

О.И. Орлова¹,
М.В. Просвирякова²,
О.В. Михайлова¹,
Г.В. Новикова¹, ✉
А.А. Тихонов³,
А.А. Белов³,
Г.М. Тобоев³

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Нижний Новгород, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

³ Чувашский государственный аграрный университет, Чебоксары, Российская Федерация

✉ NovikovaGalinaV@yandex.ru

Поступила в редакцию:
30.07.2022

Одобрена после рецензирования:
29.09.2022

Принята к публикации:
27.10.2022

Olga I. Orlova¹,
Mariana V. Prosviryakova²,
Olga V. Mikhailova¹,
Galina V. Novikova¹, ✉
Alexander A. Tikhonov³,
Alexander A. Belov³,
Gerald M. Toboev³

¹ Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Nizhny Novgorod, Russian Federation

² Russian State Agrarian University — Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

³ Chuvash State Agrarian University, Cheboksary, Russian Federation

✉ NovikovaGalinaV@yandex.ru

Received by the editorial office:
30.07.2022

Accepted in revised:
29.09.2022

Accepted for publication:
27.10.2022

Разработка и обоснование электродинамических параметров радиоволновой установки непрерывно- поточного действия для термообработки яиц

РЕЗЮМЕ

Введение. Существующие способы варки яиц в воде и на пару имеют высокую энергоёмкость. В настоящее время все еще не решена проблема непрерывности технологического процесса в потоке. Для снижения энергоёмкости, сокращения расходов воды и интенсификации процесса термообработки яиц актуальным считаем применение энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) в особом температурном режиме без использования воды.

Методика. Трёхмерное моделирование установки проводили в программе Компас 18.0, обоснование режимов термообработки проведено аналитическими методами, для выявления оптимальных параметров (энергозатраты и температурный режим) предлагаемой установки пользовались методом наименьших квадратов полиномы второй степени, в частности матрицей ротатбельного планирования второго порядка, статистический анализ матрицы проводили в программном пакете для статистического анализа Statistica 12, подтверждение аналитических данных эмпирическими проводили в программе трёхмерного моделирования процессов распространения электромагнитных полей CST Microwave Studio в расчетном модуле Eigenmode, где были исследованы картины распределения напряженности электрического и магнитного поля в сферическом резонаторе.

Результаты. Конструкционное исполнение радиоволновой установки конвейерного типа позволяет проводить термообработку яиц при перемещении в диэлектрических чашечках через щелевые сферические резонаторы. Сквозность процесса менее 0,5 обеспечивается за счет расположения чашечек в резонаторах и между ними в отношении 4:9. Значение собственной добротности резонатора достигает 8800. Визуализация в программе показывает равномерное распределение электрического поля в резонаторе, напряженность при этом составляет 1,5–3 кВ/см, что обеспечивает высокую стерильность продукта. Из регрессионных моделей, составленных на основе матрицы ротатбельного планирования эксперимента второго порядка, вытекает, что эффективная продолжительность воздействия ЭМП СВЧ составляет 154 с, удельные энергетические затраты равны 143 Вт·ч/кг. Скорость вращения мотор-редуктора конвейера составляет 0,4 об/мин.

Ключевые слова: термообработка яиц, желток и белок яиц, электрофизические параметры компонентов яйца, щелевой сферический резонатор, конвейер, эффективные режимы, технические характеристики

Для цитирования: Орлова О.И., Просвирякова М.В., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Тихонов А.А., Белов А.А., Тобоев Г.М. Разработка и обоснование электродинамических параметров радиоволновой установки непрерывно-поточного действия для термообработки яиц. Аграрная наука. 2022; 364 (11): 94–102. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-94-102>

© Орлова О.И., Просвирякова М.В., Михайлова О.В., Новикова Г.В., Тихонов А.А., Белов А.А., Тобоев Г.М.

Development and substantiation of the electrodynamic parameters of a continuous operation radio wave installation for the heat treatment of eggs

ABSTRACT

Introduction. The existing methods of cooking eggs in water and with steam have a high energy intensity. Currently, the problem of continuity of the technological process is still not solved. That is why, in order to reduce energy consumption, reduce water consumption and intensify the process of heat treatment of eggs, we consider it relevant to use the energy of the electromagnetic field of super high frequency (SHF-EMF) in a special temperature regime without using water.

Methodology. Three-dimensional modeling of the installation was carried out in the Compass 18.0 program, the justification of the heat treatment modes was carried out by analytical methods, to identify the optimal parameters (energy consumption and temperature regime) of the proposed installation, second-degree least squares polynomials were used, in particular, a rotatable second-order planning matrix, statistical analysis of the matrix was carried out in a software package for statistical analysis Statistica 12, confirmation of analytical data with empirical data was carried out in the CST Microwave Studio program for three-dimensional modeling of electromagnetic field propagation processes in the Eigenmode calculation module, where patterns of electric and magnetic field intensity distribution in a spherical resonator were studied.

Results. The structural design of the conveyor type radio wave installation allows for heat treatment of eggs when moving in dielectric cups through slotted spherical resonators. The borehole of the process is less than 0.5 due to the location of the cups in the resonators and between them in relation 4:9. The value of the resonator's own Q-factor reaches 8800. The visualization in the program shows a uniform distribution of the electric field in the resonator, with a voltage of 1.5–3 kV/cm, which ensures high sterility of the product. From the regression models compiled on the basis of the matrix of rotatable planning of the second-order experiment, it follows that the effective duration of exposure to EMF is 154 s, the specific energy costs are equal to 143 Wh/kg. The speed of rotation of the conveyor gear motor is 0.4 rpm.

Key words: heat treatment of eggs, egg yolk and egg white, electrophysical parameters of egg components, slit spherical resonator, conveyor, effective modes, technical characteristics

For citation: Orlova O.I., Prosviryakova M.V., Mikhailova O.V., Novikova G.V., Tikhonov A.A., Belov A.A., Toboev G.M. Development and substantiation of the electrodynamic parameters of a continuous-flow radio wave installation for the heat treatment of eggs. Agrarian science. 2022; 364 (11): 94–102. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-364-11-94-102> (In Russian).

© Orlova O.I., Prosviryakova M.V., Mikhailova O.V., Novikova G.V., Tikhonov A.A., Belov A.A., Toboev G.M.

Введение / Introduction

Согласно прогнозу, производство куриных яиц в мире в ближайшей перспективе будет устойчиво увеличиваться до 100 млн т. В развитых странах принят путь внедрения высоких технологий переработки яиц. В настоящее время в среднем на одного человека в год приходится 250–300 яиц [1–3]. Существующие способы варки яиц в воде и на пару имеют высокую энергоемкость [4]. Вода, проникая сквозь поры скорлупы, делает яичный белок более жестким [5]. В научной школе Новиковой Г.В. выработана концепция разработки радиоволновых установок для термообработки яиц, позволяющая устранить проблему взрыва яиц в резонаторе СВЧ-установки и причины ее возникновения: фактор диэлектрических потерь желтка в 2,5–4 раза выше, чем белка при частоте 2450 МГц; теплоемкость белка в 1,5 раза выше, чем желтка, скорость нагрева желтка в 1,5 раза выше, чем белка; воздухопроницаемость скорлупы низкая; специфическое воздействие ЭМП СВЧ — градиенты давления, температуры, влажности направлены от центра к периферии, что приводит возрастанию давления внутри скорлупы и к взрыву яйца.

В настоящее время все еще не решена проблема непрерывности технологического процесса в потоке. Именно поэтому для снижения энергоемкости, сокращения расходов воды и интенсификации процесса термообработки яиц актуальным считаем применение энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ) в особом температурном режиме без использования воды.

Научной задачей является разработка и обоснование электродинамических параметров радиоволновой установки непрерывно-поточного действия для термообработки яиц, у которых скорость диэлектрического нагрева желтка и белка отличается в 5–7 раз.

Материал и методы исследования / Materials and method

Объектом исследований является система факторов, обеспечивающих термообработку куриных яиц ЭМП СВЧ при минимальных эксплуатационных затратах и допустимых уровнях излучений в окружающую среду.

Предметом исследований являются закономерности взаимодействия рабочих органов установки с яйцом в процессе перемещения через щелевые сферические резонаторы.

Трехмерное моделирование установки проводили в программе Компас 18.0, обоснование режимов термообработки проведено аналитическими методами, для выявления оптимальных параметров (энергозатраты и температурный режим) предлагаемой установки пользовались методом наименьших квадратов полиномы второй степени, в частности матрицей ротатбельного планирования второго порядка, статистический анализ матрицы проводили в программном пакете для статистического анализа Statistica 12, подтверждение аналитических данных эмпирическими проводили в программе трехмерного моделирования процессов распространения электромагнитных полей CST Microwave Studio в расчетном модуле Eigenmode, где были исследованы картины распределения напряженности электрического и магнитного поля в сферическом резонаторе.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Инновационная идея заключается в соблюдении скважности технологического процесса менее 0,5 из-за

большой разницы скорости диэлектрического нагрева компонентов яйца. Технология реализуется путем применения конвейера для перемещения яиц в диэлектрических чашках через щелевые сферические резонаторы, где электромагнитное поле сверхвысокой частоты возбуждается от магнетронов воздушного охлаждения, расположенных на основании цилиндрического экранирующего корпуса, содержащего с боковой стороны за пределы волноводы.

На основе анализа диэлектрических параметров составных частей яйца и избыточного внутреннего давления теоретически исследована динамика нагрева компонентов яйца в зависимости от удельной мощности генератора и скважности процесса воздействия ЭМП СВЧ, обоснована частота вращения яиц разной категории вокруг своей длинной оси. Для разработанных конструктивных исполнений СВЧ-установок периодического действия выявлены эффективные режимы термообработки.

Ранее нами разработаны, запатентованы и созданы механизированные устройства для варки яиц в периодическом режиме, реализующие технологический процесс со скважностью менее 0,5 (скважность — это отношение продолжительности воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты (частота 2450 МГц, длина волны 12,24 см) к продолжительности цикла «нагрев — пауза») [6, 7]. По данным Рогова И.А., с увеличением температуры от 20 °С до 60 °С фактор диэлектрических потерь желтка и белка падает на 30,8% и 4,4% соответственно. Это значит, что скорость нагрева желтка в электромагнитном поле в 5–7 раз выше, чем белка. При повышении температуры выше 60 °С значение фактора диэлектрических потерь падает еще сильнее из-за повышения температуры воды и испарения ее части.

Нами ранее разработаны способ и СВЧ-установки периодического действия для варки яиц (рис. 1) с соблюдением скважности технологического процесса воздействия ЭМП СВЧ, которые предусматривают варку белка за счет теплопередачи от нагретого желтка за счет дипольной поляризации. Поэтому при небольшом отклонении от необходимой скважности процесса желток переварится, а белок остается только частично коагулированным.

Проанализировав технические характеристики разработанных, созданных нами установок (рис. 1), мы при испытании выявили, что удельные энергетические затраты на термообработку яиц составляют 0,23–0,32 Вт·ч/г при скважности процесса 0,18–0,48.

Уменьшение энергозатрат и интенсификация термообработки возможны за счет непрерывности технологического процесса в разрабатываемой СВЧ-яйцеварке, в том числе в установке, реализующей технологию термообработки яиц с учетом скважности процесса менее 0,5 за счет передвижения яиц в диэлектрических чашечках через сферические щелевые резонаторы, где возбуждено ЭМП СВЧ, чередующиеся с участками без воздействия поля (рис. 2). СВЧ-установка непрерывно-поточного действия со сферическими резонаторами для термообработки яиц содержит цилиндрический экранирующий корпус 2, внутри которого расположены со сдвигом по периметру сферические щелевые резонаторы 5. Соосно с корпусом расположен диэлектрический конвейер, соединенный с диэлектрическим ободком 13. На ободок конвейера установлены диэлектрические чашки 11 с помощью шарнирных петель 12. Диэлектрический конвейер соединен с валом мотора-редуктора

Рис. 1. Разработанные и изготовленные в научной школе Новиковой Г.В. СВЧ-яйцеварки периодического действия

Fig. 1. Microwave egg cookers of periodic action developed and manufactured at the scientific school of Novikova G.V.



СВЧ-яйцеварка с ячеистым ротором

Количество генераторов — 4 шт.
Производительность — 150 шт./ч.
Удельная мощность — 4 Вт/г.
Время варки — 12 мин.
Скважность — 0,27.
Удельные энергозатраты — 16 Вт·ч/шт. = 0,32 Вт·ч/г.



СВЧ-яйцеварка

Количество генераторов — 1 шт.
Производительность — 180 шт./ч.
Удельная мощность — 2,67 Вт/г.
Время варки — 2 мин.
Скважность — 0,17.
Удельные энергозатраты — 4,44 Вт·ч/шт. = 0,09 Вт·ч/г.



СВЧ-яйцеварка с цепным транспортером

Количество генераторов — 2 шт.
Производительность — 100 шт./ч.
Удельная мощность — 9,34 Вт/г.
Время варки — 16,7 мин.
Скважность — 0,1.
Удельные энергозатраты — 14,33 Вт·ч/шт. = 0,28 Вт·ч/г.



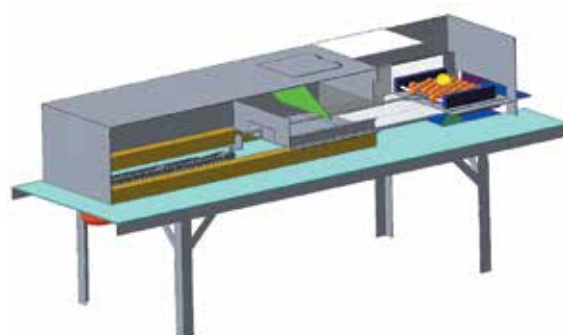
СВЧ-яйцеварка каретного типа

Количество генераторов — 1 шт.
Производительность — 68 шт./ч.
Удельная мощность — 5,33 Вт/г.
Время варки — 2,67 мин.
Скважность — 0,48.
Удельные энергозатраты — 11,87 Вт·ч/шт. = 0,237 Вт·ч/г.



СВЧ-яйцеварка с цепным транспортером

Количество генераторов — 2 шт.
Производительность — 160–200 шт./ч.
Удельная мощность — 1,33 Вт/г.
Время варки — 5 мин.
Скважность — 0,42.
Удельные энергозатраты — 5,5 Вт·ч/шт. = 0,11 Вт·ч/г.



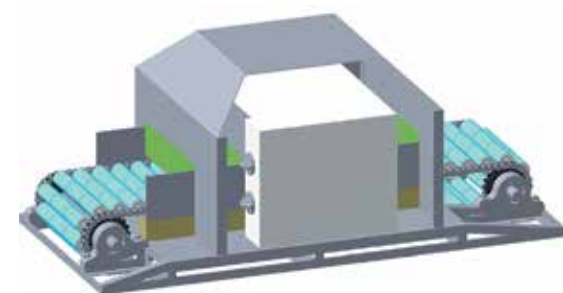
СВЧ-яйцеварка каретного типа с двумя модулями

Количество генераторов — 4 шт.
Производительность — 150 шт./ч.
Удельная мощность — 4 Вт/г.
Время варки — 12 мин.
Скважность — 0,27.
Удельные энергозатраты — 16 Вт·ч/шт. = 0,32 Вт·ч/г.



СВЧ-яйцеварка шахтного типа

Количество генераторов — 2 шт.
Производительность — 132 шт./ч.
Удельная мощность — 5,33 Вт/г.
Время варки — 5,0 мин.
Скважность — 0,18.
Удельные энергозатраты — 12 Вт·ч/шт. = 0,24 Вт·ч/г.

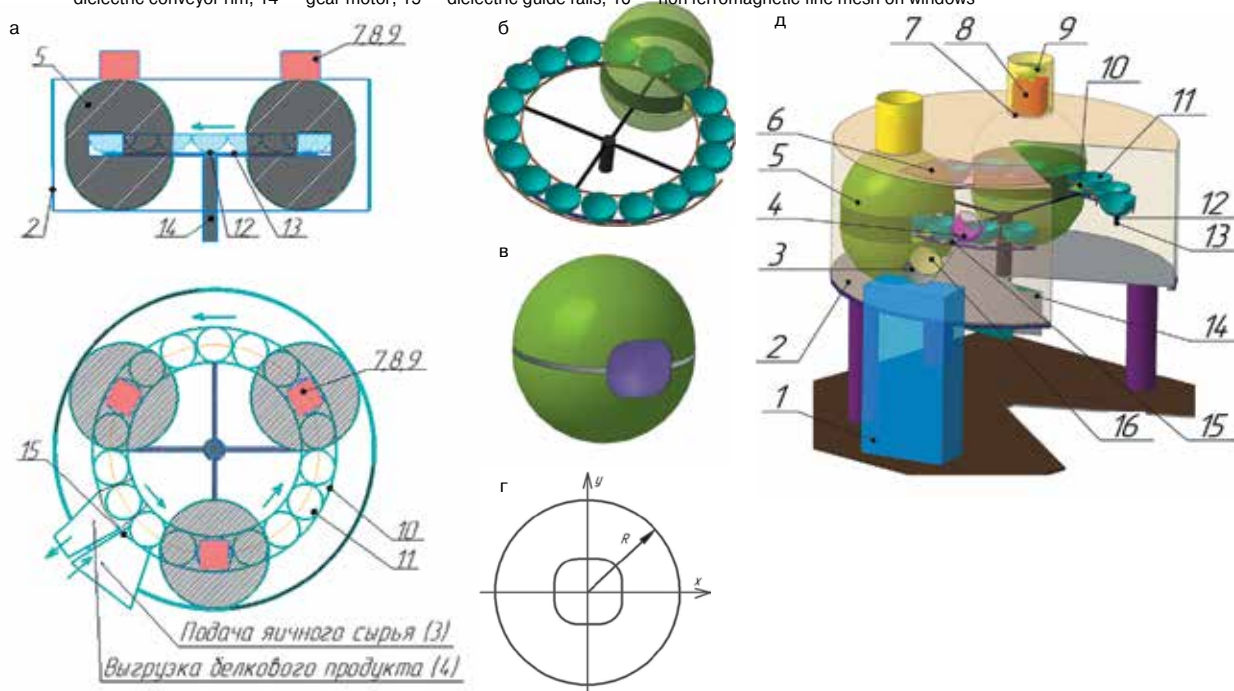


СВЧ-яйцеварка туннельного типа

Количество генераторов — 5 шт.
Производительность — 530 шт./ч.
Удельная мощность — 7,62 Вт/г.
Скважность — 0,426.
Время варки — 4,25 мин.
Удельные энергозатраты — 12 Вт·ч/шт. = 0,23 Вт·ч/г.

Рис. 2. СВЧ-установка непрерывно-поточного действия со сферическими резонаторами для термообработки яиц: а — схема процесса; б — конвейер с чашками; в — пространственное изображение установки; г — щелевой сферический резонатор; д — геометрическая конфигурация резонатора; 1 — шкаф управления; 2 — экранирующий корпус; 3 — запредельный волновод для выгрузки яиц; 4 — запредельный волновод для загрузки яиц в чашки; 5 — сферический щелевой резонатор; 6 — смотровое окно; 7 — волноводы; 8 — магнетрон; 9 — вентиляторы для охлаждения магнетронов; 10 — диэлектрические ограничительные ободки; 11 — диэлектрические чашки; 12 — шарнирные петли; 13 — диэлектрический ободок конвейера; 14 — мотор-редуктор; 15 — диэлектрические направляющие планки; 16 — неферромагнитная мелкоячеистая сетка на окнах

Fig. 2. Continuous operation microwave installation with spherical resonators for egg heat treatment: а — process diagram; б — conveyor with cups; в — spatial image of the installation; г — slit spherical resonator; д — geometric configuration of the resonator; 1 — control cabinet; 2 — shielding housing; 3 — below cutoff waveguide for unloading eggs; 4 — below cutoff waveguide for loading eggs into cups; 5 — spherical slit resonator; 6 — viewing window; 7 — waveguides; 8 — magnetron; 9 — fans for cooling magnetrons; 10 — dielectric limiting rims; 11 — dielectric cups; 12 — pin hinges; 13 — dielectric conveyor rim; 14 — gear motor; 15 — dielectric guide rails; 16 — non ferromagnetic fine mesh on windows



14. Диаметр сферического щелевого резонатора 5 кратен половине длины волны, а диэлектрический ободок с диэлектрическими чашками перемещается между полусферами, где имеются окна для передвижения чашек. Диаметр сферического щелевого резонатора 5 меньше, чем расстояние между сферическими щелевыми резонаторами. На верхнем основании цилиндрического экранирующего корпуса 2 установлены магнетроны 8 с волноводами 7 и вентиляторами 9 воздушного охлаждения так, что излучатели направлены в соответствующие сферические щелевые резонаторы 5. На боковой поверхности экранирующего корпуса 2 имеются лоток 4 для загрузки яиц через окно в диэлектрические чашки 11 и лоток для выгрузки яиц 3 через выгрузное окно. На окнах сферических щелевых резонаторов и окнах для загрузки и выгрузки яиц подвешены мелкоячеистые неферромагнитные сетки 16. Около выгрузного окна расположены диэлектрические направляющие планки 15, позволяющие опрокидывать диэлектрические чашки 11, а дальше диэлектрические чашки расположены между диэлектрическими ограничительными ободками 10.

Предлагаемая электротехнология, реализуемая в установке, подробно описана технологическим процессом, детально описанным ниже.

Технологический процесс термообработки и обеззараживания компонентов яйца в СВЧ-установке непрерывно-поточного действия происходит следующим образом. Включается мотор-редуктор 14 конвейера 13 для передвижения диэлектрических чашек 11 через сферические щелевые резонаторы 5. Включается транспортер (не показан) для загрузки яиц через лоток 4 в диэлектрические чашки 11. Включаются вентилято-

ры 9 для охлаждения магнетронов 8 с волноводами 7. Включается первый СВЧ-генератор (магнетроны 8) на определенную мощность. Последующие генераторы можно включать по мере появления внутри сферического щелевого резонатора 5 яиц в диэлектрических чашках 11. В сферических щелевых резонаторах 5 возбуждается электромагнитное поле сверхвысокой частоты (ЭМП СВЧ).

В процессе передвижения конвейера с яйцами в диэлектрических чашках через сферический щелевой резонатор 5 желток подвергается диэлектрическому нагреву, а белок нагревается за счет теплопередачи от желтка к белку. За пределами сферического щелевого резонатора яйца не подвергаются эндогенному нагреву, происходит выравнивание температуры по объему желтка и белка. При этом продолжительность нахождения яиц в сферическом щелевом резонаторе 5 должна быть меньше, чем за его пределами. Тогда скважность технологического процесса (отношение продолжительности диэлектрического нагрева к продолжительности цикла) будет менее 0,5. В этом случае за счет многократного воздействия ЭМП СВЧ на компоненты яиц обеспечивается варка желтка и белка.

Чем больше кратность воздействия ЭМП СВЧ малой мощности на яйца (больше сферических щелевых резонаторов в установке), тем равномернее нагреваются компоненты яйца по объему. Размер диэлектрической чашки позволяет свободно размещать яйцо, это обеспечивает колебание яйца в процессе передвижения конвейера, что важно для равномерной термообработки.

Сферический резонатор обладает высокой собственной добротностью, а следовательно, обеспечивает мак-

симальный КПД установки. Многократный кратковременный режим воздействия ЭМП СВЧ обеспечивает сохранность скорлупы, так как поры скорлупы успевают пропустить пар и выровнять давление внутри скорлупы. В сферическом резонаторе напряженность электрического поля равномерная, образуется стоячая волна. На окнах сферического резонатора свободно подвешены ферромагнитные мелкоячеистые сетки 16, которые в процессе передвижения диэлектрических чашек ограничивают излучение. Такие же сетки подвешены на окнах, предназначенных для загрузки и выгрузки яиц на боковой поверхности цилиндрического экранирующего корпуса 2, поэтому мощность потока излучения ограничивается.

Поток излучения через окна сферических резонаторов и через щели, предназначенные для передвижения контейнера, замыкается на яйцах, которые расположены за пределами резонаторов. Щель на сферических резонаторах со стороны экранирующего корпуса закрыта, а со стороны вала мотора-редуктора не превышает четверти длины волны. Скорость нагрева компонентов сырья регулируется дозой воздействия, а производительность установки — регулированием скорости передвижения конвейера в соответствии с мощностью и количеством генераторов.

Для термообработки яиц нами разработаны установки [8, 9, 10]:

- с передвижными сферическими резонаторами, что позволяет выполнять термообработку как целых яиц, так и с поврежденной скорлупой, при этом собственная добротность составляет около 2500, а напряженность электрического поля — 1,5 кВ/см;

- с тороидальным резонатором, что позволяет выполнять термообработку предварительно измельченного сырья, при этом напряженность электрического поля в конденсаторной части резонатора составляет 2,5–4 кВ/см, что снижает бактериальную обсемененность продукта до величин ниже 500 тыс. КОЕ/г; собственная добротность резонатора составляет около 5000;

- с биконическим резонатором, что позволяет выполнять термообработку целых яиц, при этом обеспечивается собственная добротность резонатора около 7000, а напряженность электрического поля составляет 1,5–2 кВ/см.

Собственную добротность сферического щелевого резонатора вычислим с учетом его геометрических параметров (рис. 1д) по формуле:

$$Q = \frac{k \cdot \int_0^R (R^2 - y^2) dy}{\Delta \cdot \int_0^R \sqrt{R^2 - y^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\left(\sqrt{R^2 - y^2} \right)' \right)^2} dy}, \quad (1)$$

где k — коэффициент, учитывающий геометрию прорези в резонаторе; Δ — толщина скин-слоя, м.

Расчеты показывают, что собственная добротность составляет 8800.

Обоснование режимов термообработки. Удельная диэлектрическая мощность для нагрева компонентов яйца с учетом диэлектрических параметров [11]:

$$P_{уд} = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (2)$$

Таблица 1. Уровни варьирования факторов

Table 1. Levels of variation of factors

Факторы	Уровни факторов				
	–1,414	–1	0	+1	+1,414
Продолжительность, ч	0,047	0,033	0,05	0,067	0,094
Мощность генератора, Вт	4528	3200	4000	4800	6784

где f — частота электромагнитного поля, Гц; ε — относительная диэлектрическая проницаемость компонентов яйца; $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь компонентов яйца; E — напряженность электрического поля в компонентах яйца, В/м.

Удельная мощность, необходимая для нагрева компонентов яйца с учетом теплофизических параметров яйца:

$$P_{уд} = \left(\gamma \cdot c \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right) \cdot \frac{1}{\eta}, \quad (3)$$

где γ — плотность компонентов яйца, кг/м³: плотность белка 1040 кг/м³, содержимого яйца — 1037 кг/м³, желтка — 1024–1033 кг/м³; ΔT — приращение температуры (°C) компонентов яйца за промежуток времени $\Delta \tau$ (с); η — термический КПД; C — теплоемкость компонентов яйца, кДж/кг·°C ($C_{\text{белка}} = 4,1$ кДж/кг·°C, $C_{\text{желтка}} = 2,8$ кДж/кг·°C).

С учетом необходимых удельных энергетических затрат $W = 0,23–0,32$ Вт·ч/г (рис. 1) и температуры нагрева желтка 110 °C, согласуем продолжительность нагрева желтка и удельную мощность генератора по формуле

$$\Delta \tau = \frac{\Delta T \cdot C \cdot \rho}{P_{уд} \cdot \eta} = \frac{110 \cdot 2800 \cdot 1030}{P_{уд} \cdot 0,7} = \frac{5287 \cdot 10^5}{P_{уд}}, \quad (4)$$

где $P_{уд}$ — удельная мощность генератора, Вт/м³; $\Delta \tau$ — общая продолжительность нагрева яиц в резонаторах, с; ρ — количество сферических резонаторов, шт.; η — КПД установки для варки яиц ($\eta = 0,6$); C — теплоемкость белка и желтка, кДж/кг·°C; G — масса яйца, кг.

С другой стороны, согласуем температуру нагрева желтка с энергетическими затратами по формуле:

$$W_{уд} = \frac{C \cdot \Delta T}{3600 \cdot \eta} = \frac{2800 \cdot 110}{3600 \cdot 0,7} = 142,6 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}. \quad (5)$$

Расчеты показывают, что желток сварится (110 °C) при энергетических затратах 143 Вт·ч/кг. Согласуем продолжительность и удельную мощность генератора: если в одном сферическом резонаторе подвергаются воздействию ЭМП СВЧ 4 яйца по 70 г (4 · 0,070 = 0,28 кг), то удельная мощность составляет 800 Вт/0,28 кг = 2857 Вт/кг. Если установка содержит 6 генераторов по 800 Вт, общей мощностью 4800 Вт, и в каждом сферическом резонаторе может разместиться 4 яйца по 70 г, то общая масса яиц, подвергаемых обработке 6 генераторами, составляет 1,68 кг. В этом случае продолжительность нагрева яиц до 110 °C составляет 2,7 мин,

$$\Delta \tau = \frac{\Delta T \cdot C \cdot \rho}{P_{уд} \cdot \eta} = \frac{110 \cdot 2800 \cdot 1030 \cdot 1,68}{4800 \cdot 0,7} = 154 \text{ с}. \quad (6)$$

Между резонаторами должны транспортироваться более 8 яиц для обеспечения скважности меньше 0,5. Следовательно, на конвейере будут 54 яйца между ре-

зонаторами ($6 \cdot 9 = 54$ шт.) и 24 яиц в резонаторе, общее количество 78 яиц. Производительность установки: $1,68 \cdot 60/2,6 = 38,77$ кг/ч = 554 шт./ч. Один оборот конвейера проходит за $\tau = 2,6 \cdot 78/24 = 8,45$ мин = 0,14 ч. Скорость вращения конвейера 0,4 об/мин.

Для получения регрессионных моделей составлена матрица планирования (табл. 1). При этом использовали ротатбельное планирование второго порядка. В табл. 1 и 2 приведены принципы кодирования, уровни варьирования и матрица проведения эксперимента при термообработке яиц в СВЧ-установке непрерывно-поточного действия со сферическим резонатором.

Регрессионная модель изменения энергозатрат (Y_1 , Вт·ч/кг) (7) и температуры (Y_2 , °C) (8) от продолжитель-

ности воздействия ЭМП СВЧ на яйца (τ , ч) и мощности генераторов (P , Вт):

$$Y_1 = -5,52 + 2703x_1 + 0,004x_2 + 1241x_1^2 - 0,006x_1x_2; \quad (7)$$

$$Y_2 = -3,25 + 2100x_1 + 0,003x_2 + 836x_1^2 - 0,004x_1x_2. \quad (8)$$

Из уравнений (7, 8) следует, что оба фактора оказывают влияние на энергозатраты и температуру нагрева яиц. Наглядное представление о закономерностях изменения критериев оптимизации при варьировании факторов можно получить с помощью двухмерных сечений поверхностей откликов, построенных в программном пакете для статистического анализа Statistica 12 ,

Таблица 2. Матрица ротатбельного планирования второго порядка (метод наименьших квадратов полинома второй степени)

Table 2. Matrix of rotatable planning of the second order (the method of least squares of a polynomial of the second degree)

Номер опыта	Кодированная матрица		Рабочая матрица						Параметр оптимизации	
	X ₁	X ₂	продолжительность		мощность генераторов, Вт, (по 800 Вт, по 4 яйца, 70 г)				энергозатраты, Вт·ч/кг (Y ₁)	температура, °C (Y ₂)
			мин	ч						
1	+	+	4	0,067	6 ген.	24 шт.	1,68 кг	4800	191,4	147,4
2	-	+	4	0,067	6	24	1,68	4800	191,4	147,4
3	+	-	2	0,033	4	16	1,12	3200	94,29	72,6
4	-	-	2	0,033	4	16	1,12	3200	94,29	72,6
5	-1,414	0	2, 8	0,047	5	20	1,4	4000	134,3	103
6	+1,414	0	5,65	0,094	5	20	1,4	4000	268,6	207
7	0	-1,414	3	0,05	5,66	22,6	1,58	4528	143,3	110,4
8	0	+1,414	3	0,05	8,48	33,8	2,37	6784	143,1	110,2
9	0	0	3	0,05	5	20	1,4	4000	142,8	110
10	0	0	3	0,05	5	20	1,4	4000	142,8	110
11	0	0	3	0,05	5	20	1,4	4000	142,8	110
12	0	0	3	0,05	5	20	1,4	4000	142,8	110
13	0	0	3	0,05	5	20	1,4	4000	142,8	110

Рис. 3. Поверхность отклика и сечение двухфакторной модели: а — энергозатрат; б — температуры в зависимости от продолжительности воздействия ЭМП СВЧ и мощности генераторов: Y_1 — энергозатраты (Вт·ч/кг), Y_2 — температура (°C), X_1 — продолжительность воздействия (ч), X_2 — мощность генераторов (Вт)

Fig. 3. Response surface and cross-section of the two-factor model: а — energy consumption; б — temperature depending on the duration of exposure to EMF and generator power: Y_1 — energy consumption (Wh/kg), Y_2 — temperature (°C), X_1 — duration of exposure (h), X_2 — generator power (W)

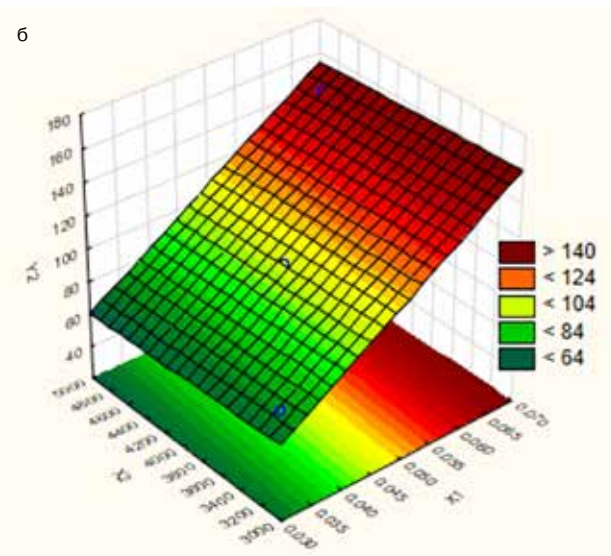
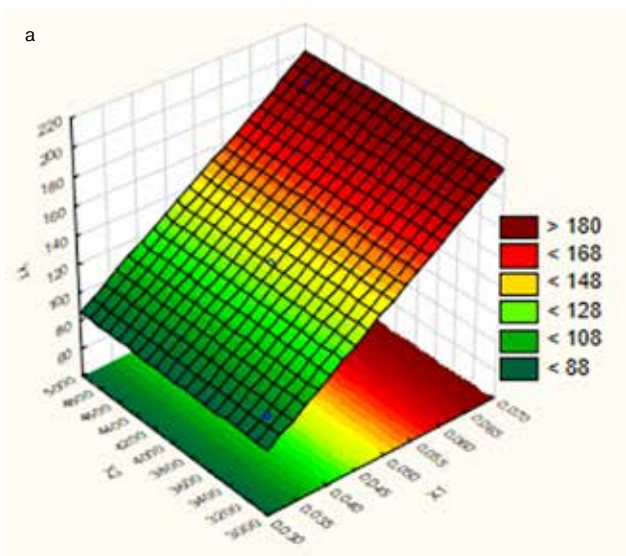
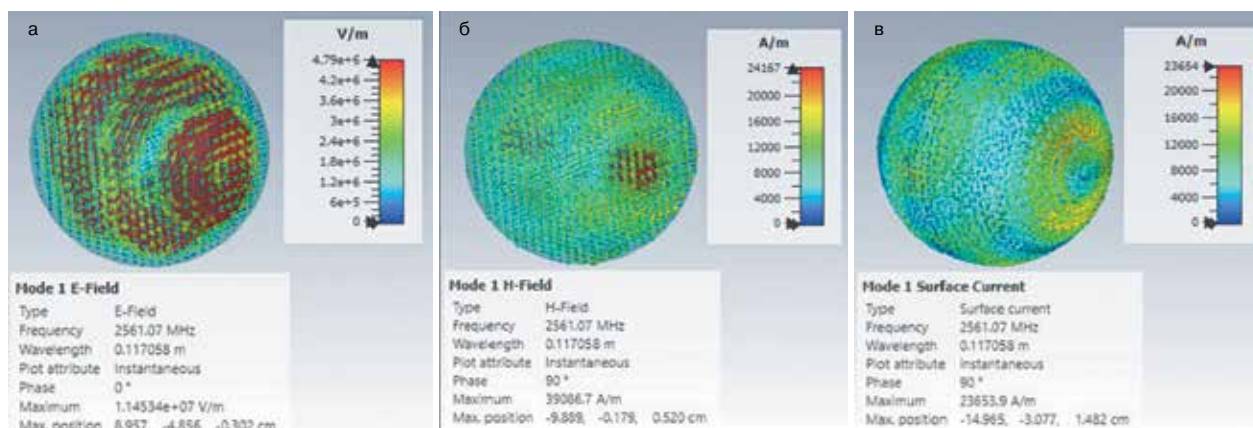


Рис. 4. Результаты исследования электродинамических параметров сферического резонатора, картина распределения: а — напряженности электрического поля; б — напряженности магнитного поля; в — плотности тока

Fig. 4. Results of the study of the electrodynamic parameters of a spherical resonator—the distribution pattern of: а — electric field strength; б — magnetic field strength; в — current density



которые позволяют с достаточной точностью прогнозировать значения критериев оптимизации и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Режим термообработки яиц будет эффективен при достижении температуры желтка 110 °С при общей мощности пяти генераторов 4,0 кВт, тогда производительность яйцеварки составит 400 шт./ч, а удельные энергетические затраты будут равны 143 Вт·ч/кг.

В программе трехмерного моделирования процессов распространения электромагнитных полей CST Microwave Studio в расчетном модуле Eigenmode были исследованы картины распределения напряженности электрического и магнитного поля в сферическом резонаторе. Результаты исследования электродинамических параметров сферического резонатора приведены на рис. 4.

Исследования показывают, что вектора напряженностей электрического поля достаточно равномерно распределены по всей рабочей области, при этом амплитудные значения напряженности электрического поля концентрируются в наибольшей степени в области расположения излучателя в резонаторе. Напряженность электрического поля в резонаторе составляет 1,5–3 кВ/см.

Выводы / Conclusion

Рассмотрены существующие технические и технологические решения по термообработке яиц с использованием энергии электромагнитного поля сверхвысокой частоты. Выявлен ряд существенных недостатков, требующих поиска новых перспективных конструктивных

исполнений рабочей камеры, обеспечивающей непрерывный режим работы установки при соблюдении электромагнитной безопасности. На основе анализа предложено новое конструкционное исполнение установки, дано теоретическое и экспериментальное обоснование режимных параметров.

Конструкционное исполнение радиоволновой установки конвейерного типа позволяет проводить термообработку яиц при перемещении в диэлектрических чашечках через щелевые сферические резонаторы. Скважность процесса менее 0,5 обеспечивается за счет расположения чашечек в резонаторах и между ними в отношении 4:9. Значение собственной добротности резонатора с достаточной достоверной вероятностью, рассчитанное в системе автоматизированного проектирования MathCAD через геометрические параметры, совпадает с результатами, полученными в программе CST Microwave Studio, и достигает 8800, с увеличением диаметра резонатора собственная добротность увеличивается. Визуализация в программе показывает равномерное распределение электрического поля в резонаторе, напряженность при этом составляет 1,5–3 кВ/см, что обеспечивает высокую стерильность продукта. Из регрессионных моделей, составленных на основе матрицы ротатбельного планирования эксперимента второго порядка, вытекает, что эффективная продолжительность воздействия ЭМП СВЧ составляет 154 с, удельные энергетические затраты равны 143 Вт·ч/кг. Скорость вращения мотор-редуктора конвейера составляет 0,4 об/мин.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу.

Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work.

The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.

The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rombouts I., Wouters G.B., Lambrecht M.A., Uten L., Van Den Bosch W., Vercruysse S., Delcour J.A. Food protein network formation and gelation induced by conductive or microwave heating: a focus on hen egg white. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020; 66. 102484. DOI 10.1016/j.ifset.2020.102484
2. Guo Q., Sun D.W., Cheng J.H., Han Z. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*. 2017; 67. 236. DOI 10.1016/j.tifs.2017.07.007

REFERENCES

1. Rombouts I., Wouters G.B., Lambrecht M.A., Uten L., Van Den Bosch W., Vercruysse S., Delcour J.A. Food protein network formation and gelation induced by conductive or microwave heating: a focus on hen egg white. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020; 66. 102484. DOI 10.1016/j.ifset.2020.102484
2. Guo Q., Sun D.W., Cheng J.H., Han Z. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science and Technology*. 2017; 67. 236. DOI 10.1016/j.tifs.2017.07.007

3. Chambers J.R., Khalid Z., Humayoun A., Abdel-Aal El-Sayed M. Chicken eggs. *Egg Innovations and Strategies for Improvements* ed Patricia Y. Hester. New York: Academic Press: chapter. 2017; 1. 1. DOI 10.1016/B978-0-12-800879-9.00001-9
4. Muthukumarappan K., Swamy G.J. Microwave processing of foods. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* ed M Kutz. New York: Academic Press. 2019; 16. 417–438. DOI 10.1016/B978-0-12-814803-7.00016-6
5. Бурдо О.Г., Терзиев С.Г., Яровой И.И., Борщ А.А. Моделирование процессов обезвоживания пищевого сырья в электромагнитном поле. *Прок. Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2013; 3. 62. DOI 10.20914/2310-1202-2013-3-62-65.
6. Белов А.А. Установки для переработки яиц. Материалы инт. научно-практической конф. «Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции». Йошкар-Ола: *Марийский государственный университет*. 2011. 145–146.
7. Вальяров М.Э. Моделирование воздействия СВЧ поля на куриное яйцо. В сборнике: *Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы - 2021. VIII Молодежная международная научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов*. Казань. 2021. С. 343–345.
8. Вальяров М.Э., Насыбуллин А.Р., Степура А.В. Прединкубационная обработка куриных яиц СВЧ ЭМП. В сборнике: *Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. Сборник статей девятой Всероссийской научной школы-семинара. Под редакцией Ал.В. Скрипаля*. Саратов. 2022. С. 280–283.
9. Новикова Г.В., Жданкин Г.В., Белова М.В., Орлова О.И., Семенов В.Г., Баймуханов Д.А., Ишхан К.З., Аубакиров А.К. Оптимизация параметров микроволновой установки с передвижными резонаторами для термообработки некондиционных яиц. *Известия национальной академии наук республики Казахстан. Серия геологических и технических наук*. 2019; 437. 5. DOI 10.32014/2019.2518-170X. 125.
10. Орлова О.И., Новикова Г.В., Михайлова О.В., Просвирыкова М.В., Зайцев П.В. Обоснование возможности приготовления яиц без воды в электромагнитном поле сверхвысокой частоты. Материалы Международной научно-практической конференции «Перспективы развития аграрных наук». Чебоксары: *Чувашская государственная сельскохозяйственная академия*. 2020. 207–208. EDX XAHANX.
11. Рогов И.А. Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. М.: *Легкая и пищевая промышленность*. 1981. 288 с.
3. Chambers J.R., Khalid Z., Humayoun A., Abdel-Aal El-Sayed M. Chicken eggs. *Egg Innovations and Strategies for Improvements* ed Patricia Y. Hester. New York: Academic Press: chapter. 2017; 1. 1. DOI 10.1016/B978-0-12-800879-9.00001-9
4. Muthukumarappan K., Swamy G.J. Microwave processing of foods. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering* ed M Kutz. New York: Academic Press. 2019; 16. 417–438. DOI 10.1016/B978-0-12-814803-7.00016-6
5. Burdo O.G., Terziev S.G., Yarovoy I.I., Borsch A.A. Modeling of food raw material dehydration processes in the electromagnetic field. *Proc. of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2013; 3. 62. DOI 10.20914/2310-1202-2013-3-62-65 (In Russian)
6. Belov A.A. Installations for egg. *Materials of the Int. Scientific and Practical Conf. Topical Issues of Improving the Technology of Production and Processing of Agricultural Products*. Yoshkar-Ola: *Mari state University*. 2011. 145–146. (In Russian)/
7. Valyarov M.E. Modeling of the effect of a microwave field on a chicken egg. In the collection: *Applied Electrodynamics, Photonics and Living Systems - 2021. VIII Youth International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, postgraduates and Students*. Kazan. 2021. 343–345. (In Russian).
8. Aviaris M.E., Nasybullin A.R., Stepura A.V. Pre-incubation processing of chicken eggs by microwave EMF. In the collection: *The interaction of ultrahigh frequency, terahertz and optical radiation with semiconductor micro- and nanostructures, metamaterials and biological objects. Collection of articles of the ninth All-Russian Scientific school-seminar. Edited by Al.V. Skripal*. Saratov. 2022. 280–283. (In Russian).
9. Novikova G.V., Zhdankin G.V., Belova M.V., Orlova O.I., Semenov V.G., Baimukanov D.A., Iskhan K.Z., Aubakirov A.K. Validation of microwave installation parameters with mobile resonators for heat treatment of nonedible eggs. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2019; 437. 5. DOI 10.32014/2019.2518-170X. 125. (In Russian).
10. Orlova O.I., Novikova G.V., Mikhailova O.V., Prosviryakova M.V., Zaitsev P.V. Justification of the possibility of cooking eggs without water in an ultra-high frequency electromagnetic field. Materials of the International scientific and practical Conference “Prospects for the development of agricultural sciences”. Cheboksary: *Chuvash State Agricultural Academy*. 2020. 207–208. EDX XAHANX. (In Russian).
11. Rogov I.A. Electrophysical, Optical and Acoustic Characteristics of Food Products. M.: *Light and food industry*. 288 p. (In Russian).

ОБ АВТОРАХ:

Ольга Ивановна Орлова, старший преподаватель кафедры «Математика и вычислительная техника» Нижегородский государственный инженерно-экономический университет ул. Октябрьская 22а, Княгинино, Нижегородской обл., 606340, Российская Федерация
E-mail: oliandria5@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4384-3158>

Марьяна Валентиновна Просвирыкова, доктор технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет — Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, д. 49, ул. Тимирязевская, г. Москва, 127550, Российская Федерация
E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>

Ольга Валентиновна Михайлова, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет ул. Октябрьская 22а, Княгинино, Нижегородской обл., 606340, Российская Федерация
E-mail: ds17823@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>

Галина Владимировна Новикова, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет ул. Октябрьская 22а, Княгинино, Нижегородской обл., 606340, Российская Федерация
E-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>

ABOUT THE AUTHORS:

Olga Ivanovna Orlova, Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Computer Engineering Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Oktabrskaya str. 22a, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, 606340, Russian Federation
E-mail: oliandria5@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4384-3158>

Mariana Valentinovna Prosviryakova, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazev street, Moscow, 127550, Russian Federation
E-mail: prosviryakova.maryana@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3258-260X>

Olga Valentinovna Mikhailova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Infocommunication Technologies and Communication Systems, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics Oktabrskaya str. 22a, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, 606340, Russian Federation
E-mail: ds17823@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1045-2003>

Galina Vladimirovna Novikova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics Oktabrskaya str. 22a, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, 606340, Russian Federation
E-mail: NovikovaGalinaV@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9222-6450>

ОБ АВТОРАХ:

Александр Анатольевич Тихонов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов и ремонт машин», Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, пр. Гагарина 97, г. Нижний Новгород, Нижегородской обл., 603107, Российская Федерация
E-mail: tichonov57@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3687-977X>

Александр Анатольевич Белов, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд 5, Москва, 109428, Российская Федерация
E-mail: sofronich.bel@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9216-9852>

Геральд Маркович Тобоев, кандидат ветеринарных наук, декан факультета ветеринарной медицины и зоотехнии, Чувашский государственный аграрный университет, ул. К. Маркса 29, г. Чебоксары, Чувашская республика, 428003, Российская Федерация
E-mail: ToboevGM@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3184-0710>

ABOUT THE AUTHORS:

Alexander Anatolyevich Tikhonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Machine Repair, Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, 97 Gagarina Ave., Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod Region, 603107, Russian Federation
E-mail: tichonov57@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3687-977X>

Alexander Anatolyevich Belov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institute Passage 5, Moscow, 109428, Russian Federation
E-mail: sofronich.bel@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9216-9852>

Gerald Markovich Toboev, Candidate of Veterinary Sciences, Dean of the Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science, Chuvash State Agrarian University, 29 K. Marx Str., Cheboksary, Chuvash Republic, 428003, Russian Federation
E-mail: ToboevGM@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3184-0710>