

УДК 66.045.12

Ольга Борисовна Колибаба

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: koli-baba@mail.ru

Роман Дмитриевич Адакин

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет», доцент кафедры технического сервиса, Россия, Ярославль, e-mail: adakin@mail.ru

Елена Александровна Шуина

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, e-mail: HM_ISPU@ispu.ru

Исследование тепловой работы теплогенератора ротационной хлебопекарной печи

Авторское резюме

Состояние вопроса. Основным технологическим оборудованием для производства хлеба и кондитерских изделий являются хлебопекарные печи. Широкое распространение получили топливные ротационные печи, в которых источником тепла является теплогенератор. Зачастую тепловые режимы печей характеризуются повышенными затратами топлива и тепловой энергии, которые зависят от эффективности работы теплогенератора. В настоящее время не существует рекомендаций по конструктивному оформлению теплогенератора с максимально эффективными характеристиками и высоким КПД, а именно по распределению поверхности теплоотдачи между жаровой трубой и теплообменным аппаратом, компоновке и материалам трубок теплообменника, геометрии интенсификаторов теплообмена и др. В связи с этим существует необходимость исследования тепловой работы теплогенератора ротационной печи в целях повышения его эффективности на основе совершенствования конструктивного оформления.

Материалы и методы. Исследование тепловой работы теплогенератора ротационной хлебопекарной печи проведено посредством физического и численного экспериментов с использованием методов математического моделирования.

Результаты. Проведены расчетно-экспериментальные исследования тепловой работы теплогенератора, которые показали большую неравномерность температурного поля теплогенератора, недогрев камеры выпечки до минимальной требуемой по технологии температуры 220 °С, что говорит о невысокой эффективности работы устройства.

Выводы. Результаты проведенных натурных и численных исследований подтверждают невысокую тепловую эффективность работы теплогенератора, что вызывает необходимость разработки новых технических решений, направленных на совершенствование конструктивного оформления данного устройства.

Ключевые слова: теплогенератор, ротационная хлебопекарная печь, камера выпечки, жаровая труба, тепловая работа, математическая модель

Olga Borisovna Kolibaba

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: koli-baba@mail.ru

Roman Dmitrievich Adakin

Yaroslavl State Agrarian University, Associate Professor of Technical Service Department, Russia, Yaroslavl, e-mail: adakin@mail.ru

Elena Aleksandrovna Shuina

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM_ISPU@ispu.ru

Study of thermal operation of heat generator of rotary baking oven

Abstract

Background. The main technological equipment to produce bread and confectionary is baking ovens. Fuel-based rotary ovens, in which the heat source is a heat generator, have become widespread. Often, the thermal conditions of ovens are characterized by increased fuel and thermal energy costs which depend on the efficiency of the heat generator. Currently, there are no recommendations on the design of a heat generator with the most efficient characteristics and the coefficient of efficiency, namely the distribution of the heat transfer surface between the flame tube and the heat exchanger, the layout and materials of the heat exchanger tubes, the geometry of heat exchange intensifiers, etc. Therefore, there is a need to study the thermal operation of the rotary oven of the heat generator to increase its efficiency due to improving the design.

Materials and methods. Physical and numerical experiments using mathematical modeling methods are carried out to study thermal operation of the heat generator of a rotary baking oven.

Results. The authors have conducted computational and experimental studies of thermal operation of the heat generator. The results have showed a large unevenness of the temperature field of the heat generator, underheating of the baking chamber to the minimum required temperature of 220 °C, which indicates the low efficiency of the device.

Conclusions. The results of field and numerical studies have confirmed the low thermal efficiency of the heat generator. Thus, the development of new technical solutions aimed at improving the design of this device is highly topical.

Key words: heat generator, rotary baking oven, baking chamber, flame tube, thermal operation, mathematical model

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.6.023-028

Введение. Основным технологическим агрегатом для производства хлеба и кондитерских изделий на производствах любого масштаба является хлебопекарная печь. Современные промышленные печи, применяемые для выпечки хлебобулочных, мучных кондитерских и специальных изделий, различаются по конструкции, способу обогрева пекарной камеры, производительности, ассортименту выпекаемых изделий и т. д.

К основным элементам печи относят: пекарную камеру, теплогенератор (топку), теплопередающие системы и устройства, ограждения (обмуровку) пекарной и топочной камер, вспомогательные устройства и контрольно-измерительные приборы. Сложная конструкция печного оборудования обусловлена особенностями процессов, протекающих в рабочей камере и влияющих на качество изготавливаемой продукции [1].

Хлебопекарные печи являются крупными потребителями топлива и электроэнергии, поэтому исследование и улучшение тепловых характеристик этих печей представляет собой актуальную задачу промышленной теплоэнергетики.

В настоящее время на хлебопекарных предприятиях большое распространение получили ротационные печи, объединившие в себе достоинства остальных типов оборудования аналогичного назначения и позволяющие производить широкий ассортимент изделий из сдобного, дрожжевого или замороженного теста. Организация в рабочем пространстве печи циркуляции большого объема воздуха при пониженной скорости потока позволяет достичь хорошего качества выпечки.

Однако из практического опыта известно, что в печах реализуются далеко не оптимальные тепловые режимы, снижающие эффективность работы оборудования. Зачастую работа печей характеризуется повышенными затратами топлива и тепловой энергии, которые в значительной степени зависят от эффективности работы теплогенератора.

В литературных источниках представлен ряд конструктивных разработок, направленных на улучшение теплотехнических показателей работы ротационных печей и повышение качества продукции [2, 3, 4]. Авторские технические решения предполагают совершенствование системы генерации и подачи пара, установку у-образных теплообменных каналов из шамотного кирпича и др. В то же время вопросу совершенствования металлических теплогенераторов (ТГ), совмещающих в себе камеру сгорания (жаровую трубу) и теплообменный аппарат (ТОА), уделено недостаточно внимания. Так, например, нет научных обоснований и рекомендаций по конструктивному оформлению теплогенератора с максимально эффективными характеристиками и высоким КПД, а именно по распределению поверхности теплоотдачи между жаровой трубой и ТОА, геометрическим параметрам камеры сгорания и ТОА с учетом их гидравлических сопротивлений, компоновке и материалам трубок ТОА, наличию и геометрии интенсификаторов теплообмена и др. Предлагаются лишь общие рекомендации по совершенствованию теплообменных аппаратов [5].

В существующих теплотехнических расчетах ТГ ротационных печей, особенностью работы которых является заикленность холодного теплоносителя в рабочем пространстве печи до конца процесса выпечки, не учитывают повы-

шенную увлажненность холодного теплоносителя, что приводит к завышенным значениям площади поверхности теплообмена. Инженерные расчеты проводят по известным критериальным уравнениям конвективного теплообмена для теплообменных аппаратов [6], что некорректно для теплогенератора, который отличается от ТОА наличием жаровой трубы и кожуха с ребрами, оказывающих влияние на характер течения теплоносителя и, следовательно, на характер теплообмена.

В связи с вышесказанным существует необходимость совершенствования и научного обоснования конструкции ТГ ротационной печи в целях повышения эффективности работы установки. Решение поставленной задачи требует проведения серии экспериментальных исследований тепловой работы теплогенератора ротационной хлебопекарной печи, построения математической модели ТГ и ее адаптации, выполнения на модели численных исследований тепловой работы усовершенствованной конструкции ТГ.

Расчетно-экспериментальное исследование тепловой работы ТГ хлебопекарной ротационной печи направлено на совершенствование конструктивного оформления устройства.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены в условиях предприятия «Ярторгтехника» на промышленной хлебопекарной ротационной печи ПКХ-1 [7], схема которой представлена на рис. 1.

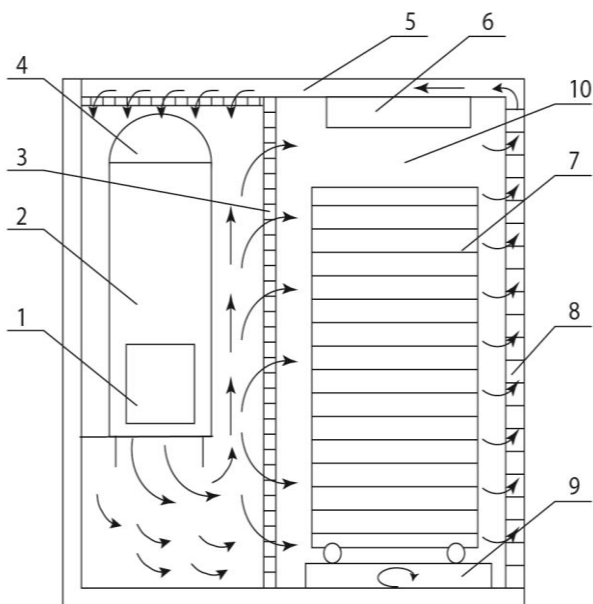


Рис. 1. Схема ротационной хлебопекарной печи: 1 – горелка; 2 – теплогенератор; 3, 5, 8 – каналы для движения теплоносителя; 4 – вентилятор; 6 – парогенератор; 7 – тележка с хлебом; 9 – механизм вращения тележки; 10 – камера выпечки

Принцип работы печи следующий: горелка 1 сжигает дизельное топливо в жаровой трубе (камере сгорания) теплогенератора 2.

Жаровая труба является первым ходом теплоносителя, трубки второго и третьего ходов составляют теплообменную часть с шахматным расположением трубного пучка (рис. 2). Вентилятор 4 нагнетает воздух на разогретый теплогенератор, который затем поступает в камеру выпечки 10 через вертикальную щель 3, расположенную в середине стенки печи, благодаря чему теплоноситель распределяется равномерно по вертикали. С помощью механизма 9 хлебопекарная тележка 7 вращается, обеспечивая равномерный обдув изделий горячим теплоносителем. Через вертикальную щель 8 и затем по каналу 5 теплоноситель из камеры выпечки возвращается на подогрев в теплогенератор.

В начале процесса выпечки из парогенератора 6 поступает пар в хлебопекарную камеру для придания хрустящей корочки хлебобулочным изделиям. В камере выпечки по требованиям технологии должен обеспечиваться температурный уровень 220–270 °С, в зависимости от вида выпускаемых изделий [8].

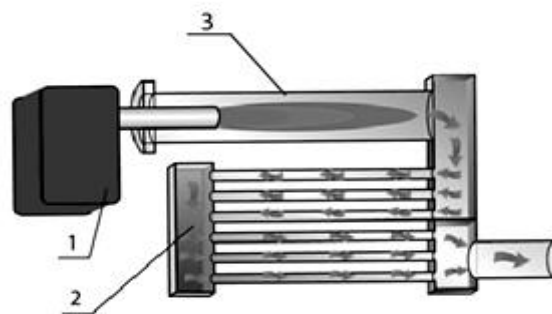


Рис. 2. Схема теплогенератора: 1 – дизельная горелка; 2 – двухходовой теплообменник; 3 – жаровая труба

Аппаратура электронно-вычислительного комплекса для проведения натурального эксперимента состоит из датчика температуры (термопары типа ТХК), передающего сигнал на аналого-цифровой преобразователь ОВЕН ТРМ-138, который в свою очередь передает сигнал на компьютер. Обработка результатов проведена в программе Owen Process Manager. Измерение температурного поля поверхности ТГ осуществлено 9 термопарами, схема расположения которых приведена на рис. 3.

Для получения правильного представления о поле температур ТГ особое значение имеет точность размещения термопар. Чтобы исключить перенос теплоты через электроды, термопары размещаются в изотермических поверхностях. В ходе эксперимента фиксировалась также температура в камере выпечки и температура продуктов сгорания на выходе из печи. Нагрев осуществлялся в режиме работы горелки с максимальной мощностью 50 кВт при расходе дизельного топлива 5 л/ч в течение 30 мин. Согласно техническим условиям, время

разогрева печи до температуры 220 °С не должно превышать 25 мин.

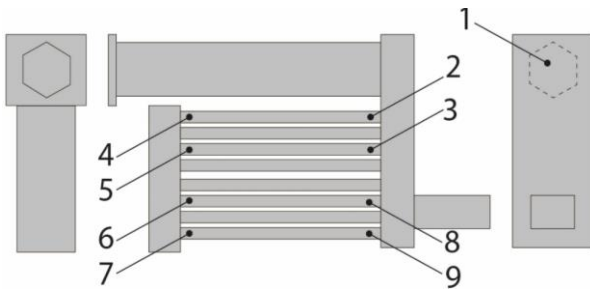


Рис. 3. Схема расположения термодатчиков на поверхности теплогенератора: 1–9 – точки замера температуры

Для повышения достоверности результатов и снижения влияния случайных погрешностей эксперимент повторяли 5 раз.

Предельная относительная погрешность определения температуры составила 5 %.

Результаты исследования. Результаты измерения температурного поля поверхности теплогенератора, усредненные по числу опытов, приведены на рис. 4.

Анализ экспериментальных данных показывает большую неравномерность температурного поля ТГ. Температура поверхности камеры сгорания в 3 раза превышает температуру трубок второго хода. Температуры второго и третьего хода теплообменной части увеличиваются медленно. Камера выпечки не прогревается до минимальной требуемой температуры 220 °С в течение 30 мин даже при условии, что горелка работает на максимальном расходе топлива.

Более глубокое исследование тепловой работы ТГ проведено посредством численного эксперимента с использованием методов математического моделирования. Нами была разработана и реализована в пакете SolidWorks [9] математическая модель ТГ ротационной печи.

Постановка задачи представлена системой уравнений движения и неразрывности вязкого несжимаемого потока:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad} \vec{v} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nu \nabla^2 \vec{v}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div} \rho \vec{v} = 0, \quad (2)$$

где v – скорость теплоносителя, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; P – давление, Па; ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; τ – время, с.

В качестве граничных условий были заданы следующие:

- влажность 0,1–0,6 кг/кг; скорость движения 1–5 м/с для холодного теплоносителя;
- влажность 0,04 кг/кг, тепловой поток $Q = 50$ кВт для горячего теплоносителя.

Потери тепла в окружающую среду при отсутствии конкретных данных рекомендуется принимать равными 5 Вт/м² [8].

Геометрическая 3d-модель теплогенератора, построенная в приложении Flow Simulation программного комплекса SolidWorks, представлена на рис. 5, где стрелками показаны входы и выходы теплоносителей.

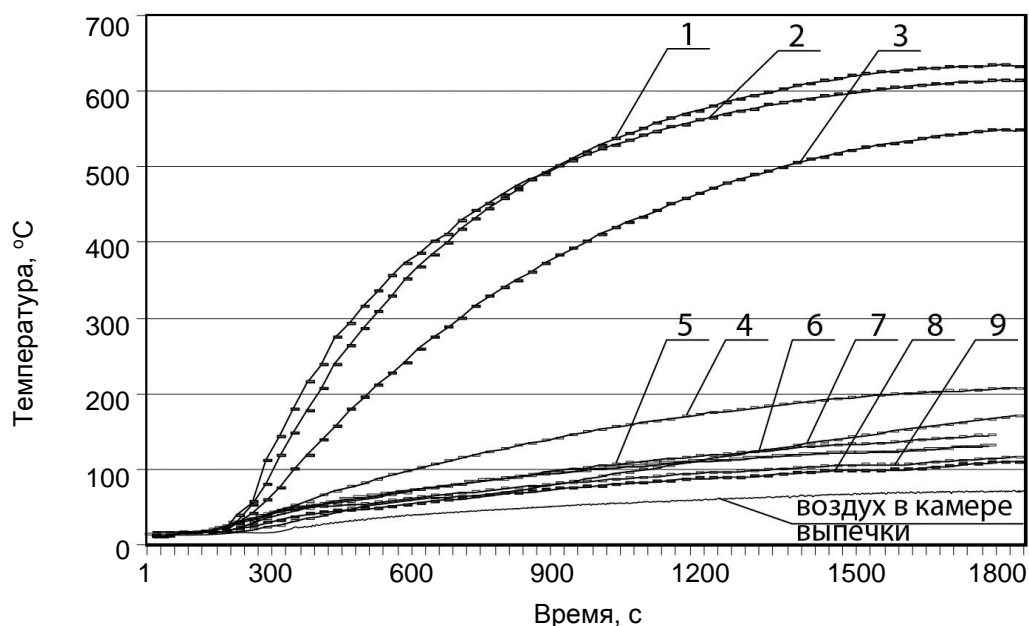


Рис. 4. Экспериментальное температурное поле теплогенератора

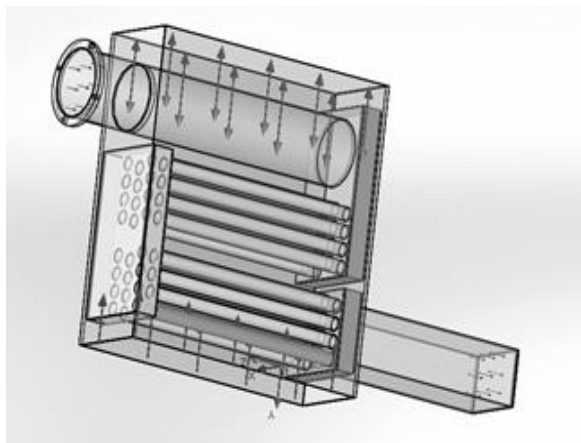


Рис. 5. Геометрическая 3d-модель теплогенератора

Адекватность предложенной математической модели подтверждена сопоставлением результатов расчета и эксперимента, которые представлены в таблице.

Средняя относительная погрешность вычислений не превышает 4,1 %, что свидетельствует о достаточной прогностической эффективности модели и позволяет рассматривать ее

в качестве достоверной основы для дальнейших исследований.

Численные исследования на предложенной модели проведены для наиболее распространенной в роторных хлебопекарных печах (в частности, ПКХ-1) схемы компоновки ТГ, характеризующейся наличием общей перегородки при повороте колен ТОО. Полученное расчетом на модели температурное поле ТГ показано на рис. 6. Анализируя результаты численного исследования, можно выявить существенный недостаток данной схемы ТГ, заключающийся в том, что в конце второго хода через перегородку происходит подогрев уходящего теплоносителя, что в итоге приводит к увеличению теплотерь в окружающую среду и, следовательно, снижению эффективности теплогенератора.

Таким образом, можно отметить невысокую тепловую эффективность работы ТГ, что вызывает необходимость разработки новых технических решений, направленных на совершенствование конструктивного оформления данного устройства.

Сопоставление опытных данных с результатами численного моделирования

Наименование опыта	Температуры поверхности ТГ									Температура продуктов сгорания
	750	745	660	471	432	410	358	326	320	
Натурный эксперимент	750	745	660	471	432	410	358	326	320	350
Численное моделирование	764	731	570	450	433	423	368	336	334	340
Соответствие термопарам на схеме	1	2	3	4	5	6	7	8	9	–
Погрешность, %	1,8	1,9	13,6	4	0,2	3	2,8	3	4,1	2,9

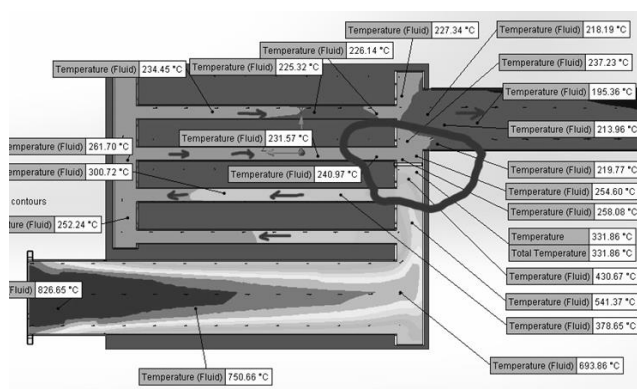


Рис. 6. Температурное поле теплогенератора, полученное численным моделированием

Новое техническое решение теплогенератора должно предусматривать его конкурентное преимущество в виде максимально низкой цены. Этого можно достичь за счет подбора материалов, оптимальных по стоимости, исходя

из того, что для более нагретых частей требуются более термостойкие, а следовательно, и более дорогие материалы. Менее нагретые части можно изготовить из менее термостойких и сравнительно недорогих материалов. Снижению стоимости может способствовать оптимальный выбор технологий изготовления, а также создание унифицированного ряда теплогенераторов в том случае, если предприятие выпускает несколько печей разной производительности или производит теплогенераторы для внешних потребителей. Определенные резервы по снижению стоимости имеются и в совершенствовании конструкции теплогенератора (например, расположение теплообменных трубок в шахматном порядке вместо рядного, обработка поверхности в целях интенсификации теплообмена и др.).

Выводы. В результате проведенного экспериментального исследования тепловой работы теплогенератора промышленной печи

ПКХ-1 установлено, что невысокая тепловая эффективность ТГ приводит к недогреву камеры выпечки до значений, соответствующих техническим условиям.

Разработанная математическая модель существующей конструкции ТГ позволяет рассчитать его температурное поле в рабочем режиме. Сопоставление модели с экспериментальными данными показало ее адекватность: расхождение расчетных данных и результатов промышленного эксперимента не превышает 4 %.

Модель позволяет провести дальнейшие исследования в направлении совершенствования конструкции ТГ в целях повышения его эффективности.

Удешевление конструкции ТГ можно достичь за счет подбора оптимальных по стоимости материалов.

Список литературы

1. **Аднабеков М.Х., Адильбеков М.А.** Исследование сложного теплообмена в хлебопекарных печах // Молодой ученый. – 2023. – № 23. – С. 86–89.
2. **Пат.** 2477049 Российская Федерация. Хлебопекарная печь / М. Кос; опубли. 10.03.2013, Бюл. № 7.
3. **Пат.** 19995 Российская Федерация. Ротационная хлебопекарная печь / С.Г. Ульянин, В.С. Бакурский, С.П. Комиссаров, Т.Л. Кальянова; опубли. 20.10.2001.
4. **Пат.** 183136 Российская Федерация. Печь хлебопекарная ротационная / В.А. Минькин, В.В. Власенко; опубли. 12.09.2018, Бюл. № 22.
5. **Алиев К.Б.** Влияние формы и плотности расположения интенсификаторов на теплообмен / К.Б. Алиев, В.С. Глазов, А.А. Арбатский // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXII Междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп., 27–28 февраля 2014 г., г. Москва. Т. 3. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. – С. 148–149.
6. **Справочник** по теплообменникам / под ред. О.Г. Мартыненко. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.
7. **Адакин Р.Д., Несиоловский О.Г.** Опыт разработки и испытаний теплогенераторов малой мощности // Вестник МГАУ. – 2013. – № 2. – С. 33–35.
8. **Хромеенков В.М.** Технологическое оборудование хлебозаводов и макаронных фабрик. – СПб.: ГИОРД, 2003. – 496 с.
9. **Алямовский А.А.** Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.

References

1. Adnabekov, M.Kh., Adil'bekov, M.A. Issledovanie slozhnogo teploobmena v khlebopekarnykh pechakh [Study of complex heat exchange in baking ovens]. *Moloday uchenyy*, 2023, no. 23, pp. 86–89.
2. Kos, M. *Khlebopekarnaya pech'* [Baking oven]. Patent RF, no. 2477049, 2013.
3. Ul'yanin, S.G., Bakurskiy, V.S., Komissarov, S.P., Kal'yanova, T.L. *Rotatsionnaya khlebopekarnaya pech'* [Rotary baking oven]. Patent RF, no. 19995, 2001.
4. Min'kin, V.A., Vlasenko, V.V. *Pech' khlebopekarnaya rotatsionnaya* [Rotary baking oven]. Patent RF, no. 183136, 2018.
5. Aliev, K.B., Glazov, V.S., Arbatskiy, A.A. Vliyaniye formy i plotnosti raspolozheniya intensivatorov na teploobmen [Influence of the shape and density of intensifiers on heat exchange]. *Tezisy dokladov XXII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika», 27–28 fevralya 2014 g., g. Moskva. T. 3* [Radio electronics, electrical engineering, and energy: abstracts of XXII International scientific-technical conference of students and postgraduates, 27–28 February 2014, Moscow. Vol. 3]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2014, pp. 148–149.
6. Martynenko, O.G. (ed.) *Spravochnik po teploobmennikam* [Handbook of Heat Exchangers]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.
7. Adakin, R.D., Nesiolovskiy, O.G. Opyt razrabotki i ispytaniy teplogeneratorov maloy moshchnosti [Experience of development and testing of low-power heat generators]. *Vestnik MGAU*, 2013, no. 2, pp. 33–35.
8. Khromeenkov, V.M. *Tekhnologicheskoe oborudovanie khlebozavodov i makaronnykh fabrik* [Technological equipment for bakeries and pasta factories]. Saint-Petersburg: GIORД, 2003. 496 p.
9. Alyamovskiy, A.A. *Inzhenernyye rascheti v SolidWorks Simulation* [Engineering calculations in SolidWorks Simulation]. Moscow: DMK Press, 2010. 464 p.