



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.655.19

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.004



РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ВЫПЕЧКИ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УПЕКА ТЕСТОЗАГОТОВОК

Геннадий Валентинович Алексеев¹, Алексей Петрович Савельев²,
Дмитрий Викторович Сызранцев³, Елена Николаевна Ивлева⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

¹ gva2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>

² savelevalexey30111983@gmail.com

³ syzrantsev.dmitriy83@mail.ru

⁴ helen-ivleva@yandex.ru

Аннотация. С использованием концепции омического нагрева рассмотрены возможности выпечки хлеба между параллельными пластинами с разными приложенными к ним напряжениями. Более широкого распространения эта технология в настоящее время не получила из-за отсутствия математической модели с привязкой к конкретным производственным условиям. Омический или контактный нагрев предлагает альтернативу нагревания материала через внутреннее тепловыделение. В статье предлагается его использование для прохождения переменного электрического тока через такое тело, как пищевая система в виде тестовой заготовки из жидкообразных частиц. Необходимость такой постановки задачи диктуется для выпуска разнообразных пищевых продуктов применяемыми в настоящее время режимами и технологическим оборудованием, которые содержат устоявшиеся этапы технологического процесса, которые способствуют появлению меланоидинов. Именно такие превращения исходных компонентов придадут пищевой продукции насыщенный цвет, а также часто отвечают за формируемые вкус и аромат. Такого рода эффекты наблюдаются и в случаях применения пищевых добавок, получаемых самостоятельно и добавляемых в продукты на стадии готовности в качестве естественных красителей и усилителей вкуса. Современные исследования свидетельствуют и о таких свойствах меланоидинов, которые позволяют использовать их в качестве антиоксидантов или антимикробных, иммуномодулирующих веществ, а также об их способности выводить радионуклеиды. Специалисты, изучающие перечисленные свойства меланоидинов, считают, что она обусловлена их внутренней структурой, которая содержит систему двойных связей в гетероциклических и хиноидном звеньях. В настоящей работе предлагается конструкция электроконтактной выпечной камеры, позволяющей автоматически контролировать и регулировать условия теплового режима выпечки и, следовательно, сохранения полезных свойств образующихся меланоидинов. Рассмотрена модель работы таких автоматических регуляторов на основе биметаллических пластин. Получены расчетные соотношения и графики для практического выбора важнейших геометрических размеров для активного и пассивного слоев, выполненных из материалов с коэффициентами линейного расширения $\alpha_1 = 18,0 \times 10^{-6} \text{ м/(м}^\circ\text{С)}$ и $\alpha_2 = 10,0 \times 10^{-6} \text{ м/(м}^\circ\text{С)}$.

Ключевые слова: электроконтактный нагрев, влияние на меланоидинообразование, выпечка хлеба, биметаллические материалы, регулирование упеком при выпечке.

Для цитирования: Регулирование режимов электроконтактной выпечки для компенсации упека тестозаготовок / Г.В. Алексеев [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 31–36. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.004. EDN: <https://elibrary.ru/TWZODM>.

Original article

REGULATION OF MODES OF ELECTROCONTACT BAKING TO COMPENSATE THE DOUGH BLANKS

Gennady V. Alekseev ¹, Alexey P. Savelyev ²,
Dmitry V. Syzrantsev ³, Elena N. Ivleva ⁴

^{1, 2, 3, 4} National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia

¹ gva2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2867-108X>

² savelevalexey30111983@gmail.com

³ syzrantsev.dmitriy83@mail.ru

⁴ helen-ivleva@yandex.ru

Abstract. Using the concept of ohmic heating, the possibilities of baking bread between parallel plates with different voltages applied to them are considered. This technology has not yet received wider distribution due to the lack of a mathematical model with reference to specific production conditions. Ohmic or contact heating offers an alternative to heating a material through internal heat generation. The article proposes its use for passing an alternating electric current through a body such as a food system in the form of a test piece of liquid particles. The need for such a statement of the problem is dictated for the production of a variety of food products by the currently used modes and technological equipment, which contain well-established stages of the technological process that contribute to the appearance of melanoidins. It is these transformations of the initial components that give food products a rich color, and are also often responsible for the formed taste and aroma. Such effects are also observed in cases of using food additives obtained independently and added to products at the stage of readiness as natural dyes and flavor enhancers. Modern studies also testify to such properties of melanoidins, which allow them to be used as antioxidants or antimicrobial, immunomodulatory substances, as well as their ability to remove radionuclides. Specialists studying the listed properties of melanoidins believe that it is due to their internal structure, which contains a system of double bonds in heterocyclic and quinoid units. In this paper, we propose the design of an electric contact baking chamber that allows you to automatically control and regulate the conditions of the thermal regime of baking and, therefore, preserve the useful properties of the formed melanoidins. The model of operation of such automatic regulators based on bimetallic plates is considered. The calculated ratios and graphs for the practical choice of the most important geometric dimensions for the active and passive layers made of materials with linear expansion coefficients $\alpha_1 = 18.0 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m}^\circ\text{C})$ and $\alpha_2 = 10.0 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m}^\circ\text{C})$.

Keywords: electrocontact heating, influence on melanoidin formation, bread baking, bimetallic materials, regulation of baked goods during baking.

For citation: Alekseev, G. V., Savelyev, A. P., Syzrantsev, D. V. & Ivleva, E. N. (2023). Regulation of electrocontact baking modes to compensate for the baking of dough pieces. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 31-36. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.004. EDN: <https://elibrary.ru/TWZODM>.

ВВЕДЕНИЕ

Меланоидины из-за своих полезных свойств нашли широкое применение как в кулинарии, так и в пищевой химии и медицине. Известным средством лечения заболеваний органов дыхания является отвар ржаных колосьев. Его рекомендуют также применять в качестве смягчающего средства. Применяют отвары ячменного зерна и при лечении заболеваний желудочно-кишечного тракта.

В качестве пробиотиков меланоидины могут применяться вместо пищевых волокон, выполняя функцию улучшения пищеварения и стимулирования роста бифидобактерий.

Определенные трудности при их использовании связаны с тем, что они почти не взаимодействуют с пищеварительными ферментами. Это приводит к плохому всасыванию их в желудочно-кишечном тракте. Другие осложняющие обстоятельства связаны с тем, что при достаточно больших температурах могут образовываться токсичные вещества. Это в частности обуславливает выделение акрила-

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ВЫПЕЧКИ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УПЕКА ТЕСТОЗАГОТОВОК

мида при нагревании продуктов выше 180 °С. Именно при таких условиях разлагаются меланоидины. Дополнительные проблемы получения и использования меланоидинов связаны с тем, что реакция Майяра действует отрицательно на биологическую ценность белков. Это приводит к тому, что аминокислоты, в том числе лизин, треонин, аргинин и метионин, соединяясь с сахарами, становятся недоступными для пищеварительных ферментов и, следовательно, не усваиваются. Именно по этой причине их зачастую не хватает в организме, когда реализуется реакция Майяра.

Электроконтактный нагрев в пищевой промышленности первоначально вызывал интерес в технологии электропроводящего оттаивания. К этому времени уже появились новые улучшенные материалы и конструкции для омического нагрева и стали более доступными. Особый интерес к этой технологии возник из-за повсеместного применения асептической переработки жидких пищевых продуктов, где в традиционной технологической схеме происходит нагревание с начала жидкой фазы, а далее тепло передается твердой фазе [1].

Дальнейшие исследования многих авторов подтвердили целесообразность такого способа теплоподвода для выпечки широкой номенклатуры хлебобулочных изделий [2].

Наиболее важным фактором является электропроводность продукта и зависимость ее от температуры. Если продукт имеет структуру из более одной фазы, например, в случае системы жидкость–частицы, необходимо рассмотреть характеристики и вклад в процесс всех фаз. Электропроводность увеличивается с ростом температуры, что предполагает, что омический нагрев становится

более эффективным при повышении температуры, и, следовательно, может привести к разогреву. Разница в электропроводности между двумя фазами и зависимости их от температурных изменений может сделать процесс омического нагрева затруднительным [2]. Решением данной проблемы может выступать возможность регулирования электропроводности под влиянием содержания ионов, например, добавления соли.

Перечисленные особенности контактного нагрева вызывают интерес к нему специалистов, занятых в пищевой промышленности, в частности в хлебопечении, и благодаря тому, что с его помощью легко управлять процессами, влияющими на свойства меланоидинов. Некоторые затруднения в этом отношении вызывают особенности выпечки в камерах, использующих такой принцип нагрева тестовых заготовок. К числу таких особенностей относится возникающий в процессе превращения тесто-хлеб упек, который иногда становится причиной нарушения необходимого контакта заготовки с электродами, а, следовательно, несанкционированного нарушения теплового режима выпечки.

Основной целью исследований явилось обеспечение установленного режима выпечки хлеба путем создания автоматизированного устройства для обеспечения непрерывного контакта заготовки с греющими поверхностями.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлась хлебопечкарная электрическая печь (рис. 1) [4], снабженная биметаллической пластиной, выполняющей роль автоматического регулятора.

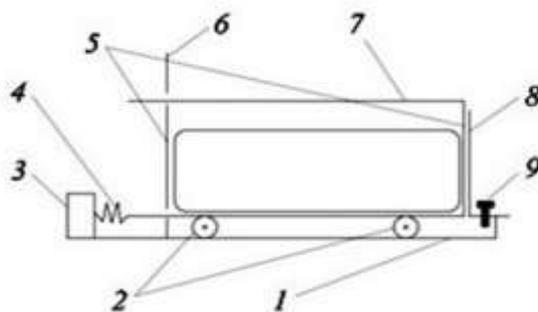


Рисунок 1 – Конструкция электроконтактной выпечной камеры:
1 – платформа; 2 – подшипники качения; 3 – фиксатор; 4 – пружина; 5 – нагревательные элементы; 6 – боковая стойка; 7 – съемная крышка; 8 – пластина; 9 – стопор

Figure 1 – Design of the electric contact baking chamber:
1 – platform; 2 – rolling bearings; 3 – retainer; 4 – spring; 5 – heating elements; 6 – side rack;
7 – removable cover; 8 – plate; 9 – stopper

Метод исследования состоял в моделировании условий постоянного контакта нагревающей поверхности с тестозаготовкой для обеспечения заданного режима ее нагрева.

Через съемную крышку незамкнутого параллелепипеда 7 корпуса загружается тестовая заготовка, продольным размером соответствующим начальной длине пекарной камеры, на его нижнюю стенку, установленную на подшипниках качения 2, пропущенную через нижнюю прорезь боковой стойки 6 и опертую с помощью пружины растяжения-сжатия 4, установленной на фиксаторе 3. После подачи напряжения на нагревательные элементы 5 начинается процесс выпечки. При повышении температуры в незамкнутом параллелепипеде нагревается биметаллическая пластина 8, установленная на неподвижной платформе 1 посредством стопора 9.

При нагреве эта пластина изгибается, начиная давить на заднюю стенку незамкнутого параллелепипеда 7. Под возникающим давлением незамкнутый параллелепипед 7 начинает перемещаться, сжимая пружину 4, установленную на фиксаторе 3, сокращая возникающий зазор между тестовой заготовкой и боковой стенкой 4, а также задней стенкой незамкнутого параллелепипеда 7. По завершении выпечки и отключении нагревателей 5 биметаллическая пластина 8 остывает и выпрямляется, что позволяет пекарной камере под действием пружины вернуться в исходное положение. Через верхнюю съемную крышку готовое изделие извлекается из корпуса хлебопекарной электрической печи. Теоретически возможности предложенной конструкции можно обосновать следующим образом [5–9].

В качестве модели воздействия на регулирующий орган изучим нагрев биметаллической пластины. Мысленно вырежем из такой пластины бесконечно малый элемент dx по всей ширине b (рис. 2).

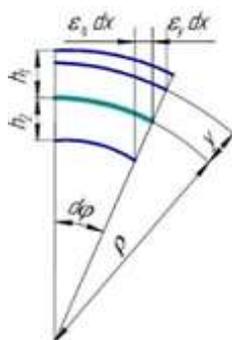


Рисунок 2 – Нагрузки, действующие на расчетный элементарный участок

Figure 2 – Loads acting on an even elementary section

Пусть для толщины слоев выбраны соответственно обозначения h_2 и h_1 , для слоев с разными коэффициентами линейного расширения – $\alpha_1 > \alpha_2$. Если нагреву подвергают неспаянные слои, то они независимо удлиняются, с относительными деформациями ε_2 и ε_1 :

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 dx &= \Delta t \cdot \alpha_1 dx, \\ \varepsilon_2 dx &= \Delta t \cdot \alpha_2 dx. \end{aligned}$$

При совместной нагрузке спаянных слоев, учитывая гипотезу плоских сечений, они искривляются, то есть концевые сечения элемента поворачиваются на угол $d\phi$. Для волокон, расположенных на расстоянии y от спая металлов, тогда имеем:

$$\varepsilon_y dx = \varepsilon_0 dx + y d\phi,$$

где ε_0 – относительное удлинение поверхности спая, при этом относительная деформация этого слоя:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 + y \frac{d\phi}{dx}.$$

Исходя из рис. 2 $\rho d\phi = dx(1 + \varepsilon_3)$, принимая $\varepsilon_0 \ll 1$, найдем кривизну пластины при температуре t :

$$\kappa_t = \frac{d\phi}{dx} = \frac{1}{\rho}.$$

При этом:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 + y \kappa_t,$$

где кривизна из решения уравнений равновесия определяется следующим выражением:

$$\kappa_1 = \frac{6(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t}{\frac{(E_1 h_1^3 - E_2 h_2^3)^2}{E_1 E_2 h_1 h_2 (h_1 + h_2)} + 4(h_1 + h_2)}$$

Изотермическое перемещение сечений пластины определяется при помощи интеграла Мора:

$$f = \int_1 \frac{M_p M_1}{EJ} dl$$

где M_p – момент в текущем сечении; $\frac{M_p}{EJ} = \frac{1}{\rho}$ – κ_{tmax} – кривизна изогнутой пластины; M_1 – момент действующей силы, равный $M_1 = 1 \cdot z$, где $0 \leq z \leq l$.

Для прямой консольно закрепленной пластины (рис. 3) прогиб свободного конца согласно полученному решению равен:

$$f = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t}{2h} l^2$$

а угол поворота концевой сечения при единичном моменте $M_1 = 1$ будет описываться формулой:

$$\varphi = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t}{2h} \int_0^1 M_1 dl = \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta t}{2h}.$$

Примем, что кривизна изогнутой пластины в первом приближении соответствует силе сопротивления, приложенной к концу биметаллической пластины, подвергаемой нагреву, со стороны перемещаемой тестозаготовки.

РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ВЫПЕЧКИ
ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ УПЕКА ТЕСТОЗАГОТОВОК

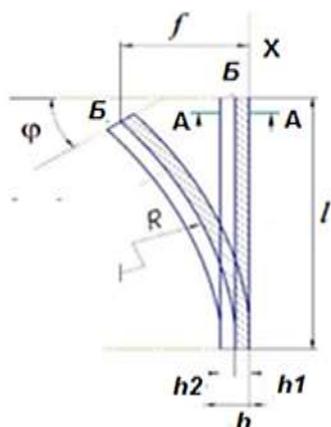


Рисунок 3 – Перемещение конца двухслойной пластины

Figure 3 – Moving the end of the two-layer plate

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

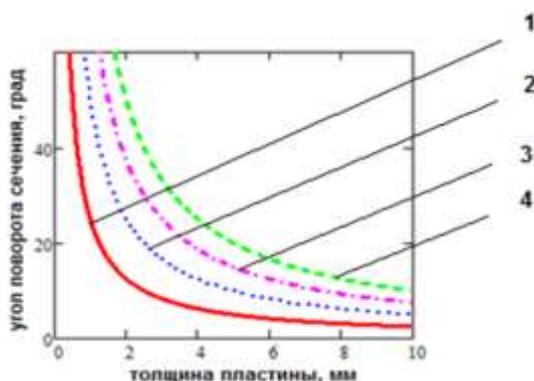


Рисунок 4 – Результаты оценки угла поворота сечения ($l=10\text{мм}$)

1 – $\Delta t = 70\text{ °C}$; 2 – $\Delta t = 80\text{ °C}$; 3 – $\Delta t = 90\text{ °C}$; 4 – $\Delta t = 100\text{ °C}$

Figure 4 – Results of the evaluation of the angle of rotation of the section ($l = 10\text{mm}$)

1 – $\Delta t=70\text{ °C}$; 2 – $\Delta t=80\text{ °C}$; 3 – $\Delta t=90\text{ °C}$; 4 – $\Delta t=100\text{ °C}$

В случаях реального проектирования описанной электроконтактной выпечной камеры возникает вопрос и о выборе толкателя – биметаллической пластины, в частности, толщинах активного (бронзового) и пассивного (стального) слоев.

Полученные выше расчетные соотношения дают ответ и на этот вопрос.

Для такого анализа на рисунках 4 и 5 приведена графическая зависимость влияния на угол поворота толщины активного слоя пластины (для фиксированной толщины пассивного слоя 1 мм).

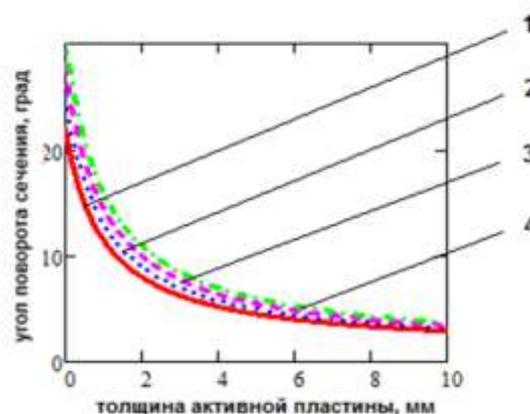


Рисунок 5 – Результаты оценки угла поворота сечения для фиксированной пассивной толщины пластины 1 мм ($l=10\text{мм}$): 1 – $\Delta t = 70\text{ °C}$; 2 – $\Delta t = 80\text{ °C}$; 3 – $\Delta t = 90\text{ °C}$; 4 – $\Delta t = 100\text{ °C}$

Figure 5 – Results of the evaluation of the angle of rotation of the section for a fixed passive plate thickness of 1 mm ($l = 10\text{mm}$):

1 – $\Delta t=70\text{ °C}$; 2 – $\Delta t=80\text{ °C}$; 3 – $\Delta t=90\text{ °C}$; 4 – $\Delta t=100\text{ °C}$

Выполнен анализ двух типов графических зависимостей: полученных для толщины биметаллической пластины без и при учете ее разбиения на активный и пассивный слои. Он позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективно толкатель будет работать при равных толщинах слоев, обеспечивающих совместность их деформаций. По-видимому, именно в этом случае предложенная конструкция электроконтактной печи будет наилучшим образом способствовать обеспечению необходимых свойств выпекаемого хлеба.

Обеспечение автоматического регулирования теплового режима в отсутствие необходимости дополнительного контроля со стороны работников плотности контакта тестозаготовки с нагревающей поверхностью обеспечит экономическую эффективность работы предлагаемой выпечной камеры и повышенное качество выпекаемых изделий.

ВЫВОДЫ

Проведенное моделирование условий обеспечения постоянного контакта нагревающей поверхности с тестозаготовкой для обеспечения заданного режима ее нагрева позволило предложить биметаллическую пластину, выполняющую роль автоматического регулятора. Анализ полученных аналитических соотношений позволяет в зависимости от заданных режимов, в том числе необходимых для оптимальных условий меланоидинообразования, рекомендовать построен-

ные графические зависимости, связывающие угол поворота сечения с фиксированной пассивной толщиной пластины и температурным режимом выпечки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ялалетдинова Д.И., Сидоренко Г.А., Попов В.П. Оптимизация технологических параметров и оценка экологичности производства зернового хлеба, выпекаемого электроконтактным способом // Вестник ОГУ. 2010. № 12. С. 118–126.
2. Новосёлов А.Г., Кулишов Б.А. Применение электроконтактного нагрева в хлебопечении : обзор // Ползуновский вестник. 2019, № 1. С. 106–113.
3. Сульдина Т.И., Аверьянова Т.Н. Реакция Майяра в технологическом процессе приготовления пиццы // Результаты современных научных исследований : сб. трудов, Саранск, 2021. С. 143–147.
4. Хлебопекарная электрическая печь: пат. 214961 Рос. Федерация. № 2022114156, заявл. от 25.05.2022; опубл. 22.11.2022 Бюл. № 33. 2 с.
5. Савельев А.П., Алексеев Г.В., Николайчук О.И. Расширение ассортимента хлебобулочной продукции и ресурсосбережение процесса выпечки // Ползуновский вестник. 2018. № 2. С. 65–68.
6. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г., Романчиков С.А., Брагин А.Н. Повышение эффективности теплогенерирующих устройств тепловых аппаратов пищевых производств // Хлебопродукты. 2021. № 4. С. 56–59.
7. Ермошин Н.А., Романчиков С.А., Брагин А.Н. Обеспечение плоскостной передачи теплоты в тепловых блоках пищевых производств // Пищевая промышленность. 2021. № 5. С. 20–23.
8. Finot P.A. Historical perspective of the Maillard reaction in food science // Ann. N. Y. Acad. Sci. Vol. 2005. 1043. P. 1–8.
9. Echavarría A.P., Pagan J., Ibarz A. Melanoidins Formed by Mail-lard reaction in food and their biological activity // Food Eng. Rev. Vol. 4.2012. № 4. P. 203–223.
10. Андронов И.Н., Демина М.Ю. Изгиб свободной биметаллической пластины // Актуальные проблемы прочности: в сб. : 60-ой Международной научной конференции 2018. С. 3–5.

Информация об авторах

- Г. В. Алексеев – доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО.
А. П. Савельев – кандидат технических наук, докторант, Университет ИТМО.
Д. В. Сызранцев – соискатель, Университета ИТМО.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.02.2023; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.

The article was received by the editorial board on 28 Feb 2023; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.

Е. Н. Ивлева – аспирант ОЦ «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО.

REFERENCES

1. Yalaletdinova, D.I., Sidorenko, G.A. & Popov, V.P. (2010). Optimization of technological parameters and environmental assessment of the production of grain bread baked by electrocontact method. Bulletin of OSU. (12). 118-126. (in Russ.).
2. Novosyolov, A.G. & Kulishov, B.A. (2019). Application of electric contact heating in baking: a review. Polzunov Vestnik. (1). 106-113. (in Russ.).
3. Suldina, T.I. & Averyanova, T.N. Maillard reaction in the technological process of cooking // Results of modern scientific research: collected works, Saransk, 2021. С. 143-147. (in Russ.).
4. Baking Electric Oven: Patent. 214961 of the Russian Federation. No. 2022114156, application, 25.05.2022; publ. 22.11.2022 Bulletin No. 33. 2 c. (in Russ.).
5. Saveliev, A.P., Alekseev, G.V., Nikolyuk, O.I. (2018). Expanding the range of bakery products and resource-saving baking process. Polzunov Vestnik. (2). 65-68. (in Russ.).
6. Ermoshin, N.A., Lazarev, Y.G., Romanchikov, S.A. & Bragin, A.N. (2021). Increasing the efficiency of heat-generating devices of heat apparatuses of food production. Khleboprodukty. (4). 56-59. (in Russ.).
7. Ermoshin, N.A., Romanchikov, S.A., Bragin, A.N. (2021). Ensuring the planar transfer of heat in the thermal units of food production. Food Industry. (5). 20-23. (in Russ.).
8. Finot, P.A. (2005). Historical perspective of the Maillard reaction in food science. Ann. N. Y. Acad. Sci. (1043). 1-8.
9. Echavarría, A.P., Pagan, J. & Ibarz, A. (2012). Melanoidins Formed by Mail-lard reaction in food and their biological activity. Food Eng. Rev. 4. (4). 203-223.
10. Andronov I.N., Demina M.Y. (2018). Bending of a free bimetallic plate. Actual problems of strength: collection: 60th International Scientific Conference. 3-5. (in Russ.).

Information about the Authors

- G. V. Alekseev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems" ITMO University.
A. P. Saveliev - candidate of technical sciences, doctoral student, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems" ITMO University.
D. V. Syzrantsev - competitor, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems" ITMO University.
E. N. Ivleva - graduate student, Educational Center "Energy Efficient Engineering Systems" ITMO University.