



**М.В. Просвирякова¹,
Н.Г. Горячева²,
В.Ф. Сторчевой¹, ✉
О.В. Михайлова³,
Г.В. Новикова³,
Н.К. Кириллов⁴**

¹ Российский государственный аграрный университет — МСХА им К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

² Академия гражданской защиты МЧС России, Химки, Московская область, Российская Федерация

³ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

⁴ Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Российская Федерация

✉ v.storchevoy@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию:
30.07.2022

Одобрена после рецензирования:
29.09.2022

Принята к публикации:
27.10.2022



**Mariana V. Prosviryakova¹,
Natalia G. Goryacheva²,
Vladimir F. Storcheva¹, ✉
Olga V. Mikhailova³,
Galina V. Novikova³,
Kirillov N. Kirillovich⁴**

¹ Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

² Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Khimki, Moscow Region, Russian Federation

³ Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

⁴ Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russian Federation

✉ v.storchevoy@rgau-msha.ru

Received by the editorial office:
30.07.2022

Accepted in revised:
29.09.2022

Accepted for publication:
27.10.2022

Разработка хмелесушилки непрерывно-поточного действия с энергоподводом

РЕЗЮМЕ

Введение. Производство хмеля в РФ составляет в среднем 116 тыс. т с 54 тыс. га. Используемая в технологической линии сушки хмеля хмелесушилка ХС-400 является энергоемкой. Концепцией развития хмелеводства в Чувашской Республике (ЧР) на 2020–2025 годы, утвержденной распоряжением Кабинета министров ЧР от 20.08.2020 за номером 738-р, предусмотрено освоение до 45–50 га новых площадей под хмель, из расчета 15–17 га на одну хмелесушилку ХС-400. Для расширения производства хмеля необходимо эффективное освоение инновационных технологий и установок для сушки свежесобранного хмеля, не уступающих по технико-экономическим параметрам зарубежным аналогам. Разработка хмелесушилки, обеспечивающей обезвоживание и обеззараживание свежесобранного хмеля, сохраняющей потребительские свойства при сниженных эксплуатационных затратах, является актуальной в настоящее время.

Методика. Провели анализ электрофизических параметров шишек хмеля (по методике Рогова) в зависимости от частоты электромагнитного поля, влажности и температуры, теоретически исследовали теплообменные процессы при подводе конвективного тепла в объемный резонатор СВЧ-установки, определили эффективные технологические параметры хмелесушилки. Исследования напряженности электромагнитного поля, плотности тока, собственной добротности резонаторов проводили в программе трехмерного компьютерного моделирования CST Studio Suite 2017 и ее подпрограмме CST Microwave Studio.

Результаты. Разработана многорезонаторная хмелесушилка с энергоподводом в электромагнитном поле. Предлагаемая хмелесушилка содержит последовательно расположенные в горизонтальной плоскости резонаторы с криволинейными поверхностями, состыкованные через керамические двояковыпуклые перфорированные плиты. Собственная добротность эллиптического тороидального резонатора составляет 14600, треугольного призматического резонатора — в пределах 9000–1200 в зависимости от степени вогнутости верхней грани. Произведен расчет производительности установки, которая достигает 180–200 кг/ч при мощности 15,66 кВт, что позволило определить энергетические затраты — 0,1 кВт·ч/кг.

Ключевые слова: многорезонаторная хмелесушилка, свежесобранный хмель, треугольный призматический и эллиптический тороидальный резонатор, радиопрозрачный транспортер, керамическая двояковыпуклая перфорированная четырехгранная плита

Для цитирования: Просвирякова М.В., Горячева Н.Г., Сторчевой В.Ф., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Кириллов Н.К. Разработка хмелесушилки непрерывно-поточного действия с энергоподводом. *Аграрная наука.* 2022; 364 (11): 110–116. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-110-116>

© Просвирякова М.В., Горячева Н.Г., Сторчевой В.Ф., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Кириллов Н.К.

Development of a continuous operation hop-kiln with power supply

ABSTRACT

Introduction. Hop production in the Russian Federation averages 116 thousand tons from 54 thousand hectares. The HS-400 hop-kiln used in the hop drying process line is energy-intensive. The concept of hop growing development in the Chuvash Republic for 2020–2025, approved by the decree of the Cabinet of Ministers of the Chuvash Republic (dated 20.08.2020 No. 738-r), provides for the development of up to 45–50 hectares of new areas for hop, at the rate of 15–17 hectares per one hop-kiln HS-400. To expand the production of hop, it is necessary to effectively master innovative technologies and installations for drying freshly harvested hop that are not inferior in technical and economic parameters of foreign analogues. The development of a hop-kiln that provides dehydration and disinfection of freshly harvested hop, pre-serves consumer properties with reduced operating costs, is currently relevant.

Methodology. The electrophysical parameters of hop cones (according to the Rogov method) were analyzed depending on the frequency of the electromagnetic field, humidity and temperature, heat and mass transfer processes during the supply of convective heat to the volumetric resonator of the microwave installation were theoretically investigated, and the effective technological parameters of the hop-kiln were determined. Studies of the electromagnetic field strength, current density, and intrinsic Q-factor of resonators were carried out in the CST Studio Suite 2017 three-dimensional computer modeling program and its CST Microwave Studio subprogram.

Results. A multi-resonator hop-kiln with an energy supply in an electromagnetic field has been developed. The proposed hop-kiln contains resonators sequentially arranged in a horizontal plane with curved surfaces, docked through ceramic biconvex perforated plates. The design and technological scheme of the hop-kiln has been developed. The intrinsic Q-factor of elliptical toroidal resonator is 14600, of triangular prismatic resonator — in the range of 9000–1200, depending on the degree of concavity of the upper face. The calculation of the installation productivity amounts to 180–200 kg/h with a power of 15.66 kW, which made it possible to determine energy costs — to 0.1 kWh/kg.

Key words: multi-cavity hop-kiln, freshly harvested hop, triangular prismatic and elliptical toroidal resonators, radio-transparent conveyor, ceramic biconvex perforated square plate

For citation: Prosviryakova M.V., Goryacheva N.G., Storcheva V.F., Mikhailova O.V., Novikova G.V., Kirillov N.K. Development of a continuous operation hop-kiln with power supply. *Agrarian science.* 2022; 364 (11): 110–116. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-110-116> (In Russian).

© Prosviryakova M.V., Goryacheva N.G., Storcheva V.F., Mikhailova O.V., Novikova G.V., Kirillov N.K., Semenov A.A.

Введение / Introduction

Мировое производство хмеля в 2020 году составило 116000 т. Крупнейшими производителями хмеля являются Эфиопия (40074 т в год, площадь 31367 га) и США (39526 т в год, площадь 20581 га). Россия занимает 21-е место [1]. Объемы производства хмеля на площади в 544 га в России составляют 0,32–0,4 тыс. т, это не более 4% от потребительского рынка (10–11 тыс. т). Основной регион в России, где валовый сбор хмеля достигает 90% — это Чувашская Республика (ЧР). Урожайность хмеля в ЧР составляет 15–19 ц/га. Концепцией развития хмелеводства в ЧР на 2020–2025 годы, утвержденной распоряжением Кабинета министров ЧР от 20.08.2020 за номером 738-р, предусмотрено освоение до 45–50 га новых площадей под хмель, из расчета 15–17 га на одну хмелесушилку, и закупка хмелесушилки ХС-400. Многие агротехнические мероприятия по возделыванию хмеля механизированы, хмелесушилки ХС-400 работают с использованием конвективного тепла [2]. Такие хмелесушилки достаточно энергоемкие и не сохраняют потребительские свойства хмеля из-за длительности процесса сушки. Нагретый до 65 °С воздух не прекращает развитие микрофлоры, поэтому потребительские показатели снижаются. Для расширения производства хмеля необходимо эффективное освоение инновационных технологий и установок для сушки свежесобранного хмеля, не уступающих по технико-экономическим параметрам зарубежным аналогам.

В авторском свидетельстве № 1220605 [3] описаны технология и установка по сушке свежесобранного хмеля в электромагнитном поле высокой частоты. В установке заложен принцип поэтапного удаления влаги из шишек хмеля, находящихся в трех попарно расположенных рабочих конденсаторах. Такая технология обеспечивает равномерную сушку хмеля с начальной влажностью 75–82% при чередовании цикла нагрева с циклом охлаждения. Но в высокочастотном диапазоне сложно обеспечить электромагнитную безопасность при непрерывном режиме работы установок, и напряженность электрического поля недостаточная для снижения бактериальной обсемененности сырья.

Характерной особенностью конвективного и кондуктивного способов теплообмена является превалирование радиационного излучения. А при оценке параметров СВЧ-установок радиационным излучением можно пренебречь. Поэтому разработка хмелесушилки непрерывно-поточно-го действия, обеспечивающей поэтапное обезвоживание и обеззараживание свежесобранного хмеля, сохранение потребительских свойств при сниженных эксплуатационных затратах путем энергоподвода в электромагнитном поле сверхвысокой частоты, *актуальна*.

Материал и методы исследования /

Materials and method

Анализировали электрофизические параметры шишек хмеля (по методике Рогова) в зависимости от частоты электромагнитного поля [4], влажности и температуры, теоретически исследовали тепломассообменные процессы при подводе конвективного тепла в объемный резонатор СВЧ-установки и определили эффективные технологические параметры хмелесушилки.

Исследования напряженности электромагнитного поля, плотности тока, собственной добротности резонаторов проводили в программе трехмерного компьютерного моделирования CST Studio Suite 2017 и ее подпрограмме CST Microwave Studio.

Результаты и обсуждение /

Results and discussion

Разработка многорезонаторной хмелесушилки непрерывно-поточного действия с энергоподводом в электромагнитном поле с маломощными магнетронами и с обоснованным конструкционным исполнением для сушки свежесобранного хмеля позволит обеспечить высокую напряженность электрического поля и электромагнитную безопасность без экранирующего корпуса.

Многорезонаторная хмелесушилка с энергоподводом в электромагнитном поле (рис. 1) содержит последовательно состыкованные объемные неферромагнитные резонаторы нетрадиционных конструкций.

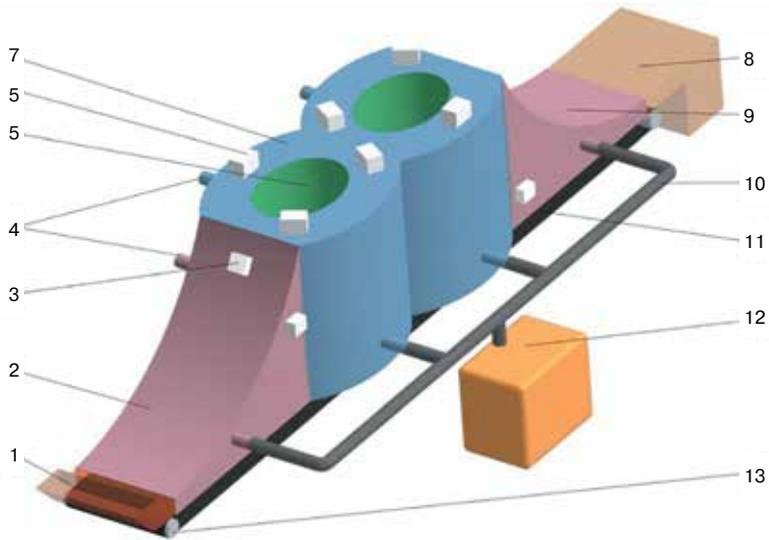
Ко всем неферромагнитным резонаторам подведены воздухопроводы 10 с возможностью регулирования расхода воздуха и воздухоотводы 4, соединенные с теплового пушкой 12, позволяющей регулировать температуру и расход воздуха. Каждое пространство между керамической двояковыпуклой перфорированной четырехгранной плитой и неферромагнитной поверхностью выполняет функцию *металлодиэлектрического* резонатора.

Первый резонатор (на рисунке 1 обозначен номером 2) и последний резонатор (на рисунке 1 обозначен номером 9) выполнены в виде треугольных призматических резонаторов с вогнутыми гранями. Расположенные в середине сушильной установки соосно установленные неферромагнитные эллиптические цилиндры 5, 7 выполнены в виде П-образных тороидальных резонаторов, то есть они собраны из соосно расположенных эллиптических наружных цилиндров 7 с вырезанными боковыми поверхностями и внутренних неферромагнитных эллиптических резонаторов 5. Причем эллипс симметричен относительно горизонтальной и вертикальной осей. Боковые поверхности наружных эллиптических неферромагнитных цилиндров вырезаны по горизонтальной оси эллипса.

Все неферромагнитные резонаторы состыкованы между собой через керамические двояковыпуклые перфорированные четырехгранные плиты 14. Между нижними основаниями соосно расположенных эллиптических неферромагнитных наружных и внутренних цилиндров имеется промежуток, образующий конденсаторную часть каждого тороидального резонатора. При этом нижние основания внутренних эллиптических резонаторов перфорированы. В местах стыка резонаторов участки боковой поверхности наружных эллиптических цилиндров вырезаны, и в углубления установлены керамические двояковыпуклые перфорированные четырехгранные плиты, ширина отверстий в которых равна ширине транспортера, а высота — равной высоте прорезей 16, на треугольных призматических резонаторах. Прорези сделаны на уровне критических сечений, за пределами которых излучения нет. Над рабочей ветвью установлен сеточный радиопрозрачный ограничитель 15. Через двояковыпуклые керамические плиты и неферромагнитные резонаторы проложена рабочая ветвь сеточного радиопрозрачного транспортера 11. Электропривод 13 транспортера расположен вне сушилки. Загрузочная емкость 1 пристыкована к первому треугольному призматическому неферромагнитному резонатору 2, а выгрузная емкость — ко второму аналогичному резонатору 9. Маломощные (700–850 Вт, частота 2450 МГц, длина волны 12,24 см) магнетроны 6, 3 с воздушным охлаждением прикреплены с наружных сторон к поверхности тороидальных резонаторов со сдвигом на 120 градусов, а к треугольным призматическим

Рис. 1. Многорезонаторная хмелесушилка с энергоподводом в электромагнитном поле: 1 — загрузочная емкость с заслонкой; 2, 9 — треугольные призматические резонаторы с вогнутой гранью; 3 — магнетроны на призматических резонаторах; 4 — воздухоотводы; 5 — внутренние эллиптические цилиндры; 6 — магнетроны на тороидальных резонаторах; 7 — наружный эллиптический цилиндр; 8 — выгрузная емкость; 10 — воздухопровод; 11 — сеточный радиопрозрачный транспортер; 12 — тепловая пушка; 13 — электропривод транспортера; 14 — керамическая двояковыпуклая перфорированная четырехгранная плита; 15 — радиопрозрачный сеточный ограничитель; 16 — прорезь

Fig. 1. Multi-cavity hop-kiln with power supply in an electromagnetic field: 1 — loading container with a flap; 2, 9 — triangular prismatic resonators with a concave face; 3 — magnetrons on prismatic resonators; 4 — air vents; 5 — internal elliptical cylinders; 6 — magnetrons on toroidal resonators; 7 — external elliptical cylinder; 8 — discharge tank; 10 — air duct; 11 — mesh radio-transparent conveyor; 12 — heat gun; 13 — electric conveyor drive



резонаторам 2, 9 — на все наружные грани в области стыка резонаторов.

Свежеубранный хмель в ЭМПСВЧ нагревается эндогенно, внутренняя влага за счет градиента температуры стремится к наружной поверхности хмеля и удаляется теплым воздухом конвективным способом через соответствующие воздухоотводы 4 и через перфорированные основания внутренних эллиптических цилиндров 5.

В процессе нагрева сырья в ЭМПСВЧ устанавливается положительный градиент по его сечению (температура на поверхности сырья за счет испарения оказывается ниже, чем внутри) и, следовательно, влажностное и температурное поле направлены в одну сторону, что также ускоряет процесс испарения влаги, сокращает продолжительность сушки и сохраняет потребительские свойства хмеля. В каждом резонаторе имеются датчики влажности и температуры, позволяющие контролировать режим обезвоживания хмеля. Температура воздуха на выходе калорифера регулируется до 70 °С, в том числе с помощью регулятора напряжения.

Благодаря высокой напряженности электрического поля сырье обеззараживается в процессе обезвоживания. Высушенный в щадящем режиме с сохранением потребительских свойств хмель выгружается через прорезь 16 в выгрузную емкость 8. После окончания процесса сушки в первую очередь выключают генераторы 3, 6 и калорифер. Далее останавливают транспортер 11 и в последнюю очередь выключают вентилятор 12.

Известно, что тороидальный резонатор обеспечивает меньшие потери. На частоте 2450 МГц поглощение энергии близко к максимальному, что обеспечивает хорошее преобразование электромагнитной энергии в тепловую энергию.

Использование треугольных призматических резонаторов повышает радиационную добротность (то есть обусловленную потерями на излучение). От высоты призмы и вогнутости верхней грани зависят продольные координаты критического сечения [5]. В таких резонаторах существуют волны, постоянные пространства которых уменьшаются в зависимости от вогнутости грани. Прорезь на стыке вогнутой грани и основания призмы следует делать на уровне поверхности, от которой наблюдается полное отражение волн (на уровне критического сечения). Тогда соблюдается электромагнитная безопасность при работе СВЧ-установки непрерывно-поточного действия.

Использование керамических двояковыпуклых перфорированных четырехгранных плит 14 как части резонаторов позволяет поддерживать свободные электромагнитные колебания разных видов, удовлетворяющие условиям границы раздела «сырье — воздух», то есть условиям полного внутреннего отражения (малые радиационные потери) при диэлектрической проницаемости (5,2) большей, чем у фторопласта (2,2). Керамика обладает малыми

тепловыми потерями, так как тангенс угла диэлектрических потерь всего $3 \cdot 10^{-3}$, следовательно, собственная добротность всех проектируемых резонаторов выше, чем без керамических двояковыпуклых поверхностей. Падающие и отраженные волны фокусируются в определенных местах выпуклости плиты в зависимости от расположения излучателей.

Суммарный коэффициент поглощения энергии достигает максимального значения в тех зонах резонаторов, где падающий, отраженный и боковой потоки энергии соизмеримы. Концентрация энергии электромагнитного поля в объеме резонатора и уменьшение потерь на излучение достигается благодаря применению двояковыпуклой керамической плиты. Перфорация двояковыпуклых плит обеспечивает циркуляцию воздуха. При проектировании объемных резонаторов надо, чтобы размеры их обеспечивали совпадение спектра возбуждаемых в них частот многомодового электромагнитного поля стоячих волн со спектром частот аномальных дисперсий свободной и связанной влаги на различных этапах ее удаления из хмеля [6].

Для обеспечения технологического режима сушки свежеубранного хмеля рабочая камера собрана из последовательно соединенных резонаторов разной конструкции. В первом резонаторе сырье, выровненное по толщине, подвергается воздействию ЭМПСВЧ и обдувается теплым воздухом. При этом через слой хмеля проходит подогретый воздух, подаваемый тепловой пушкой через воздухопровод 10 под сеточный радиопрозрачный транспортер. Происходит частичное удаление влаги с наружной поверхности сырья и нагрев до 31–34 °С. Далее слой хмеля попадает в процессе передвижения транспортера в эллипсоидный тороидальный резонатор, где хмель нагревается до температуры 41–

46 °С; при такой температуре из шишек хмеля начинает выделяться свободная влага, которая удаляется теплым воздухом. Во втором тороидальном резонаторе шишки хмеля нагреваются до температуры 55–60 °С, достаточной для удаления физико-химической связанной воды. В третьем призматическом резонаторе шишки хмеля нагреваются до температуры 75 °С, высыхают до влажности 8–9% и попадают в выгрузную емкость 8.

Проанализированы изменения электрофизических параметров хмеля в процессе сушки [7]. Получены зависимости диэлектрической проницаемости (ϵ), фактора диэлектрических потерь (k), объемной плотности (ρ), теплоемкости (c) от влажности хмеля (10–80%):

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,91 \cdot e^{0,044W}, k = 0,664 \cdot e^{0,044W}, \\ \rho &= 1,8 \cdot W^{1,08}, c = 0,76 \cdot W^{0,34}. \end{aligned} \quad (1)$$

На основе этих данных согласована мощность, генерируемая в единице объема сырья в каждом резонаторе в процессе обезвоживания хмеля. Производительность хмелесушилки можно изменять, варьируя количество эллипсоидных тороидальных резонаторов, мощность генераторов, калорифера и производительность вентилятора. Для обеспечения сушки хмеля в более щадящем режиме рекомендуется использовать несколько тороидальных резонаторов, где доза воздействия регулируется мощностью генераторов в процессе обезвоживания хмеля.

Для оценки эффективности конструкционного исполнения хмелесушилки непрерывно поточного действия с нетрадиционными резонаторами, обеспечивающими разную дозу воздействия ЭМП СВЧ, вычислена их собственная добротность, определена возможность возбуждения электрического поля высокой напряженности, согласованной с объемами резонаторов и мощностью генераторов.

Собственная добротность резонатора определена как отношение энергии электромагнитного поля, запасенной в резонаторе, к энергии, теряемой за период собственных колебаний [8]. Запас энергии в резонаторе пропорционален его объему. Энергия потерь пропорциональна объему, в котором они происходят. Для практических расчетов значения собственной добротности резонатора можно пользоваться формулой, характеризующей отношением емкости к площади поверхности резонатора с учетом толщины поверхностного слоя (скин-слоя).

Собственная добротность тороидального резонатора с круглым основанием:

$$Q \approx \frac{2 \cdot V_{кр}}{\Delta \cdot S_{кр}} \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot (R^2 \cdot H - r^2 \cdot h)}{\Delta \cdot 2\pi \cdot (R^2 + R \cdot H + r \cdot h)} \approx \frac{(R^2 \cdot H - r^2 \cdot h)}{\Delta \cdot (R^2 + R \cdot H + r \cdot h)}, \quad (2)$$

где $S_{кр}$, $V_{кр}$ — площадь поверхности и объем тороидального резонатора соответственно; R , H — радиус и высота эллиптического наружного цилиндра; r , h — радиус и высота эллиптического внутреннего цилиндра; Δ — толщина поверхностного слоя (скин-слоя); для немагнитных материалов, например для алюминия, $\Delta = 1,72 \cdot 10^{-5}$ м.

Площадь поверхности и объем тороидального резонатора с круглым основанием:

$$S_{кр} = 2\pi \cdot (R^2 + RH + rh), \quad V_{кр} = \pi \cdot (R^2 \cdot H - r^2 \cdot h). \quad (3)$$

Собственная добротность эллиптического тороидального резонатора:

где S_1 — площадь основания наружного эллиптического цилиндра, $S_1 = \pi \cdot A \cdot B$.

$$B = A \cdot \left[2,28 \cdot \left(\frac{B}{A} \right)^{1,44} + 4 \right], \quad S_1 = \pi \cdot A^2 \cdot \left[2,28 \cdot \left(\frac{B}{A} \right)^{1,44} + 4 \right]. \quad (4)$$

Площадь основания внутреннего эллиптического цилиндра: $S_2 = \pi \cdot a \cdot b$,

a , b — длина малой и большой оси соответственно.

$$b = a \cdot \left[2,28 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^{1,44} + 4 \right], \quad S_2 = \pi \cdot a^2 \cdot \left[2,28 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^{1,44} + 4 \right]. \quad (5)$$

Площадь боковой поверхности внутреннего эллиптического цилиндра:

$$S_{вн} = h \cdot \pi \cdot a^2 \cdot \left[2,28 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^{1,44} + 4 \right]. \quad (6)$$

Площадь боковой поверхности наружного эллиптического цилиндра:

$$S_{нар} = H \cdot \pi \cdot A^2 \cdot \left[2,28 \cdot \left(\frac{B}{A} \right)^{1,44} + 4 \right]. \quad (7)$$

Кольцевая площадь: $S_2 - S_1 = \pi \cdot (AB - ab)$.

Объем эллиптического тороидального резонатора:

$$V_{элл} = \pi \cdot (A \cdot B \cdot H - a \cdot b \cdot h). \quad (8)$$

Общая площадь эллипсоидного тороидального резонатора:

$$\begin{aligned} S_{общ} &= \pi \cdot \left[H \cdot A^2 \cdot \left(2,28 \cdot \left(\frac{B}{A} \right)^{1,44} + 4 \right) + \right. \\ &\left. + h \cdot a^2 \cdot \left(2,28 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^{1,44} + 4 \right) + (AB - ab) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Собственная добротность эллиптического тороидального резонатора:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (A \cdot B \cdot H - a \cdot b \cdot h)}{\Delta \cdot \pi \cdot \left[H \cdot A^2 \cdot \left(2,28 \cdot \left(\frac{B}{A} \right)^{1,44} + 4 \right) + h \cdot a^2 \cdot \left(2,28 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^{1,44} + 4 \right) + (A \cdot B - a \cdot b) \right]}. \quad (10)$$

Проектируемый резонатор имеет размеры: $B = 1,2$ м, $A = 0,9$ м, $b = 0,5$ м, $a = 0,4$ м, $H = 0,9$ м, $h = 0,6$ м.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (0,9 \cdot 1,2 \cdot 0,9 - 0,4 \cdot 0,5 \cdot 0,6)}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot \pi \cdot \left[0,9 \cdot 0,9^2 \cdot \left(2,28 \cdot \left(\frac{1,2}{0,9} \right)^{1,44} + 4 \right) + 0,6 \cdot 0,4^2 \cdot \left(2,28 \cdot \left(\frac{0,5}{0,4} \right)^{1,44} + 4 \right) + (0,9 \cdot 1,2 - 0,4 \cdot 0,5) \right]} = 14600.$$

$$V_{элл} = \pi \cdot (A \cdot B \cdot H - a \cdot b \cdot h); \quad V_{элл} = 5,35 \text{ м}^3. \quad (11)$$

Сравнение значений собственной добротности традиционного и эллиптического резонаторов проводим при равных объемах $5,35 \text{ м}^3$. Для этого вычислим радиусы внутреннего и наружного цилиндров с круглым сечением в соответствии с формулой:

$$V_{кр} = \pi \cdot (R^2 \cdot H - r^2 \cdot h). \quad 5,35 = \pi \cdot (R^2 \cdot 0,9 - r^2 \cdot 0,6). \quad (12)$$

Зная собственную добротность и объем резонатора, можно приблизительно вычислить напряженность электрического поля по формуле [9]:

$$E = \sqrt{\frac{k \cdot P \cdot Q}{0,27 \cdot \varepsilon_0 \cdot V \cdot \omega}},$$

$$E = \sqrt{\frac{3 \cdot 850 \cdot 14600}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,15 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6}} = 82 \cdot 10^3 \text{ В/м}, \quad (13)$$

где k — количество генераторов, шт.; P — мощность генератора, Вт; Q — добротность резонатора; ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; V — объем конденсаторной части резонатора, где концентрируется электрическое поле, м^3 ; ω — угловая частота СВЧ-излучения, $\omega = 2 \pi f$, 1/с.

При собственной добротности, равной 14600, в конденсаторной части эллиптического тороидального резонатора объемом $0,15 \text{ м}^3$ можно обеспечить напряженность электрического поля $0,82 \text{ кВ/см}$, что недостаточно для снижения бактериальной обсемененности хмеля. Поэтому следует часть боковой поверхности заменить керамическими двояковыпуклыми четырехгранными плитами. Это ненамного изменит объем и площадь поверхности тороидального резонатора, но обеспечит концентрацию электромагнитных волн и высокую напряженность электрического поля.

Результатом является определение собственной добротности усеченного *треугольного призматического резонатора* через площадь и объем. Площадь поверхности резонатора:

$$S_{ус.призмы} = H \cdot (b + a) + a \cdot (c - h) = H \cdot (b + a) + a \cdot (\sqrt{b^2 + H^2} - h), \quad (14)$$

где H , b , a — высота, длина, ширина резонатора соответственно, м; h — высота прорези, м; c — гипотенуза треугольника, $c = \sqrt{b^2 + H^2}$. $b = 1,2 \text{ м}$, $H = 0,9 \text{ м}$, $a = 0,7 \text{ м}$; $h = 0,1 \text{ м}$.

$$S_{ус.призмы} = 0,9 \cdot (1,2 + 0,7) + 0,7 \cdot (\sqrt{1,2^2 + 0,9^2} - 0,1) = 3,215 \text{ м}^2. \quad (15)$$

Объем усеченного *треугольного призматического резонатора*

$$V_{ус.призмы} = \frac{b \cdot H \cdot a}{2} - \frac{a \cdot h \cdot h_1}{2} = \frac{1,2 \cdot 0,9 \cdot 0,7}{2} - \frac{0,7 \cdot 0,1 \cdot 0,1}{2} = 0,371 \text{ м}^3. \quad (16)$$

$$Q \approx \frac{2 \cdot V}{\Delta \cdot S} \approx \frac{2 \cdot 0,371}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 3,215} = 13418. \quad (17)$$

С учетом вогнутой грани призматического резонатора можно считать, что объем уменьшается на 5%, ($0,353 \text{ м}^3$), а площадь поверхности увеличивается до $3,376 \text{ м}^2$, тогда собственная добротность *треугольного призматического резонатора* с вогнутой гранью составляет:

$$Q \approx \frac{2 \cdot V}{\Delta \cdot S} \approx \frac{2 \cdot 0,353}{1,72 \cdot 10^{-5} \cdot 3,376} = 12158. \quad (18)$$

Собственная добротность *треугольного призматического резонатора* около 12000, средняя напряженность электрического поля в нем $0,49 \text{ кВ/см}$.

$$E = \sqrt{\frac{3 \cdot 850 \cdot 12000}{0,27 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,353 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2450 \cdot 10^6}} = 48,56 \cdot 10^3 \text{ В/м}. \quad (19)$$

Объемная плотность мощности потерь СВЧ-энергии в сырье P [9] пропорциональна квадрату напряженности электрического поля E , частоте поля f , фактору диэлектрических потерь сырья $k = 0,664 \cdot e^{0,044W}$:

$$P = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot \omega}{4 \cdot \pi} = \frac{E^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot 0,664 \cdot e^{0,044W} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}{4 \cdot \pi} = \frac{E^2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,664 \cdot e^{0,044W} \cdot 2450 \cdot 10^6}{2} = 7199 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0,044W} \cdot E^2 \text{ В/м}^3. \quad (20)$$

В процессе обезвоживания хмеля плотность мощности потерь СВЧ-энергии уменьшается (рис. 2).

Эти значения совпадают с данными, приведенными Корчагиным Ю.В. [9].

Ожидаемая производительность СВЧ-установки при мощности генераторов $10,2 \text{ кВт}$, вентиляторов для охлаждения магнетронов $0,96 \text{ кВт}$, тепловой пушки 4 кВт , мотора-редуктора для привода транспортера $0,5 \text{ кВт}$ составляет $180\text{--}200 \text{ кг/ч}$. Общая мощность установки — $15,66 \text{ кВт}$, удельные энергетические затраты — $0,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$.

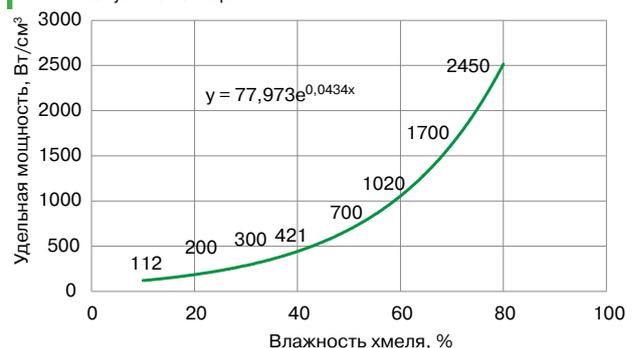
Для сравнения, технические характеристики *хмелесушилки ХС-400*: производительность по сырому хмелю до 400 кг/ч ; площадь поверхности сушки 155 м^2 ; площадь поверхности камеры для отлежки 25 м^2 ; расход воздуха $53000 \text{ м}^3/\text{ч}$; мощность электродвигателей $37,9 \text{ кВт}$ [10].

Качество резонаторов анализируется с учетом собственной добротности, показателя, характеризующего густоту спектра колебаний в них; уровня мощности; технологичности; надежности; радиогерметичности; многомодовости.

На собственную добротность *металлодиэлектрического резонатора* влияют следующие источники потерь: диэлектрические потери в объеме хмеля, оцениваемые фактором диэлектрических потерь; потери, обусловленные рассеянием энергии в близлежащем к диэлек-

Рис. 2. Изменение плотности мощности потерь СВЧ энергии в процессе обезвоживания хмеля

Fig. 2. Change in the power density of microwave energy losses during the dehydration of hop



трическому элементу пространстве, где локализована электромагнитная энергия системы; потери, обусловленные проводимостью неферромагнитного корпуса резонатора; потери из-за рассеяния электромагнитной энергии в перфорациях на поверхности плиты и др.

Все перечисленные потери в разной степени влияют на добротность резонаторов, но, независимо от конфигураций резонаторов, диэлектрические потери хмеля основные. Излучение двояковыпуклой керамической перфорированной плиты учитывается понятием радиационной добротности. Чем больше значение собственной добротности металлодиэлектрического резонатора, тем лучше частотная избирательность.

Особенностью металлодиэлектрического резонатора сантиметрового диапазона как распределенной колебательной системы является многомодовость.

К числу других показателей качества резонаторов относятся: допустимый уровень мощности, технологичность, надежность, радиогерметичность. Поэтому в зависимости от конкретных технических и технологических требований для обоснованного выбора конструкции необходимо разрабатывать несколько рабочих камер, реализовывающих 5–10 показателей качества резонаторов. При проектировании и оптимизации конфигураций резонаторов возникают противоречия. Например, попытки обеспечить непрерывность технологического процесса и увеличить напряженность электрического поля в резонаторе приводят к ухудшению надежности работы и снижению электромагнитной безопасности и т.п.

К важным характеристикам эллиптического тороидального резонатора относится распределение электромагнитного поля различных типов колебаний. Теоретическое решение электродинамической задачи в

установках с такими резонаторами затруднено из-за наличия открытой криволинейной поверхности и необходимости учета дифракционных явлений при рассеянии волн от керамической перфорированной плиты, а также излучения электромагнитной энергии во внешнее пространство через прорезь в треугольном призматическом резонаторе с вогнутой гранью. Поэтому мы воспользовались сервером для моделирования сверхвысокочастотных трехмерных структур, позволяющим моделировать объемный резонатор и анализировать электромагнитное поле во времени и в зависимости от частоты электромагнитного излучения.

Выводы / Conclusion

Разработана конструктивно-технологическая схема хмелесушилки непрерывно-поточного действия с маломощными магнетронами (700–850 Вт, 2450 МГц, 12,24 см) воздушного охлаждения и с металлодиэлектрическими резонаторами нетрадиционной конфигурации.

Экономичность и производительность сушильной установки обеспечивается высоким уровнем передачи СВЧ-мощности сырью и выбором конструкции резонатора. Установлено, что собственная добротность эллиптического тороидального резонатора составляет 14600, а напряженность электрического поля в конденсаторной части — 0,82 кВ/см; для ее повышения части боковых поверхностей заменены двояковыпуклыми керамическими четырехгранными плитами. Собственная добротность треугольного призматического резонатора находится в пределах 9000–12000 в зависимости от степени вогнутости верхней грани. При производительности хмелесушилки непрерывно-поточного действия 180–200 кг/ч, мощности 15,66 кВт, удельные энергетические затраты составят 0,1 кВт·ч/кг.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Страны-по-производству-хмеля. Режим доступа: <https://znaharb.ru/vyrashchivayut-khmel-rossii> [Дата обращения 5.03.2022].
2. Распоряжение № 738-р об утверждении Концепции развития хмелеводства в Чувашской Республике на 2020-2025 годы. Режим доступа: km.cap.ru/doc/laws/2020/08/20/disposal-738-r.
3. Майоров К.П. Зайцев П.В. А.с. № 1220605 (СССР). 1986.
4. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: *Агропромиздат*. 1985. 336 с.
5. Геворкян В., Кочемасов В. Объемные диэлектрические резонаторы—основные типы, характеристики, производители. *Электроника*. 2018; 4 (00154): 62-76.
6. Дробахин О.О. Резонансные свойства аксиально-симметричных микроволновых резонаторов с коническими элементами. *Радиофизика радиоастрономия*. 2009; 14 (14): 433-441.
7. Рогов И.А., Адаменко В.Я. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М.: *Легкая и пищевая промышленность*. 1981. 288 с.
8. Пчельников Ю.Н. Электроника сверхвысоких частот. М.: *Радио и связь*. 1981. 96 с.
9. Корчагин Ю.В.; Патент РФ № ; 2021.
10. Копусов В.Н. К вопросу создания многомагнетронного оборудования для современных технологий. *СВЧ техника и телекоммуникационные технологии*. Севастополь: *Вебер*. 2019. 652-653.

REFERENCES

1. Hop-producing countries. Available from: <https://znaharb.ru/vyrashchivayut-khmel-rossii> [Accessed March 5, 2022] (in Russian).].
2. Order No. 738-r on approval of the Concept of hop growing development in the Chuvash Republic for 2020-2025. Available from: km.cap.ru/doc/laws/2020/08/20/disposal-738-r. [Accessed March 5, 2022] (in Russian).
3. Mayorov K.P., Zaitsev P.V. A.S. N 1220605 (USSR). 1986. (in Russian).
4. Ginzburg A.S. Calculation and design of drying plants of the food industry. M.: *Agropromizdat*. 1985. 336 p. (in Russian)
5. Gevorkyan V., Kochemasov V. Volumetric dielectric resonators-main types, characteristics, manufacturers. *Electronics*. 2018; 4 (00154): 62-76 (in Russian)
6. Drobakhin O. The resonance properties of the axially symmetric microwave resonator-tori with conical elements. *Radiophysics radio astronomy*. 2009; 14 (14): 433-441 (in Russian).
7. Rogov IA, Adamenko VJ. Electrophysical, optical, and acoustic characteristics of food products. M.: *Light and food industry*. 1981. 288 p. (in Russian).
8. Pchel'nikov YuN. Electronics of ultrahigh frequencies. M.: *Radio and Communications*. 1981. 96 p. (in Russian)
9. Korchagin Yu.V.; Patent RF 2021. (in Russian)
10. Kopusov VN. On the issue of creating multi-magnetron equipment for modern technologies. *Microwave equipment and telecommunication technologies*. Sevastopol: *Weber*. 2019. 652-653. (in Russian)

ОБ АВТОРАХ:

Марьяна Валентиновна Просвирякова, доктор технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, д. 49, ул. Тимирязевская, г. Москва, 127550, Российская Федерация

E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>

Наталья Геннадьевна Горячева, к.т.н., доцент кафедры Медико-биологической и экологической защиты

Академия гражданской защиты МЧС России, микрорайон Новогорск, г.о. Химки, Московская область, 141435, Российская Федерация

E-mail: goryacheva76@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4874-3922>

Владимир Федорович Сторчевой, д.т.н., Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, д. 49, ул. Тимирязевская, г. Москва, 127550, Российская Федерация

E-mail: energo-air@rgau-msha.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6929-919>

Ольга Валентиновна Михайлова, Доктор технических наук, профессор, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, ул. Октябрьская, д. 22 А, г. Княгинино, 606340, Российская Федерация

E-mail: ds1723@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>

Галина Владимировна Новикова, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, 22 а., ул. Октябрьская, г. Княгинино, Нижегородская область, 606340, Российская Федерация

E-mail: novikovagalinav@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>

Николай Кириллович Кириллов, доктор ветеринарных наук, профессор, член диссертационного совета, Чувашский государственный аграрный университет, 29, ул. К. Маркса, Чебоксары, 428003, Российская Федерация

E-mail: main@academy21.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4847-9762>

ABOUT THE AUTHORS:

Mariana Valentinovna Prosviryakova, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazev street, Moscow, 127550, Russian Federation

E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>

Natalia Gennadievna Goryacheva, Ph.D., Associate Professor of the Department of Biomedical and Environmental Protection Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Novogorsk microdistrict, Khimki, Moscow region, 141435, Russian Federation

E-mail: goryacheva76@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4874-3922>

Vladimir Fedorovich Storchevoy, Tech D, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazev street, Moscow, 127550, Russian Federation

E-mail: energo-air@rgau-msha.ru

<https://orcid.org/0000-0002-6929-919>

Olga Valentinovna Mikhailova, Tech D, Professor, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, 22 A, Oktyabrskaya str., Knyaginino 606340, Russian Federation

E-mail: ds1723@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>

Galina Vladimirovna Novikova, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Chief Scientific Associate, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, 22 a., st. Oktyabrskaya, Knyaginino, Nizhny Novgorod Region, 606340, Russian Federation

E-mail: novikovagalinav@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>

Nikolay Kirillovich Kirillov, Dr. Sci. (Medicine), Professor, member of the Dissertation Council, Chuvash State Agricultural University, 29, K. Marx Street, Cheboksary, 428003, Russian Federation

E-mail: main@academy21.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4847-9762>