

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622763>

Оригинальное исследование



# СВЧ установка для термообработки вторичного мясного сырья

Е.В. Воронов<sup>1</sup>, Г.В. Новикова<sup>1</sup>, О.В. Михайлова<sup>1</sup>, М.В. Просвирякова<sup>2</sup>, С.А. Суслов<sup>1</sup><sup>1</sup> Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Российская Федерация;<sup>2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В условиях фермерских хозяйств возникает проблема нейтрализации неприятных запахов при термообработке вторичного мясного сырья для сохранения потребительских свойств белкового корма при низких эксплуатационных затратах.

**Цель работы** — разработка установки для термообработки с обеззараживанием и нейтрализацией неприятного запаха измельченного вторичного мясного сырья комплексным воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты, бактерицидного потока УФ лучей и озона в непрерывном режиме с обеспечением электромагнитной безопасности.

**Материалы и методы.** Сырьем являются камеры желудка жвачных животных. Основная идея, принцип работы и конструкция установки базируется на распространении СВЧ колебаний в резонаторе со спиральной замедляющей системой. СВЧ установка содержит в неферромагнитном цилиндре с перфорированным нижним основанием, соосно расположенный неферромагнитный спиральный цилиндр и электроприводной фторопластовый шнек, со сплошной винтовой поверхностью. Средний периметр кольцевого объема, между цилиндром и спиральным цилиндром, образующего коаксиальный резонатор, и его высота кратны половине длины волны. К кольцевому основанию цилиндра установлены коронирующие щетки, под которыми радиально расположены электрогазоразрядные лампы, запитанные от генераторов килогерцовой частоты, а под лампами расположена керамическая кольцевая сферическая поверхность. Магнетроны установлены по периметру наружного цилиндра со сдвигом на 120 градусов. Шквара удаляется с помощью пневмотранспортера.

**Результаты.** Особенность коаксиального резонатора — это образующая внутреннего цилиндра, которая представлена в виде спиральной замедляющей системы. Поэтому собственная добротность резонатора высокая, в пределах 115 000, следовательно, термический КПД может составить 0,7–0,75. Фактор диэлектрических потерь сырья с уменьшением влажности с 76 до 30% уменьшается в пять раз. Значит, при сохранении напряженности электрического поля на уровне 1,2–2 кВ/см, мощность электромагнитного поля, рассеиваемая в единице объема шквары, уменьшается в пять раз с 34 500 до 6800 Вт/см<sup>3</sup>.

**Заключение.** Новое конструктивное решение со спиральным коаксиальным резонатором и использованием керамического отражателя, комплекса физических факторов позволило создать конструкции рабочей камеры для термообработки отходов убоя жвачных животных с нейтрализацией неприятного запаха, производительностью 30–35 кг/ч и удельными энергетическим затратами 0,16–0,19 кВт·ч/кг.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле; коронирующие щетки; озон; керамическая поверхность; бактерицидный поток; винтовой шнек.

## Как цитировать:

Воронов Е.В., Новикова Г.В., Михайлова О.В., Просвирякова М.В., Суслов С.А. СВЧ установка для термообработки вторичного мясного сырья // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 1. С. 113–122. doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622763>

Рукопись получена: 27.10.2023

Рукопись одобрена: 25.12.2023

Опубликована онлайн: 15.03.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622763>

Original Study Article

# Microwave device for heat treatment of meat by-products and waste

Evgeniy V. Voronov<sup>1</sup>, Galina V. Novikova<sup>1</sup>, Olga V. Mikhailova<sup>1</sup>,  
Mariana V. Prosviryakova<sup>2</sup>, Sergey A. Suslov<sup>1</sup><sup>1</sup> Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russian Federation;<sup>2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** In the conditions of farms, there is a problem of neutralizing unpleasant odors during heat treatment of secondary meat raw materials to preserve the consumer properties of protein feed at low operating costs.

**AIM:** Development of the device for heat treatment with disinfection and neutralization of the unpleasant odor of crushed secondary meat raw materials with the integral effect of an ultra-high frequency electromagnetic field, a bactericidal flow of UV rays and ozone in a continuous mode with electromagnetic safety ensured.

**METHODS:** The raw materials are the stomach chambers of ruminants. The basic idea, principle of operation and design of the device are based on the propagation of microwave oscillations in a resonator with a spiral decelerating system. The microwave device contains a non-ferromagnetic cylinder with a perforated lower base, a coaxially arranged non-ferromagnetic spiral cylinder and an electrically driven fluoroplastic auger with a solid screw surface. The average perimeter of the annular volume, between the cylinder and the spiral cylinder forming the coaxial resonator, and its height are multiples of half-wavelength. Corona brushes are mounted to the annular base of the cylinder, under which electric gas discharge lamps powered by 1 kHz frequency generators are radially located, and a ceramic annular spherical surface is located under the lamps. Magnetrons are mounted along the perimeter of the outer cylinder with a shift of 120 degrees. The crackling is removed using a pneumatic conveyor.

**RESULTS:** The feature of the coaxial resonator is that the inner core is formed as a spiral decelerating system. Therefore, the intrinsic Q-factor of the resonator is high, about 115000, therefore, the expected thermal efficiency is 0.7–0.75. The factor of dielectric losses of raw materials with a decrease in humidity from 76% to 30% is reduced by five times. Thus, while keeping the electric stress at the level of 1.2–2 kV/cm, the electromagnetic field power dissipated in a unit of the volume of the crackling decreases by five times, from 34 500 to 6800 W/cm<sup>3</sup>.

**CONCLUSIONS:** A new design solution with a spiral coaxial resonator, the use of a ceramic reflector, and a number of physical factors made it possible to develop the design of the operation chamber for the heat treatment of ruminant slaughter waste with the neutralization of unpleasant odors with a capacity of 30–35 kg/h and specific energy costs of 0.16–0.19 kWh/kg.

**Keywords:** electromagnetic field; corona brushes; ozone; ceramic surface; bactericidal flow; screw auger.

## To cite this article:

Voronov EV, Novikova GV, Mikhailova OV, Prosviryakova MV, Suslov SA. Microwave device for heat treatment of meat by-products and waste. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(1):113–122. doi: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-622763>

Received: 27.10.2023

Accepted: 25.12.2023

Published online: 15.03.2024

## ВВЕДЕНИЕ

Из мясных отходов убоя животных, допущенных ветеринарной службой к переработке, производят белковый корм для животных. К указанным отходам, в частности, можно отнести камеры желудков жвачных животных (рубец, сетка, книжка, сычуг), как жиросодержащее некондиционное сырье. Из них вытапливают технический жир и шквару для корма животных [1, 2]. Для этих целей применяют аппараты, где реализуется способ непосредственного контакта сырья с горячей водой или острым (см. с. 322 в книге [3]) паром. Вместе с тем, следует отметить, что длительная продолжительность контакта сырья с высокотемпературным теплоносителем снижает качество жира и шквары.

Известна СВЧ установка с биконическим резонатором и пакетами тарелок для термообработки мясокостных конфискатов (см. патент № 2803127 [4]). Она содержит вертикально расположенный биконический неферромагнитный резонатор в виде конических обечаек. Внутри резонатора соосно расположены внешний и внутренний пакеты фторопластовых тарелок в виде усеченных конусов. Внутренний пакет тарелок установлен на электроприводной диэлектрический вал со спиральным диэлектрическим шнеком в нижней конической обечайке. Известны и другие СВЧ установки для термообработки мясного сырья [5–6]. Использование таких установок позволяет повысить качество обработки вторичного мясного сырья, но не позволяет нейтрализовать неприятный запах.

Возникает проблема нейтрализации неприятных запахов при термообработке вторичного мясного сырья для сохранения потребительских свойств белкового корма при низких эксплуатационных затратах [7]. В условиях фермерских хозяйств, нейтрализация запаха при термообработке конфискатов, является актуальной задачей.

**Целью настоящей работы** является разработка многогенераторной радиогерметичной установки с СВЧ энергоподводом, бактерицидным потоком УФ лучей, озоном в коаксиальный резонатор для термообработки с обеззараживанием и нейтрализацией неприятного запаха измельченного вторичного мясного сырья в непрерывном режиме.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Измельченным сырьем являются камеры желудка жвачных животных (рубец, книжка, сетка, сычуг) и другие мясные отходы [8]. Основная идея, принцип работы и конструкция установки базируется на распространении СВЧ колебаний в резонаторе со спиральной замедляющей системой. При конструировании коаксиального резонатора образующая внутреннего цилиндра представлена в виде спирали. Варьированием отношения длины одного витка спирали к ее шагу можно изменить коэффициент

замедления системы, пропустить между витками частицы сырья в кольцевой объем резонатора в непрерывном режиме за счет центробежной силы для термообработки во взвешенном состоянии.

СВЧ установка с коаксиальным спиральным резонатором для термообработки вторичного мясного сырья в непрерывном режиме (см. рис. 1) содержит в вертикально установленном неферромагнитном цилиндре 2 с перфорированным нижним основанием 7, соосно расположенный неферромагнитный спиральный цилиндр 4 и электроприводной фторопластовый шнек 5, со сплошной винтовой поверхностью и фторопластовым валом. Первый винт шнека, под загрузочной емкостью, выполнен из неферромагнитного материала. Соосно расположенные неферромагнитный цилиндр и неферромагнитный внутренний цилиндр, боковая поверхность которого представлена в виде спирали из неферромагнитного материала (неферромагнитный спиральный цилиндр) образуют коаксиальный резонатор 3 (кольцевой объем). Средний периметр кольцевого объема и высота коаксиального резонатора кратны половине длины волны. К нижнему перфорированному основанию неферромагнитного цилиндра прикреплена неферромагнитная цилиндрическая накопительная емкость 8 с наклонным основанием, содержащим запердельный волновод 9 с шаровым краном, а на верхнее неферромагнитное кольцевое основание неферромагнитного цилиндра установлена неферромагнитная загрузочная емкость 1 с задвижкой. К внутренней стороне кольцевого основания цилиндра с радиальным сдвигом установлены неферромагнитные коронирующие щетки 13, под которыми радиально расположены электрогазоразрядные лампы 12, запитанные от генераторов килогерцовой частоты, расположенных с наружной стороны боковой поверхности цилиндра 2. Под электрогазоразрядными лампами расположена керамическая кольцевая сферическая поверхность 11, большой диаметр которой меньше диаметра наружного цилиндра, на половину длины волны. Из этих кольцевых отверстий (отверстие в керамической кольцевой сферической поверхности и кольцевое отверстие между наружным цилиндром и керамической поверхностью) бактерицидный поток УФ излучений распространяется в сырье, которое находится во взвешенном состоянии. По периметру боковой поверхности цилиндра со сдвигом на 120 градусов и сдвигом по высоте установлены волноводы с магнетронами 6 и вентиляторами. Над перфорированным основанием 7 цилиндра расположена всасывающая диэлектрическая труба 10 пневмотранспортера, закрытая сеткой, ячейки которой не более размеров шквары (5–6 мм). Продолжение диэлектрической трубы 10 пневмотранспортера за цилиндром 2 выполнено из неферромагнитного материала.

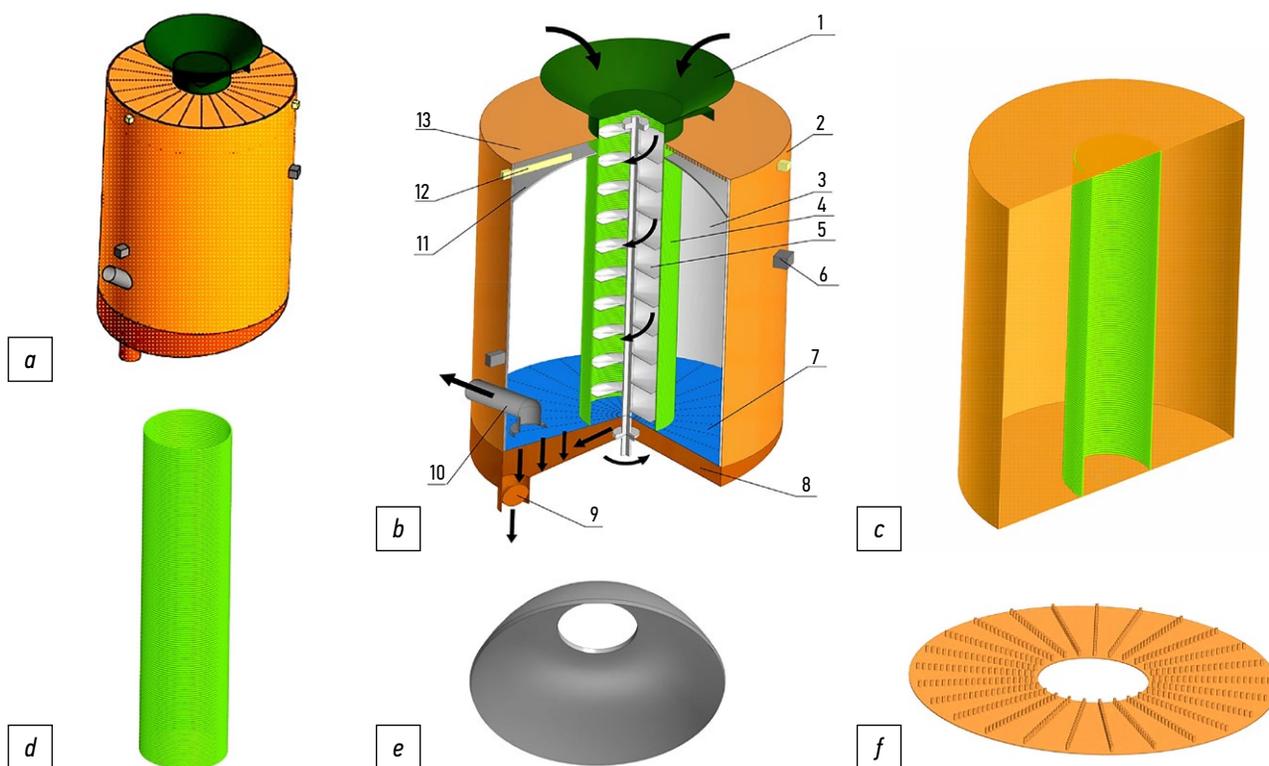
Электрогазоразрядные лампы бактерицидного потока УФ излучений могут быть подключены к генераторам килогерцовой частоты, как в Ультратоне (22 кГц), или в Дарсонвале (110 кГц) [9] либо лампы могут загораться за счет

энергии электромагнитных излучений СВЧ диапазона. Температура колбы лампы влияет на интенсивность ультрафиолетового излучения, максимум излучения лампы соответствует температуре ее стенок 40 °С. При этом, вследствие изменения сопротивления газового разряда, падает напряжение на лампе и, соответственно, увеличивается сила тока, а мощность лампы сохраняет свою величину. Лампа в совокупности с генератором килогерцовой частоты является колебательным контуром, а разряд, возникающий в лампе, при каждом изменении направления тока, является источником электромагнитных колебаний, лежащих в диапазоне радиоволн. Электрогазоразрядные лампы (40 Вт) бактерицидного потока УФ излучений при расположении на расстоянии 0,5–1 см от ферромагнитной щетки начинают коронировать с сопровождением длинных искр. Коронный разряд возникает у щетки с тонкими ферромагнитными иглками. Зона вблизи щетки характеризуется более высокими

значениями напряженности электрического поля (менее 15 кВ/см), вокруг электрогазоразрядных ламп возникает свечение в виде короны, происходит ионизационные процессы и озонирование воздуха.

При этом основными действующими факторами являются бактерицидный поток, синусоидальный ток надтоновой частоты, высоковольтный (3,5 кВ) коронный разряд, обеспечивающий озонирование воздуха и выделение тепла. Наличие этих факторов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (2450 МГц) обеспечивает уникальное бактерицидное действие с обеззараживанием и нейтрализацией неприятных запахов при термообработке измельченных камер желудков жвачных животных.

*Технологический процесс* термообработки, обеззараживания и нейтрализация неприятных запахов вторичного мясного сырья в непрерывном режиме в СВЧ установке с коаксиальным резонатором происходит следующим способом. Загрузить предварительно измельченные куски



**Рис. 1.** СВЧ установка для термообработки вторичного мясного сырья в непрерывном режиме: *a*) общий вид; *b*) общий в разрезе с позициями; *c*) коаксиальный резонатор в разрезе; *d*) неферромагнитный спиральный цилиндр; *e*) керамическая кольцевая сферическая поверхность; *f*) неферромагнитные коронирующие щетки на верхнем основании цилиндра; 1 — неферромагнитная загрузочная емкость; 2 — неферромагнитный цилиндр с перфорированным нижним основанием 7; 3 — неферромагнитный коаксиальный резонатор; 4 — неферромагнитный спиральный цилиндр; 5 — фторопластовый шнек; 6 — магнетроны воздушного охлаждения; 8 — неферромагнитная накопительная емкость; 9 — запределный волновод; 10 — диэлектрическая труба пневмотранспортера; 11 — керамическая кольцевая сферическая поверхность; 12 — электрогазоразрядные лампы; 13 — неферромагнитные коронирующие щетки.

**Fig. 1.** The microwave device for heat treatment of meat by-products and waste in a continuous mode: *a*) general view; *b*) general view in section with positions; *c*) coaxial resonator in section; *d*) non-ferromagnetic spiral cylinder; *e*) ceramic annular spherical surface; *f*) non-ferromagnetic corona brushes at the upper base of the cylinder; 1 — non-ferromagnetic loading tank; 2 — non-ferromagnetic cylinder with a perforated lower base 7; 3 — non-ferromagnetic coaxial resonator; 4 — non-ferromagnetic spiral cylinder; 5 — fluoroplastic auger; 6 — air-cooled magnetrons; 8 — non-ferromagnetic storage tank; 9 — transcendental waveguide; 10 — dielectric tube of the pneumatic conveyor; 11 — ceramic annular spherical surface; 12 — electric gas discharge lamps; 13 — non-ferromagnetic corona brushes.

вторичного мясного сырья (камеры жвачных животных: рубец, сетка, книжка, сычуг и др.) в загрузочную емкость 1 при закрытой задвижке. Включить генераторы килогерцовой частоты, после чего электрогазоразрядные лампы 12 загорятся и начинают коронировать о неферромагнитные щетки 13. Происходит выделение озона, что обеспечивает стерилизацию поверхностей всех элементов рабочей камеры. Далее необходимо включить электропривод фторопластового шнека 5 и открыть задвижку в загрузочной емкости. После чего измельченные куски вторичного мясного сырья с помощью сплошной винтовой поверхности шнека перемещаются вдоль вниз, тогда включить магнетроны 6 с вентиляторами. В кольцевом объеме, представленном как коаксиальный резонатор 3 между неферромагнитным цилиндром 2 и неферромагнитным спиральным цилиндром 4, возбуждается равномерное электромагнитное поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ), поле бегущей волны. Частота ЭМП СВЧ 2450 МГц, длина волны 12,24 см, глубина проникновения волны в сырье 1,7–2 см, размеры частиц готовой шквары 5–6 мм. Керамическая кольцевая сферическая поверхность 11 обеспечивает концентрацию энергии ЭМП СВЧ в кольцевом объеме резонатора и уменьшает потери на излучение, так как обладают малыми диэлектрическими потерями (см. с. 360 в [10]).

В коаксиальном резонаторе боковая поверхность внутреннего цилиндра представлена в виде спирали с достаточно большой длиной витка и с определенным шагом витков, между которыми при вращении фторопластового шнека предварительно измельченное сырье, размером менее, чем глубина проникновения волны проходит, за счет центробежной силы в кольцевой объем (в коаксиальный резонатор). Частицы сырья в кольцевом резонаторе находятся во взвешенном состоянии, и равномерно за счет токов поляризации в ЭМП СВЧ нагреваются до 85–95 °С и обеззараживаются [11]. Жир вытапливается и стекает через перфорированное неферромагнитное основание 7 в неферромагнитную накопительную емкость 8 с заперевым волноводом 9, через которую можно слить жидкую фракцию, открывая шаровой кран. Шквара за счет центробежной силы при вращении фторопластового шнека 5 сбрасывается к периферии и боковой поверхности неферромагнитного цилиндра, и всасывается диэлектрической трубой 10 пневмотранспортера через сетку, ячейки которой не позволяют транспортировать не вытопленные частицы сырья.

Для обеспечения стабильности работы магнетронов воздушного охлаждения важно иметь в коаксиальном резонаторе ЭМП, возбуждаемое на виде колебаний  $H_{011}$  и охватывающее узел, выполненный в форме спирали. Поэтому боковая поверхность внутреннего цилиндра выполнена в виде спирали. Спираль, соединенная с верхним кольцевым основанием и нижним перфорированным основанием наружного цилиндра, обеспечивает в витках синусоидальный вид колебаний. Виды колебаний в коаксиальном резонаторе, отличающиеся от  $H_{011}$ , отстают

от него по частоте достаточно сильно и могут быть эффективно подавлены, что и обеспечивает наличие в пространстве взаимодействие только синусоидальных колебаний (см. с. 192 в [12]). Это позволит существенно увеличить мощность потока излучений в коаксиальном резонаторе. При этом, внутрь спирального цилиндра поток мощности излучений проходит через межвитковую щель, поэтому в нем реализован фторопластовый шнек. Благодаря большому объёму коаксиального резонатора при малой площади его поверхности (поверхность в виде спирали), увеличивается собственная добротность всей резонансной системы и, следовательно, стабильность частоты. При этом взаимодействие происходит в тех случаях, когда частота СВЧ волны совпадает или кратна частоте синусоидальных колебаний в витках спирали. Поэтому шаг спирали и длина одного витка подобраны так, чтобы усилить энергию СВЧ бегущей волны в объёме коаксиального резонатора. Радиогерметичность установки обеспечивается за счет неферромагнитного первого винта (под задвижкой в загрузочной ёмкости 1) фторопластового шнека 5, а также заперевым волноводом в накопительной ёмкости 8.

Согласно существующим правилам техники безопасности обслуживающий персонал не должен подвергаться воздействию электромагнитных излучений интенсивностью большей 10 мкВт/см<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

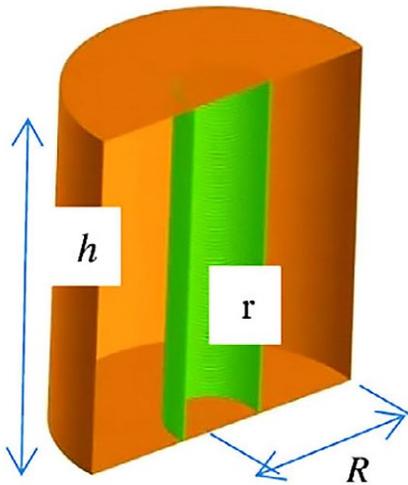
Особенность спиральной замедляющей системы — слабая зависимость замедления от частоты электромагнитного поля. Поэтому на частоте 2450 МГц для усиления СВЧ энергии в коаксиальном резонаторе рассматривается возможность использования спирали вместо образующей внутреннего цилиндра, извитый как круглый цилиндр радиусом  $a$  с постоянным шагом  $d$ . Если диаметр неферромагнитного провода мал по сравнению с диаметром спирали, то её можно рассматривать как цилиндр, проводимость которого бесконечна в направлении витков спирали и равна нулю в перпендикулярном направлении (см. с. 99 в [13]).

Замедление ( $m$ ) электромагнитной волны в направлении продольной оси спирали  $z$  приблизительно равно отношению длины волны витка спирали к ее шагу (см. с. 16 в [14]):

$$m \approx 2 \cdot \pi \cdot b / h = \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $b$  — радиус спирали по центру поперечного сечения неферромагнитной проволоки, см;  $h$  — шаг спирали, см;  $\varphi$  — угол между направлением витков и продольной осью спирали  $z$ .

Продольные составляющие напряжённости электрического поля изменяются по-разному, внутри спирали и вне спирали, т.е. в кольцевом объёме резонатора.



**Рис. 2.** Размеры коаксиального резонатора:  $R = 30,6$  см;  $r = 9,2$  см;  $h = 76,5$  см.

**Fig. 2.** Dimensions of the coaxial resonator:  $R = 30,6$  cm;  $r = 9,2$  cm;  $h = 76,5$  cm.

Проведён расчёт собственной добротности коаксиального резонатора, как основной показатель оценки КПД. Распределения напряжённости электрического поля в коаксиальном резонаторе со спиральной обечайкой внутреннего цилиндра исследовали в программе CST Studio Suite [15]. Собственная добротность вычислена через объем ( $V$ , м<sup>3</sup>) и площадь поверхности стенок алюминиевого резонатора ( $S$ , м<sup>2</sup>), учитывая толщину скин-слоя ( $\Delta = 1,72$  мкм) при частоте 2450 МГц, и учитывая особенности щелевого резонатора [14, 16]. Объем и площадь поверхности коаксиального резонатора (рис. 2) вычисляли по формулам:

$$V_{\text{коакс}} = \pi \cdot h \cdot (R^2 - r^2) = 3,14 \cdot 76,5 \cdot (30,6^2 - 9,2^2) = 204592 \text{ см}^3, \quad (2)$$

$$S_{\text{коакс}} = 2\pi [R \cdot h + R^2 \cdot k_1 + r \cdot h \cdot k_2] = 2 \cdot 3,14 \cdot [30,6 \cdot 76,5 + 30,6^2 \cdot 0,5 + 9,2 \cdot 76,5 \cdot 0,7] = 20735 \text{ см}^2, \quad (3)$$

где  $k_1$  — коэффициент, учитывающий снижение площади поверхности резонатора за счёт перфорации основания ( $k_1 = 0,5$ );  $k_2$  — коэффициент, учитывающий уменьшение поверхности внутреннего цилиндра, выполненного в виде спирали ( $k_2 = 0,7$ ).

Собственная добротность коаксиального резонатора:

$$Q = \frac{2 \cdot V}{S \cdot \Delta} = \frac{2 \cdot 0,204592}{2,0735 \cdot 1,72 \cdot 10^{-6}} = 114732. \quad (4)$$

Расчёты показывают, что собственная добротность резонатора такой конструкции в пределах 115000, следовательно, термический КПД может составить 0,7–0,75.

Для вычисления мощности электромагнитного поля (Вт/см<sup>3</sup>), рассеиваемой в единице объёма сырья (5), анализированы изменения их диэлектрических параметров при термообработке в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (см. рис. 3, 4).

$$P = 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot k \cdot E^2 \cdot f, \quad (5)$$

где  $k$  — фактор диэлектрических потерь сырья;  $E$  — напряжённость электрического поля, В/см;  $f$  — частота электромагнитного поля (2450·10<sup>6</sup> Гц).

Анализ диэлектрических характеристик мясного сырья при частоте 2400 МГц показывает, что они значительно зависят от жирности (см. с. 67 [17]).

Зависимости диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), фактора диэлектрических потерь ( $k$ ), тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) от жирности ( $\mathcal{J}$ , %) мясного сырья описываются следующими эмпирическими выражениями:

$$\begin{aligned} \epsilon &= 52,63 \cdot e^{-0,022 \cdot \mathcal{J}}, \\ k &= 19,64 \cdot e^{-0,025 \cdot \mathcal{J}}, \\ \text{tg}\delta &= 0,37 \cdot e^{-0,025 \cdot \mathcal{J}}. \end{aligned} \quad (6)$$

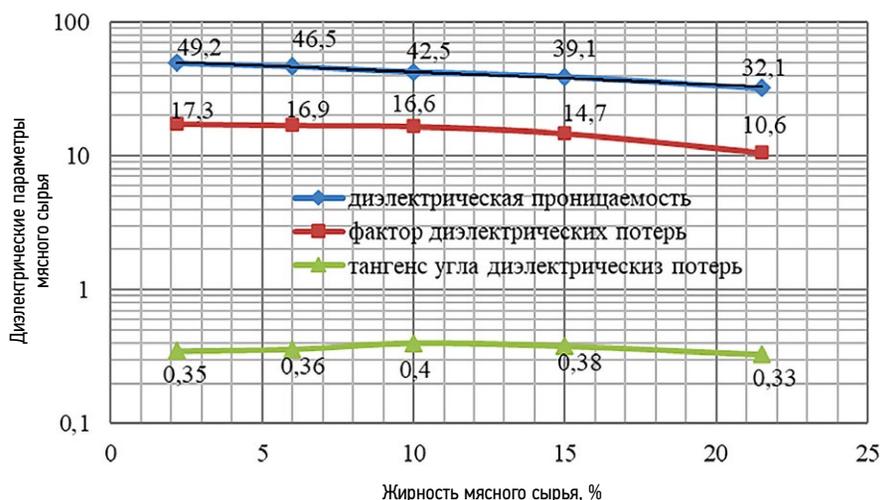
Уменьшение диэлектрических характеристик с увеличением жирности мясного сырья (рис. 4) объясняется снижением влажности. При термообработке сырья вытопленный жир стекает через перфорированное основание резонатора, и влажность шквары уменьшается. Тогда диэлектрические характеристики сырья в зависимости от влажности изменяются (см. рис. 5).

Анализ характеристик показывает, что фактор диэлектрических потерь сырья ( $k$ ) в процессе термообработки (с уменьшением влажности) уменьшается в пять раз, с 17,6 до 3,5. Это значит, при сохранении напряжённости электрического поля на уровне 1,2–2 кВ/см, мощность электромагнитного поля (см. с. 259 в [18]), рассеиваемая в единице объёма шквары, уменьшается в пять раз.

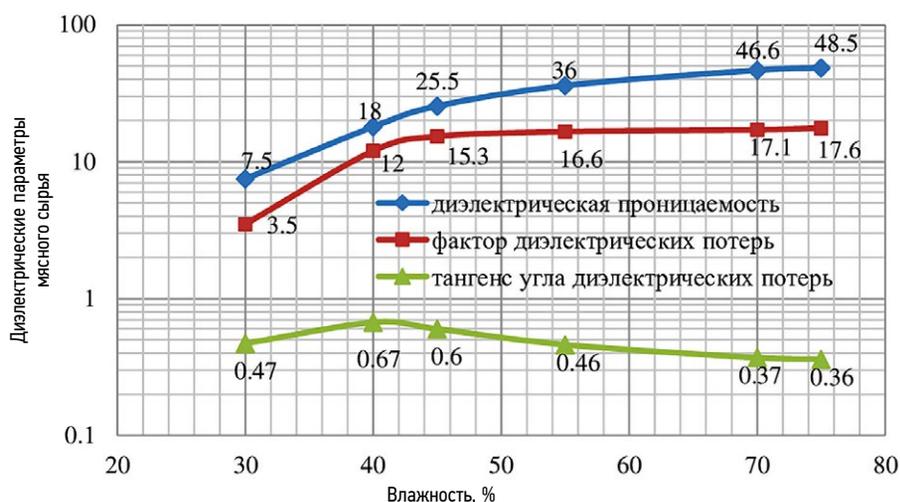
$$\begin{aligned} P &= 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot k \cdot E^2 \cdot f = \\ &= 0,556 \cdot 10^{-12} \cdot (17,6 \div 3,5) \cdot (1,2 \cdot 10^3)^2 \cdot 2450 \cdot 10^6 = \\ &= 34523,6 \div 6865,5 \text{ Вт/см}^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Итак, удельные диэлектрические потери, а, следовательно, и количество теплоты, выделяемое в единице объёма сырья, уменьшается с 34500 до 6800 Вт/см<sup>3</sup>.

Производительность установки зависит от количества и мощности магнетронов и электрогазоразрядных ламп и мощности источников килогерцовой частоты, вида жиродержащего сырья. Технические характеристики установки приведены в табл. 1.



**Рис. 3.** Диэлектрические характеристики мясного сырья в зависимости от жирности при температуре 20°C и частоте 2450 МГц [17].  
**Fig. 3.** Dielectric characteristics of meat by-products and waste depending on fat content at a temperature of 20°C and a frequency of 2450 MHz Dielectric [17].



**Рис. 4.** Диэлектрические характеристики мясного сырья в зависимости от влажности при температуре 20°C и частоте 2450 МГц [17].  
**Fig. 4.** Dielectric characteristics of meat by-products and waste depending on humidity at a temperature of 20°C and a frequency of 2450 MHz [17].

**Таблица 1.** Технические характеристики центробежной установки

**Table 1.** Technical specification of the centrifugal device

| Наименование / Name  | Параметры  |
|--|------------|
| Производительность, кг/ч / Capacity, kg/h  | 30–35      |
| Общая мощность установки, кВт / Total power of the installation, kW                            | 5,6        |
| Удельные энергетические затраты, кВт·ч/кг / Specific energy costs, kWh/kg                      | 0,16–0,19  |
| Мощность СВЧ генераторов, кВт / Total power of the installation, kW                            | 3,3        |
| Мощность вентиляторов для охлаждения магнетронов, кВт/ kW                                      | 0,45       |
| Мощность генератора килогерцовой частоты, кВт / Power of the kilohertz frequency generator, kW | 0,45       |
| Мощность пневмонасоса, кВт / Pneumatic pump power, kW  | 0,4        |
| Мощность винтового шнеков, Вт / Power of screw screws, W                                       | 1,0        |
| Диаметр и высота резонатора, см / Diameter and height of the resonator, cm                     | 61,2; 76,5 |

## ВЫВОДЫ

Результаты предварительного исследования динамики нагрева тонко измельчённого сырья показывают, что можно произвести термообработку с вытопкой жира производительностью 30–35 кг/ч при мощности СВЧ генератора 5,6 кВт, мощности генератора килогерцовой частоты 0,45 кВт при удельных энергетических затратах 0,16–0,19 кВт·ч/кг.

Применение современного программного обеспечения при моделировании распределения электромагнитного поля в такой конструкции резонатора позволили выявить новые возможности для улучшения конструктивных и технологических параметров СВЧ установки для термообработки вторичного мясного сырья. Использование нового материала в виде керамического отражателя; других физических факторов, таких как: коронный разряд, обеспечивающий озонирование и бактерицидный поток УФ излучений; новых конструктивных решений позволили создать конструкции рабочей камеры для термообработки отходов убоя жвачных животных с нейтрализацией неприятного запаха, существенно превосходящих их прототипы. Данную конструкцию резонатора можно отнести к металлодиэлектрическим резонаторам.

При конструировании коаксиального резонатора образующая внутреннего цилиндра представлена в виде спирали. Варьируя отношение длины одного витка спирали к её шагу, можно изменить коэффициент замедления системы, пропустить между витками частицы сырья в кольцевой объем резонатора в непрерывном режиме за счет центробежной силы для термообработки во взвешенном состоянии.

Описанная концепция разработки СВЧ установки с нестандартной конструкции резонатора, совмещающего функции спиральной замедляющей системы при термообработке вторичного мясного сырья, позволит увеличить эффективность процесса при непрерывном режиме работы.

СВЧ установку с нестандартным коаксиальным резонатором, обеспечивающим электромагнитную безопасность без дополнительного экранирующего корпуса в непрерывном режиме, целесообразно применить в убойных цехах фермерских хозяйств.

Результаты оценки действия газоразрядных ламп, расположенных в электромагнитном поле СВЧ на кормовую ценность продукта, позволяют определить направление исследований при изучении механизмов действия газоразрядных технологий.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Е.В. Воронов — анализ существующей технологии переработки камер желудка жвачных

животных, доработка текста, утверждение окончательной версии рукописи; Г.В. Новикова — работа над реализацией инновационной идеи нейтрализации запаха сырья в коаксиальном резонаторе с источниками электрофизических факторов; обоснование эффективных режимов термообработки сырья; О.В. Михайлова — формирование структуры статьи, анализ и дополнение текста статьи; построение 3D-модели установки; исследования электродинамических параметров системы «генератор-резонатор»; М.В. Просвирякова — совместный анализ научной литературы по проблеме исследования, описание принципа действия установки, подготовка первоначальных выводов; С.А. Суслов — формулирование основных направлений исследований, доработка текста; составление выводов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** E.V. Voronov — analysis of the existing technology of processing chambers of ruminant animals, text revision, approval of the final version of the manuscript; G.V. Novikova — work on the implementation of the innovative idea of neutralizing the odor of meat by-products and waste in a coaxial resonator with sources of electrophysical factors; justification of effective modes of heat treatment of meat by-products and waste; O.V. Mikhailova — formation of the structure of the article, text editing; building of a 3D model of the device; studies of electrodynamic parameters of the “generator-resonator” system; M.V. Prosviryakova — complex analysis of scientific literature on the research problem, description of the principle of operation of the device, preparation of initial conclusions; S.A. Suslov — formulation of the main directions of the research, text revision; drawing conclusions. All the authors made a significant contribution to the research and preparation of the article, read and approved the final version before publication.

**Conflict of interest.** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interests related to the publication of this article.

**Funding source.** The authors state that there is no external funding when conducting the study.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселева И.С., Рудик Ф.Я., Романова О.В. Ресурсосберегающие технологии переработки мясной продукции // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 5. С. 140–145. EDN: DGKAXV doi: 10.28983/asj.y2023i5pp140-145
2. Балякина К.Д., Детиненко С.А., Чернегов Н.Ю. Переработка вторичных ресурсов как метод повышения эффективности деятельности предприятия АПК // *Modern Science*. 2021. № 4–1. С. 77–86. EDN: SPIYQA
3. Азаров Б.М., Аурих Х., Дичев С. Технологическое оборудование пищевых производств. М.: Агропромиздат, 1988.
4. Патент РФ № 2803127 / 06.09.2023. Бюл. № 25. Воронов Е.В., Тихонов А.А. Михайлова О.В. и др. СВЧ установка с биконическим резонатором и пакетами тарелок для термообработки мясокостных конфискатов. Дата обращения: 27.10.2023. Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_54659424\\_76234872.PDF](https://elibrary.ru/download/elibrary_54659424_76234872.PDF) EDN: OHWPJY
5. Жданкин Г.В., Сторчевой В.Ф., Новикова Г.В. и др. Исследование режимов работы установки СВЧ для термообработки и обеззараживания непищевого сырья животного происхождения // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019. № 6. С. 65–69. EDN: GTLNAO doi: 10.31857/S2500-26272019665-69
6. Жданкин Г.В., Белова М.В., Михайлова О.В. и др. Радиоволновые установки для термообработки непищевых отходов животного происхождения // *Известия Оренбургского ГАУ*. 2018. № 4(72). С. 198–202. EDN: XYKUTJ doi: 10.37670/2073-0853
7. Горбунова Н., Петрунина И.П. Проблемы использования отходов при производстве продукции предприятиями мясной отрасли // *Мясная индустрия*. 2023. № 9. С. 32–36. EDN: WAGVLY doi: 10.37861/2618-8252-2023-09-32-36
8. Воронов Е.В. Исследование и обоснование параметров СВЧ-установки, реализующей ресурсосберегающую технологию тер-
- мообработки мясных отходов // *Вестник НГИЭИ*. 2023. № 8 (147). С. 33–43. EDN: POTHMG doi: 10.24412/2227-9407-2023-8-33-43
9. Астафьева К.А., Иванова И.П. Анализ цитотоксического действия медицинских газоразрядных устройств // *Современные технологии в медицине (STM-HtmlView)*. Т 9, № 1 (2017). С. 115–123. EDN: YIZWGT doi: 10.17691/stm2017.9.1.15
10. Стрекалов А. В., Стрекалов Ю. А. Электромагнитные поля и волны. М.: РИОР; ИНФРА-М, 2014.
11. Кененбай Г.С., Чоманов У.Ч., Омиржанова Б.Б., Татиева А.Н. Микробиологические показатели говяжьего рубца после озонирования // *Все о мясе*. 2023. № 1. С. 43–45. EDN: BQQRKJ doi: 10.21323/2071-2499-2022-6-43-45
12. Воскобойник М. Ф., Черников А. Н. Техника и приборы СВЧ. М.: Радиосвязь, 1982.
13. Баскаков С.И. Электродинамика и распространения волн. М.: Высшая школа, 1992.
14. Пчельников Ю.Н., Свиридов В.Т. Электроника сверхвысоких частот. М.: Радио и связь, 1981.
15. Рябенко В.Ю., Паслён В.В. Компьютерное моделирование объектов с помощью ПП CST Microwave Studio // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций*. 2018. № 1. С. 139. EDN: QIKITH
16. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. и др. Исследование объемного полосково-щелевого перехода с П-образным щелевым резонатором // *Ural Radio Engineering Journal*. 2020. Т. 4. № 3. С. 277–292. EDN: OYRVAF doi: 10.15826/urej.2020.4.3.002
17. Рогов И.А., Адаменко В.Я., Некрутман С.В. и др. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981.
18. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985.

## REFERENCES

1. Kiseleva IS, Rudik FYa, Romanova OV. Resource-saving technologies for processing meat products. *Agrarian scientific journal*. 2023;5:140–145. EDN: DGKAXV (In Russ). doi: 10.28983/asj.y2023i5pp140-145
2. Balyakina KD, Detinenko SA, Chernegov NYu. Recycling of secondary resources as a method of increasing the efficiency of the agro-industrial complex. *Modern Science*. 2021;4–1:77–86. EDN: SPIYQA
3. Azarov BM, Aurich H, Dichev S. Technological equipment for food production. Moscow: Agropromizdat; 1988. (In Russ).
4. Patent RUS № 2803127 / 06.09.2023. Byul. № 25. Voronov E.V., Tikhonov A.A. Mikhaylova O.V., et al. SVCh ustanovka s bikonicheskim rezonatorom i paketami tarelok dlya termoobra-botki myasokostnykh konfiskatov. (In Russ). [cited: 27.10.2023] Available from: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_54659424\\_76234872.PDF](https://elibrary.ru/download/elibrary_54659424_76234872.PDF) EDN: OHWPJY
5. Zhdankin GV, Storchevov VF, Novikova GV, et al. Investigation of the modes of operation of a microwave installation for heat treatment and disinfection of non-food raw materials of animal origin. *Russian agricultural science*. 2019;6:65–69. (In Russ). doi: 10.31857/S2500-26272019665-69
6. Zhdankin GV, Belova MV, Mikhaylova OV, et al. Radio wave installations for heat treatment of non-food waste of animal origin. *Izvestiya Orenburg GAU*. 2018;4(72):198–202. (In Russ). doi: 10.37670/2073-0853
7. Gorbunova N, Petrunina IP. Problems of waste use in the production of products by meat industry enterprises. *Meat industry*. 2023;9:32–36. (In Russ). doi: 10.37861/2618-8252-2023-09-32-36
8. Voronov EV. Investigation and substantiation of parameters of a microwave installation implementing a resource-saving technology for heat treatment of meat waste. *Bulletin of NGIEI*. 2023. No. 8 (147). pp. 33–43. (In Russ). doi: 10.24412/2227-9407-2023-8-33-43
9. Astafyeva KA, Ivanova IP. Analysis of the cytotoxic effect of medical gas-discharge devices // *Modern technologies in medicine (STM-HtmlView)*. 2017;9(1):115–123. (In Russ). EDN: YIZWGT doi: 10.17691/stm2017.9.1.15
10. Strekalov AV, Strekalov YuA. *Electromagnetic fields and waves*. Moscow: RIOR; INFRA-M; 2014.

11. Kenenbai GS, Chomanov UCh, Omirzhanova BB, et al. Microbiological indicators of beef rumen after ozonation. *All about meat*. 2023;1:43–45. (In Russ). doi: 10.21323/2071-2499-2022-6-43-45
12. Voskoboynik MF, Chernikov AN. *Microwave equipment and devices*. Moscow: Radiosvyaz; 1982. (In Russ).
13. Baskakov SI. *Electrodynamics and wave propagation*. Moscow: Vysshaya shkola; 1992. (In Russ).
14. Pchelnikov YuN, Sviridov VT. *Ultrahigh frequency electronics*. Moscow: Radio i svyaz; 1981. (In Russ).
15. Ryabchenko VYu, Nightshade VV. Computer modeling of objects using PP CST Microwave Studio. *Modern problems of radio electronics and telecommunications*. 2018;1:139. (In Russ).
16. Fomin DG, Dudarev NV, Darovskikh SN, et al. Investigation of a volumetric flap-slit junction with a U-shaped slit resonator. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):277–292. (In Russ). doi: 10.15826/urej.2020.4.3.002
17. Rogov IA, Adamenko VYa, Nekrutman SV, et al. *Electrophysical, optical and acoustic characteristics of food products*. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost; 1981. (In Russ).
18. Ginzburg AS. *Calculation and design of drying installations for the food industry*. Moscow: Agropromizdat; 1985. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

### \* Воронов Евгений Викторович,

доцент, канд. экон. наук;  
директор инженерного института;  
адрес: Российская Федерация, Нижегородская область,  
606340, Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а;  
ORCID: 0000-0002-9867-5860;  
eLibrary SPIN: 8963-4080;  
e-mail: e\_voronov@list.ru

### Новикова Галина Владимировна,

профессор, д-р техн. наук,  
главный научный сотрудник по подготовке  
научно-педагогических кадров;  
ORCID: 0000-0001-9222-6450;  
eLibrary SPIN 3317-5336;  
e-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru

### Михайлова Ольга Валентиновна,

профессор, д-р техн. наук,  
профессор кафедры «Инфокоммуникационные технологии  
и системы связи»;  
ORCID: 0000-0001-9231-4733;  
eLibrary SPIN: 9437-0417;  
e-mail: ds17823@yandex.ru

### Просвирякова Марьяна Валентиновна,

доцент, д-р техн. наук,  
профессор кафедры «Автоматизация и роботизация  
технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина»;  
ORCID: 0000-0003-3258-260X;  
eLibrary SPIN: 5642-4560;  
e-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru

### Сулов Сергей Александрович,

доцент, д-р эконом. наук,  
профессор кафедры «Экономика и автоматизация  
бизнес процессов»;  
ORCID: 0000-0003-1189-8023;  
eLibrary SPIN: 4040-2965;  
e-mail: nccmailu@mail.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Evgeny V. Voronov,

Associate Professor, Cand. Sci. (Economics),  
Director of the Engineering Institute;  
address: 22a Oktyabrskaya street, 606340 Knyaginino,  
Nizhny Novgorod region, Russian Federation;  
ORCID: 0000-0002-9867-5860;  
eLibrary SPIN: 8963-4080;  
e-mail: e\_voronov@list.ru

### Galina V. Novikova,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),  
Chief Researcher for the Academic Staff Training;  
ORCID: 0000-0001-9222-6450;  
eLibrary SPIN 3317-5336;  
e-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru

### Olga V. Mikhailova,

Professor, Dr. Sci. (Engineering),  
Professor of the Infocommunication Technologies  
and Communication Systems Department;  
ORCID: 0000-0001-9231-4733;  
eLibrary SPIN: 9437-0417;  
e-mail: ds17823@yandex.ru

### Mariana V. Prosviryakova,

Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering),  
Professor of the Automation and Robotization of Technological  
Processes Department named after Academician I.F. Borodin;  
ORCID: 0000-0003-3258-260X;  
eLibrary SPIN: 5642-4560;  
e-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru

### Sergey A. Suslov,

Associate Professor, Dr. Sci. (Economic),  
Professor of the Economics and Automation of Business  
Processes Department;  
ORCID: 0000-0003-1189-8023;  
eLibrary SPIN: 4040-2965;  
e-mail: nccmailu@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author