

ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 621.365:641.5.35; 641.521:641.542.6

ПРОЦЕСС ВЫПЕЧКИ ПОДОВЫХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПАРОКОНВЕКЦИОННОМ АППАРАТЕ

И.М. Кирик, А.А. Смоляк, А.В. Кирик

Исследован процесс теплоотдачи в пароконвекционном аппарате и нестационарной теплопроводности в выпекаемой тестовой заготовке из пшеничной муки. Получены аналитическая зависимость для поправочного коэффициента, учитывающего состав паровоздушной среды на теплоотдачу, и уравнение, описывающее процесс прогрета выпекаемой тестовой заготовки. Представлены результаты разработки конструкции пароконвектомата.

Введение

В настоящее время на потребительском рынке хлебобулочных изделий наблюдается тенденция падения спроса на сорта хлеба массового производства, в связи с чем хлебопекарные предприятия вынуждены искать пути сохранения объемов производства. Делается это за счет расширения ассортимента выпускаемой продукции, в первую очередь мелкочтучных изделий, выпускаемых в сравнительно небольших количествах.

Для реализации поставленных задач необходимо использование пароконвекционных аппаратов: экономичных, мобильных, малогабаритных. Мобильность и гибкость небольших хлебопекарных и кондитерских производств, оснащенных современным технологическим оборудованием, позволяют оперативно изменять вырабатываемый ассортимент продукции, ориентируясь на вкусы потребителей, что и предопределяет их эффективную работу и позволяет занимать свою нишу на рынке.

Вместе с тем проектирование тепловых аппаратов для выпечки начинается с обоснования продолжительности выпечки. Предлагаемые на данный момент подходы к аналитическому определению продолжительности выпечки нуждаются в развитии и совершенствовании, так как от этого параметра зависят и качество получаемой продукции, и энергетические затраты на процесс.

Согласно литературным данным [1–5] длительность процесса выпечки обусловлена многими факторами. К ним относятся масса и форма изделия; свойства теста, из которого выпекается изделие; интенсивность тепловой обработки и способ выпечки. Окончание процесса выпечки объективно устанавливается по значению температуры в центре выпекаемой тестовой заготовки, которая должна составлять 96 °С – 98 °С.

Сложность и многофакторность процесса тепловой обработки тестовых заготовок делает затруднительным достаточно точное теоретическое описание изменения температурного поля в теле тестовой заготовки во времени. В большинстве случаев тепловой расчет хлебопекарных печей и других технических устройств для выпечки хлебобулочных изделий выполняется на основе опытных температурных кривых процесса.

Методы решения задач нестационарной теплопроводности разрабатывались А.М. Айзенном, В.В. Ивановым и другими учеными [5]. 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 кривых и таблиц.

Исследованиям температурного поля теста-хлеба при выпечке посвящены ряд работ А.С. Гинзбурга, В.О. Фогеля, А.А. Михелева. В этих работах изучалось, в частности, температурное поле в начальной фазе процесса выпечки, имеющей важное значение для качества хлеба и соответствующей первым минутам прогрева куска теста в пекарной камере. Постоянство температуры в центре теста-хлеба в начальной стадии процесса выпечки позволило авторам при расчетах теплообмена в условиях выпечки рассматривать тесто-хлеб как полуграниченное тело. Воспользовавшись решениями уравнения теплопроводности для такой задачи, ими получен наиболее удачный результат для начальной стадии процесса. Предложенная математическая зависимость для определения температуры поверхности тестовой заготовки в первоначальной стадии процесса выпечки (начало образования корки на поверхности выпекаемой тестовой заготовки при $t \geq 100$ °С) [5] имеет следующий вид:

$$t_{\text{п}}(0, \tau) = t_{\text{ср}} \left[1 - e^{aH^2\tau} \cdot \operatorname{erfc}(H\sqrt{a\tau}) \right] \quad (1)$$

где $t_{\text{п}}$ – температура поверхности хлеба в процессе выпечки, °С;
 $t_{\text{ср}}$ – температура среды пекарной камеры, °С;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с; τ – время выпечки, с;
 H – относительный коэффициент теплообмена, м⁻¹

$$H = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);
 erfc – дополнительная функция ошибок Гаусса.

Из данного уравнения можно определить время первоначального периода выпечки $\tau_{\text{н}}$, за которое температура на поверхности тестовой заготовки достигнет величины $t = 100$ °С.

Как видно из формулы (2), в нее входит коэффициент теплоотдачи α , численное значение которого зависит от условий теплообмена в рабочей камере аппарата в начальный период выпечки (температуры и характера движения теплоносителя, уровня его относительной влажности и др.). Поскольку влага оказывает существенное влияние на термодинамические свойства воздуха, практический интерес представляет учет влияния состава паровоздушной среды на коэффициент теплоотдачи в пароконвекционных аппаратах.

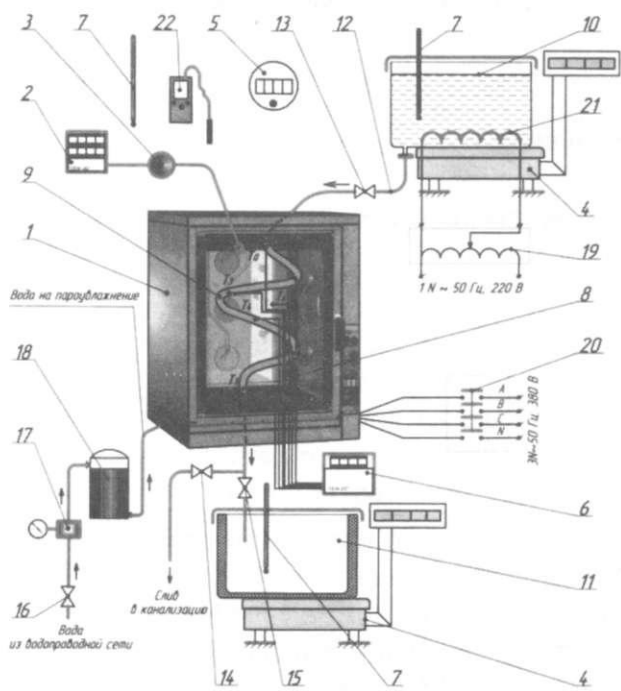
Аналитический подход к оценке продолжительности выпечки по времени достижения заданной температуры на основе теории нестационарной теплопроводности разработали А.С. Гинзбург и А.А. Михелев [6]. Уравнение М.С. Смирнова [6] описывает характер изменения температуры в центральной области выпекаемой тестовой заготовки. Исследователи В.А. Брызун, В.И. Маклюков, М.Ф. Аднодворцев и А.А. Бочарников разработали комплексную математическую модель переноса энергии и массы в современных хлебопекарных печах, которая учитывает переменные теплофизические и геометрические характеристики выпекаемых тестовых заготовок [6–8]. Предлагаемые ими соотношения теоретически верно отражают влияние факторов, определяющих продолжительность процесса выпечки, но для практических расчетов эти соотношения не совсем пригодны из-за отсутствия четких рекомендаций по нахождению числа Био.

По этой причине продолжительность выпечки аналитическим путем, как правило, не рассчитывается, а принимается по данным технологических инструкций. Согласно этим данным

продолжительность выпечки для каждого вида хлебобулочных изделий характеризуется определенным интервалом рекомендуемых значений. Включает ли рекомендуемый интервал оптимальное значение – ответить сложно. Кроме того, в настоящее время отсутствуют рекомендации по продолжительности и режимным параметрам выпечки в некоторых современных печах. А отсутствие единого подхода к определению продолжительности процесса выпечки делает затруднительным инженерный расчет при проектировании хлебопекарных аппаратов.

Результаты исследований и их обсуждение

Для исследования влияния состава паровоздушной среды на теплоотдачу в условиях принудительной циркуляции греющей паровоздушной среды при атмосферном давлении была разработана экспериментальная установка (рисунок 1), с помощью которой экспериментально определяли значение коэффициента конвективной теплоотдачи при различных значениях относительной влажности теплоносителя (α_k^3). Затем расчетным путем по известным уравнениям подобия получали значение коэффициента теплоотдачи от сухого воздуха (α_k^p).



1 – пароконвекционный аппарат; 2 – измеритель температуры и влажности; 3 – измеритель-преобразователь температуры и влажности; 4 – весы; 5 – счетчик-секундомер; 6 – измеритель температуры; 7 – термометр; 8 – преобразователь термоэлектрический (T_0 – температура воды на входе в теплообменник, T_1 – температура воды на выходе из теплообменника, $T_2...T_5$ – температура стенки теплообменника, T_6 – температура рабочей камере; 9 – теплообменник трубчатый; 10 – бачок расходный для воды; 11 – бачок приемный для воды; 12 – шланг термостойкий; 13, 14, 15, 16 – кран пробковый; 17 – клапан редукционный с манометром; 18 – колонка ионообменная; 19 – автотрансформатор; 20 – пускатель магнитный; 21 – электронагреватель трубчатый; 22 – термоанемометр

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Полученное расчетным путем значение коэффициента конвективной теплоотдачи от сухого воздуха α_k^p сравнивалось со значением α_k^3 , полученным экспериментальным путем, и находилось значение поправочного коэффициента ϵ_ϕ :

$$\epsilon_\phi = \frac{\alpha_k^3}{\alpha_k^p} \tag{3}$$

Графическая зависимость поправочного коэффициента ϵ_ϕ , учитывающего влияние относительной влажности воздуха ϕ (%), на коэффициент конвективной теплоотдачи представлена на рисунке 2.

Для наглядности и простоты инженерных расчетов функциональную зависимость $\epsilon_\phi = f(\phi)$ определяли в виде степенной функции. В итоге получена аппроксимирующая зависимость для вычисления ϵ_ϕ для интервала значений относительной влажностью воздуха $13 < \phi < 65$, реализуемых в пароконвекционных аппаратах для осуществления жарочно-пекарных процессов:

$$\epsilon_\phi = 0,019 \cdot \phi^{1,584} \tag{4}$$

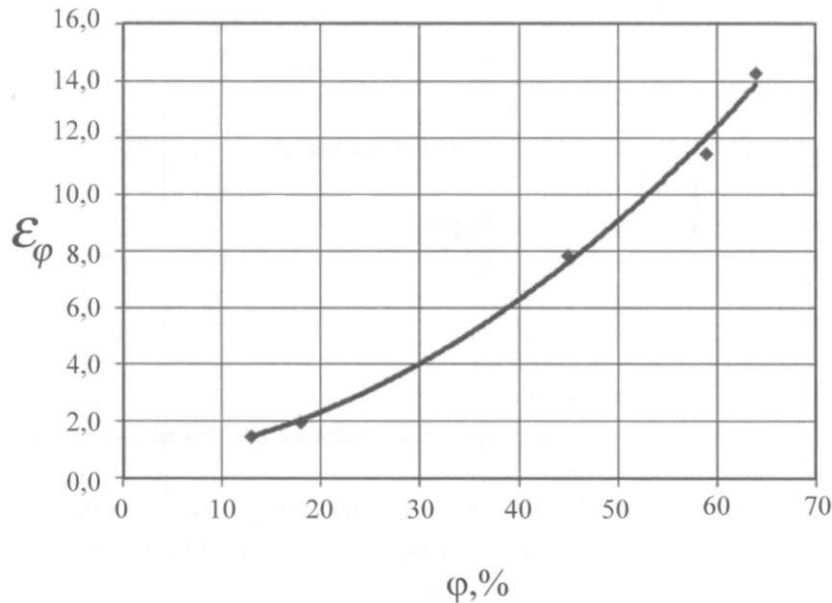
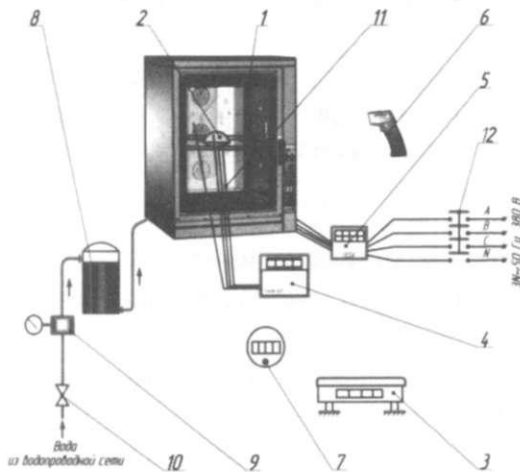


Рисунок 2 – Зависимость значения поправочного коэффициента ε_{φ} от относительной влажности воздуха

Эти результаты с достаточной для инженерных расчетов точностью отражают влияние относительной влажности воздуха на коэффициент его конвективной теплоотдачи, что необходимо при определении продолжительности первого периода выпечки.

Для исследования температурных полей в выпекаемой тестовой заготовке с целью определения продолжительности выпечки подовых хлебобулочных изделий в пароконвекционном аппарате была создана экспериментальная установка, представленная на рисунке 3.



1 – тепловой аппарат; 2 – выпекаемая тестовая заготовка; 3 – электронные весы; 4 – измеритель температуры; 5 – счетчик электрической энергии трехфазный; 6 – пирометр; 7 – счетчик-секундомер электронный; 8 – колонка ионообменная; 9 – клапан редукционный; 10 – кран пробковый; 11 – преобразователь термоэлектрический; 12 – пускатель магнитный

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Как установлено А.С. Гинзбургом и А.А. Михелевым, базовым процессом при выпечке является нестационарная теплопроводность в теле тестовой заготовки, поскольку изменение температурного поля вызывает или изменяет все остальные процессы.

В теории нестационарной теплопроводности изменение температуры во времени в каждой точке тела при его нагревании и охлаждении определяется бесконечным рядом:

$$\Theta = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}, \quad (5)$$

где Θ – относительная избыточная температура тела (далее для краткости Θ называется просто безразмерной температурой);

D_n – некоторая функция, зависящая от граничных условий, координат, формы тела и т.п;

μ_n – корни характеристического уравнения, получаемого при решении задачи;

Fo – число Фурье, определяемое как

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (6)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – время, с;

l – характерный геометрический размер тела, м.

Безразмерная температура определяется по формуле

$$\Theta = \frac{t_{cp} - t}{t_{cp} - t_0}, \quad (7)$$

где t_{cp} – температура греющей среды, $^{\circ}\text{C}$;

t – текущее значение температуры в центре выпекаемой тестовой заготовки, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 – начальная температура заготовки, $^{\circ}\text{C}$.

Для тел правильной формы с одномерным полем температур (бесконечная плоская пластина, бесконечный цилиндр, шар) величины D_n и μ_n для центра тела и для его поверхности табулированы и приводятся в справочной литературе.

Как видно из выражений (5, 6), температурное поле в теле зависит от его геометрической формы, начального теплового состояния и условий теплообмена тела с окружающей средой. Известно, что со временем с ростом числа Фурье ряд (5) быстро сходится. Все члены ряда, начиная со второго, становятся малыми по сравнению с первыми, и распределение температуры во времени для всех точек тела может быть выражено первым слагаемым ряда:

$$\Theta = D_1 \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo}. \quad (8)$$

Такую особенность процесса называют регулярным режимом теплопроводности. Изменение температуры при этом во всех точках тела имеет аналогичный характер и не зависит от начального теплового состояния тела. Для бесконечного цилиндра и шара такой режим наступает при $Fo \geq 0,25$ (при определяющем размере, равном радиусу цилиндра или шара, т.е. при $l = r$, где r – радиус, м). Аппроксимация экспериментальных измерений уравнением (8) открывает большие возможности для обобщения опытных данных, прогнозирования изменения температуры во времени в процессе выпечки тестовых заготовок, получения расчетных уравнений. Коэффициенты D_1 и μ_1 получаются в этом случае эмпирически.

Для температурного поля внутри тестовой заготовки, содержащей влагу, вместо температуры среды принята предельная температура $t_{cp} = 100^{\circ}\text{C}$ – температура насыщения водяного пара (температура кипения) при атмосферном давлении [9].

Результаты серии экспериментов по изучению процесса нестационарной теплопроводности в теле выпекаемой тестовой заготовки представлены на рисунке 4.

Число Фурье при этом вычислялось при определяющем размере, равном половине начальной высоты тестовой заготовки после расстойки перед помещением в рабочую камеру, т.е. при $l = h/2$. Здесь можно наблюдать хорошее совмещение линий, позволяющее объединять данные для изделий разной массы при получении критериального уравнения.

Аппроксимируя данные, представленные на рисунке 4, получено уравнение, описывающее процесс прогрева изделия на его второй стадии:

$$\Theta = 18,3 \cdot e^{-8,98F_o} \quad (9)$$

Данное уравнение получено для изделий из пшеничного теста массой 200 – 500 г в форме шарового сегмента с соотношением диаметра к начальной высоте $D/h \approx 5:1$ и справедливо при $Fo \geq 0,35$. Оно рекомендуется для инженерных расчетов при определении необходимого времени до достижения заданной температуры в центре выпекаемой тестовой заготовки.

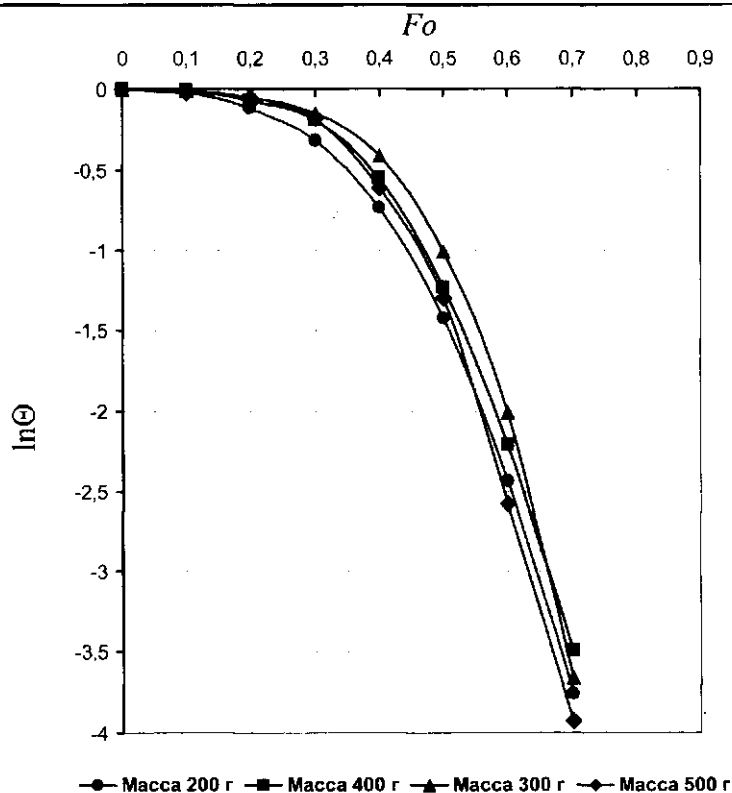


Рисунок 4 – График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье в полупологарифмических координатах для выпекаемых тестовых заготовок разной массы

Таким образом, на основании проведенных исследований разработана методика определения продолжительности процесса выпечки подовых хлебобулочных изделий из пшеничного теста в пароконвекционных аппаратах.

При определении с помощью уравнения (1) продолжительности начального периода выпечки тестовых заготовок, по истечении которого на их поверхности образуется корка с температурой $t_{\text{п}} \geq 100$ °С, для нахождения численного значения коэффициента теплоотдачи рекомендуется использовать поправочный коэффициент ε_{φ} , определяемый по формуле (4).

Для определения продолжительности процесса выпечки тестовых заготовок τ , при котором температура в центре тестовой заготовки достигает величины 96 °С...98 °С, уравнение (9) было преобразовано в следующий вид:

$$\tau = \frac{(\ln\Theta - 2,91)(h_n / 2)^2}{8,98a} \quad (10)$$

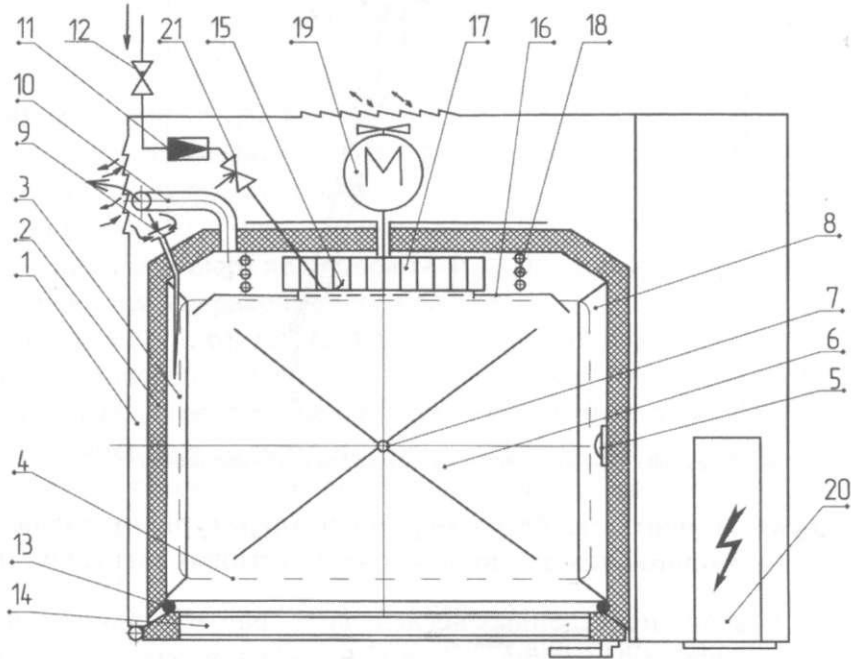
Так как современные пароконвекционные аппараты практически моделируют тепловые процессы, происходящие в ротационных хлебопекарных печах, и в большинстве своем представляют собой их физическое подобие с расширенным диапазоном функциональных возможностей, то полученные результаты могут быть применимы для всех аппаратов боксового типа с регулированием временных, температурных и влажностных параметров.

Следует отметить, что, так как на потребительском рынке Республики Беларусь пароконвекционные аппараты представлены зарубежными фирмами и такое оборудование в республике не производилось, то его разработка и постановка на серийное производство являлись важными и актуальными задачами, направленными на решение вопросов импортозамещения.

Кроме того, это позволяет решить вопрос технического перевооружения объектов питания при лечебных учреждениях и учреждениях образования, так как доля морально и физически изношенного теплового оборудования на них достигает 70 % – 90 %.

На рисунке 5 представлена схема разработанного пароконвекционного аппарата инжекторного способа пароувлажнения (патент на полезную модель № 6333 ВУ А 21В1/00).

Разработанная конструкция пароконвекционного аппарата АПК-0,85 (рисунок 6) внедрена в серийное производство на РУП «Гомельский завод торгового машиностроения» в двух конструктивных исполнениях – с механическим (а) и электронным (б) блоком управления, а также разработаны и применяются на ряде объектов общественного питания республики Беларусь рецептуры и технологические карты по производству кулинарной продукции и мучных изделий с применением пароконвекционной обработки.

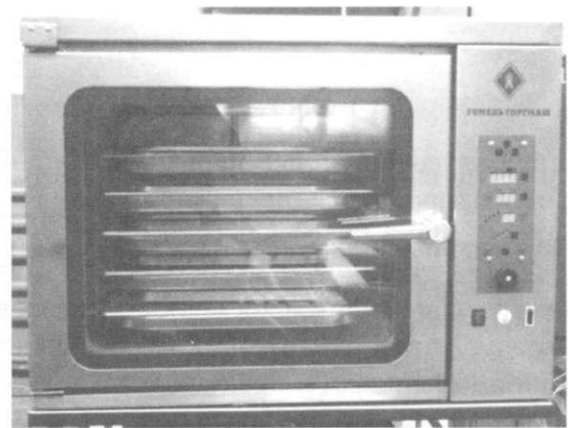


1 – корпус аппарата; 2 – теплоизоляция; 3 – направляющая для gastronorm-емкостей; 4 – место расположения gastronorm-емкости; 5 – лампочка освещения; 6 – днище; 7 – отверстие для удаления конденсата; 8 – направляющая для gastronorm-емкостей; 9 – патрубок с клапаном для ввода свежего воздуха; 10 – патрубок для отвода теплоносителя; 11 – редукционный клапан; 12 – вентиль подачи воды; 13 – уплотнитель дверцы; 14 – дверца; 15 – патрубок подачи воды в турбину; 16 – шторка с направляющими потока теплоносителя; 17 – турбина вентилятора; 18 – ТЭНы; 19 – электродвигатель; 20 – блок управления; 21 – клапан электромагнитный

Рисунок 5 – Принципиально-конструктивная схема пароконвекционного аппарата



а



б

Рисунок 6 – Аппарат пароконвекционный АПК-0,85

Заключение

Исследовано влияние состава паровоздушной среды на коэффициент конвективной теплоотдачи в пароконвекционной аппаратуре и предложено расчетное выражение для поправочного коэффициента к коэффициенту конвективной теплоотдачи от сухого воздуха в зависимости от относительной влажности теплоносителя в технологическом диапазоне параметров (относительная влажность 13 % – 65 %; температура 160 °С – 210 °С). Исследован процесс теплопроводности в теле выпекаемой тестовой заготовки и определена зависимость безразмерной температуры выпекаемой тестовой заготовки в форме шарового сегмента с отношением диаметра к начальной высоте изделия (после расстойки) как 5:1 от числа Фурье при регулярном режиме нестационарной теплопроводности, позволяющая определять необходимое время до достижения заданной температуры в центре заготовки. Разработана и внедрена в серийное производство конструкция пароконвекционного аппарата инжекторного типа, позволяющего осуществлять процессы тепловой обработки кулинарной продукции и выпечки тестовых заготовок, а также рецептуры и технологические карты по производству кулинарной продукции и мучных изделий с применением пароконвекционной обработки.

Литература

- 1 Ауэрман, Л.Я. Технология хлебопекарного производства: учебник / Л.Я. Ауэрман; под ред. Л.И. Пучковой. – 9-е из., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2002. – 416 с.
- 2 Зверева, Л.Ф. Технология и теххимический контроль хлебопекарного производства / Л.Ф. Зверева, З.С. Немцова, Н.П. Волкова. – 3-е изд. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1983. – 416 с.
- 3 Пашук, З.Н. Технология производства хлебобулочных изделий: справочник / З.Н. Пашук, Т.К. Апет, И.И. Апет. – СПб. : ГИОРД, 2009. – 400 с.
- 4 Пашенко, Л.П. Технология хлебобулочных изделий / Л.П. Пашенко, И.М. Жаркова. – М. : КолосС, 2008. – 389 с.
- 5 Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производств / А.А. Михелев [и др.]. – М. : Пищевая промышленность, 1979. – 326 с.
- 6 Брызун, В.А. Теплотехнические аспекты эффективной выпечки пшеничных хлебобулочных изделий / В.А. Брызун, В.И. Маклюков, М.Ф. Бочарников. – М. : Пищепромиздат, 2004. – 272 с.
- 7 Брызун, В.А. Новое о закономерностях выпечки хлебобулочных изделий / В.А. Брызун, В.И. Маклюков, М.Ф. Аднодворцев // Кондитерское и хлебопекарное производство. – 2007. – № 5. – С. 4–7.
- 8 Твердохлеб, Л.Л. Влияние увлажнения в зонах выпечки на качество хлебобулочных изделий / Л.Л. Твердохлеб, Л.Е. Матвиенко // Хлебопекарная и кондитерская промышленность. – 1979. – № 6. – С. 24–25.
- 9 Смоляк, А.А. Особенности процессов теплообмена в тестовой заготовке при выпечке в пароконвекционном аппарате / А.А. Смоляк, А.В. Кирик // Тем.зб. наук. пр./ Донецкий нац. ун-т экон. і торг. · Донецьк : ДонНУЕТ, 2010. – Вип. 25: Обладнання та технології харчових виробництв. – С. 280–289.

Поступила в редакцию 25.11.2013