

МИКРОВОЛНОВАЯ УСТАНОВКА С ЩЕЛЕВЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕЗОНАТОРОМ ДЛЯ ВЫТОПКИ ЖИРА ИЗ МЯСНЫХ ОТХОДОВ

Е. В. Воронов, Г. В. Новикова, С. А. Суслов, О. В. Михайлова, М. В. Просвирякова

По данным Росстата, в 2022 году в России объем выращенного крупного рогатого скота на мясо составил 1673,5 тыс. тонн. После убоя в сутки на мясокомбинатах РФ накапливается 126,3 тонн вторичного мясного сырья, из которых производят кормовую и техническую продукцию. Но при термообработке желудков жвачных животных используют установки с высокими эксплуатационными затратами. Поэтому существует необходимость переработки указанного сырья в кормовую продукцию с использованием энергии электромагнитных излучений сантиметровых волн. Целью исследований является разработка СВЧ-установки с электроприводным щелевым резонатором в экранирующем корпусе для термообработки сырья в непрерывном режиме с реализацией рекуперации электромагнитной мощности в кольцевом объеме, излучаемой системой первичных источников в резонаторе. Исследуемое сырье – слизистые субпродукты жвачных животных. Внутри корпуса установки, с зазором не более 3,06 см от верхнего его основания, где размещены магнетроны, соосно расположен электроприводной цилиндрический щелевой резонатор без верхнего основания, а соосно с ним – керамическая перфорированная воронка. Средний кольцевой объем кратен половине длины волны. Боковая поверхность резонатора представлена как вертикально расположенные стержни со щелями между ними. Установка представлена как соосно расположенные цилиндрический щелевой и коаксиальный резонаторы. Резонатор обеспечивает: возбуждение электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) и концентрацию энергии в сырье за счет керамической воронки; высокую напряженность электрического поля (до 2 кВ/см); рекуперацию мощности потока излучений через щели резонатора; радиогерметичность за счет заградительного волновода; тонкое измельчение сырья в процессе удара о ферромагнитные стержни резонатора. Термообработка сырья происходит производительностью 40–45 кг/ч, при пропускной способности электроприводного щелевого резонатора с керамической перфорированной воронкой 59 кг/ч и удельных энергетических затратах 0,29 кВт·ч/кг. Экономический эффект составляет 456 246 руб./месяц.

Ключевые слова: щелевой электроприводной резонатор, рекуперация энергии электромагнитных излучений, слизистые субпродукты, непрерывный режим.

По данным Росстата, в 2022 году в России объем выращенного крупного рогатого скота (КРС) на мясо составил 1673,5 тыс. тонн, в убойном весе 14,7% [1]. Наиболее трудоемкими в переработке субпродуктами являются многокамерные желудки крупного рогатого скота (КРС) и мелкого рогатого скота (МРС) [2]. Они относятся к слизистым субпродуктам. В среднем 2%, т.е. 33 470 тонн субпродуктов второй категории накапливается в год по РФ в структуре мясного животноводства. В сутки необходимо переработать 126,3 тонн субпродуктов второй категории. Слизистые субпродукты следует перерабатывать в течение 3 часов после убоя [3]. Поэтому суммарная производительность установок для переработки

сырья должна составлять 42,1 т/ч. Если производительность проектируемой установки со сверхвысокочастотным энергоподводом составляет 40–45 кг/ч, то необходимое их количество в пределах 1000 шт. С учетом вида убойного скота накапливаются субпродукты говяжьи, конские, олени, верблюжьи, бараньи, свиные. Следовательно, количество необходимых установок для переработки сырья с вытопкой жира, включая резервные, для РФ составит 6–7 тысяч.

Существующее оборудование для тепловой обработки жирового сырья – это установки, работающие по способу непрямого контакта – рубашечные котлы, шнековые аппараты с рубашкой. Есть непрерывно-поточные линии для вытопки жира, различающиеся конструкциями



отдельного оборудования, например содержащую установку для вытопки жира Я8-ФИБ [3]. Она предназначена для предварительного измельчения жирсырья, вытопки жиромассы. После этой установки необходимо использовать питательный бак, далее центрифугу, где жиромасса разделяется на жир и шквару; расход пара при этом достаточно высокий – 180 кг/ч при давлении 0,3 МПа и температуре пара 120 °С, мощность электродвигателя 15 кВт. Контакт пара с сырьем обеспечивает эффективное использование теплоты, но снижает потребительские показатели жира и шквары.

Анализируются техническая и экономическая эффективность мясоперерабатывающей промышленности и ферм по производству мясной продукции в других странах, где повышают эффективность производства путем автоматизации основных технологических процессов [4–6].

Есть научные разработки по исследованию электроволновых технологий [7–9]. Используют СВЧ-энергию для гидролитической и биотехнологической переработки сырья [10] и предлагают модели конвейерного способа переработки веществ [11]. Имеются работы по обоснованию суммарного потока электромагнитных излучений [12–14] и по моделированию распределения электромагнитного поля в СВЧ-устройствах и обоснованию параметров тороидального резонатора [15–17]. Существуют научные работы по выработке методологии разработки СВЧ-установок для обработки других видов сельскохозяйственного сырья [18–20]. Разработанные в научной школе опытные образцы СВЧ-установок для термообработки мясного сырья в непрерывном режиме [21–23] усовершенствуются для снижения энергетических затрат и сохранения кормовой ценности продукта [24, 25].

Прототипом является СВЧ-установка для термообработки мясного сырья в процессе маслирования в рассоле [26–28], ее недостаток – циклический режим работы [29], а следовательно, низкая эффективность установки.

Научная проблема – низкая эффективность технических средств, предназначенных для термообработки слизистых субпродуктов.

Цель исследования – разработка технологии и СВЧ-установки с электроприводным цилиндрическим щелевым резонатором

в экранирующем корпусе для термообработки измельченных слизистых субпродуктов животных в непрерывном режиме с реализацией двух инновационных идей:

1) рекуперация электромагнитной мощности в кольцевом объеме, излучаемой системой первичных источников в цилиндрическом щелевом резонаторе;

2) генерация электромагнитного поля сантиметрового диапазона в электроприводном цилиндрическом щелевом резонаторе.

Материалы и методы исследования

Исследуемым сырьем являются слизистые субпродукты 2-й категории, имеющие питательную ценность ниже, чем мясо, являющиеся дополнительным источником животного белка. Это желудок жвачных животных (рубец, сетка, книжка, пищевод, сычуг), свиные некондиционные желудки [1].

После анализа информации о динамике электромагнитного поля диэлектрического нагрева [30–32] и о распределении сантиметрового диапазона в резонаторах разного конструктивного исполнения [33–35], о возможности обеспечения равномерного распределения электрического поля в резонаторах со щелями [36, 37] и контроля параметров с моделированием процесса обработки сырья [38, 39], разработана новая установка с СВЧ-энергоподводом в резонатор, реализующая две вышеуказанные инновационные идеи.

Пропускная способность электроприводного щелевого резонатора вычислена с учетом обоснованных в соответствии с длиной волны 12,24 см размеров корпуса резонатора и угла наклона керамической перфорированной воронки, когда содержание шквары в сырье составляет 50% по методике В.И. Ивашова.

Исследования динамики нагрева слизистых субпродуктов проводили в имеющейся лаборатории научной школы в СВЧ-установках с учетом рекомендаций других авторов [29].

Оценка технико-экономических показателей применения установки с СВЧ-энергоподводом для термообработки слизистых субпродуктов жвачных животных проведена, опираясь на существующую методику расчета [40], через эксплуатационные издержки на термообработку сырья за месяц по отношению к базовой установке для вытопки жира Я8-ФИБ.

Результаты и обсуждение

Установка с СВЧ-энергоподводом в щелевой цилиндрический резонатор для вытопки жира из измельченных слизистых субпродуктов в непрерывном режиме (рис. 1) содержит в цилиндрическом экранирующем корпусе 2 соосно расположенный электроприводной цилиндрический щелевой резонатор 4. Магнетроны равномерно установлены на верхнем основании корпуса 2 так, что излучатели направлены в электроприводной цилиндрический щелевой резонатор. Средний периметр кольцевого объема 10 между экранирующим корпусом и щелевым резонатором кратен половине длины волны, а зазор между их боковыми поверхностями не менее половины длины волны (6,12 см). Под нижним наклонным основанием 6 экранирующего корпуса размещена ферромагнитная приемная емкость 9 с шаровым краном. Боковая поверхность щелевого резонатора представлена как вертикально расположенные фер-

ромагнитные стержни со щелями между ними, и одни концы стержней прикреплены на нижнее основание по его периметру, а другие концы стержней прикреплены к верхнему ферромагнитному ободку. Зазор между верхним ободком и верхним основанием цилиндрического экранирующего корпуса 2 не более четверти длины волны (3,06 см). Внутри щелевого резонатора соосно расположена керамическая электроприводная перфорированная воронка 5 (диаметр отверстий 1,2–6 мм), жестко прикрепленная к нижнему основанию резонатора. Керамическая воронка обеспечивает концентрацию энергии ЭМП СВЧ в сырье и уменьшает потери на излучение, так как обладает малыми диэлектрическими потерями [24, 25]. Под воронкой 5 жестко прикреплен патрубок 7 к нижнему основанию 6 экранирующего корпуса 2, выполняющий функцию запредельного волновода. Щелевой резонатор 4 и воронка 5 закреплены на фторопластовый электроприводной вал.

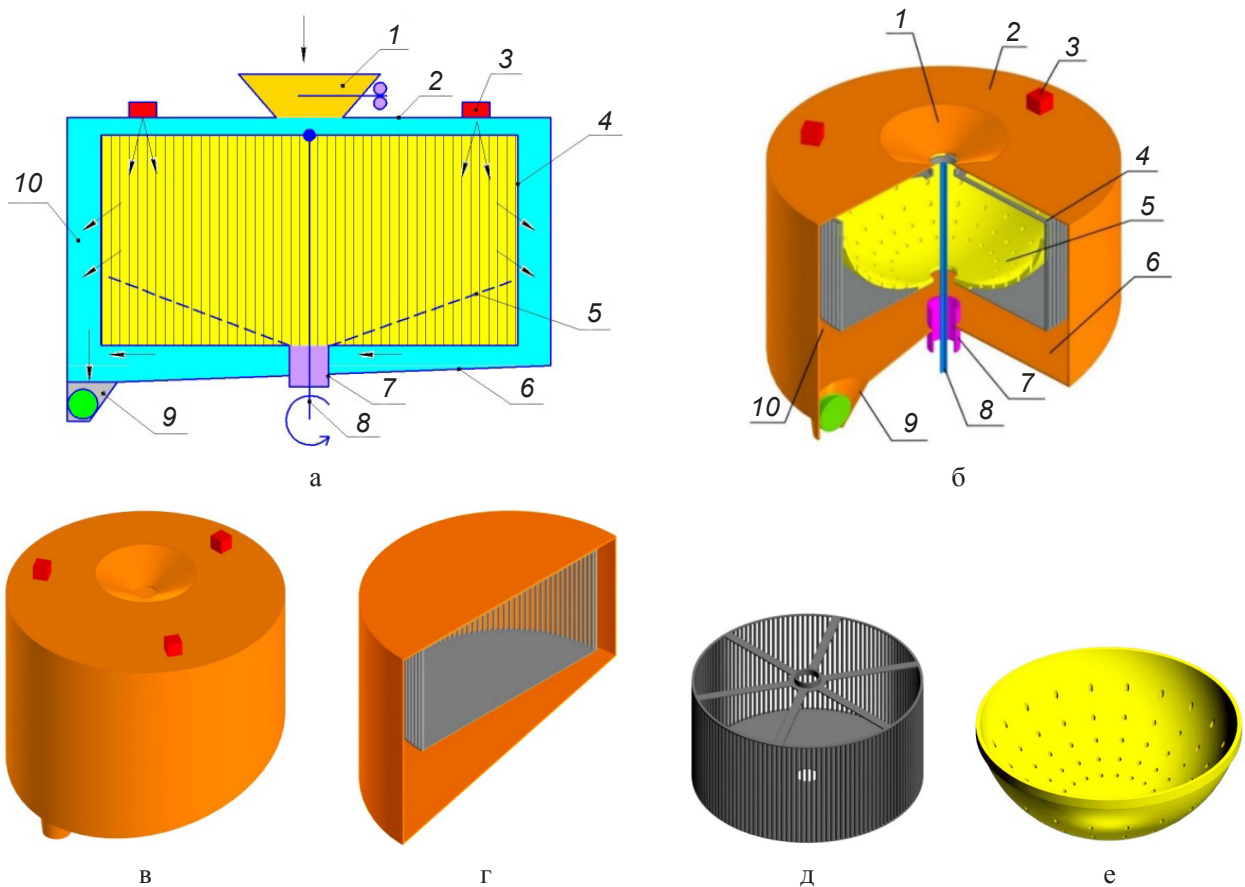


Рис. 1. Установка с СВЧ-энергоподводом в щелевой цилиндрический резонатор для вытопки жира из слизистых субпродуктов: а – технологическая схема; б – общий вид; в – расположение магнетронов на корпусе; г – расположение резонатора в корпусе, разрез; д – резонатор; е – керамическая воронка



Технологический процесс осуществляется путем загрузки предварительно измельченных слизистых субпродуктов в загрузочную емкость 1 при закрытой неферромагнитной задвижке. Включается электропривод, после чего начинают вращаться цилиндрический щелевой резонатор 4 и керамическая электроприводная перфорированная воронка 5. Измельченные субпродукты поступают в электроприводной цилиндрический щелевой резонатор 4 после открытия задвижки в приемной емкости. Далее включить все вентиляторы и магнетроны 3, излучатели которых направлены в цилиндрический щелевой резонатор, где возбуждается ЭМП СВЧ. Измельченное сырье в электроприводном щелевом резонаторе за счет токов поляризации равномерно нагревается (в соответствии с глубиной проникновения волны) во взвешенном состоянии.

Из сырья вытапливается жир при перемешивании, и за счет центробежной силы вытопленный жир просачивается через щели между стержнями резонатора 4. Шквара с сырьем в керамической электроприводной воронке 5 продолжает нагреваться в ЭМП СВЧ, и вытопленный жир через перфорацию вытекает, а шквара выгружается через неферромагнитный патрубок 7, который одновременно служит запредельным волноводом. Вытопленный жир по наклонному основанию стекает в приемную емкость 9, откуда открывая шаровой кран, можно слить вытопленный жир. Кольцевой объем 10 выполняет функцию коаксиального резонатора, так как в нем происходит рекуперация мощности потока электромагнитных излучений через щели электроприводного цилиндрического резонатора 4 (реализация первой инновационной идеи). В этом объеме вытопленный жир продолжает эндогенно нагреваться, его вязкость уменьшается, и легко вытекает через приемную емкость 9.

Инновационные идеи и сущность термообработки измельченных слизистых субпродуктов жвачных животных – продолжение нагрева вытопленного жира за счет электромагнитного излучения через щели между стержнями цилиндрического щелевого резонатора заключаются в следующем.

Первая инновационная идея. СВЧ-установка выполнена в виде соосно расположенных двух резонаторов: первый – внутренний неферромагнитный цилиндрический щелевой резонатор, а второй резонатор представлен как коаксиальный резонатор между неферромагнитным

экранирующим корпусом и щелевым электроприводным резонатором. Магнетроны воздушного охлаждения установлены со сдвигом на 120 градусов на верхнем основании экранирующего корпуса, излучатели которых направлены в щелевой резонатор через его верхний открытый торец. Возбуждение ЭМП СВЧ в коаксиальном резонаторе происходит за счет рекуперации электромагнитных излучений через щели между стержнями щелевого резонатора. Наличие кольцевого объема между щелевым резонатором и экранирующим корпусом создает условия для рекуперации (повторного и многократного использования) электромагнитной мощности, излучаемой системой первичных источников. В коаксиальном резонаторе происходит повторное воздействие на вытопленный жир электромагнитного поля бегущей волны [26].

Вторая инновационная идея. По методике А. В. Стрекалова*, если отношение высоты неферромагнитного цилиндрического щелевого резонатора к его радиусу меньше или равно двум, то основным электромагнитным колебанием будет H_{011} , обладающий особым свойством, не требующим наличие контакта между боковой поверхностью цилиндра и основанием. Поэтому разработан цилиндрический щелевой резонатор высотой 24,48 см, диаметром 48,96 см, без верхнего основания, расположенный в неферромагнитном цилиндрическом экранирующем корпусе. При этом в стенках резонатора возбуждаются только токи, текущие по окружности цилиндра. Благодаря этому свойству между ободком, соединяющим концы неферромагнитных стержней, и верхним основанием цилиндрического экранирующего корпуса может существовать зазор [26, 29].

Обеззараживание вытопленного жира и шквары достигается путем концентрации энергии электромагнитных излучений от магнетронов керамической электроприводной перфорированной воронкой 5. Напряженность электрического поля достигает 1,5–2 кВ/см. Электромагнитная безопасность при работе установки обеспечивается, во-первых, неферромагнитной задвижкой в загрузочной емкости 1 и, во-вторых, неферромагнитным патрубком 7, выполняющим функцию запредельного волновода, в-третьих, с шаровым краном в приемной емкости 9.

* Стрекалов, А. В. Электромагнитные поля и волны : учебное пособие / А. В. Стрекалов, Ю. А. Стрекалов. – М. : ИРИО; ИНФРА-М, 2014. – 375 с.

Проведен расчет пропускной способности (M) электроприводного щелевого резонатора с керамической перфорированной воронкой по методике В. И. Ивашова:

$$M = q \cdot F \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3, \quad (1)$$

где q – удельная пропускная способность перфорированной электроприводной воронки, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

F – площадь перфорированной керамической воронки, м^2 ;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров воронки и содержания шквары в жирсырье.

Зависимость коэффициента k_1 , учитывающего угол наклона керамической воронки α к горизонту, приведена на рисунке 2 а, описывается полиномом второго порядка:

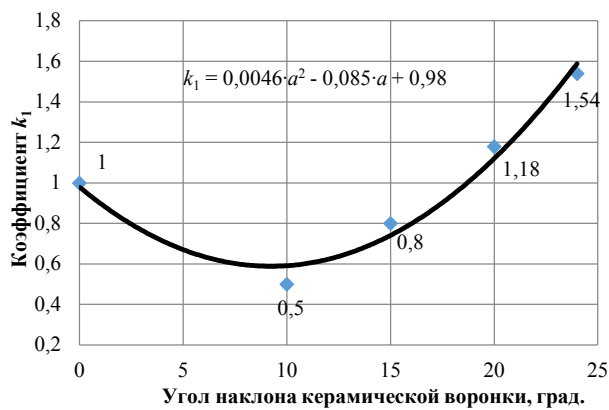
$$k_1 = 0,0046 \cdot a^2 - 0,085 \cdot a + 0,98. \quad (2)$$

Коэффициент k_2 учитывает содержание жира (%) в смеси со шкварой. Эта зависимость приведена на рисунке 2 б, описывается эмпирическим выражением:

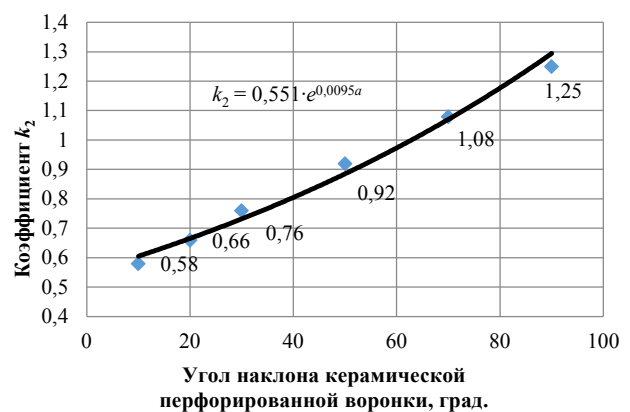
$$k_2 = 0,551 \cdot e^{0,0095a}. \quad (3)$$

Коэффициент k_3 учитывает содержание шквары с размером, меньшим 0,5 размера отверстий перфорации керамической воронки. Зависимость коэффициента k_3 от содержания шквары (x , %) в смеси приведена на рисунке 2 в, описывается эмпирическим выражением:

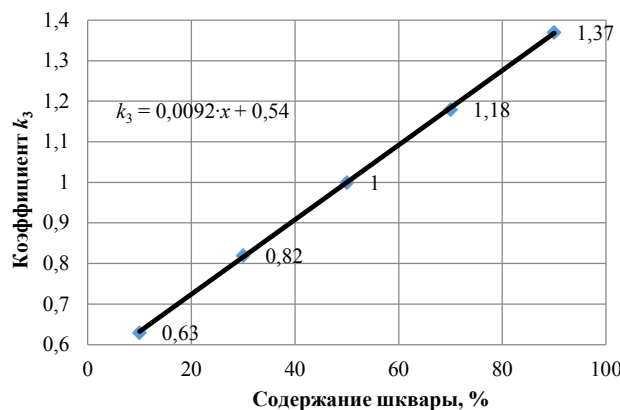
$$k_3 = 0,0092 \cdot x + 0,54. \quad (4)$$



а



б



в

Источник: разработано авторами на основании данных В.И. Ивашова*

Рис. 2. Зависимости коэффициентов от конструктивных параметров воронки и содержания шквары в жирсырье: а – k_1 ; б – k_2 ; в – k_3

* Ивашов, В. И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. Часть 1. Оборудование для убоя и первичной обработки / В. И. Ивашов. – Москва : Колос, 2001. – С. 497.



Расчет рабочей площади (F), через которую просачивается вытопленный жир, сводится к определению суммы площади поверхности вращающейся керамической перфорированной воронки (F_1) и части цилиндрической обечайки щелевого резонатора (F_2), так как жирсырье поднимается на некоторую высоту и затем соскальзывает по поверхности сферической воронки.

Тогда пропускную способность электроприводного щелевого резонатора с керамической перфорированной воронкой можно вычислить при определенном угле наклона воронки (α , град), и содержание шквары (x , %) описывается выражением:

$$M = q \cdot F \cdot (0,0046 \cdot a^2 - 0,085 \cdot a + 0,98) \times (0,551 \cdot e^{0,0095a}) \cdot (0,0092 \cdot x + 0,54) \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (5)$$

Проведены расчеты пропускной способности резонатора при нижеприведенных размерах. Размеры экранирующего корпуса: диаметр 61,2 см, высота 30,6 см; размеры щелевого резонатора: высота 24,48 см, диаметр 48,96 см; размеры керамической перфорированной воронки: диаметр сферического сегмента 48,96 см, высота воронки 8,16 см; угол наклона воронки 20 градусов ($k_1 = 1,18$, $k_2 = 0,6$); содержание шквары 50% ($k_3 = 1$).

Площадь поверхности сферического сегмента:

$$F_1 = 6,28 \cdot R \cdot h_1, \quad (5)$$

где R – радиус сферы, см;

h_1 – высота сегмента, см (8,16 см).

Площадь поверхности сферического сегмента:

Таблица 1 – Экономические показатели внедрения установки с СВЧ-энергоподводом в электроприводной цилиндрический щелевой резонатор для термообработки слизистых субпродуктов жвачных животных

№ п/п	Показатели	Проектная	Базовая
1	Балансовая стоимость установки, руб.	130 000	350 000
2	Производительность установки, кг/ч	45–50	150
3	Потребляемая мощность установки, кВт	14,5	15
4	Потребляемая электроэнергия, кВт·ч/кг	0,29	0,15
	Расходы на потребление пара, руб./месяц	–	15 000
5	Эксплуатационные расходы на термообработку слизистых субпродуктов, руб./месяц	86 993	114 254
6	Себестоимость расходов на термообработку слизистых субпродуктов жвачных животных, руб./кг	6,21	4,35
7	Цена слизистых субпродуктов жвачных животных, руб./кг	40	40
8	Себестоимость вытопленного жира и шквары, руб./кг	46,21	40,35
9	Цена реализации вытопленного жира, руб./кг	200	
10	Цена реализации жиромассы, руб./кг	–	160
11	Прибыль, руб./кг	153,79	119,65
12	Объем термообработанных слизистых субпродуктов жвачных животных, кг/месяц	14 000	26 250
13	Капитальные затраты на технологический процесс термообработки сырья, руб./кг/месяц	9,28	13,33
14	Рентабельность, %	332	296
15	Повышение рентабельности, %	36	
16	Срок окупаемости установки, месяц	0,3	0,8
17	Экономический эффект от применения установки с СВЧ энергоподводом в щелевой резонатор для термообработки слизистых субпродуктов жвачных животных $[(40,35 + 0,2 \cdot 13,33) \cdot 26 250 - (46,21 + 0,2 \cdot 9,28) \cdot 14 000] = 456 246$ руб./месяц		

$$F_1 = 6,28 \cdot 24,48 \cdot 8,16 = 1254,5 \text{ см}^2.$$

Площадь цилиндрической обечайки щелевого резонатора:

$$F_2 = 6,28 \cdot R \cdot h_2 = 6,28 \cdot 24,48 \cdot 16,32 = 2509 \text{ см}^2, \quad (6)$$

где h_2 – высота рабочей части обечайки цилиндрического щелевого резонатора, см (16,32 см).

$$F = F_1 + F_2 = 1254,5 + 2509 = 3763,5 \text{ см}^2. \quad (7)$$

Пропускную способность можно оценить по удельной нагрузке на 1 м^2 , которую принимают равной $q = 0,33 \dots 0,56 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$.

Пропускная способность электроприводного щелевого резонатора с керамической перфорированной воронкой равна:

$$M = q \cdot F \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = 0,33 \cdot 0,37635 \cdot 1,18 \cdot 0,6 \cdot 1 = 0,088 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (8)$$

С учетом плотности жира 670 кг/м^3 пропускная способность резонатора может составить $50\text{--}59 \text{ кг/ч}$. При мощности трех генераторов $4,4 \text{ кВт}$ установка может провести термообработку сырья за счет диэлектрического нагрева производительностью $45\text{--}50 \text{ кг/ч}$.

Проведена экономическая оценка применения установки с СВЧ энергоподводом в электроприводной цилиндрической щелевой резонатор в экранирующем корпусе для термообработки слизистых субпродуктов жвачных животных в непрерывном режиме по стандартной методике [40]. За базовый вариант принимали установку для вытопки жира Я8-ФИБ. Результаты оценки экономической эффективности сведены в таблицу 1. Оценен комплекс показателей: производительность установки, эксплуатационные затраты на получение продукции, капитальные вложения на изготовление установки и срока ее окупаемости за счет экономии эксплуатационных издержек.

Выводы

Цилиндрический электроприводной щелевой резонатор обеспечивает:

- возбуждение ЭМП СВЧ при непрерывном режиме работы, когда зазор между боковой поверхностью резонатора и основанием экранирующего корпуса меньше $3,06 \text{ см}$;

- повторное использование мощности потока электромагнитных излучений через щели электроприводного цилиндрического резонатора, средним периметром кольцевого объема кратным $6,12 \text{ см}$;

- концентрацию энергии ЭМП СВЧ в сырье за счет керамической воронки;

- электромагнитную безопасность с заградительным волноводом и шаровым краном;

- высокую напряженность электрического поля (выше $1,5 \text{ кВ/см}$), достаточную для снижения бактериальной обсемененности продукта;

- переработку измельченных слизистых субпродуктов жвачных животных по малоотходной технологии, более тонким измельчением в процессе удара о ферромагнитные стержни боковой поверхности щелевого резонатора.

Благодаря снижению эксплуатационных расходов при применении разработанной установки и реализации готовой продукции (соответствующей потребительским свойствам) можно достичь экономического эффекта в размере $456\,246 \text{ руб./месяц}$.

Список литературы

1. Горбунова, Н. Проблемы использования отходов при производстве продукции предприятиями мясной отрасли / Н. Горбунова, И. П. Петрунина // Мясная индустрия. – 2023. – № 9. – С. 32–36. – DOI 10.37861/2618-8252-2023-09-32-36.
2. Киселева, И. С. Ресурсосберегающие технологии переработки мясной продукции / И. С. Киселева, Ф. Я. Рудик, О. В. Романова // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 5. – С. 140–145. – DOI 10.28983/asj.y2023i5pp140-145.
3. Файвишевский, М. Л. Некоторые рекомендации по совершенствованию переработки непищевого сырья на мясокомбинатах / М. Л. Файвишевский // Мясные технологии. – 2017. – № 1(169). – С. 48–50.
4. Kamel, G. The Technical and Economic Efficiency for Red meat Production Farms in New Valley Governorate / G. Kamel // Alexandria Science Exchange Journal. – 2022. – Vol. 43. – № 1. – P. 341–361. – DOI 10.21608/ase-jaiqjsae.2022.223965. – EDN TDNJDQ.
5. Jafrizal, J. Efficiency analysis of meat processing industry in Indonesia / J. Jafrizal, B. Robiani, S. Suhel // Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences. – 2017. – № 1(61). –



P. 294–304. – DOI 10.18551/rjoas.2017-01.33. – EDN XVQHMF.

6. Artificial intelligence-driven automation is how we achieve the next level of efficiency in meat processing / Ch. Barbar, Ph. D. Bass, R. Barbar [et al.] // *Animal Frontiers*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – P. 56–63. – DOI 10.1093/af/vfac017. – EDN WVXVNH.

7. Прорывные электроволновые технологии и оборудование для утилизации и обезвреживания отходов / А. С. Иванов, В. А. Иванов, Д. С. Сидоренко [и др.] // *Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса*. – 2018. – № 1. – С. 103–110. – EDN SQZUAG.

8. Hao Jianga Microwave processing: Effects and impacts on food components / Hao Jianga, Zhigang Liua, Shaojin Wangb // *Critical reviews in food science and nutrition*. – DOI <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1319322>.

9. The application of electrophysical effects in the processing of agricultural materials / D. A. Budnikov, A. N. Vasiliev, A. A. Vasilyev [et al.] // *Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development*. – Hershey, PA, USA, 2019. – P. 1–27. – DOI 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch001.

10. Болтовский, В. С. Использование СВЧ-энергии для гидролитической и биотехнологической переработки растительного сырья: возможности, состояние и перспективы / В. С. Болтовский // *Труды БГТУ. Сер. 2 : Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2020. – № 1(229). – С. 82–92. – EDN WXKICZ.

11. Веденькин, Д. А. Модель конвейерного способа переработки веществ при помощи СВЧ-нагрева / Д. А. Веденькин, А. З. Халиков, Р. Р. Хабибуллин // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 2(49). – С. 50. – EDN YATERV.

12. Белов, А. А. Суммирование потока электромагнитного излучения магнетронов в волноводе / А. А. Белов, Е. Ю. Савенко // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 4. – С. 256–259. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-4-256-25.

13. Белов, А. А. Исследование мощности потока излучений около сверхвысокочастотных установок / А. А. Белов // *Естественные и технические науки*. – 2016. – № 5(95). – С. 92–94. – EDN WHRAKX.

14. Савенко, Е. Ю. Разработка источника импульсного высокого напряжения для элект-

трофической установки / Е. Ю. Савенко, А. А. Белов // *Естественные и технические науки*. – 2022. – № 2(165). – С. 21–26. – EDN VJQBES.

15. Белов, А. А. Моделирование распределения электромагнитного поля в устройстве сложения мощностей СВЧ-магнетронов / А. А. Белов, Ю. А. Собченко // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. – 2020. – Т. 67. – № 1(38). – С. 11–15. – DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-1-11-15.

16. Белов, А. А. Аналитическое обоснование параметров тороидального резонатора / А. А. Белов // *Тенденции развития науки и образования*. – 2018. – № 43-8. – С. 7–9. – DOI 10.18411/lj-10-2018-180.

17. Belov, A. Effect of microwave pretreatment on the exchange energy of forage barley / A. Belov, A. Vasilyev, A. Dorokhov // *Journal of Food Process Engineering*. – 2021. – Vol. 44. – № 9. – P. e13785. – EDN STHXGB.

18. Шамин, Е. А. Методология разработки СВЧ-установки для сбора пуха со шкур кроликов / Е. А. Шамин // *Вестник НГИЭИ*. – 2022. – № 1(128). – С. 38–45. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-1-38-45.

19. Горячева, Н. Г. Анализ конструктивных исполнений конвективно-сверхвысокочастотных хмелесушилок / Н. Г. Горячева // *Вестник НГИЭИ*. – 2023. – № 5(144). – С. 57–71. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-5-57-71.

20. Шевелев, А. В. Исследование динамики нагрева воскового сырья в электромагнитном поле СВЧ / А. В. Шевелев, М. С. Жужин, Е. А. Сбитнев // *Вестник НГИЭИ*. – 2022. – № 6(133). – С. 32–43. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-6-32-43.

21. Жданкин, Г. В. Исследование режимов работы установки СВЧ для термообработки и обеззараживания непищевого сырья животного происхождения / Г. В. Жданкин, В. Ф. Сторчевой, Г. В. Новикова // *Российская сельскохозяйственная наука*. – 2019. – № 6. – С. 65–69. – DOI 10.31857/S2500-26272019665-69.

22. Сторчевой, В. Ф. Разработка сверхвысокочастотной установки для термообработки непищевых отходов убоя и переработки птицы / В. Ф. Сторчевой, Г. В. Жданкин // *Научная жизнь*. – 2016. – № 11. – С. 10. – EDN XETNFP.

23. Белов, А. А. Разработка радиоволновых установок для термообработки сырья / А. А. Белов, Г. В. Жданкин, В. Ф. Сторчевой // *Вестник*

НГИЭИ. – 2016. – № 10(65). – С. 7–14. – EDN WXBXNH.

24. Воронов, Е. В. Исследование и обоснование параметров СВЧ-установки, реализующей ресурсосберегающую технологию термообработки мясных отходов / Е. В. Воронов // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 8(147). – С. 33–43. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-8-33-43.

25. Воронов, Е. В. Исследование и разработка СВЧ установки для термообработки и обеззараживания жиросодержащих отходов убоя животных / Е. В. Воронов, Г. В. Новикова, М. В. Просвирякова // Известия Санкт-Петербургского ГАУ. – 2023. – № 4(73). – С. 126–136.

26. Ершова, И. Г. Повышение эффективности функционирования мясомассажера с источниками сверхвысокочастотной энергии при термообработке сырья / И. Г. Ершова, Д. В. Поручиков // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 1(30). – С. 34–45.

27. Uhf device introduction for animal raw material processing / D. Poruchikov, G. Samarin, A. Vasilyev [et al.] // Helix. – 2020. – Vol. 10. – № 3. – P. 64–68. – DOI 10.29042/2020-10-3-64-68.

28. Microwave installation for accelerating the process of salting the food products / D. Poruchikov, I. Ershova, A. Vasiliev [et al.] // E3S Web of Conferences. International Conference on Efficient Production and Processing, ICEPP 2020. – 2020. – P. 01048. – DOI 01048. 10.1051/e3s-conf/202016101048.

29. Ершова, И. Г. Экспериментальные исследования теплоносителя при воздействии поля сверхвысокой частоты / И. Г. Ершова, А. Н. Васильев, Д. В. Поручиков // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. – № 5. – С. 33–37. – DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-5-33-37.

30. Королев, А. А. Разработка метода определения граничных условий обработки сырья в СВЧ поле для нивелирования термической компоненты / А. А. Королев, В. В. Кондратенко // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. : Процессы и аппараты пищевых производств. – 2021. – № 2(48). – С. 3–12. – DOI 10.17586/2310-1164-2021-14-2-3-12.

31. Каткова, Т. О. Генератор СВЧ на кольцевом эллиптическом резонаторе в объемном интегральном исполнении / Т. О. Каткова, Э. Ю. Седышев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – С. 430–433. – EDN SWJDTM.

32. Давидович, М. В. Возбуждение прямоугольного резонатора через окна связи в конвейерной установке СВЧ-нагрева / М. В. Давидович, А. К. Кобец, К. А. Саяпин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 88–99. – DOI 10.18469/1810-3189.2022.25.4.88-99.

33. Еременко, В. Т. Основы построения направляющих систем и объемных резонаторов / В. Т. Еременко. – Орел : ОГУ имени И. С. Тургенева, 2017. – 229 с.

34. Кабдин, Н. Е. Обеспечение равномерности СВЧ-обработки сельскохозяйственных материалов в объемном резонаторе / Н. Е. Кабдин, С. А. Андреев // Международный технико-экономический журнал. – 2018. – № 4. – С. 42–49. – EDN YUZNUD.

35. Давидович, М. В. Возбуждение цилиндрического резонатора током спирали и осевым током электронного пучка / М. В. Давидович, Н. А. Бушуев // ЖТФ. – 2013. – Т. 83. – № 7. – С. 135–145. – URL : <https://journals.ioffe.ru/articles/10964>.

36. Исследование объемного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором / Д. Г. Фомин, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских, В. К. Баранов // Ural Radio Engineering Journal. – 2020. – Т. 4. – № 3. – С. 277–292. – DOI 10.15826/urej.2020.4.3.002.

37. Титов, Е. В. Компьютерное моделирование наложенных электромагнитных волн от источников электромагнитного поля в широком диапазоне частот / Е. В. Титов, А. А. Сошников, В. Ю. Васильев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3(209). – С. 102–108. – DOI <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-209-3-102-108>.

38. Разработка метода контроля параметров процесса микроволновой переработки отходов животноводства / С. В. Смирнов, Г. А. Морозов, О. Г. Морозов [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 11-1(101). – С. 67–73. – DOI 10.23670/IRJ.2020.101.11.010.

39. Microwave drying of wood, mathematical simulation of rotating lumber in the SHF field / M. I. Tuhvatullin, R. S. Aipov, A. V. Linenko [et al.] // International Journal of Advanced Science and Technology. – 2019. – Vol. 28. – № 9. – P. 208–218.

40. Морозов, Н. М. Методические положения оценки экономической эффективности



техники для механизации и автоматизации животноводства / Н. М. Морозов // Вестник «Эко-

номика и организация инженерно-технических систем в АПК». – 2017. – № 1. – С. 52–59.

Воронов Евгений Викторович, канд. экон. наук, доцент, директор инженерного института, ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
E-mail: e_voronov@list.ru.

Новикова Галина Владимировна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ лаборатории «Электроэнергетика и электротехника», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
E-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru.

Сулов Сергей Александрович, д-р экон. наук, доцент, профессор кафедры «Экономика и автоматизация бизнес-процессов», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
E-mail: nccmailu@mail.ru.

Михайлова Ольга Валентиновна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет».
E-mail: ds17823@yandex.ru.

Просвирякова Марьяна Валентиновна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизация и роботизация технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина», ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».
E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru.

* * *