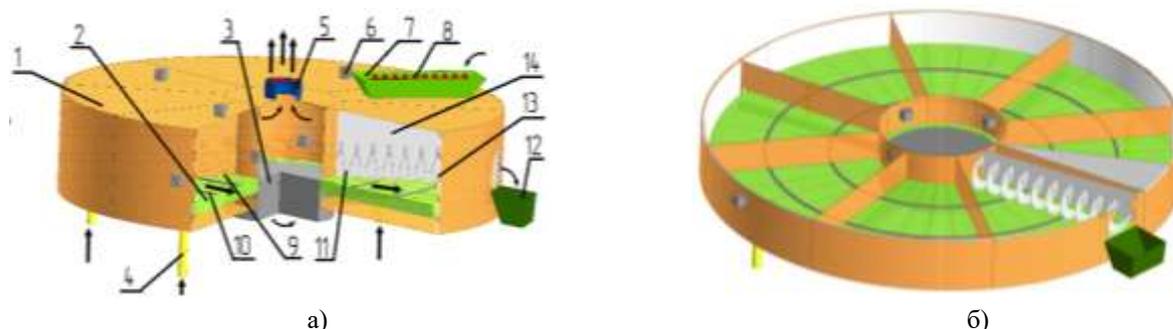


Рис. 1. Карусельная хмелесушилка с СВЧ энергоподводом в сегменты коаксиального цилиндра: а) общий вид;

б) поперечный разрез; 1 – неферромагнитные радиальные сегменты коаксиального цилиндра;

2 – диэлектрическая перфорированная кольцевая платформа на раме 3; 4 – неферромагнитные воздуховоды с

тепловыми пушками; 5 – воздухоотвод с вытяжным вентилятором; 6 – волноводы с магнетронами;

7 – неферромагнитная загрузочная емкость; 8 – неферромагнитный спиральный электроприводной шнек;

9 – диэлектрическая перфорированная кольцевая платформа; 10 – диэлектрические кольцевые гребенки;

11 – диэлектрический безосевой жесткий винтовой электроприводной шнек; 12 – приемная емкость;

13 – выпуклые керамические отражатели; 14 – диэлектрический ограничитель

Технологический процесс сушки свежесобранного хмеля происходит следующим образом: закрыть заслонку в загрузочной неферромагнитной емкости 7 и загрузить свежесобранный хмель; включить все электрические тепловые пушки для подачи теплого воздуха определенной производительностью, через воздухопроводы в резонаторы и включить вытяжной неферромагнитный вентилятор 5.

Включить электроприводы неферромагнитного спирального шнека 8, диэлектрического винтового безосевого шнека 11 и кольцевой диэлектрической перфорированной платформы 9. Открыть заслонку в загрузочной емкости 7, после чего шишки свежесобранного хмеля падают на карусельную диэлектрическую кольцевую платформу 9 между кольцевыми гребенками 10, где расстояние не более четверти длины волны (длина волны 12,24 см, частота электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) 2450 МГц). Как только сырье попадает из первого сегмента во второй, являющийся объемным резонатором, необходимо включить СВЧ генераторы 6, где шишки хмеля нагреваются за счет токов поляризации в ЭМП СВЧ, в соответствии с диэлектрическими параметрами компонентов шишки избирательно, эндогенно. При этом поверхностная влага удаляется конвективным способом. В связи с тем, что расстояние между кольцевыми гребенками не более двух глубин проникновения волны, хмель по всей толщине нагревается равномерно. В следующем сегменте без магнетронов (сегмент, обеспечивающий паузу) происходит выравнивание температуры, давления и влажности шишек хмеля по сечению загруженного сырья между диэлектрическими кольцевыми гребенками. В данном случае скважность технологического процесса (отношение продолжительности нагрева к продолжительности цикла) равна 0,5. По мере загрузки сырья в объемные резонаторы следует включать соответствующие СВЧ генераторы. Такое многократное воздействие ЭМП СВЧ с конвективным способом удаления выделенной влаги из сырья через сегменты способствует сушке хмеля в щадящем режиме и сохранению его потребительских свойств. По окончании сушки хмель с выравненными параметрами влажности, температуры и давления попадает в последний сегмент, откуда выгружается с помощью диэлектрического безосевого жесткого винтового шнека 11, за пределы хмелесушилки в приемную емкость 12. Качество высушенного хмеля зависит от температуры и напора воздуха, дозы воздействия ЭМП СВЧ, напряженности электрического поля в каждом резонаторе, поэтому следует придерживаться как минимум трехэтапного процесса сушки (нагрев-пауза). Равномерность распределения сырья на диэлектрической перфорированной платформе и нагрева его обеспечиваются с помощью диэлектрических кольцевых гребенок 10, так как расстояние между гребенками не более двух глубин проникновения волны в хмель (3-4 см). Выпуклые керамические отражатели 13 позволяют не только концентрировать энергию электромагнитного поля сверхвысокой частоты в сырье, но и уменьшать потери на излучение через щели [10].

Для реализации эффективного режима сушки предусмотрены возможности регулирования: мощности СВЧ генераторов; частоты вращения электродвигателей; производительности вентиляторов и мощности нагревательных элементов тепловых пушек; объемов загрузки сырья в резонаторы с изменением частоты вращения спирального шнека. Высокая напряженность электрического поля, достаточная для обеззараживания хмеля (1,2-1,8 кВ/см) в каждом резонаторе обеспечивается за счет интерференции концентрированных волн от выпуклых керамических отражателей, обладающих малым значением тангенса угла диэлектрических потерь.

По известным методикам [3] были проведены теоретические исследования электродинамических параметров, в том числе определены: основной тип колебаний в резонаторе в виде сегмента коаксиального цилиндра; резонансная частота и собственная и нагруженная добротности; накапливаемая предельная энергия; максимальная напряженность электрического поля.

Оптимизацию параметров резонатора в виде радиального сегмента коаксиального цилиндра проводили с применением математического моделирования [4, 5, 8] и по программе CST Microwave Studio [4, 8, 12]. Разработанный объемный резонатор в виде радиального сегмента с указанием размеров приведен на рис. 2. Длина радиальной грани 113 см, высота сегмента 61,2 см, длина малой дуги 61,2 см, а большой дуги – 244,8 см. Вычислены резонансные длины волн трех низших типов колебаний по аналогии прямоугольного резонатора [3].



Рис. 2. Резонатор в виде радиального сегмента коаксиального цилиндра: а) с указанием размеров; б) пространственное изображение

Резонансная длина волны (размеры в см.):

- для типа колебаний  $H_{101}$ :

$$\lambda_p = \frac{0,2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/l)^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{(1/103)^2 + 0 + (1/61,2)^2}} = 12,27 \text{ см.} \quad (1)$$

- для типа колебаний  $H_{011}$ :

$$\lambda_p = \frac{0,2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/l)^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{0 + (1/113)^2 + (1/61,2)^2}} = 10,89 \text{ см.} \quad (2)$$

- для типа колебаний  $E_{110}$ :

$$\lambda_p = \frac{0,2}{\sqrt{(m/a)^2 + (n/b)^2 + (p/l)^2}} = \frac{0,2}{\sqrt{(1/103)^2 + (1/113)^2 + 0}} = 15,22 \text{ см.} \quad (3)$$

Расчеты показывают, что основным в проектируемом резонаторе является колебание  $E_{110}$ , у которого значение резонансной длины волны наибольшее.

$$\text{Резонансная частота: } (H_{101}) f_p = c / \lambda_p = 3 \cdot 10^{10} / 12,27 = 2445 \text{ МГц,} \quad (4)$$

$$(H_{011}) f_p = c / \lambda_p = 3 \cdot 10^{10} / 10,89 = 2755 \text{ МГц,} \quad (5)$$

$$(E_{110}) f_p = c / \lambda_p = 3 \cdot 10^{10} / 15,22 = 1971 \text{ МГц.} \quad (6)$$

Энергию, запасенную в пустом объемном резонаторе, для колебаний указанных типов определяли по формуле 7 [3]:

$$W = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E_{\max}^2 \cdot a \cdot b \cdot l = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot (10^5)^2 \cdot 1,03 \cdot 1,13 \cdot 0,612 = 7,13 \cdot 10^{-2} \text{ Дж,} \quad (7)$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\varepsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды (воздуха  $\varepsilon = 1$ , влажного хмеля  $\varepsilon = 24-25$ ).

Энергия, запасенная в сырье:

$$W_c = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E_{\max}^2 \cdot a \cdot b \cdot l = 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 24 \cdot (1,2 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,0028 = 0,863 \cdot 10^{-2} \text{ Дж.} \quad (8)$$

Расчет собственной добротности резонатора в виде сегмента коаксиального цилиндра сводится к нахождению запаса энергии в резонаторе и мощности потерь ( $P_0$ ):

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot W / P_0. \quad (9)$$

Мощность потерь зависит от толщины поверхностного слоя ( $\Delta$ , мкм), площади поверхности стенок резонатора ( $S$ , м<sup>2</sup>).

$$\Delta = \frac{66 \cdot \sqrt{\sigma_{cu} / \sigma_{Al}}}{\sqrt{f \text{ (МГц)}}} = \frac{66 \cdot \sqrt{5,8 \cdot 10^7 / 3,5 \cdot 10^7}}{\sqrt{2450}} = 1,716 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \quad (10)$$

Площадь поверхности стенок сегмента кольцевого резонатора

$$S = 2 \cdot \pi \cdot [R \cdot h + R^2 - r^2 + r \cdot h] = 6,28 \cdot [0,4 \cdot 0,612 + 1,53^2 - 0,4^2 + 0,4 \cdot 0,612] = 16,52 \text{ м}^2. \quad (11)$$

$R$ ,  $r$ ,  $h$  – радиусы и высота коаксиального цилиндра, м.

Объем поверхностного слоя во всех стенках резонатора:

$$\Delta \cdot S = 1,716 \cdot 10^{-6} \cdot 16,52 = 28,35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 28,35 \text{ см}^3 \quad (12)$$

Мощность потерь в поверхностном слое (скин-слое):

$$P_0 = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2 \cdot \Delta \cdot S = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1200^2 \cdot 28,35 = 55610 \text{ Вт.} \quad (13)$$

Собственная добротность резонатора:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot W / P_0 = 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 7,13 \cdot 10^{-2} / 55610 = 4731. \quad (14)$$

Итак, собственная добротность резонатора в виде радиального сегмента коаксиального цилиндра составляет в пределах 5000.

Мощность, «генерируемая» в сырье [3, 10]:

$$P_c = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot f \cdot k \cdot E^2 \cdot V_c = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 1200^2 \cdot 0,00135 \cdot 10^4 = 132405 \text{ Вт.} \quad (15)$$

При загрузки резонатора свежесобранной хмелю нагруженная добротность резонатора составляет всего 100:

$$Q_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot W_c / P_c = 6,28 \cdot 2450 \cdot 10^6 \cdot 0,863 \cdot 10^{-2} / 132405 = 100. \quad (16)$$

Далее рассмотрены особенности обеспечения электромагнитной безопасности. Загрузочная емкость расположена на сегменте, где отсутствуют источники электромагнитных излучений, т.е. на сегменте без магнетронов. Но на боковых гранях всех сегментов имеются окна, предусмотренные для передвижения диэлектрической перфорированной кольцевой платформы 9 с сырьем. Через эти окна происходит излучение электромагнитных волн. Для ограничения электромагнитных излучений в открытое пространство, в загрузочной емкости предусмотрена замедляющая система в виде спирального шнека 8, навитой из алюминиевой проволоки круглого поперечного сечения. Она обеспечивает замедление скорости распространения электромагнитных волн [3, 10]. Особенностью спиральной замедляющей системы является слабая зависимость замедления от частоты электромагнитного поля. Замедление электромагнитной волны ( $m$ ) в

направлении продольной оси спирали можно приблизительно определить как отношение длины витка спирали к ее шагу ( $h$ ) намотки:  $m \approx 2 \cdot \pi \cdot b / h$ .

$$m \approx 2 \cdot \pi \cdot b / h = 2 \cdot \pi \cdot 3 / 5 = 3,8. \quad (17)$$

Или точнее по формуле (18):

$$m \approx \frac{\sqrt{(2 \cdot \pi \cdot b)^2 + h^2}}{h}. \quad (18)$$

где  $b$  – радиус спирали по центру поперечного сечения проволоки.

Радиус спирали, и шаг витка выбраны исходя из размеров шишек хмеля (3 и 5 см, соответственно).

$$m \approx \frac{\sqrt{(2 \cdot \pi \cdot b)^2 + h^2}}{h} = \frac{\sqrt{(2 \cdot \pi \cdot 3)^2 + 5^2}}{5} = 3,9. \quad (19)$$

Если диаметр ферромагнитной проволоки мал по сравнению с диаметром спирали, то ее можно рассматривать как цилиндр, проводимость которого бесконечна в направлении витков спирали и равна нулю в поперечном направлении [3, 10]. Правильным подбором радиуса спирали и шага намотки можно обеспечить достаточную эффективность замедления ЭМП, т.е. снижение излучений через загрузочное окно. Расчеты показывают, что почти 4 раза снизится мощность потока излучений через загрузочную емкость, если применить спиральную замедляющую систему. К тому же, свежесобранная хмель имеет влажность до 80 %, а значит, электромагнитное поле замыкается на сырье. Поэтому следует ожидать соблюдение безопасной нормы СВЧ излучения 10 мкВт/см<sup>2</sup> [10].

Замедляющая спираль выполняет одновременно функцию равномерного перемещения сырья из загрузочной емкости на карусельную диэлектрическую платформу в сегменте коаксиального цилиндра. Вместо замедляющей спирали можно рекомендовать применение других конструкций, например «встречные штыри», «гребенка» [3]. При применении замедляющей системы типа «гребенка» интенсивность ЭМП резко падает с удалением от поверхности, и напряженность электрического поля в загрузочной емкости невелика.

Применение керамического отражателя обеспечивает интерференцию когерентных волн [10]. Так, при применении трех магнетронов, результирующую напряженность ЭП можно определить методом векторной диаграммы:

$$E_{рез}^2 = (E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \alpha)^2 + E_3^2 - 2 \cdot (E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \alpha) \cdot E_3 \cdot \cos \alpha, \quad (20)$$

где  $\alpha = 120^\circ - (\varphi_2 - \varphi_1)$ .

В точках пространства резонатора, где разность фаз когерентных волн равна нечетному значению  $\pi$ , результирующая амплитуды будет минимальной и равной

$$E_{рез}^2 = \left[ (E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2) + E_3^2 - 2 \cdot (E_1^2 + E_2^2 - 2 \cdot E_1 \cdot E_2) \cdot E_3 \right]^2. \quad (21)$$

В точках, где разность фаз когерентных волн равна четному числу ( $2m\pi$ ), результирующая амплитуда будет максимальной  $E_{рез} = E_1 + E_2 + E_3$ . (22)

Если напряженность электрического поля от одного источника равна 0,6 кВ/см, то при расположении трех излучателей, результирующая напряженность ЭП может быть 1,8 кВ/см, а это достаточная напряженность для обеззараживания хмеля.

**Выводы.** Разработанная карусельная хмелесушилка СВЧ энергоподводом в резонаторы в виде радиальных сегментов коаксиального цилиндра предназначена для функционирования в условиях хмелеводческих хозяйств и обеспечивает трехэтапную сушку и обеззараживание хмеля в непрерывном режиме при соблюдении электромагнитной безопасности.

Основным типом колебаний в резонаторе в виде сегмента коаксиального цилиндра являются  $E_{010}$  с резонансной частотой 2,445 ГГц и собственной добротностью 5000, максимальной напряженностью электрического поля 1,8 кВ/см. Использование ферромагнитного спирального шнека, выполняющего функцию замедляющей системы, ограничивает излучение через загрузочную емкость в 4 раза.

### Литература

- ГОСТ 32912-2014. Хмелепродукты. Общие технические условия : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2014 г. N 1664-ст : дата введения 2016-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 15 с.
- Патент № 2654805 РФ, МПК F26B 15/04. Карусельная зерносушилка : 2017111431 : заявлено 2017.04.04 : опубликовано 22.05.2018. / Бибик Г.А. – 11 с.
- Баскаков, С. И. Электродинамика и распространения радиоволн : учебное пособие. – Москва : URSS. 2012. – 416 с.
- Дерачиц, Д. С. Моделирование на базе САПР CST Microwave Studio фильтра высоких частот / Д. С. Дерачиц, Н. Н. Кисель, С. Г. Грищенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 3(164). – С. 257-265.

5. Доценко, А. В. Оптимизация параметров установки СВЧ-диэлектрического нагрева, работающий в периодическом режиме // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия : Технические науки. – 2006. – № 40. – С 136-138.
6. Дунаева, Т. Ю. Применение методов математического моделирования для оптимизации сушильных установок СВЧ диэлектрического нагрева / Т. Ю. Дунаева // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 1. – № 1 (10). – С, 137-141.
7. Казарцев Д. А. Разработка общих видов математических моделей сушки пищевых продуктов с СВЧ энергоподводом на основе законов химической кинетики гетерогенных процессов / Д. А. Казарцев. – текст электронный // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2021. – Т. 83. – № 3. – С.17-22. – URL : <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-17-22>. – Текст : электронный
8. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А. А. Курушин., А. Н. Пластиков. – Москва : МЭИ, 2011, – 155 с. – URL : [https://www.studmed.ru/kurushin-a-a-plastikov-a-n-proektirovanie-svch-ustroystv-v-srede-cst-microwave-studio\\_49dc63779b6.html](https://www.studmed.ru/kurushin-a-a-plastikov-a-n-proektirovanie-svch-ustroystv-v-srede-cst-microwave-studio_49dc63779b6.html). – Текст : электронный
9. Падусова, Е. В. Расчет диэлектрических волноводов и объемных резонаторов / Е. В. Падусова С. И. Шарангович. – Томск, 2018. – 103 с.
10. Стрекалов А. В., Стрекалов Ю. А. Электромагнитные поля и волны: учебное пособие / А. В. Стрекалов, Ю. А. Стрекалов. – Москва : РИОР: ИНФРА-М, 2014. – 375 с.
11. Фатеев, А. В. Применение по CST Microwave Studio для расчета микроволновых антенн и устройств СВЧ. Учебное пособие / А. В. Фатеев. – Томск, 2014. – 120 с.
12. Хасанов, А. С. Анализ электромагнитных полей с использованием среды CST Microwave Studio / А. С. Хасанов // XXII. Туполевские чтения. Российский фонд фундаментальных исследований, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева. – Казань : КАИ (КНИТУ-КАИ), 2015. – С. 808-810.
13. Belova, M. V., Mikhailova, O. V., Novikova, G. V., Zaitsev, S. P., Belov, E. L. Development of microwave devices with toroidal resonators for treatment of raw materials // Journal of Environmental Treatment Techniques, 2019, 7(Special Issue), pp. 1215–1223.
14. Prosviryakova, M. V., Storchevoy, V. F., Goryacheva, N. G., Novikova, G. V., Storchevoy, A. V. Continuous-flow hop dryer with endogenous convection heat producers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2022, 1052(1), 012141.
15. Prosviryakova M. V., Ziganshin B. G., Shogenov Yu. Kh., Mikhailova O. V., Tikhonov A .A. Modular microwave installation for heat treatment of raw materials of agricultural enterprises. <https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/abs/2022/11/contents/contents.html>. БИО Веб-сайт конференций. Том 52 (2022). //Международная научно-практическая конференция «Сельское хозяйство и продовольственная безопасность: технологии, инновации, рынки, человеческие ресурсы» (FIES 2022). Казань, Россия, 26-28 мая 2022 г.

#### *Сведения об авторах*

1. **Просвирякова Марьяна Валентиновна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Лиственничная аллея, 6, e-mail: [prosviryakova.maryana@yandex.ru](mailto:prosviryakova.maryana@yandex.ru);
2. **Горячева Наталья Геннадьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры медико-биологической и экологической защиты, Академия гражданской защиты МЧС России, 141435, Московская область, г.о. Химки, микрорайон Новогорск, e-mail: [goryacheva76@mail.ru](mailto:goryacheva76@mail.ru);
3. **Новикова Галина Владимировна**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 606340, г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22 А, E-mail: [NovikovaGalinaV@yandex.ru](mailto:NovikovaGalinaV@yandex.ru);
4. **Сторчевой Владимир Федорович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И.Ф. Бородина, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Лиственничная аллея, 6, e-mail: [energo-air@rgau-msha.ru](mailto:energo-air@rgau-msha.ru);
5. **Селезнева Дарья Михайловна**, старший преподаватель кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов им. академика И.Ф. Бородина, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Лиственничная аллея, 6, e-mail: [energo-dms@rgau-msha.ru](mailto:energo-dms@rgau-msha.ru).

## PREDICTIVE PARAMETERS OF HOP DRYER RESONATORS WITH MICROWAVE POWER SUPPLY

M. V. Prosviryakova<sup>1</sup>, N. G. Goryacheva<sup>2</sup>, G. V. Novikova<sup>3</sup>, V. F. Storchevoy<sup>1</sup>, D. M. Selezneva<sup>1</sup><sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Russian Federation<sup>2</sup>Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia, 141435, Moscow region, Khimki, Russian Federation<sup>3</sup>Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University, 606340, Knyaginino, Russian Federation

**Brief abstract.** For drying freshly harvested hops in hop farms, a carousel hop dryer has been developed using convective heat and microwave energy supply and a certain duty cycle of the technological process to equalize the temperature and humidity of hop cones when moving a dielectric carousel platform through a working chamber formed by radial segments of a coaxial cylinder. The hop dryer is designed taking into account technological, structural and operational requirements. Using the electromagnetic field theory, the following are determined: the main type of oscillations in the resonator; resonant frequency and intrinsic quality factor; accumulated limiting energy; electric field strength; electromagnetic wave deceleration coefficient. In the working chamber, presented as radial segments of a coaxial cylinder, there is a carousel dielectric perforated annular platform with dielectric annular combs. The inner cylinder has air outlets from each segment, and a non-ferromagnetic exhaust fan is located on the upper base of the cylinder. Magnetrons are installed in segments alternating with segments without magnetrons. Above the first segment is a loading tank with a non-ferromagnetic spiral screw. Inside the last segment along the diagonal of the base there is an unloading dielectric axisless screw auger. Convex ceramic reflectors are located inside each resonator, and air ducts from heat guns are directed under the lower bases of the resonators. The main type of oscillations in the resonator in the form of a radial segment of a coaxial cylinder are E010 with a resonant frequency of 2.42 GHz. The self-quality factor of the resonator, calculated through the accumulated limiting energy at an electric field strength (1.2 kV/cm), is 5000.

**Key words:** dielectric platform, ring combs, electrodynamic parameters, process duty cycle, heating-pause, convective heat.

## References

1. GOST 32912-2014. Hmeleprodukty. Obshchie tekhnicheskie usloviya : vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 19 noyabrya 2014 g. N 1664-st : data vvedeniya 2016-01-01. – Moskva : Standartinform, 2019. – 15 s.
2. Patent № 2654805 RF, MPK F26V 15/04. Karusel'naya zernosushilka : 2017111431 : zayavleno 2017.04.04 : opublikovano 22.05.2018. / Bibik G.A. – 11 s.
3. Baskakov, S. I. Elektrodinamika i rasprostraneniya radiovoln : uchebnoe posobie. – Moskva : URSS. 2012. – 416 s.
4. Derachic, D. S. Modelirovanie na baze SAPR CST Microwave Studio fil'tra vysokih chastot / D. S. Derachic, N. N. Kisel', S. G. Grishchenko // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. – 2015. – № 3(164). – S. 257-265.
5. Docenko, A. V. Optimizaciya parametrov ustanovki SVCH-dielektricheskogo nagreva, rabotayushchij v periodicheskom rezhime // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya : Tekhnicheskie nauki. – 2006. – № 40. – S. 136-138.
6. Dunaeva, T. YU. Primenenie metodov matematicheskogo modelirovaniya dlya optimizacii sushil'nyh ustanovok SVCH dielektricheskogo nagreva / T. YU. Dunaeva // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2006. – T. 1. – № 1 (10). – S. 137-141.
7. Kazarcev D. A. Razrabotka obshchih vidov matematicheskikh modelej sushki pishchevyyh produktov s SVCH energopodvodom na osnove zakonov himicheskoy kinetiki geterogennyh processov / D. A. Kazarcev. – tekst elektronnyj // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tekhnologij. – 2021. – T. 83. – № 3. – S.17-22. – URL : <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-17-22> (data obrashcheniya:). – Tekst : elektronnyj
8. Kurushin, A. A. Proektirovanie SVCH ustrojstv v srede CST Microwave Studio / A. A. Kurushin., A. N. Plastikov. – Moskva : MEI, 2011, – 155 s. – URL : [https://www.studmed.ru/kurushin-a-a-plastikov-a-n-proektirovanie-svch-ustrojstv-v-srede-cst-microwave-studio\\_49dc63779b6.html](https://www.studmed.ru/kurushin-a-a-plastikov-a-n-proektirovanie-svch-ustrojstv-v-srede-cst-microwave-studio_49dc63779b6.html) (data obrashcheniya:). – Tekst : elektronnyj
9. Padusova, E. V. Raschet dielektricheskikh volnovodov i ob"emnyh rezonatorov / E. V. Padusova S. I. SHarangovich. – Tomsk, 2018. – 103 s.
10. Strekalov A. V., Strekalov YU. A. Elektromagnitnye polya i volny: uchebnoe posobie / A. V. Strekalov, YU. A. Strekalov. – Moskva : RIOR: INFRA-M, 2014. – 375 s.
11. Fateev, A. V. Primenenie po CST Microwave Studio dlya rascheta mikrovolnovykh antenn i ustrojstv SVCH. Uchebnoe posobie / A. V. Fateev. – Tomsk, 2014. – 120 s.
12. Hasanov, A. S. Analiz elektromagnitnykh polej s ispol'zovaniem sredy CST Microwave Studio / A. S. Hasanov // HKHII. Tupolevskie chteniya. Rossijskij fond fundamental'nyh issledovanij, Kazanskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet im. A. N. Tupoleva. – Kazan' : KAI (KNITU-KAI), 2015. – S. 808-810.

13. Belova, M. V., Mikhailova, O. V., Novikova, G. V., Zaitsev, S. P., Belov, E. L. Development of microwave devices with toroidal resonators for treatment of raw materials // Journal of Environmental Treatment Techniques, 2019, 7(Special Issue), pp. 1215–1223.

14. Prosviryakova, M. V., Storchevoy, V. F., Goryacheva, N. G., Novikova, G. V., Storchevoy, A. V. Continuous-flow hop dryer with endogenous convection heat producers // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2022, 1052(1), 012141.

15. Prosviryakova M. V., Ziganshin B. G., Shogenov Yu. Kh., Mikhailova O. V., Tikhonov A. A. Modular microwave installation for heat treatment of raw materials of agricultural enterprises. <https://www.bioconferences.org/articles/bioconf/abs/2022/11/contents/contents.html>. BIO Veb-sajt konferencij. Tom 52 (2022). //Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Sel'skoe hozyajstvo i prodovol'stvennaya bezopasnost': tekhnologii, innovacii, rynki, chelovecheskie resursy» (FIES 2022). Kazan', Rossiya, 26–28 maya 2022 g.

#### Information about authors

1. **Prosviryakova Maryana Valentinovna**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named K. A. Timiryazev, 127550, Moscow, Listvennichnaya Alleya, 6; e-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru;

2. **Goryacheva Natalya Gennadievna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Biomedical and Environmental Protection, Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergencies of Russia, 141435, Moscow region, Khimki, Novogorsk microdistrict; e-mail: goryacheva76@mail.ru;

3. **Novikova Galina Vladimirovna**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Nizhny Novgorod State Engineering and Economics University, 606340, Nizhny Novgorod Region, Knyaginino, st. Oktyabrskaya, 22 A; e-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru;

4. **Storchevoy Vladimir Fedorovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Listvennichnaya Alleya, 6; e-mail: energo-air@rgau-msha.ru;

5. **Selezneva Daria Mikhailovna**, Senior Lecturer, Department of Automation and Robotization of Technological Processes named after Academician I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Listvennichnaya Alleya, 6; e-mail: energo-dms@rgau-msha.ru.

УДК 631.37

DOI:

### АНАЛИЗ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИЗНОСА И СПОСОБ РЕМОНТА ДИСКОВ КОЛЕС ТРАКТОРА

**П. А. Смирнов, М. П. Смирнов, В. П. Егоров**

*Чувашский государственный аграрный университет  
428003, г. Чебоксары, Российская Федерация*

**Аннотация.** Животноводческие помещения с остаточным ресурсом оказались весьма востребованными малым и средним бизнесом на селе. Реконструкция проводится, как правило, хозяйственным способом под современную механизированную раздачу кормов тракторными агрегатами. Однако приближенные строительные расчеты параметров трансформируемого здания и без учета параметров кинематики тракторного агрегата приводят к уменьшенным показателям по ширине проездов (проходов) внутри здания, а они в свою очередь – к интенсивному износу боковой поверхности шин и дисков колес о бетонные отбойники. Точно такая же картина наблюдается на современных уплотненных застройках жилых микрорайонов городов, где также наблюдается интенсивный износ узлов ходовой части коммунальных тракторных агрегатов. Положение существенно усложняется отсутствием отечественных малогабаритных тракторов тягового класса 6,0 и 9,0 кН. Использование вместо них тракторов тягового класса 14 кН также потребует еще большего увеличения ширины проходов. В статье изложены теоретические предпосылки возникновения износа, предложения проектировщикам и строителям по расчету проходов и зоны поворотов тракторных агрегатов. Предложен метод устранения износа и усиления дисков колес сваркой кольца, изготовленного из стального прутка. Для задних дисков потребуется прутки диаметром сечения 18 мм, на диски передних колес рекомендуется прутки диаметром 14 мм. Сварка к изношенному ободу проводится с двух сторон прутка, возможна как ручной дуговой, так и полуавтоматической сваркой в среде защитного газа. Во время сварки рекомендована проверка биения диска непосредственно на тракторе. При соблюдении рекомендаций и последовательности проведения сварки радиальное биение возможно в пределах 8...12 мм, боковое – до 15 мм. Для предотвращения среза корпуса золотника камеры предложено приварить к монтажному отверстию диска вставку в виде тонкостенного цилиндра. Проведенные мероприятия по