

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 621.384:664

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЯСНЫХ И РЫБНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В МАЛОГАБАРИТНЫХ АППАРАТАХ С ГАЛОГЕНОВЫМИ ИК-ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ

И. М. Кирик, С. Л. Масанский, А. В. Кирик, С. И. Гузова

Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

АННОТАЦИЯ

Введение. ИК-аппараты – энергоэффективное оборудование для обработки пищи. Однако конкуренция требует от производителей сокращать удельные затраты электроэнергии на процесс обработки. Научная задача – сравнительная оценка энергоэффективности ИК-аппарата, отличающегося верхним и нижним по отношению к продукту расположению нагревательных элементов, в качестве которых используются галогеновые трубчатые излучатели.

Материалы и методы. Экспериментальный аппарат оригинальной конструкции. Галогеновые («светлые») излучатели (длина волны: ~1,6 мкм), обеспечивающие плотность теплового потока до 5×10^4 Вт/м². Мясные, куриные и рыбные реструктурированные изделия шарообразной формы массой 50–100 г.

Результаты. Получено 12 зависимостей, описывающих процесс нагрева фаршевых изделий в аппаратах с верхним энергоподводом при различной плотности теплового потока. Экспериментальный аппарат с двухсторонним энергоподводом, который обеспечивается галогеновыми излучателями, на 10–30 % более энергоэффективен в сравнении с традиционными жарочными аппаратами.

Выводы. Экспериментальная конструкция ИК-аппарата рекомендуется как прототип для проектирования промышленного образца, а полученные аналитические зависимости – для инженерных расчетов. «Светлые» инфракрасные трубчатые излучатели позволяют формировать высокое качество готовой продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *инфракрасный нагрев; галогеновые излучатели; мясные, рыбные полуфабрикаты; энергоэффективность; теплопроводность; безразмерная температура; число Фурье.*

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кирик, И. М. Энергоэффективность процесса нагрева мясных и рыбных полуфабрикатов в малогабаритных аппаратах с галогеновыми ИК-излучателями / И. М. Кирик, С. Л. Масанский, А. В. Кирик, С. И. Гузова // Вестник МГУП. – 2020. – № 1(28). – С. 80–91.

ENERGY EFFICIENCY OF THE HEATING PROCESS OF MEAT AND FISH SEMI-FINISHED PRODUCTS IN SMALL-SIZED APPARATUSES WITH HALOGEN IR EMITTERS

I. M. Kiryk, S. L. Masansky, A. V. Kiryk, S. I. Guzova

Mogilev State University of Food Technologies, Republic of Belarus

ABSTRACT

Introduction. IR apparatuses are energy efficient food processing equipment. However, competition requires for the producers to reduce their specific energy costs for processing. The scientific task is to carry out comparative assessment of the energy efficiency of the IR apparatus, which differs in the upper and lower arrangement of heating elements in relation to the product. Halogen tube emitters are used as the heating elements.

Materials and methods. Experimental apparatus of original design. Halogen («bright») emitters (wave length: ~ 1.6 nm) with heat flux density of up to 5×10^4 W/m². Restructured ball-shaped meat, chicken and fish products weighing 50–100 g.

Results. There were obtained 12 dependencies that describe the heating process of minced meat products in apparatuses with an upper power supply at different heat flux densities. The experimental apparatus with a two way energy supply, provided by halogen emitters, is as much as 10–30 % more energy-efficient than the conventional frying one.

Conclusions. The experimental design of an IR apparatus is recommended as a prototype for designing an industrial model, and the obtained analytical dependences can be used for engineering calculations. «Bright» infrared tube emitters make it possible to manufacture high quality finished products.

KEY WORDS: *infrared heating; halogen emitters; meat and fish semi-finished products; energy efficiency; thermal conductivity; dimensionless temperature; Fourier number.*

FOR CITATION: Kiryk I. M., Masanskiy S. L., Kiryk A. V., Guzova S. I. Energy efficiency of the heating process of meat and fish semi-finished products in small-sized apparatuses with halogen IR emitters. Bulletin of Mogilev State University of Food Technologies. – 2020. – No. 1(28). – P. 80–91. (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ

Метод инфракрасного (ИК) нагрева находит все большее применение в различных отраслях пищевой промышленности и на объектах общественного питания, поскольку он является перспективным физическим методом обработки продуктов, экологически безопасным, энергосберегающим, позволяющим обеспечить интенсификацию и углубленную обработку исходного сырья.

При ИК-нагреве продуктов значительно снижается влияние теплопроводности нагреваемых тел по сравнению с традиционными (поверхностными) способами тепловой обработки, такими как варка, жарка и т.п., создаются условия для интенсификации процесса, т.к. тепловая энергия передается продукту излучением при отсутствии непосредственного контакта между ИК-генераторами и нагреваемым изделием. Среда, окружающая продукт, прозрачна для ИК-лучей, поэтому она не нагревается либо нагревается слабо и практически не является теплопередающей [1].

Развитие и коммерциализация технологий переработки пищевых продуктов на основе ИК может открыть новые пути для доставки безопасных и ценных продуктов питания, желательных для потребителей, при одновременном сокращении потребления природных ресурсов в процессе переработки [2].

Достижимые преимущества источников ИК-нагрева и методов комбинированного (лучистого и парового) воздействия на пищевые продукты при их кулинарной обработке, такие как: высокая скорость кулинарной обработки, высокое качество кулинарной обработки (наличие хрустящей корочки и непересушенность продукта), экономичность, отсутствие пригорания к днищу, экологическая безопасность и универсальность, в целом обеспечивают новое качество кухонного электрооборудования, привлекательного для покупателей [1, 3, 4].

Эффективность термообработки кулинарных изделий ИК-лучами зависит от плотности облучения, спектральных характеристик генераторов излучения и взаимосвязи этих параметров с пропускательной, отражательной и поглощательной способностями обрабатываемых изделий. Таким образом, режимы термической обработки (запекания, обжарки и т.п.) достигаются путем изменения длины волны и плотности теплового потока [5].

Сложность и многофакторность процесса тепловой обработки пищевых продуктов делает затруднительным достаточно точное теоретическое описание изменения температурного поля в теле продукта во времени. Методы решения задач нестационарной теплопроводности

разрабатывались Ю. М. Плаксиным, В. В. Филатовым, Р. Р. Азизовым и другими учеными. Большинство решений задач нестационарной теплопроводности основано на решении дифференциального уравнения Фурье при определенных граничных условиях с использованием громоздкого математического аппарата и требует большой вычислительной работы по составлению вспомогательных расчетных номограмм и таблиц [6–8].

Нагревание внутренних слоев кулинарных изделий в ИК-аппарате происходит в основном за счет теплопроводности продукта и, частично, за счет поглощения лучистой энергии всем объемом продукта. При этом формируются органолептические характеристики изделий, их пищевая ценность, текстура. Некоторая часть свободной воды, образующейся вследствие денатурации белков, выделяется на поверхности изделий, откуда испаряется под действием теплоты. Повышение температуры поверхности вызывает изменение цвета поверхности изделий (переход к коричневатой и темно-коричневой окраске). Повышение температуры свыше 140 °С приводит к появлению продуктов глубокого распада азотистых веществ и жира, негативно сказывающихся на органолептических показателях готовой продукции [9–14].

На объектах общественного питания находится значительное количество различных аппаратов ИК-нагрева периодического и непрерывного действия. Кроме того, ИК-нагрев довольно часто используется в сочетании с другими видами нагрева (чаще всего используется конвективный теплообмен, и его доля в тепловом балансе некоторых аппаратов может превышать 50 %). Отмечается, что конструктивные особенности гриль-аппаратов существенно влияют на качество и энергоэффективности процессов. Для каждого аппарата требуется уточнение значений параметров режимов и продолжительности тепловой обработки отдельных продуктов [15, 16].

Электрические ИК-излучатели в аппаратах размещаются в рабочей камере в отражателях таким образом, чтобы создавался максимальный и равномерно распределенный лучистый поток по поверхности обрабатываемых изделий и обеспечивался оптимальный режим тепловой кулинарной обработки.

Кварцевые («светлые») галогенные излучатели – это излучатели с наибольшей интенсивностью излучения. В зависимости от желаемого спектра излучения используются 2 различных вольфрамовых проводника: звездчатая спираль для средневолновых галогенных излучателей (серия QT) и поддерживаемая нить накала для коротковолновых галогенных излучателей (серия QH). Время нагрева и охлаждения обоих вариантов составляет несколько секунд, поэтому они особенно подходят для областей использования с коротким временем цикла. Используемая в средневолновых кварцевых галогенных излучателях серии QT вольфрамовая звездчатая спираль достигает рабочих температур до 1500 °С. Звездчатая спираль обладает высокой структурной прочностью и сделана таким образом, что при небольшой световой эмиссии она излучает больше инфракрасного тепла (пиковая длина волн: ~1,6 мкм).

Коротковолновые кварцевые галогенные излучатели серии QH излучают строго определенный инфракрасный спектр, за счет чего можно получить эффективную регулировку в отношении нагреваемого объекта. Очень короткое время реагирования и высокие температуры (2600 °С) делают этот нагревательный элемент идеальным для коротких циклических процессов и сфер использования, которые требуют высокую удельную мощность.

«Светлые» электрические ИК-излучатели не обладают устойчивостью к термоударам и при попадании на их раскаленную поверхность образующегося в процессе жарки сока или жира быстро выходят из строя. Поэтому их размещают обычно в верхней части рабочей камеры, чтобы стекающий из изделия сок и жир на них не попадал.

При обогреве изделия ИК-лучами только сверху выделяющийся в значительных количествах (особенно из мясных изделий) сок и частично жир перетекают на нижнюю поверхность изделия, где нагрев отсутствует, и сливаются в поддон. При этом наблюдаются значительные потери минеральных и питательных веществ из изделия. Кроме того, верхняя часть изделия сильно обезвоживается, что значительно снижает качество готовых изделий. При нагреве изделия ИК-лучами только снизу выделяющийся из его нижней части сок подвергается интен-

сивному нагреву. При этом из него испаряется вода, а практически все минеральные и питательные вещества остаются в изделии.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что наилучшим вариантом можно считать ИК-аппарат, имеющим двухсторонний энергоподвод, позволяющий осуществлять быстрый равномерный нагрев изделия по всей поверхности при минимальных потерях пищевых веществ обрабатываемого продукта в процессе его тепловой обработки.

В настоящее время известна эффективность использования для ИК-нагрева в качестве источника теплоты галогенных ламп. При этом количество тепловой энергии, выделяемой галогенной лампой в виде лучистого потока, составляет 80–90 % от потребляемой электрической энергии и с помощью них можно создавать высокие плотности энергии – до 60 кВт/м² [1]. Вместе с тем в малых производственных специализированных аппаратах для общественного питания галогенные лампы не нашли широкого применения.

Цель исследования – обоснование новых конструкций энергоэффективных аппаратов ИК-нагрева для использования на объектах общественного питания и в быту, позволяющих свести к минимуму удельные энергетические затраты на процесс, получить продукцию высокого качества, реализовать принципы здорового и вкусного питания.

Научная задача – получение аналитической зависимости относительной избыточной температуры (Θ) реструктурированных мясных и рыбных полуфабрикатов шарообразной формы от числа Фурье (Fo) при их обработке в ИК-аппаратах с верхним энергоподводом и сравнительная оценка энергоэффективности ИК-аппарата, отличающегося верхним и нижним по отношению к продукту расположением нагревательных элементов, в качестве которых используются галогеновые излучатели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

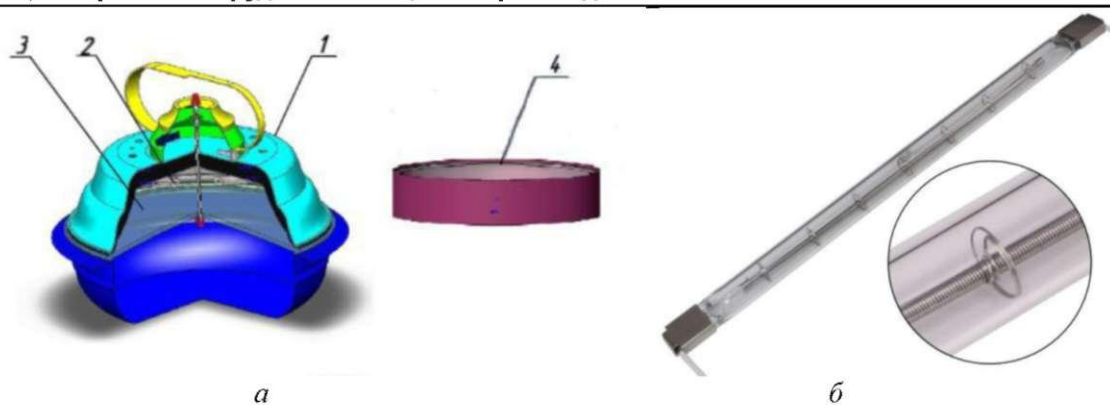
Метод исследования – теплотехнический эксперимент. В качестве объектов для изучения процесса ИК-нагрева выбраны мясные, куриные и рыбные рубленые изделия, имеющие форму шара (как, например, тефтели, фрикадельки), которые занимают значительный удельный вес в продукции общественного питания и в бытовой кухне.

Заготовки формировались шарообразной формы и различной массы (50–100 г) с обязательной фиксацией параметров, в их центр вводился преобразователь термоэлектрический ТХА, подключенный к измерителю-регулятору, далее заготовка укладывалась в ИК-аппарат для тепловой обработки. Для исходного обоснования режимов тепловой обработки использовали результаты, описанные в [17].

К моменту достижения продуктом кулинарной готовности температура в центре изделия составляет 80–90 °С, ближе к поверхности – около 100 °С, на поверхности – 130–140 °С. Использовали тепловизионный метод измерения температуры, позволяющий получать более точные результаты [18].

Применяемый для исследований ИК-аппарат (рис. 1) представляет собой емкость из нержавеющей стали объемом 3 дм³, в сферическую крышку которого встроены галогеновые кварцевые излучатели, отражающий теплоизолирующий экран и защитный экран из термостойкого стекла.

В качестве нагревательных элементов использовались коротковолновые галогеновые кварцевые излучатели серии QH, имеющие максимальную потребляемую мощность 500 Вт и напряжение питания до 240 В.

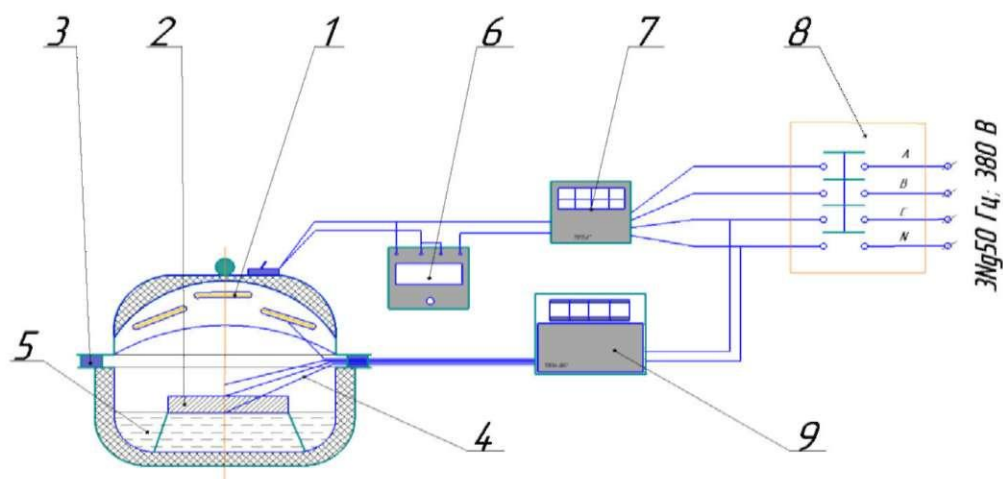


а – схема аппарата; 1 – корпус; 2 – галогеновые излучатели; 3 – защитный экран из термостойкого стекла; 4 – дистанционная вставка; *б* – галогеновый кварцевый излучатель

Рис. 1. Схема экспериментального ИК-аппарата

Fig. 1. Design of an experimental IR apparatus

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для исследования плотности теплового потока в ИК-аппарате.



1 – аппарат инфракрасного нагрева; 2 – пластина для измерения плотности теплового потока; 3 – вставка дистанционная; 4 – преобразователи термоэлектрические; 5 – вода для охлаждения нижней поверхности пластины; 6 – ваттметр; 7 – счетчик электроэнергии; 8 – пускатель магнитный; 9 – измеритель-регулятор «Сосна-004»

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения плотности теплового потока

Fig. 2. Diagram of the experimental unit for determining the heat flux density

На верхнюю поверхность круглой пластины 2 из углеродистой стали толщиной 12 мм равномерно наносился однородный слой черни, в результате чего формировалась лучевосприимчивая площадка и обеспечивалось максимальное поглощение падающего лучистого потока от ИК-излучателей. В верхнюю и нижнюю поверхности пластины зачеканивались хромель-алюмелевые термопары с диаметрами термоэлектродов 0,3 мм. Нижняя поверхность пластины окуналась в емкость с холодной водой, которая располагалась в корпусе аппарата. Такое охлаждение пластины водой обеспечивало значительный перепад температур между верхней и нижней поверхностями пластины, в результате чего осуществлялось беспрепятственное распространение теплового фронта сверху вниз. Пластина горизонтально размещалась под ИК-излучателями и лучистый поток равномерно попадал на ее лучевосприимчивую верхнюю поверхность [6].

Абсолютные значения плотности теплового потока q , Вт/м², рассчитывали по уравнению теплопроводности Фурье:

$$q = \frac{\lambda \cdot (t_c' - t_c'')}{\delta}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности пластины, Вт/м·°С; δ – толщина пластины, м; t_c' – температура верхней поверхности пластины, °С; t_c'' – температура нижней поверхности пластины, °С.

Таким образом, экспериментальным путем были получены значения плотности теплового потока в ИК-аппарате от его режимных параметров, представленные в табл. 1, что позволило в дальнейшем воспроизводить условия при экспериментах.

Для проведения исследований по изучению процесса тепловой обработки пищевых продуктов инфракрасным излучением создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 3.

Изменение температуры во времени в каждой точке тела при его нагревании и охлаждении определяли по известному из теории нестационарной теплопроводности уравнению, модифицированному нами с учетом условий данного эксперимента:

$$\Theta = D_1 \cdot e^{-\mu_l^2 \cdot Fo}, \quad (2)$$

где Θ – относительная избыточная температура тела (далее для краткости называется просто безразмерной температурой); D_1 – некоторая функция, зависящая от граничных условий, координат, формы тела и т.п.; μ_l – корни характеристического уравнения, получаемого при решении задачи; Fo – число Фурье.

Коэффициенты D_1 и μ_l определяются в этом случае эмпирически.

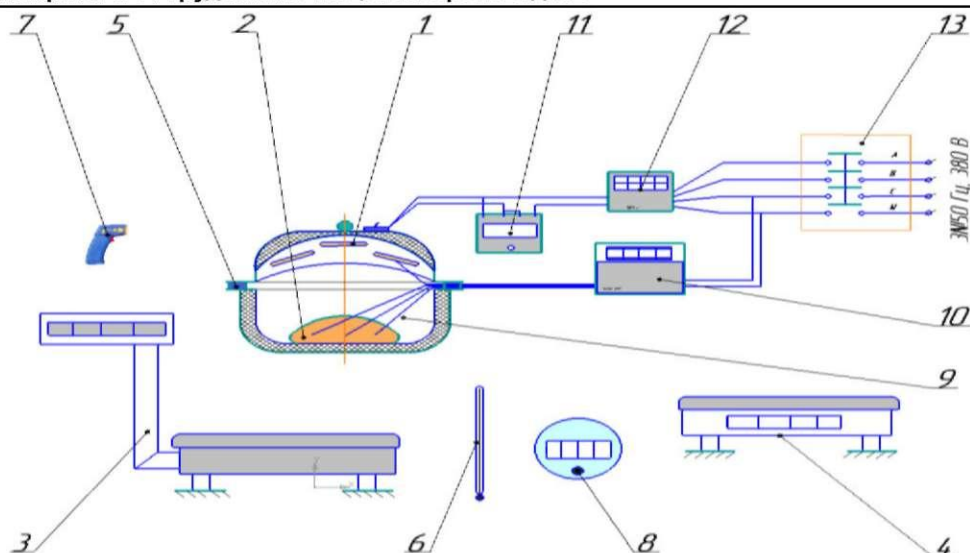
Табл. 1. Плотность теплового потока в экспериментальном ИК-аппарате в зависимости от изменяемых рабочих параметров

Table 1. Heat flux density in the experimental IR apparatus depending on the variable operating parameters

Изменяемые рабочие параметры ИК-аппарата		Плотность теплового потока, Вт/м ²
Напряжение на излучателях, В	200	$4,39 \times 10^4$
	220	$4,85 \times 10^4$
	250	$5,53 \times 10^4$
Удаление ИК-излучателей на расстояние, мм, дистанционной вставкой от верхней поверхности пластины при напряжении на излучателях 220 В	100	$4,7 \times 10^4$
	125	$3,2 \times 10^4$
	150	$2,88 \times 10^4$
	175	$2,76 \times 10^4$

Для температурного поля внутри реструктурированного продукта животного происхождения, содержащего большой процент влаги, вместо температуры среды принята предельная температура $t_{cp} = 100$ °С – температура насыщения водяного пара (температура кипения) при атмосферном давлении [19]. Уравнение (2) является уравнением подобия (критериальным уравнением), которое обобщает экспериментальные результаты и, в первую очередь, – результаты для изделий одной формы (в нашем случае – шаровидной).

Среднеквадратичная погрешность определения безразмерной температуры при нормальном законе распределения с вероятностью 0,955 не превысит значения 11,6 %.



1 – аппарат ИК-нагрева; 2 – продукт; 3 – весы электронные ВТН_Т-15; 4 – весы электронные лабораторные SC 4010; 5 – вставка дистанционная; 6 – термометр; 7 – пирометр Сентр-350; 8 – счетчик-секундомер; 9 – преобразователь термоэлектрический ТХА; 10 – измеритель-регулятор «Сосна-004»; 11 – ваттметр Д5004; 12 – счетчик трехфазный ЦЭ6803ВШ; 13 – пускатель магнитный ПМЕ

Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Fig. 3. Diagram of the experimental unit

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлены результаты аппроксимации экспериментальных данных, полученных при тепловой обработке реструктурированных мясных полуфабрикатов ИК-излучением в аппаратах с верхним (односторонним) энергоподводом, а в табл. 2 – результирующие зависимости безразмерной температуры от числа Фурье Fo .

Аналогичным способом были получены и обработаны экспериментальные данные для реструктурированных изделий из мяса птицы (мякоть бедра и голени) и рыбы (минтай), которые представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты обработки экспериментальных данных (верхний энергоподвод)

Table 2. Results of experimental data processing (upper power supply)

Изделия из мясного фарша			
Плотность теплового потока, Вт/м ²	Расчетная формула	Плотность теплового потока, Вт/м ²	Расчетная формула
$2,76 \times 10^4$	$\Theta = 2,0 \cdot e^{-6,7Fo}$	$4,39 \times 10^4$	$\Theta = 2,91 \cdot e^{-10,8Fo}$
$2,88 \times 10^4$	$\Theta = 2,30 \cdot e^{-8,5Fo}$	$4,85 \times 10^4$	$\Theta = 2,74 \cdot e^{-10,6Fo}$
$3,20 \times 10^4$	$\Theta = 2,38 \cdot e^{-8,4Fo}$	$5,53 \times 10^4$	$\Theta = 2,90 \cdot e^{-13,8Fo}$
Изделия из куриного фарша		Изделия из рыбного фарша	
Плотность теплового потока, Вт/м ²	Расчетная формула	Плотность теплового потока, Вт/м ²	Расчетная формула
$4,39 \times 10^4$	$\theta = 3,02 \cdot e^{-18,2Fo}$	$4,39 \times 10^4$	$\theta = 1,27 \cdot e^{-5,4Fo}$
$4,85 \times 10^4$	$\theta = 8,5 \cdot e^{-31,4Fo}$	$4,85 \times 10^4$	$\theta = 1,29 \cdot e^{-8,9Fo}$
$5,53 \times 10^4$	$\theta = 6,6 \cdot e^{-23,2Fo}$	$5,53 \times 10^4$	$\theta = 1,3 \cdot e^{-5,3Fo}$

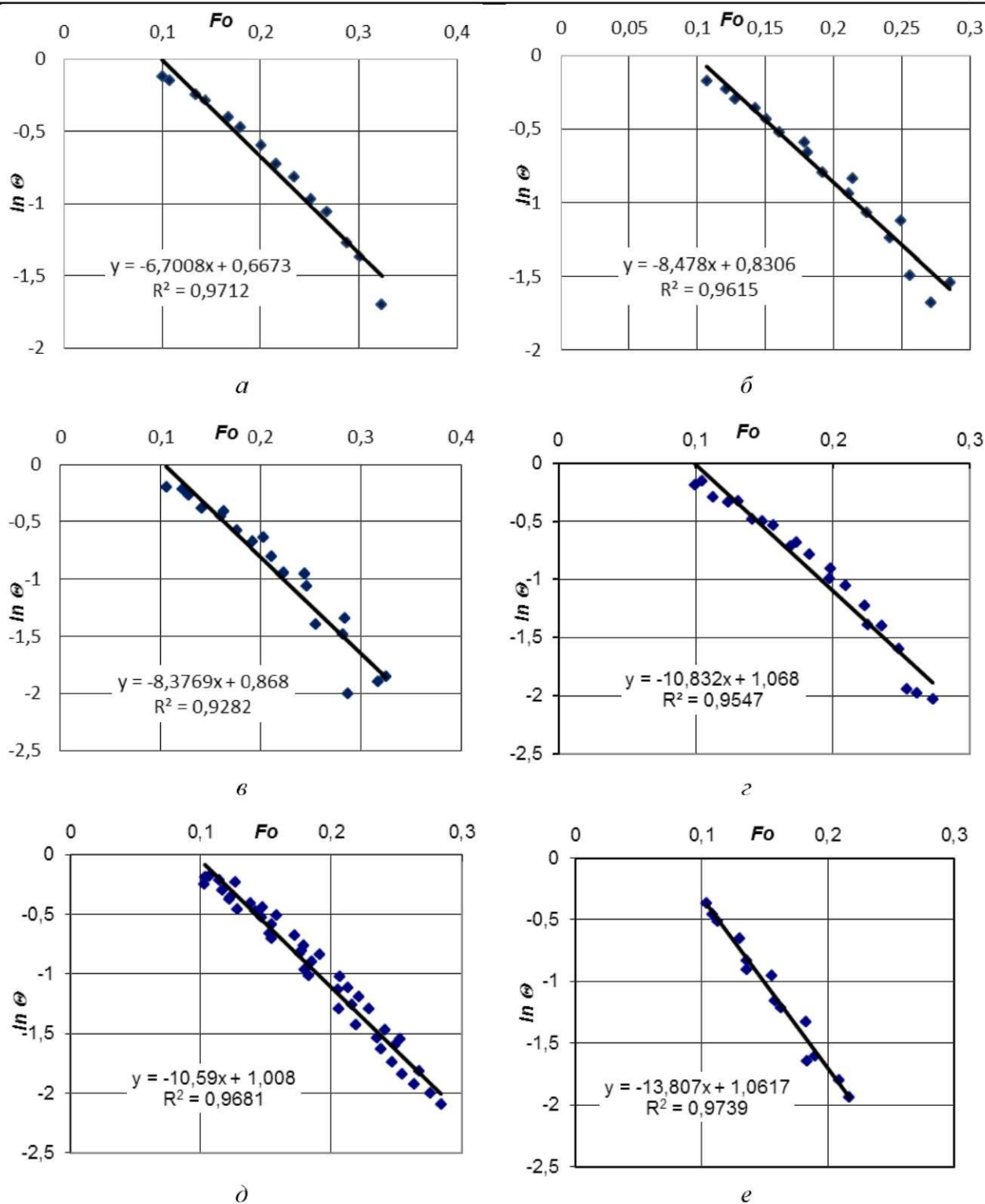


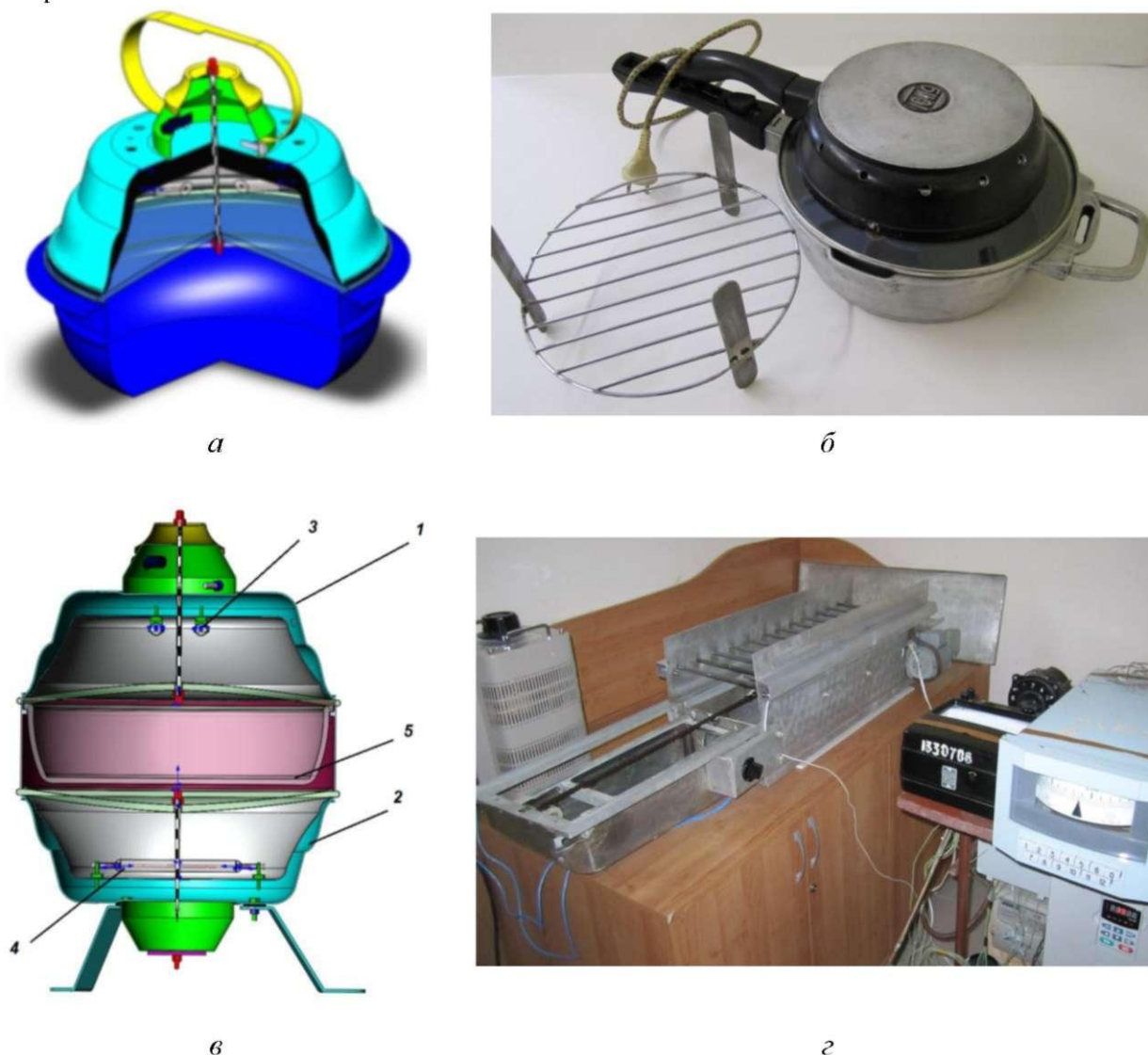
Рис. 4. Обобщенные зависимости безразмерной температуры Θ от числа Фурье Fo при тепловой обработке реструктурированных мясных изделий при плотностях теплового потока:
 а) $2,76 \times 10^4$ Вт/м²; б) $2,88 \times 10^4$ Вт/м²; в) $3,20 \times 10^4$ Вт/м²; г) $4,39 \times 10^4$ Вт/м²;
 д) $4,85 \times 10^4$ Вт/м²; е) $5,53 \times 10^4$ Вт/м²

Fig. 4. Generalized dependences of the dimensionless temperature Θ on the Fourier number Fo at thermal processing of restructured meat products at heat flux densities:
 а) $2,76 \times 10^4$ W/m²; б) $2,88 \times 10^4$ W/m²; в) $3,20 \times 10^4$ W/m²; г) $4,39 \times 10^4$ W/m²;
 е) $4,85 \times 10^4$ W/m²; ф) $5,53 \times 10^4$ W/m²

Представленные в табл. 2 зависимости описывают процесс нагрева изделий из мясного, куриного и рыбного фаршей массой 50–100 г шаровидной формы в аппаратах ИК-нагрева с верхним энергоподводом и справедливы при $Fo \geq 0,1$. Эти уравнения рекомендуются для определения температуры в центре изделий в зависимости от времени или расчета необходимого времени до достижения заданной температуры в центре обрабатываемой мясной заготовки в форме шара.

Данные зависимости могут быть положены в основу методики инженерного расчета аппаратов ИК-нагрева с верхним энергоподводом как периодического действия, так и непрерывного действия (конвейерного типа), схемы и фотографии моделей которых представлены на рис. 5.

С целью повышения эффективности процесса тепловой обработки и получения кулинарной продукции более высокого качества (сокращения времени и равномерной обжарки) нами разработана конструкция ИК-аппарата с двухсторонним энергоподводом, схема которого представлена на рис. 5.



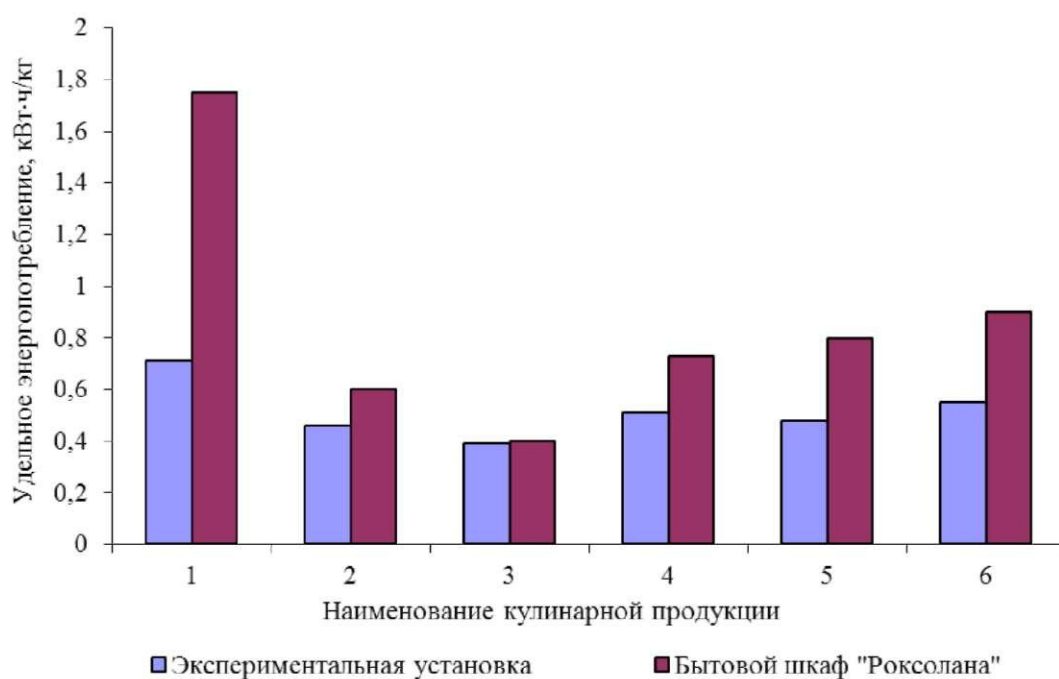
1 – верхний корпус; 2 – нижний корпус; 3, 4 – ИК-излучатели; 5 – емкость для продукта

Рис. 5. Аппараты ИК-нагрева: *а, б* – бытового назначения с верхним энергоподводом (по патенту РБ на полезную модель №10713) соответственно 3D-модель и фото; *в* – бытового назначения с двухсторонним энергоподводом; *г* – конвейерного типа

Fig. 5. IR heating devices: *a, b* – household use type with an upper power supply (according to the patent of the Republic of Belarus for a useful model No. 10713), respectively, a 3D model with a photo; *c* – household use type with two-way power supply; *g* – conveyor type

Результаты исследований показали эффективность применения новой конструкции аппарата по сравнению с ИК-аппаратом с верхним энергоподводом. При этом процесс характеризовался высокими показателями энергоэффективности и качества готовой продукции, в том числе при сравнении с результатами других авторов, которые использовали в экспериментах современное ИК-оборудование [7, 10, 11, 13]. Необходимо отметить, что конструкция аппарата с верхним и нижним энергоподводом с использованием «светлых» ИК-излучателей в доступной литературе не описана. Анализ патентной информации также показал, что такая конструкция характеризуется новизной.

Для различных кулинарных изделий (карп жареный (1); картофель жареный (2); котлета картофельная (3); котлета из говядины (4); бедро цыпленка (5)) определены удельные затраты на технологический процесс тепловой обработки в потоке инфракрасного излучения. Сравнительные по показателю удельного энергопотребления результаты обработки в экспериментальной установке и серийно выпускаемом бытовом шкафу «Роксолана» отражены на диаграмме сравнения (рис. 6).



1 – картофель жареный; 2 – котлета картофельная запеченная; 3 – котлета из говядины;
4 – карп жареный; 5 – бутерброд; 6 – птица жареная (бедро)

Рис. 6. Диаграмма сравнения удельного энергопотребления экспериментального аппарата ИК-нагрева с верхним энергоподводом и бытового шкафа ИК-нагрева «Роксолана»

1 – fried potatoes; 2 – baked potato cutlet; 3 – beef cutlet;
4 – fried carp; 5 – sandwich; 6 – fried chicken (thigh)

Fig. 6. Diagram for comparison of specific energy consumption of the experimental IR heating apparatus with upper power supply with a household IR heating cabinet «Roksolana»

Следует также отметить, что полученная в нем кулинарная продукция имеет более высокие органолептические показатели по сравнению с традиционной жаркой, т.к. выделяющийся из продукта сок и жир в процессе ИК-нагрева равномерно распределяются по его поверхности, излишняя влага быстро испаряется во всех направлениях, а высокая плотность тепло-

вого потока от галогеновых кварцевых излучателей обеспечивают быстрый нагрев продукта.

Полученные экспериментальные результаты и аналитические зависимости, представленные в табл. 2, имеют отличия от уже известных уравнений [19], что подтверждает преимущества применения объемных способов тепловой обработки продуктов по сравнению с традиционными поверхностными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен ряд конструкций ИК-аппаратов инфракрасного нагрева для применения в быту и на объектах общественного питания, оснащенных галогеновыми кварцевыми излучателями с верхним и верхним и нижним расположением. Аппараты позволяют получить кулинарные изделия высокого качества, сократить время тепловой обработки и снизить на 10–30 % (в зависимости от вида обрабатываемого продукта) энергоемкость технологического процесса.

Экспериментально подтверждено, что процесс нагрева ИК-излучением реструктурированных полуфабрикатов из мяса (птицы или рыбы) с течением времени приобретает характер, который можно считать регулярным режимом нестационарной теплопроводности и может аналитически выражаться зависимостью (2).

Предельной температурой, к которой стремится температура внутри полуфабриката, является температура насыщения водяного пара при атмосферном давлении, т.е. 100 °С. Температура греющей среды (в допускаемом технологическим регламентом диапазоне 150–250 °С) существенно не влияет на характер изменения температуры внутри обрабатываемого ИК-излучением полуфабриката на стадии регулярного режима, она влияет на процесс его прогрева в начальный период и на его продолжительность, а также на процессы, происходящие в корке изделия и на его поверхности.

Для инженерных расчетов для определения температуры в центре обрабатываемой ИК-излучением заготовки из мясного (куриного или рыбного) фарша в конкретный момент времени или определения времени нагрева заготовки до определенной температуры (температуры готовности) рекомендуются уравнения подобия, которые получены для реструктурированных полуфабрикатов животного происхождения шарообразной формы массой 50–100 г и справедливы при $Fo \geq 0,1$.

Необходимо продолжить исследования в направлении повышения безопасности эксплуатации экспериментальных аппаратов, конструктивно обеспечивая защиту галогеновых кварцевых излучателей от случайного механического воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Кирпичников, В. П. Оборудование предприятий общественного питания: в 3 ч. / В. П. Кирпичников, М. И. Ботов. – М.: Акадсмия, 2010. – Ч.2: Тепловое оборудование: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – 496 с.
- 2 Pan, Z. The potential of novel infrared food processing technologies: case studies of those developed at the USDA-ARS Western Region Research Center and the University of California-Davis / Z. Pan, G.G. Atungulu // Case Studies in Novel Food Processing Technologies: Elsevier BV. – 2010. – P. 139-208. doi: 0.1533/9780857090713.2.139.
- 3 Eun-Ho Lee. A Review on Applications of Infrared Heating for Food Processing in Comparison to Other Industries / Eun-Ho Lee // Reference Module in Food Science: Elsevier BV. – 2020. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.22670-X
- 4 Плаксин, Ю. М. Разработка и моделирование устройств инфракрасного нагрева жидких пищевых сред / Ю. М. Плаксин, Ю. В. Синявский, О. В. Иванова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 11. – С. 79–81.
- 5 Плаксин, Ю.М. Основы теории инфракрасного нагрева / Ю. М. Плаксин, В. В. Филатов и др. Монография: под общ. ред. Филатова В. В. – М.: МГУПП. – 2007. – 168 с.
- 6 Филатов, В. В. Исследования термической обработки капиллярно-пористых материалов инфракрасным излучением / В. В. Филатов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 5. – С.17–23.
- 7 Sheridan, P. S. Determination of the thermal diffusivity of ground beef patties under infrared radiation oven-shelf cooking / P. S. Sheridan, N. C. Shilton // Journal of Food Engineering. – Volume 52, Issue 1, March 2002. – P. 39–45. doi: 10.1016/S0260-8774(01)00083-8.
- 8 Erdogdu, F. A short update on heat transfer modelling for computational food processing in conventional and innovative processing / Ferruh Erdogdu, Ozan Karatas, Fabrizio Sarghini // Current Opinion in Food Science. – Volume 23, October 2018. – P. 113-119; doi: 10.1016/j.cofs.2018.10.003.

- 9 Клименко, А.В. Теплоэнергетика и теплотехника: в 4 т. / А. В. Клименко; под общ. ред. А. В. Клименко и М. В. Зорина. – 4-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – Т.2: Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник. – 564 с.
- 10 Braeckman, L. Influence of combined IR-grilling and hot air cooking conditions on moisture and fat content, texture and colour attributes of meat patties / L. Braeckman, F. Ronsse P. Cueva Hidalgo, J. Pieters // Journal of Food Engineering. – Volume 93, Issue 4, August 2009. – P. 437–443. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2009.02.009.
- 11 Kendirci, P. Influence of infrared final cooking on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in ohmically pre-cooked beef meatballs / Perihan Kendirci, Filizleier Gamze Kor, Tomris Altug Onogur // Meat Science. – Volume 97, Issue 2, June 2014. – P. 123–129; doi: 10.1016/j.meatsci.2014.01.020.
- 12 Grill apparatus for reducing carcinogens in grilled foods // Trends in Food Science & Technology. – Volume 6, Issue 5, May 1995. – P. 170. doi: 10.1016/S0924-2244(00)89042-1.
- 13 Shilton, N. Modeling of heat transfer and evaporative mass losses during the cooking of beef patties using far-infrared radiation / N. Shilton, P. Mallikarjunan, P. Sheridan // Journal of Food Engineering. – Volume 55, Issue 3, December 2002. – P. 217–222. doi: 10.1016/S0260-8774(02)00066-3.
- 14 Wall, K. R. Grilling temperature effects on tenderness, juiciness, flavor and volatile aroma compounds of aged ribeye, strip loin, and top sirloin steaks / Kayley R. Wall, Chris R. Kerth, Rhonda K. Miller, Christine Alvarado // Meat Science. – Volume 150, April 2019. – P. 141–148. doi: 10.1016/j.meatsci.2018.11.009.
- 15 Беляев, М. И. Индустриальные технологии производства продукции общественного питания. Общественное питание / М. И. Беляев – М.: Экономика, 1989. – 270 с.
- 16 Егнзаров, М. А. Исследование технико-экономических, теплотехнических и аэродинамических характеристик гриль-аппаратов // Научный журнал КубГАУ - Scientific Journal of KubSAU. 2011. № 70. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-tehniko-ekonomicheskikh-teplotehnicheskikh-i-aerodinamicheskikh-harakteristik-gril-apparatov> (дата обращения: 06.04.2020).
- 17 Акулич, А. В. Исследование процесса тепловой обработки изделий из мясного фарша от режимных параметров в бытовом аппарате инфракрасного нагрева / А. В. Акулич, И. М. Кирик, С. И. Василевская // Пищевая наука и технология. – 2012. – № 4. – С. 94–97.
- 18 Kor, G. Thermal imaging during infrared final cooking of semi-processed cylindrical meat product / Gamze Kor, Filiz Icier // Infrared Physics & Technology. – Volume 79, November 2016. – P. 242–251. doi: 10.1016/j.infrared.2016.11.002.
- 19 Смагин, Д. А. Повышение эффективности тепловой обработки картофеля и мясных рубленых изделий в среде перегретого водяного пара: дис. канд. техн. наук: 05.18.12 / Д. А. Смагин; Научн. рук. В. Я. Груданов, Могилевский гос. университет продовольствия. – Могилев: МГУП, 2006. – 182 с.

Поступила в редакцию 09.04.2020 г.

ОБ АВТОРАХ:

- Кирик Игорь Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств, Могилевский государственный университет продовольствия, kirik.mapp@gmail.com.
- Масанский Сергей Леонидович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры товароведения и организации торговли, Могилевский государственный университет продовольствия, masanskii_sl@mgup.by.
- Кирик Аlesia Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Могилевский государственный университет продовольствия, kirik.mapp@gmail.com.
- Гузова Светлана Ивановна**, аспирант кафедры машин и аппаратов пищевых производств, Могилевский государственный университет продовольствия.

ABOUT AUTHORS:

- Igor M. Kiryk**, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Food Engineering Machines and Devices, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: kirik.mapp@gmail.com.
- Sergey L. Masansky**, PhD (Engineering), Professor of Commodity Research and Trade Organisation, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: masanskii_sl@mgup.by.
- Alesia V. Kiryk**, PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Food Engineering Machines and Devices, Mogilev State University of Food Technologies, e-mail: kirik.mapp@gmail.com.
- Svetlana I. Guzova**, post-graduate student of the Department of Food Engineering Machines and Devices, Mogilev State University of Food Technologies.