ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2511
https://elibrary.ru/IIUTYY

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Разработка СВЧ-установки для термообработки отходов убоя животных

Е. В. Воронов

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия

Поступила в редакцию: 25.09.2023
Принята после рецензирования: 29.01.2024
Принята к публикации: 06.02.2024

Е. В. Воронов: e_voronov@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9867-5860

© Е. В. Воронов, 2024

Аннотация.
В сутки в РФ перерабатывают 126,3 т ветеринарных конфискатов для кормовых целей. При производительности перерабатывающей установки 35 кг/ч необходимое количество должно составлять не менее 7 тыс. шт. Базовые аппараты являются энергоемкими, поэтому необходимо снизить эксплуатационные затраты на термообработку сырья с сохранением кормовых показателей. Цель исследования – разработка установки с энергоподводом в электроприводном резонаторе и обоснование режимов работы.
Объектом исследования являлись слизистые субпродукты, требующие нейтрализации запаха и обеззараживания при термообработке. Алгоритм работы: исследовать динамику нагрева сырья; разработать цифровую модель установки; провести компьютерное моделирование электродинамических процессов в резонаторе; обосновать режимы работы установки: напряженность коронного разряда и электрического поля в резонаторе; вычислить эффективность экрана, мощность генератора, производительность установки, энергетические затраты.
Разработали технологию и установку, совмещающую процессы термообработки, обеззараживания и нейтрализации запаха в непрерывном режиме комплексным воздействием электромагнитных излучений, при сниженных эксплуатационных затратах. В электроприводном резонаторе, соосно расположенном в экранирующем корпусе установки, расположены коронирующая щетка, электрогазоразрядные лампы бактерицидного потока УФ-лучей, ножи, шнеки и излучатели от магнетронов воздушного охлаждения. Средний периметр кольцевого объема между резонатором и корпусом, где возбуждается бегущая волна за счет электромагнитного излучения через перфорацию, кратен половине длины волны. Установлено, что термообработку сырья с обеззараживанием и вытопкой жира можно провести в электроприводном резонаторе с собственной добротностью 80 000 и мощностью генератора 4,4 кВт, производительностью 35–40 кг/ч и энергетическим затратами 0,25–0,28 кВт·ч/кг. При напряженности электрического поля 5 кВ/см и коронного разряда 9,79 кВ/см, обеспечивающей необходимую концентрацию озона за счет коронирования бактерицидных ламп, происходит снижение бактериальной обсемененности продукта до допустимого уровня.
Практическую значимость представляет установка с энергоподводом в электроприводной резонатор и обоснованные режимы работы, позволяющие снизить эксплуатационные затраты на термообработку сырья и сохранить кормовые показатели продукта.

Ключевые слова. Субпродукты, СВЧ-установка, электрогазоразрядные лампы, генератор килогерцовой частоты, перфорированный барабан-резонатор, коронирующие иглы, спиральный и винтовой шнеки

Для цитирования: Воронов Е. В. Разработка СВЧ-установки для термообработки отходов убоя животных // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 369–381. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2511

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2511
https://elibrary.ru/IIUTYY

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Electrophysical Microwave Installation for Heat Treatment of Animal Slaughter Waste

Evgeny V. Voronov

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia

Received: 25.09.2023
Revised: 29.01.2024
Accepted: 06.02.2024

Evgeny V. Voronov: e_voronov@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-9867-5860

© E.V. Voronov, 2024

Abstract.
Every day, the Russian Federation processes 126.3 tons of animal slaughter waste into animal feed. With an installation capacity of 35 kg/h, the required quantity is 7000 units. As a rule, the devices are energy-intensive. The problem is to reduce the operating costs of heat treatment of raw materials while maintaining the feed quality. The article introduces a new installation powered by an electrically driven resonator with rationalized operating modes.
The research featured mucous by-products that require thermal treatment to neutralize the smell and disinfect the raw material. The authors investigated the dynamics of heating and used the data obtained to develop a digital installation model and test the electrodynamics in the resonator. After that, they rationalized the operating modes, i.e., corona discharge, electric field, screen efficiency, generator power, installation performance, and energy costs.
The complex action of electromagnetic radiation provided a continuous combined heat treatment, disinfection, and odor neutralization with reduced operating costs. The electrical resonator was coaxially located in the shielding and contained a coronating electrode, electric bactericidal UV gas discharge lamps, knives, screws, and emitters from air-cooled magnetrons. The annular volume between the resonator and the coat excited the traveling wave by electromagnetic radiation through the perforation. Its average perimeter was a multiple of half the wavelength. The heat treatment with disinfection and fat rendering required an intrinsic quality factor of 80 000, a generator power of 4.4 kW, a productivity of 35–40 kg/h, and energy costs of 0.25–0.28 kWh/kg. When the electric field was 5 kV/cm and the corona discharge was 9.79 kV/cm, the corona of bactericidal lamps provided the required ozone concentration and the bacterial contamination fell down to an acceptable level.
The new installation with an electrical resonator reduced operating costs for heat treatment of animal slaughter waste and maintained the high-quality of the resulting feed products.

Keywords. By-products, microwave installation, electric gas discharge lamps, kilohertz frequency generator, perforated resonator drum, corona needles, spiral and screw augers

For citation: Voronov EV. Electrophysical Microwave Installation for Heat Treatment of Animal Slaughter Waste. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(2):369–381. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2511

Введение

Наиболее трудоемкими в обработке субпродуктами являются четырехкамерные желудки крупного рогатого скота и мелкого рогатого скота, а также желудки свиней. Некоторые слизистые субпродукты из-за малой пищевой ценности и трудоемкости обработки (промыть, разрезать вдоль, обезжирить, очистить от слизистой оболочки) используют только для кормовых целей. При переработке отходов убоя животных, например, желудка жвачных животных (рубец, книжка, сетка, сычуг), выделяется специфический запах [1]. Поэтому при термообработке такого сырья при производстве корма для животных с вытопкой жира необходимо нейтрализовать запах и обеззаразить продукт. При производстве комбикорма из желудка жвачных животных (рубца, книжки, сетки и сычуга) его шпарят и очищают от слизистой оболочки в центрифуге при температуре воды 65–68 °C в течение 5–6 мин. Тем не менее неприятный запах остается. Это сырье можно использовать как корм для животных только после термообработки, обеззараживания и удаления запаха [2–4].

В связи с этим разработка установки с источниками электрофизических факторов для термообработки отходов убоя животных, позволяющей реализовать указанные процессы в непрерывном режиме, актуальна.

Известна норма выхода субпродуктов при переработке крупного рогатого скота в процентах к живой массе: непищевая обрезь − 0,17 %, трахея − 0,14 %, сычуг обработанный и свиной желудок – 0,21 %, рубец – 1,32 % [1]. В среднем это 2 %, т. е. 33 470 т субпродуктов второй категории накапливается в год по России в мясном животноводстве. В среднем в сутки следует переработать 126,3 т субпродуктов второй категории.

Слизистые продукты следует перерабатывать в течение 3 ч после убоя, суммарная производительность установок должна составлять 42 100 кг/ч. Если производительность проектируемой установки с источниками электрофизических факторов составляет 35−40 кг/ч, то необходимое их количество в пределах 1000 шт.

С учетом вида убойного скота накапливаются субпродукты говяжьи, конские, оленьи, верблюжьи, бараньи, свиные. Следовательно, количество необходимых установок, включая резервные, для РФ составит 6−7 тыс. Существуют сотни установок для измельчения и плавления жиросодержащего мясного сырья. Разработанная нами установка наиболее близка к центробежной машине АВЖ-245 (измельчитель-плавитель). Основным рабочим органом машины является перфорированный электроприводной барабан, подвижный и неподвижные ножи. Под действием центробежной силы измельченное сырье попадает через перфорацию в кольцевое пространство между корпусом и барабаном, куда подается острый пар под давлением 0,15 МПа. Недостатки: высокий расход пара − на 1 т сырья 100 кг; рабочий процесс происходит при смешивании жирового сырья с горячей водой, что ухудшает кормовую ценность продукта. При такой технологии вытопки жира из такого сырья, как желудок жвачных животных, нейтрализовать неприятный запах не удается.

Известны СВЧ-установки с резонаторами разного конструктивного исполнения для термообработки сырья [5−9]. Эти установки эффективно работают, но в них не предусмотрены источники электрофизических факторов, обеспечивающие нейтрализацию неприятного запаха при переработке сырья. Для термообработки камер желудка жвачных животных с удалением неприятного запаха установки следует доукомплектовать источниками озона и бактерицидного потока УФ-лучей. В нашей научной школе разработаны СВЧ-установки для термообработки мясного сырья в непрерывном режиме. Основной составной частью установки с СВЧ-энергоподводом является объемный резонатор. Поэтому разработаны цифровые модели резонаторов и проведено компьютерное моделирование электродинамических процессов в резонаторах. От его электродинамических параметров, а именно напряженности электрического поля и собственной добротности резонаторов, в значительной степени зависит режимы термообработки каждого вида сырья, позволяющие снизить эксплуатационные затраты с сохранением кормовой ценности продукта. Но эти установки также без источников электрофизических факторов [10−15].

Научная проблема – снижение эксплуатационных затрат на термообработку некондиционного вторичного мясного сырья решается разработкой технологии и технического средства непрерывно-поточного действия с источниками электрофизических факторов в электроприводном цилиндрическом резонаторе, позволяющих при тонком измельчении сырья сохранить кормовую ценность готового продукта и нейтрализовать неприятный запах.

Цель статьи – исследовать динамику нагрева камер желудка крупного рогатого скота и разработать радиогерметичную установку для термообработки и обеззараживания в непрерывном режиме при тонком измельчении боенских отходов с источниками электрофизических факторов, включая сверхвысокочастотный энергоподвод, бактерицидный поток УФ-лучей и озон определенной концентрации в электроприводном перфорированном цилиндрическом резонаторе.

Объекты и методы исследования

В рамках этой статьи использовали материалы заявки на изобретение (заявка № 2023123873). Моделирование распределения электромагнитного поля в резонаторе проводили с помощью программы CST Microwave Studio [16, 17]. Исследуемым сырьем являются слизистые субпродукты 2-й категории, имеющие питательную ценность ниже, чем питательная ценность мяса, являющиеся дополнительным источником животного белка. Это желудки жвачных животных (рубец, сетка, книжка, пищевод, сычуг), свиные желудки, некондиционные кишки, трахеи говяжья и свиная, селезенка и другое мясное сырье, требующее нейтрализации запаха и обеззараживания при термообработке. На рисунке 1 приведено исследуемое сырье − камеры желудка крупного рогатого скота, полученное после убоя 01.08.2023 г. из фермерского хозяйства «КФХ Пирогова Р. А.».

На основе диэлектрических, физико-механических характеристик некондиционного сырья, специфических особенностей электромагнитного поля СВЧ, теории оптического излучения и коронного разряда, системного подхода к комплексу теоретических и экспериментальных результатов разработана установка с цилиндрическим электроприводным резонатором для термообработки, обеззараживания и нейтрализации запаха жиросодержащих отходов убоя животных воздействием электрофизических факторов. На основании анализа исследований и классификации конструктивных решений выявили перспективную модель установки с источниками электромагнитного поля СВЧ и бактерицидного потока ультрафиолетовых излучений коронного разряда.

Результаты и их обсуждение

Провели экспериментальные исследования динамики нагрева камер желудка крупного рогатого скота в микроволновой системе «генератор – резонатор – нагрузка» SUPRA-850 при мощности магнетрона 850 Вт. Изучение динамики нагрева сырья позволяет уточнить режимы работы разрабатываемой установки, выбрать оптимальную удельную мощность генератора, что позволит подобрать оптимальное время обработки сырья и температуру обработки. В перспективе это приведет к снижению эксплуатационных затрат

Рисунок 1. Исследуемое сырье (камеры желудка крупного рогатого скота): a) рубец; b) сетка; c) книжка; d) сычуг

Figure 1. Cattle stomach chambers used as raw material: a) rumen; b) reticulum; c) psalterium; d) abomasum

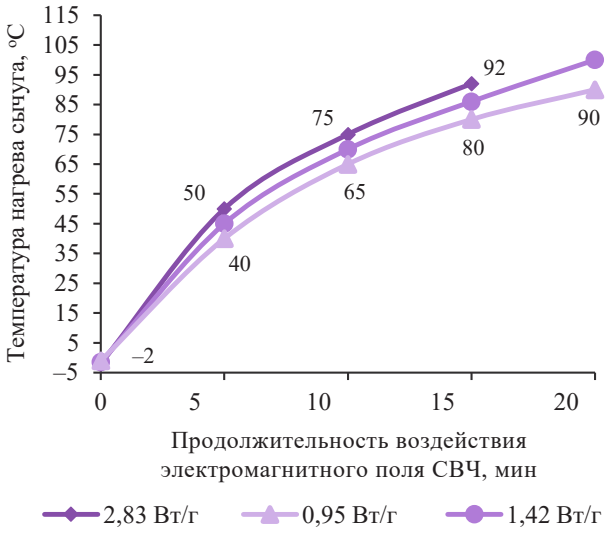

Рисунок 2. Динамика диэлектрического нагрева сычуга крупного рогатого скота при разных удельных мощностях генератора: 2,53, 1,42, 0,95 Вт/г

Figure 2. Dielectric heating of cattle rennet at 2.53, 1.42, 0.95 W/g

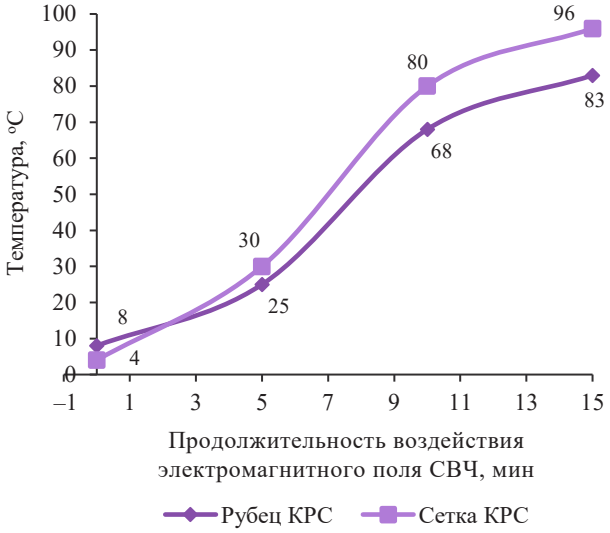

Рисунок 3. Динамика диэлектрического нагрева измельченных кусков рубца (1,8 Вт/г) и сетки (2 Вт/г)

Figure 3. Dielectric heating of crushed rumen (1.8 W/g) and reticulum (2 W/g)

при термообработке сырья и сохранению кормовых показателей готового продукта при испытании натурного лабораторного образца установки. На рисунке 2 приведены результаты исследования динамики диэлектрического нагрева сычуга крупного рогатого скота. Они позволяют оценить скорость нагрева сычуга крупного рогатого скота, соизмерить продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ для трех разных удельных мощностей генератора: 2,53, 1,42, 0,95 Вт/г (что достигается регулировкой закладываемой массы сырья). Для того чтобы в полной мере использовать положительное воздействие микроволнового фактора, термообработку необходимо проводить от 10 до 20 мин, что позволит достичь температуры сычуга от 80 до 100 °С (контролировалось тепловизором FLUKE TISS 45), в зависимости от удельной мощности генератора.

Для увеличения производительности установки и равномерного нагрева сырья его следует тонко измельчать и непрерывно перемешивать в резонаторе с 4 магнетронами по 1100 Вт, что позволит достичь эффективности переработки за короткий промежуток времени.

Результаты экспериментальных исследований динамики диэлектрического нагрева рубца и сетки крупного рогатого скота (рис. 3) позволяют оценить их скорость нагрева и определить продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ при разных удельных мощностях генератора: 1,8 и 2 Вт/г. Они

показывают, что сетка и рубец крупного рогатого скота нагреваются в электромагнитном поле СВЧ с разной скоростью. При вариации продолжительности воздействия от 0 до 15 мин температура в измельченных кусках сетки составила 96 °С, а в измельченных кусках рубца − 83 °С.

Провели эксперименты по выявлению эффективных удельных мощностей генератора, продолжительности воздействия и температуры нагрева книжки крупного рогатого скота. Результаты исследования температуры нагрева готового продукта, выявленные на основе проведенного эксперимента при помощи тепловизора FLUKE TISS 45 (рис. 4), показывают, что при мощности генератора 6,64 Вт/г за 5 мин можно получить высушенный продукт из измельчённой книжки (рис. 4). При этом массовая доля влаги в книжке составила 86 %, а влажность книжки после воздействия электромагнитного поля СВЧ – 14 %. Поэтому для переработки измельченной книжки актуальной является сушка при сниженных энергетических затратах.

На основе проведенных экспериментальных исследований динамики диэлектрического нагрева сырья (камер желудка крупного рогатого скота), выявленных эффективных удельных мощностей генератора, продолжительности воздействия, температуры и скорости нагрева сырья разработана установка с цилиндрическим электроприводным резонатором, совмещающая комплексное воздействие электрофизических факторов с тонким его измельчением и перемешиванием. Установка для термообработки и обеззараживания с нейтрализацией запаха при тонком измельчении жиросодержащих отходов убоя животных воздействием электрофизических факторов приведена на рисунке 5. Она содержит в неферромагнитном цилиндрическом корпусе *3* соосно расположенный перфорированный цилиндрический электроприводной барабан-резонатор *7*. На перфорированном нижнем основании барабана-резонатора жестко установлен подвижный неферромагнитный нож *10* с радиально расположенными лезвиями. По высоте боковой поверхности барабана-резонатора параллельно расположены неподвижные ножи *9* со сдвигом на 120° по периметру барабана-резонатора. Верхнее перфорированное основание барабана-резонатора представлено как неферромагнитная перфорированная кольцевая поверхность, состыкованная с периметром боковой поверхности. На всей кольцевой поверхности расположена неферромагнитная коронирующая щетка *8*. Над центральным отверстием верхнего основания барабана-резонатора на верхнем основании неферромагнитного цилиндрического корпуса со сдвигом на 120° расположены волноводы с магнетронами воздушного охлаждения, излучатели которых направлены в перфорированный цилиндрический барабан-резонатор. По центру верхнего основания корпуса *3* расположена неферромагнитная загрузочная ёмкость *1* с заслонкой, внутри которой установлен неферромагнитный электроприводной спиральный шнек *2*. С внутренней стороны верхнего основания корпуса над неферромагнитной коронирующей щеткой с равномерным радиальным сдвигом расположены электрогазоразрядные лампы бактерицидного потока УФ-лучей *5*, подключенные к источникам килогерцовой частоты. Неферромагнитная приемная ёмкость *13* расположена под нижним основанием цилиндрического

Рисунок 4. Визуализация вареного в электромагнитном поле СВЧ сырья (книжки крупного рогатого скота)

Figure 4. Psalterium cooked in electromagnetic microwave field

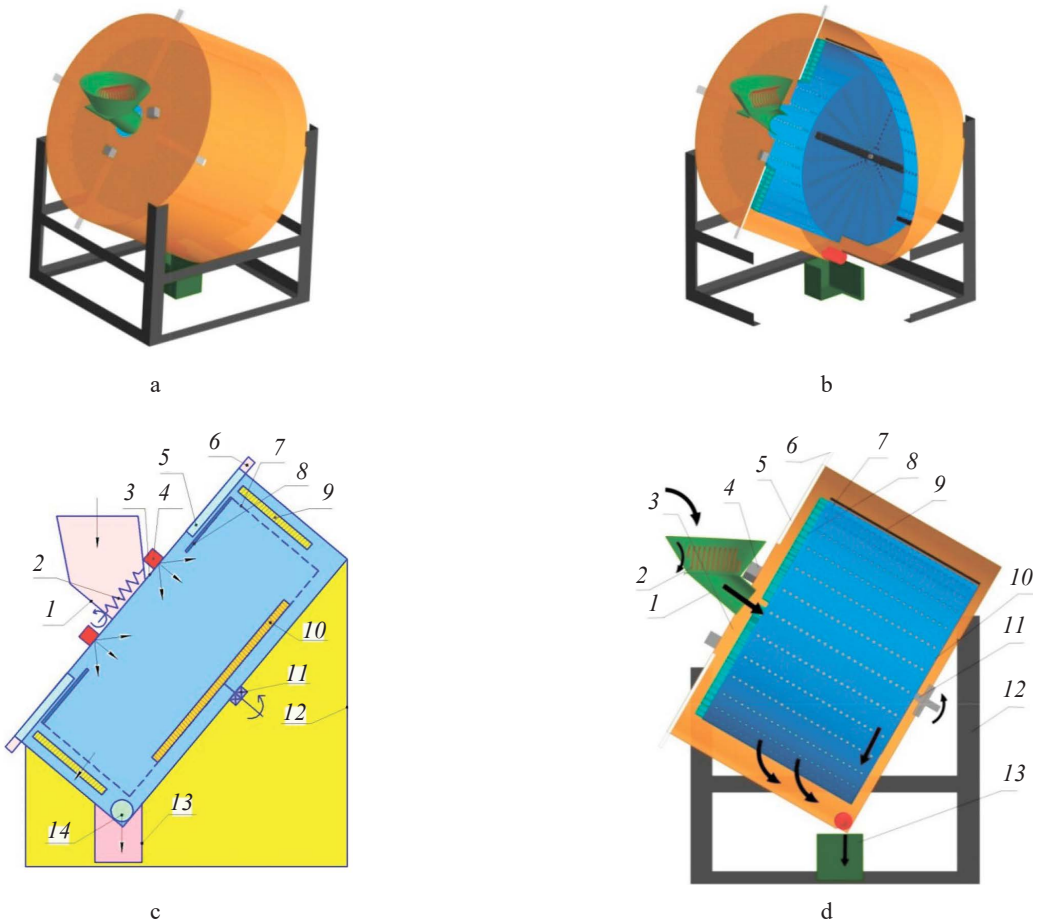

Рисунок 5. Установка с цилиндрическим электроприводным резонатором для термообработки, обеззараживания и нейтрализации запаха жиросодержащих отходов убоя животных воздействием электрофизических факторов: а) общий вид; б) общий вид в разрезе; в) схематическое изображение установки; г) установка в разрезе, с позициями; *1* − загрузочная ёмкость; *2* − электроприводной спиральный шнек; *3* − неферромагнитный цилиндрический корпус; *4* − магнетроны; *5* − электрогазоразрядные лампы бактерицидного потока УФ-лучей; *6* – источники килогерцовой частоты; *7* − перфорированный цилиндрический электроприводной барабан-резонатор; *8* − неферромагнитная коронирующая щетка; *9* − неподвижные ножи; *10* − подвижный нож; *11* − вал электропривода; *12* − каркас для монтажа; *13* − приемная ёмкость; *14* − неферромагнитный винтовой шнек

Figure 5. Installation with a cylindrical electric resonator for heat treatment, disinfection, and odor neutralization of fat-containing animal slaughter waste: a) general view; b) general cross-sectional view; c) scheme; d) installation in section, with positions; *1* – loading chamber; *2* – electrically driven spiral screw; *3* – non-ferromagnetic cylindrical body; *4* – magnetrons; *5* – UV bactericidal electric gas-discharge lamps; *6* – kilohertz frequency sources; *7* – perforated cylindrical electric drum-resonator; *8* – non-ferromagnetic coronating electrode; *9* – fixed knives; *10* – movable knife; *11* – electric drive shaft; *12* – frame; *13* – receiving tank; *14* – non-ferromagnetic screw

корпуса, где в кольцевом зазоре между ним и барабаном-резонатором расположен электроприводной винтовой шнек *14*. Установка смонтирована на каркасе *12*.

Технологический процесс термообработки, обеззараживания и нейтрализации запаха жиросодержащих отходов убоя животных воздействием электрофизических факторов происходит следующим образом. Загрузить измельченные отходы убоя животных, включая камеры жвачных животных (рубец, сетка, книжка, сычуг), в загрузочную ёмкость *1* при закрытой заслонке. Включить электропривод барабана-резонатора *7*. Включить электропривод неферромагнитного винтового шнека *14*. Открыть заслонку в загрузочной ёмкости и включить неферромагнитный спиральный шнек *2*. После этого измельченные куски жиросодержащих отходов убоя животных попадают в барабан-резонатор через центральные отверстия на основаниях корпуса *3* и барабана-резонатора. На основании барабана-резонатора закреплен подвижный нож для тонкого измельчения сырья и отбрасывания его к внутренней поверхности барабана. Зазор между неподвижными ножами и барабаном-резонатором регулируется в зависимости от вида вторичного сырья. Далее включить вентиляторы и магнетроны *4* воздушного охлаждения.

В барабане-резонаторе возбуждается электромагнитное поле сверхвысокой частоты (стоячая волна

с частотой 2450 МГц и длиной волны 12,24 см). Включить источники *6* килогерцовой частоты. Частота импульсно-моделированных высокочастотных колебаний 110 кГц. После этого электрогазоразрядные лампы *5* бактерицидного потока УФ-лучей загораются и при соприкосновении неферромагнитной щеткой *8* начинают коронировать. За счет электромагнитного поля СВЧ мощность электрогазоразрядных ламп увеличивается, они ярче горят и сильнее коронируют, увеличивается концентрация озона в резонаторе. При вращении барабана-резонатора за счет коронного разряда между электрогазоразрядными лампами *5* и неферромагнитными щетками происходит озонирование воздуха. Озон и бактерицидный поток УФ-лучей (в диапазоне волн 254−257 нм) распространяются внутри неферромагнитного перфорированного электроприводного барабана-резонатора. УФ-лучи оказывают бактерицидное воздействие. Озон обладает сильным обеззараживающим действием на сырье. За счет токов поляризации жиросодержащее тонкоизмельченное сырье в электромагнитном поле СВЧ нагревается до 85−95 °С, жир вытапливается при вращении барабана резонатора. За счет центробежной силы сырье отбрасывается к перфорированной боковой поверхности барабана-резонатора (диаметр отверстий 1,2−6,0 мм). Тонко измельченное сырье прижимается к обечайке барабана-резонатора. Вытопленный жир просачивается через перфорацию барабана-резонатора в кольцевое пространство между резонатором и цилиндрическим корпусом *3*. Шквара по мере уменьшения размеров частиц также проходит через перфорацию барабана-резонатора вместе с вытопленным жиром. В связи с тем, что резонатор перфорирован, в этом кольцевом пространстве возбуждается электромагнитное поле бегущей волны, поэтому здесь смесь жира и шквары дополнительно эндогенно нагревается и озонируется.

Комплексное воздействие электрофизических факторов бактерицидного потока УФ-лучей, озона и электрического поля высокой напряженности (более 1,2 кВ/см) угнетает процессы размножения и роста микроорганизмов, разрушая их вегетативные формы при термообработке сырья в непрерывном режиме. За счет озона и бактерицидного потока УФ-лучей нейтрализуется запах. Озон уничтожает микроорганизмы, разрушая их клетки изнутри и снаружи, не позволяя им размножаться. Применяя несколько магнетронов воздушного охлаждения, можно увеличить число возбуждаемых в заданном диапазоне видов колебаний в резонаторе и повысить равномерность нагрева сырья [18, 19]. Подвижный неферромагнитный нож *10* с радиально расположенными лезвиями обеспечивает при вращении вместе с барабаном-резонатором *7* тонкое измельчение жиросодержащих отходов, интенсивное перемешивание и отбрасывание к внутренней поверхности барабана-резонатора. Неподвижные ножи *9* нарезают шквару, которая за счет центробежной силы вместе вытопленным жиром падает в отверстие на боковой поверхности барабана-резонатора. Готовый продукт (шквара и жир) стекает в неферромагнитный винтовой шнек *14*, т. к. центробежная установка расположена под наклоном к горизонтальной плоскости. Угол наклона установки подобран с учетом угла стекания вытопленного жира вместе со шкварой. С помощью винтового шнека готовый продукт выгружается в неферромагнитную приемную ёмкость *13*. Неферромагнитный винтовой шнек ограничивает излучение через отверстие, предназначенное для выгрузки продукта. Неферромагнитный спиральный шнек *2* выполняет две функции: равномерной подачи сырья в барабан-резонатор и ограничения излучений как замедляющей системы при определенном соотношении длины витка спирали к ее шагу. Если диаметр провода мал, по сравнению с диаметром спирали, то ее можно рассматривать как анизотропный цилиндр, проводимость которого бесконечна в направлении витков спирали и равна нулю в перпендикулярном направлении. Производительность установки зависит от количества магнетронов, электрогазоразрядных ламп и мощности источников килогерцовой частоты, вида жиросодержащего сырья, площади живого сечения перфорации барабана-резонатора и его окружной скорости. При термообработке сырья в электромагнитном поле сантиметрового диапазона в перфорированном цилиндрическом барабане-резонаторе изменение диэлектрических параметров сырья (диэлектрической проницаемости, фактора диэлектрических потерь) мало влияет на режим работы магнетронного генератора. Размеры цилиндрического резонатора выбраны кратными нескольким длинам полуволн. Средний периметр кольцевого объема между резонатором и корпусом, где возбуждается бегущая волна за счет электромагнитного излучения через перфорацию, кратен половине длины волны. Кольцевой объем будет выполнять функцию кольцевого резонатора. Объемный резонатор является системой с распределенными параметрами, обладающими множеством резонансных частот. Цилиндрический резонатор возбуждается на одной из резонансных частот, если излучатель магнетрона направлен через специальный волновод и нем устанавливаются стоячие волны, в узлах которых нагрев сырья невозможен (энергия сантиметровых волн в узле равна нулю). Поэтому цилиндрический резонатор выполнен в виде электроприводного барабана, чтобы узлы стоячих волн непрерывно перемещались. Одновременно сырье перемешивается и измельчается. Установка содержит несколько магнетронов воздушного охлаждения, что также за счет интерференции волн увеличивает мощность и напряженность электрического поля. В цилиндрическом резонаторе электромагнитного поля СВЧ возбуждается от 3–4 магнетронов, излучатели которых через соответствующие волноводы направлены в его объем.

На скорость нагрева сырья сильно влияет напряженность электрического поля, количество сырья в

резонаторе (удельная мощность генератора) и изменение его диэлектрических параметров в зависимости от температуры нагрева. В установке между электрогазоразрядными лампами бактерицидного потока УФ-лучей, запитанными от генератора килогерцовой частоты, и коронирующими иглами создается неоднородное электрическое поле, напряженность которого максимальна на иголках. Преобразование высоковольтного напряжения в коронный разряд необходимой силы происходит благодаря электрогазоразрядным лампам. Сложные физические и электрохимические процессы с участием инертных газов в лампе позволяют получить несколько факторов. Инертный газ приобретает свойства электропроводника, затем через слой воздуха между лампой и коронирующими иглами замыкается на землю. В результате возникает коронный разряд, следовательно, происходит выделение озона, тепла и ультрафиолетового излучения в пространстве. Если уменьшить межэлектродный промежуток (0,5–1,0 см), то напряженность электрического поля достигает такого значения, при котором начинается ионизация воздуха. Ионизация и возбуждение молекул газа в коронном разряде наблюдается только в области наибольшей напряженности электрического поля, вблизи поверхности с коронирующими иглами. В остальной части разрядного промежутка токопрохождение осуществляется за счет дрейфового движения электронов или ионов, образовавшихся в коронирующей области.

В процессе термообработки следует контролировать температуру продукта. Неотъемлемой частью процесса термообработки сырья является контроль микробиологической безопасности жира и шквары. При проведении переработки в течение трех часов после убоя животных, соблюдении санитарных правил и условий хранения продукта (жира и шквары) повышения общего микробного числа выше предельно допустимого уровня 500 тыс. КОЕ/г не происходит. Мощность потока излучений установкой следует контролировать с помощью прибора ПЗ-41, чтобы соблюдать электромагнитную безопасность на уровне 10 мкВт/г.

По известной методике рассчитаны основные параметры коронного разряда. Для цилиндрической системы электродов величина напряженности электрического поля, при которой наблюдается возникновение коронного разряда вблизи поверхности цилиндрического электрода (электрогазоразрядной лампы), определяется эмпирической формулой Пика:

$$E_z = 31 \times \delta \times \left[1 + \left(\frac{0,308}{\sqrt{\delta \times r}}\right)\right] \quad (1)$$

где δ – давление газа, атм.; r – радиус коронирующего цилиндра, см.

В установке радиус электрогазоразрядной лампы равен r_2 = 1 см, радиус коронирующих неферромагнитных иголок (иголки в щетке) r_1 = 0,1 см, воздух с давлением 50 мм рт. ст.

Тогда напряженность электрического поля у поверхности коронирующих игл, при которой начинается коронный разряд, составляет

$$E_z = 31 \times \frac{50}{760} \times \left[1 + \left(\sqrt{\frac{50}{760} \times 0,1}\right)\right] = 9,787 \quad (2)$$

По формуле цилиндрического конденсатора определена разность потенциалов, соответствующая этой напряженности электрического поля:

$$U_z = E_z \times r_1 \times ln\frac{r_2}{r_1} = 9787 \times 0,1 \times ln\frac{1}{0,1} = 2253 \quad (3)$$

Эффективность экранирования неферромагнитного корпуса, т. е. отношение напряженностей электрического поля в данном месте при отсутствии экрана и при его наличии без отверстий и щелей считают бесконечно большой. Однако выполнение сплошного цилиндрического экранирующего корпуса при работе установки в непрерывном режиме невозможно, т. к. есть отверстия для загрузки сырья и выгрузки продукта. Эффективность экранирования установки определяли по методике А. В. Донского:

$$Э = \frac{1}{4} \times \left(\frac{S_{корп}}{S_o}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

где $S_{корп.}$ – площадь поверхности экранирующего корпуса, м^2; S_o – площадь отверстия, м^2.

Площадь поверхности цилиндрического корпуса:

$$S_{корп} = 2 \times \pi \times \left(R \times H + R^2\right) = 2 \times$$
$$\times 3,14 \times \left(0,45 \times 0,6 + 0,45^2\right) = 2,97 \quad (5)$$

Так как на экранирующем корпусе три отверстия (смотровое окно ($Э_1$), отверстия под загрузочной ($Э_2$) и приемной ($Э_3$) ёмкостями), то общая эффективность экранирования (Э) вычисляется по формуле

$$\frac{1}{Э} = \frac{1}{Э_1} + \frac{1}{Э_2} + \frac{1}{Э_3} \quad (6)$$

Площадь окна для визуального наблюдения за процессом равна

$$S_{o1} = 3,14 \times 0,025 = 0,0785 \text{ м}^2 \quad (7)$$

Тогда эффективность экранирования смотрового окна составляет

$$Э_1 = \frac{1}{4} \times \left(\frac{S_{корп}}{S_{o1}}\right)^{\frac{3}{2}} = 0,25 \times \left(\frac{2,97}{0,0785}\right)^{1,5} = 58,18 \quad (8)$$

Эффективность экранирования отверстия под загрузочной ёмкостью:

$$S_{o2} = 3,14 \times 0,306^2 = 0,294 \text{ м}^2$$

$$Э_2 = \frac{1}{4} \times \left(\frac{S_{корп}}{S_{o2}}\right)^{\frac{3}{2}} = 0,25 \times \left(\frac{2,97}{0,294}\right)^{1,5} = 8,03 \quad (9)$$

Эффективность экранирования прямоугольного отверстия, размерами 0,05×0,6 м на основании корпуса под приемной ёмкостью: $S_{о3}$ = 3,14 × 0,6 × × 0,05 = 0,0942 м^2,

$$Э_3 = \frac{1}{4} \times \left(\frac{S_{корп}}{S_{о3}} \right)^{\frac{3}{2}} = 0,25 \times \left(\frac{2,97}{0,0942} \right)^{1,5} = 44,26 \quad (10)$$

Общая эффективность экранирования:

$$\frac{1}{Э} = \frac{1}{Э_1} + \frac{1}{Э_2} + \frac{1}{Э_3} = \frac{1}{58,18} + \frac{1}{8,03} + \frac{1}{44,26} = 0,0172 + \\ + 0,1245 + 0,0226 = 0,164 \quad (11)$$

Общая эффективность экранирования низкая, поэтому во всех отверстиях для ограничения излучений предусмотрены дополнительные узлы. Смотровое окно затянуто мелкоячеистой неферромагнитной сеткой, диаметр проволоки не менее 2 мм и размер окна диаметром 50 мм. В загрузочной ёмкости расположен электроприводной неферромагнитный спиральный шнек с радиусом спирали r и шагом h. Диаметр неферромагнитного провода мал, по сравнению с диаметром спирали, поэтому этот шнек можно представить как анизотропный цилиндр, т. е. проводимость его бесконечна в направлении витков спирали и равна нулю в перпендикулярном направлении. Коэффициент замедления можно приблизительно определить по формуле:

$$k \approx 2 \times \pi \times \frac{d}{h} \quad (12)$$

Подбором радиуса и шага спирали можно ограничить мощность излучения через отверстие, предназначенное для загрузки сырья. Аналогичную функцию осуществляет и электроприводной неферромагнитный винтовой шнек, размещенный в отверстии, предназначенном для выгрузки продукта.

Важным параметром резонансной системы является собственная добротность, характеризующая отношение запасенной энергии к средней энергии потерь за период колебания, т. е. по этому показателю можно оценить термический коэффициент полезного действия в цилиндрическом резонаторе. Для обоснования добротности разрабатываемой конструкции резонатора было проведено компьютерное моделирование электродинамических процессов системы «генератор – резонатор». Учитывали, что резонатор представлен как цилиндр, на верхнем основании которого расположен еще цилиндр малой высоты. Размеры цилиндра приведены в таблице 1. Моделирование трехмерных структур электромагнитного поля в цилиндрическом резонаторе провели в программе CST Studio Suite (вычислительный модуль Time Domain Solver) [16, 17]. Это программа позволила моделировать сложные сверхвысокочастотные структуры в резонаторе и визуализировать распределение электрической и магнитной составляющей электромагнитного поля в нем.

Результаты исследования распределения электромагнитного поля в объеме цилиндрического резонатора (рис. 6) показывают, что в его центре напряженность электрического поля достигает 4–5 кВ/см. При такой напряженности электрического поля и определенной концентрации озона за счет коронирования бактерицидных ламп ожидается снижение бактериальной обсемененности продукта до ПДУ, 500 тыс. КОЕ/г.

Провели расчет его собственной добротности путем вычисления объема (V, м^3) и площади поверхности стенок алюминиевого резонатора (S, м^2), учитывая толщину скин-слоя (Δ = 1,72 мкм), при частоте 2450 МГц. Пользуясь методикой Ю. Н. Пчельникова, вычислили собственную добротность резонатора по формуле:

$$Q = k \times 2 \times \frac{V}{S} \times \Delta \quad (13)$$

где k – коэффициент, учитывающий снижение площади поверхности резонатора за счет перфорации (k = 0,55).

Площадь поверхности цилиндрического резонатора диаметром 73,44 см и высотой 50 см составляет

$$S = 2 \times \pi \times (R \times H \times R^2) = 2 \times 3,14 \times \\ \times (0,3672 \times 0,5 + 0,3672) = 2 \text{ м}^2 \quad (14)$$

Объем цилиндрического резонатора:

$$V = \pi \times R^2 \times H = 2 \times 3,14 \times \\ \times (0,3672 \times 0,5 + 0,3672^2) = 2 \text{ м}^2 \quad (15)$$

Собственная добротность резонатора:

$$Q = k \times 2 \times \frac{V}{S} \times \Delta = 0,65 \times 2 \times \frac{0,211}{2} \times \\ \times 1,72 \times 10^{-6} = 79738 \quad (16)$$

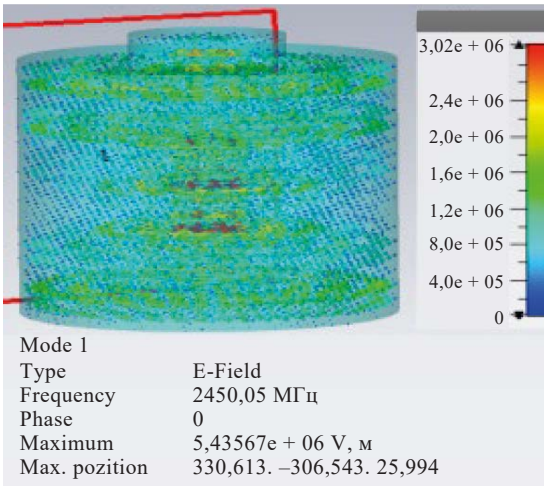

Рисунок 6. Распределение напряженности электрического поля в резонаторе

Figure 6. Electric field strength in the resonator

Таблица 1. Технические характеристики установки с воздействующими электрофизическими факторами в электроприводном цилиндрическом резонаторе

Table 1. Electrophysical installation with electrical cylindrical resonator: technical characteristics

Наименование	Параметры
Производительность, кг/ч	35–40
Общая мощность установки, кВт	10
Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг	0,25–0,28
Мощность СВЧ генераторов, кВт	4,4
Мощность электрогазоразрядных ламп, кВт	0,4
Мощность привода барабана-резонатора, кВт	5
Мощность спирального и винтового шнеков, Вт	0,2
Частота вращения барабана, об/мин	200–250
Диаметр и высота корпуса, см	90; 60
Диаметр и высота резонатора, см	73,44; 50

Расчеты показывают, что собственная добротность резонатора такой конструкции находится в пределах 80 000. Это значит, что термический коэффициент полезного действия может достигать 0,7–0,73. В цилиндрическом резонаторе собственная длина волны не зависит от его высоты вдоль оси 0z и совпадает со значением критической длины волны E_{01} в волноводе. Независимость собственной длины волны от высоты цилиндрического резонатора для моды E_{010} позволяет увеличить собственную добротность, повышая его высоту. Поэтому для волны E_{010} изменение собственной добротности достигали изменением его продольных размеров, оставляя резонансную частоту фиксированной величиной. Для полых резонаторов величина собственной добротности по данным А. В. Стрекалова имеет порядок 10^5.

С учетом электрофизических параметров жира – удельной теплоемкости (2300 Дж/кг·°С), плотности (930 кг/м^3) расплавленного жира, фактора диэлектрических потерь (18–20) при температуре 80–100 °С и ожидаемой напряженности электрического поля в коаксиальном резонаторе 4–5 кВ/см – вычислили продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ на сырье.

Из выражения, характеризующего скорость диэлектрического нагрева жира ($\Delta T/\Delta\tau$, °С/с), можно по методике И. А. Рогова определить продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ:

$$\frac{\Delta T}{\Delta\tau} = \frac{0,555\times10^{-12}\times f\times k\times E^2\times\eta}{\rho\times c} \qquad (17)$$

где f – частота электромагнитного поля, МГц; k – фактор диэлектрических потерь жира; E – напряженность электрического поля, В/м; η – термический коэффициент полезного действия; ρ – плотность расплавленного жира, кг/м^3 (930 кг/м^3); c – теплоемкость расплавленного жира, Дж/кг·°С (2300 Дж/кг).

Продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ:

$$\Delta\tau = \frac{90\times930\times2300}{0,55510^{-12}\times2450\times10^6\times19\times5000^2\times0,73} = 408\ \text{с} = 6,8\ \text{мин} \qquad (18)$$

Расчеты показывают, что при напряженности электрического поля, равной 5 кВ/см, продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ составляет 6,8 мин (0,113 ч), если термический коэффициент полезного действия 0,73. Такую продолжительность можно обеспечить при мощности генератора 3–4 Вт/г, т. е. в резонаторе с четырьмя генераторами, общей мощностью 4,4 кВт. Тогда в резонаторе может в стационарном режиме обрабатываться сырье массой 1,5 кг. В непрерывном режиме и при воздействии остальных электрофизических факторов в резонаторе одновременно будет обрабатываться 3–4 кг сырья производительностью 35,4 кг/ч (4/0,113 = 35,4 кг/ч). Мощность электромагнитного поля, рассеиваемая в единице объема сырья, определяется по формуле И. А. Рогова:

$$\text{P} = 0,555\times10^{-5}\times f\times k\times E^2\times\eta = 0,555\times10^{-5}\times$$
$$\times2450\times10^6\times19\times5^2 = 645881\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \qquad (19)$$

На основе результатов проведенных исследований и многолетних работ научной школы, где созданы десятки СВЧ-установок для термообработки разного сырья агропредприятий, составили технические характеристики установки (табл. 1) [20]. Частоту вращения электроприводного резонатора принимали равную частоту вращения рабочего органа – электроприводного барабана измельчителя-плавителя АВЖ-245, где при таких оборотах происходит тонкое измельчение сырья. Конструктивные размеры резонатора для возбуждения электромагнитного поля резонансной частоты согласовали с длиной волны. Для цилиндрического резонатора его диаметр должен быть кратным половине длины волны (длина волны 12,24 см). Рекомендуют, чтобы линейные размеры в 5–6 раз превышали длину волны генератора. Поэтому диаметр принят равным 6 кратной длине волны (12,24×6 = 73,44 см), а высота цилиндрического резонатора не связана с рабочей длиной волны и можно выбрать произвольно, порядка радиуса поперечного сечения. Приняли, равной

50 см, для эффективной балансировки резонатора при оборотах 200–250 об/мин.

Провели технико-экономическую оценку применения установки в фермерском хозяйстве. Оценку разработанной установки проводили в сравнении с устатановкой для вытопки жира Я-ФИБ (базовый вариант) стоимостью 400 тыс. руб. Расчеты ввелись для измельчения жиросырья и вытопки жиромассы производительностью 100–120 кг/ч при удельном расходе электроэнергии 0,1 кВт·ч/кг и расходе пара (при давлении 0,15–0,3 МПа) 180 кг/ч.

Расчеты показывают, что общая сумма эксплуатационных расходов составляет 150 000 руб./месяц. Себестоимость термообработки и обеззараживания сырья по базовому варианту составляет 6,21 руб./кг. Расчеты эксплуатационных расходов на термообработку отходов убоя животных по проектному варианту установки балансовой стоимостью 130 тыс. руб. показывают, что при производительности 35–40 кг/ч общая сумма расходов составляет 86 993 руб./месяц. Себестоимость термообработки с обеззараживанием сырья составит 4,35 руб./кг.

Выводы

Научную новизну представляют обоснованные конструктивно-технологические параметры установки с электроприводным цилиндрическим резонатором, предназначенной для комплексного воздействия электрофизических факторов на некондиционное мясное сырье в непрерывном режиме с соблюдением электромагнитной безопасности.

Практическую значимость работы представляют 3D модель установки с источниками электрофизических факторов, расположенными внутри электроприводного цилиндрического резонатора; результаты исследования динамики диэлектрического нагрева камер желудки крупного рогатого скота; результаты моделирования электродинамических процессов с использованием CAD/CAE-системы CST Microwave Studio; технические характеристики установки с рациональными параметрами.

Результаты исследования динамики нагрева тонко измельченного сырья показывают, что можно провести термообработку с вытопкой жира в установке с цилиндрическим электроприводным резонатором в непрерывном режиме. При мощности СВЧ-генератора 4,4 кВт и мощности электрогазоразрядных ламп 400 Вт производительность установки составляет 35–40 кг/ч, удельные энергетические затраты равны 0,25–0,28 кВт·ч/кг.

Результаты исследования электродинамических процессов системы и распределения электромагнитного поля в объеме цилиндрического резонатора показывают, что в его центре напряженность электрического поля достигает 4–5 кВ/см, а Е-энергия − 30–40 Дж/м^3. Высокая собственная добротность, подтвержденная расчетным значением (79738), указывает, что термический коэффициент полезного действия может достигнуть 0,73.

При напряженности электрического поля, равной 5 кВ/см, продолжительность воздействия электромагнитного поля СВЧ составляет 0,113 ч, если термический коэффициент полезного действия равен 0,73. Такую продолжительность можно обеспечить при мощности генератора 3–4 Вт/г, т. е. в резонаторе с четырьмя генераторами общей мощностью 4,4 кВт. Тогда в резонаторе может в стационарном режиме обрабатываться сырье массой 1,5 кг. В непрерывном режиме и при воздействии остальных электрофизических факторов в резонаторе одновременно будет обрабатываться 3–4 кг сырья производительностью 35,4 кг/ч.

При напряженности электрического поля 9,79 кВ/см у поверхности коронирующих игл начинается коронный разряд и выделение озона, соответствующей концентрации, что дополнительно с бактерицидным потоком от электрогазоразрядных ламп усиливает эффект обеззараживания продукта.

Радиогерметичность установки обеспечивается электроприводным неферромагнитным спиральным шнеком при загрузке сырья и винтовым шнеком при выгрузке продукта, выполняющие одновременно функцию замедляющей системы, ограничивая излучения.

Таким образом, проектирование радиогерметичной установки с источниками электрофизических факторов в объемном резонаторе с высокой собственной добротностью и с магнетронами воздушного охлаждения, обеспечивающий высокую напряженность электрического поля для термообработки вторичного мясного сырья в условиях фермерских хозяйств в непрерывном режиме, является перспективным; можно переходить к изготовлению образца установки.

Критерии авторства

Результаты исследования принадлежат автору.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

The results of the study belong to the author.

Conflict of interest

The author declared no conflict of interests regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Gorbunova NA, Petrunina IP. Waste management problems in manufacturing products by enterprises of the industry. Meat Industry. 2023;(9):32–36. (In Russ.). [Горбунова Н. А., Петрунина И. П. Проблемы использования отходов при производстве продукции предприятиями мясной отрасли // Мясная индустрия. 2023. № 9. С. 32–36.]. https://www.elibrary.ru/WAGVLY

2. Fayvishevsky ML. Improving the processing of certain meat by-products. Meat Technology. 2022;233(5):44–47. (In Russ.). [Файвишевский М. Л. Совершенствование переработки некоторых видов побочного мясного сырья // Мясные технологии. 2022. Т. 233. № 5. С. 44–47.]. https://www.elibrary.ru/UQVXFX

3. Fayvishevsky ML. Ideas for improving the processing and use of animal raw materials. Meat Technology. 2023; 247(7):40–41. (In Russ.). [Файвишевский М. Л. Некоторые предложения по совершенствованию переработки и использованию животного сырья // Мясные технологии. 2023. Т. 247. № 7. С. 40–41.]. https://www.elibrary.ru/ZPZPGT

4. Uglov VA, Shelepov VG, Borodai EV, Slepchuk VA. Prospects for Using Secondary Resources of Meat Processing Industries Based on Patent Research. Innovations and Food Safety. 2020;(3):39–46. (In Russ.). https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-39-46; https://www.elibrary.ru/PORRLH

5. Ivanov AS, Ivanov VA, Sidorenko DS, Oganezov NI, Rogozhin KV. Breakthrough Electric Wave Technologies and Equipment for Waste Disposal. Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development. 2018;(1):103–110. (In Russ.). [Прорывные электро-волновые технологии и оборудование для утилизации и обезвреживания отходов / А. С. Иванов [и др.] // Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса. 2018. № 1. С. 103–110.]. https://www.elibrary.ru/SQZUAG

6. Krapivnitskaya TK, Bulanova SA, Denisenko AN, Bogdashov AA, Vikharev AA, Sobolev DI, *et al.* Microwave system for processing solid organic raw materials. Microwave and Telecommunication Technology. 2021;(3):380–381. (In Russ.). [Система СВЧ переработки твердого органического сырья / Т. К. Крапивницкая [и др.] // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2021. № 3. С. 380–381.]. https://www.elibrary.ru/WWUUEA

7. Tukhvatullin MI, Arkhangelsky YuS, Akhmetshin AT. Features of Hybrid Microwaveelectrical Installations. Agricultural technology and energy supply. 2021;(4):30–36. (In Russ.). [Тухватуллин М. И., Архангельский Ю. С., Ахметшин А. Т. Особенности гибритных СВЧ электротехнологических установок // Агротехника и энергообеспечение. 2021. № 4. С. 30–35.]. https://www.elibrary.ru/NACSLZ

8. Aipov RS, Gabitov II, Tuhvatullin MI, Linenko AV, Tuktarov MF, Akhmetshin AT. Process Unit for Drying Sawn Timber Rotating in the Ultra High Frequency Field with a Discrete Arrangement of Magnetrons. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2019;25(Suppl. 2):3–11.

9. Fomin DG, Dudarev NV, Darovskikh SN, Klygach DS, Vakhitov MG. Specific Features of Volume-Modular Technology Application in the Design of Microwave Electronic Devices. Ural Radio Engineering Journal. 2021;5(2):91–103. (In Russ.). https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.2.001; https://www.elibrary.ru/SVKGKQ

10. Novikova GV, Zhdankin GV, Belova MV, Mikhailova OV. Installations for Complex Influence of Electrophysical Factors on Raw Materials. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan (Series of Geology and Technical Sciences). 2019;4(436):54–61. https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.97

11. Belova MV, Zhdankin GV, Novikova GV. Creation of Microwave Installation of Container Type for Heat Treatment of Blood and Fat-Containing Raw Materials. Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2016;11(4):74–78. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_592fc7d6407e48.58575824; https://www.elibrary.ru/YPLNDD

12. Mikhailova O, Gdankin G, Prosviryakova M, Novikova G, Storchevoy V. Microwave Heating of Slaughterhouse Confiscations to Increase the Feed Value. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021;857:012002. https://doi.org/10.1088/1755-1315/857/1/012002

13. Novikova GV, Prosviryakova MV, Mikhailova OV, Tikhonov AA, Fedorov ME, Romanov PN. Development of an Installation with a Microwave Power Supply for Grinding and Melting of Fat Raw Materials in a Non-Standard Resonator. Bulletin NGIEI. 2023;140(1):34−43. (In Russ.). [Разработка установки с СВЧ-энергоподводом для измельчения и плавления жиросырья в нестандартном резонаторе / Г. В. Новикова [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2023. Т. 140. № 1. С. 34–43.]. https://www.elibrary.ru/MOMWOF

14. Tikhonov AA, Kazakov AV, Belova MV, Mikhailova OV, Novikova GV. Icrowave Unit with a Quasi-Stationary Resonator for Melting of Decontaminated Fat from Milled Fat-Containing Material in Continuous Mode. Russia patent RU 2726565C1. 2020. [СВЧ установка с квазистационарным резонатором для вытопки обеззараженного жира из измельчённого жиросодержащего сырья в непрерывном режиме: пат. 2726565C1 Рос. Федерация. № 2019122928 / Тихонов А. А. [и др.]; заявл. 16.07.2019; опубл. 14.07.2020. 9 с. Бюл. № 20.].

15. Prosviryakova MV, Tikhonov AA, Ziganshin BG, Mikhailova OV, Novikova GV. Intensification of the Process of Extracting Fat from Fat-Containing Raw Materials by Dielectric Heating. Bulletin of the Kazan State Agrarian University. 2022;17(3):96–105. (In Russ.). [Интенсификация процесса извлечения жира из жиросодержащего сырья диэлектрическим нагревом / М. В. Просвирякова [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 3. С. 96–105.]. https://www.elibrary.ru/VMESJJ

16. Alekseychik LV, Kurushin AA. Simulation of Microwave Dielectric Resonator by Plane Electromagnetic Wave. Journal of Radio Electronics. 2020;(11):6. (In Russ.). [Алексейчик Л. В., Курушин А. А. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 11. С. 6.]. https://www.elibrary.ru/XYFOXB

17. Titov EV, Soshnikov AA, Vasiliev VYu, Solovskoy AS. Computer Simulation of Superimposed Electromagnetic Waves from Electromagnetic Field Sources in a Wide Frequency Range. Bulletin of Altai State Agricultural University. 2022;(3):102−108. (In Russ.). [Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот / Е. В. Титов [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 3. С. 102–108.]. https://www.elibrary.ru/WJXMFX

18. Sivyakov BK, Grigoryan SV. Mathematical Modeling of Multi-Wave Microwave Installations for Drying Products. Journal of Electrotechnics. 2019;(4):5−11. (In Russ.). [Сивяков Б. К., Григорьян С. В. Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов // Вопросы электротехнологии. 2019. № 4. С. 5−11.]. https://www.elibrary.ru/ZTXFUW

19. Ryabchenko VYu, Paslyon VV. Computer Simulation of Objects with CST Microwave Studio. Modern Issues in Radioelectronics and Telecommunications. 2018;(1):139. (In Russ.). [Рябченко В. Ю., Паслён В. В. Математическое моделирование многоволновой СВЧ установки для сушки продуктов // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2018. № 1. С. 139.]. https://www.elibrary.ru/QIKITH

20. Voronov EV. Research and Justification of Parameters for a Microwave Setup Implementing a Resource-Saving Technology for Heat Treatment of Meat Waste. Bulletin NGIEI. 2023;(8):33–43. (In Russ.). [Воронов Е. В. Исследование и обоснование параметров СВЧ установки, реализующей ресурсосберегающую технологию термообработки мясных отходов // Вестник НГИЭИ. 2023. № 8. С. 33−43.]. https://www.elibrary.ru/POTHMG