

УДК 621.365:641.5.35; 641.521:641.542.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В ПАРОКОНВЕКТОМАТЕ

Кирик И.М., к.т.н.,

Кирик А.В., инженер.

Могилевский государственный университет продовольствия

Тел (+375 222) 455416

Аннотация – в статье приведены результаты разработки и исследований универсального теплового аппарата для объектов общественного питания – пароконвектомата. Исследован процесс теплопроводности в выпекаемой тестовой заготовке из пшеничной муки. Показано, что при обработке экспериментальных данных предельной температурой для внутренней массы изделия следует считать температуру насыщенного пара. Получено критериальное уравнение для определения температуры в центре выпекаемой тестовой заготовки для инженерных расчетов.

Ключевые слова – тестовая заготовка, пароконвектомат, влажность, температуропроводность, безразмерная температура.

Постановка проблемы. Сложность и многофакторность процесса тепловой обработки тестовых заготовок делает затруднительным достаточно точное теоретическое описание изменения температурного поля в теле 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.

Анализ предыдущих исследований. Аналитический подход к оценке продолжительности выпечки по времени достижения заданной температуры на основе теории нестационарной теплопроводности изложен в литературных источниках [1] и [2]. Представленные в них соотношения теоретически верно отражают влияние факторов, которые определяют время выпечки изделия. Но они имеют неизвестные коэффициенты, в том числе зависящие от числа Био, четких рекомендаций по нахождению которого нет. Поэтому для инженерных расчетов они практически непригодны.

Результаты исследования температурного поля выпекаемой тестовой заготовки (далее ВТЗ) представлены в литературных источниках [3] и [4]. В общем случае аналитическое определение температурного поля ВТЗ связано с необходимостью решения системы дифференциальных уравнений Лыкова-Михайлова [5]. Решение этой системы дифференциальных уравнений получить пока не удастся.

По результатам обработки экспериментальных измерений на основе теории подобия были получены расчетные критериальные уравнения, описанные в литературе [2] и [6]. Но эти уравнения позволяют получить только наружную температуру тестовой заготовки на начальном этапе выпечки. Кроме того, для их применения требуется знать конкретный закон изменения плотности теплового потока на поверхности ВТЗ, который заранее неизвестен.

Рассмотренные подходы к аналитическому определению температуры ВТЗ нуждаются в развитии и совершенствовании.

Цель работы – аналитическое описание изменения температуры в центре ВТЗ на основе обработки экспериментальных измерений с использованием теории подобия и разработка конструкции пароконвекционного аппарата и внедрение его в серийное производство.

Основная часть. Выпечка изделий из теста в пароконвекционном аппарате представляет собой нестационарный тепловой процесс, включающий теплопроводность, перенос влаги с изменением ее агрегатного состояния и различные физические, биохимические, микробиологические, коллоидные и другие процессы. Базовым процессом здесь следует считать нестационарную теплопроводность в теле ВТЗ, поскольку изменение температурного поля вызывает или изменяет все остальные процессы.

Для проведения экспериментальных исследований по изучению процесса теплопроводности в теле ВТЗ создана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1 [7, 8, 9].

Схема расположения термопар в ВТЗ при измерении температуры в различных ее слоях изображено на рис. 2.

Измеренные значения температуры на поверхности ВТЗ и в ее центре показали классически традиционный в качественном плане характер изменения температуры во времени. Температура на поверхности ВТЗ (или температура корки) сразу быстро возрастает, со временем скорость возрастания ее температуры уменьшается, и температура приближается к температуре греющей среды. В центре изделия на первоначальной стадии температура остается неизменной, пока идет процесс прогрева заготовки. Через некоторое время температура в центре ВТЗ начинает расти сначала быстро, а затем все медленнее, также приближаясь к некоторой предельной температуре.

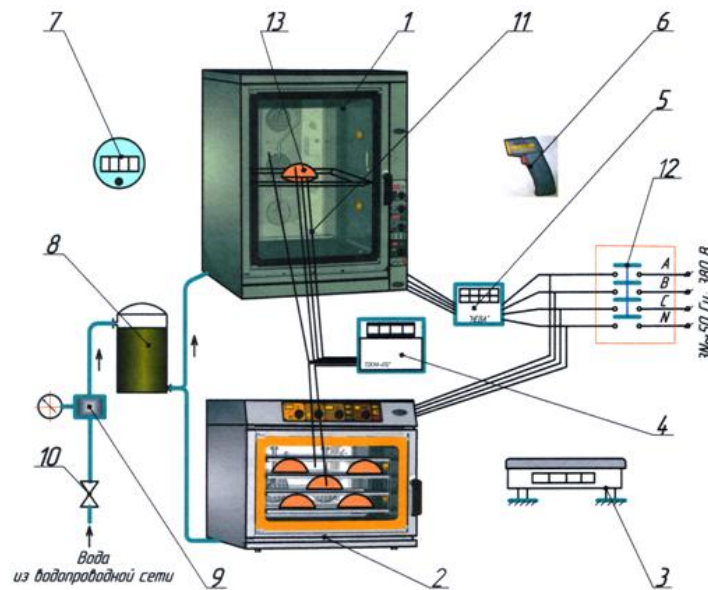


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

1 – апарат пароконвекційний; 2 – шаф розстійний; 3 – ваги електронні лабораторні SC 4010; 4 – вимірювач-регулятор «Сосна-012»; 5 – лічильник трифазний «Нева»; 6 – пірометр Centr-350; 7 – лічильник-секундомір електронний; 8 – колонка іонообмінна DEF; 9 – клапан редукційний з манометром ІТАР; 10 – кран пробковий; 11 – перетворювач термоелектричний ТХА(К); 12 – пускатель магнітний ПМЕ; 13 – заготовка тестова.

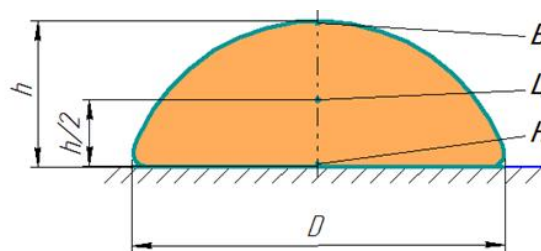


Рис. 2. Схема розташування термопар в різних шарах ВТЗ:

B – точка вимірювання температури ВТЗ в підкорковому шарі; **C** – точка вимірювання температури в центрі ВТЗ; **H** – точка вимірювання температури в нижній корці.

В теорії нестационарної теплопровідності змінення температури во часі в кожній точці тіла при його нагріванні і охолодженні визначається нескінченним рядом [10]

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

де θ – безрозмірна температура, визначається як

$$\theta = \frac{t_{z.c.} - t}{t_{z.c.} - t_o}, \quad (2)$$

$t_{z.c.}$ – температура греющей среды, °С;

t – температура ВТЗ в момент времени τ , °С;

t_o – начальная температура ВТЗ, °С;

Fo – число Фурье, определяемое как

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (3)$$

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

τ – время, с; l – характерный геометрический размер тела, м;

D_n – функция, зависящая от граничных условий, координат, формы тела;

μ_n – корни характеристического уравнения, получаемого при решении задачи.

Для фиксированной точки (например, в центре изделия) величины D_n и μ_n зависят только от числа Био, которое характеризует условия нагревания (охлаждения) поверхности тела

$$Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к изделию, Вт/м²К;

λ – коэффициент теплопроводности нагреваемого тела, Вт/мК.

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 [11].

На первом этапе выпечки, называемом неупорядоченным режимом, наблюдается сложный характер изменения температуры в теле ВТЗ, различный в разных точках, и для определения температуры требуется много членов ряда (1). Со временем с ростом числа Фурье ряд (1) сходится все быстрее, и для определения значений температуры требуется все меньшее число членов ряда. После определенных значений числа Фурье ряд сходится настолько быстро, что для математического описания процесса достаточно первого члена ряда

$$\theta = D_1 \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo}. \quad (5)$$

Этот режим называют регулярным режимом. Изменение температуры при этом во всех точках тела имеет аналогичный характер. 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 (5) открывает большие возможности для обобщения опытных данных, прогнозирования изменения температуры во времени в процессе выпечки тестовых заготовок, получения расчетных уравнений. Коэффициенты D_l и μ_l получаются в этом случае эмпирически. При нагревании твердых однородных тел обе температуры, как и температуры в любой точке, со временем сближаются, стремясь к температуре греющей среды. Однако известно, что при выпечке изделий из теста имеет место существенное различие – температура внутри ВТЗ стремится не к температуре греющей среды, а к другой, более низкой температуре, обычно не превышающей 100°C . Поскольку для центра и поверхности ВТЗ эти температуры оказываются разными, будем рассматривать далее предельную температуру t_{np} .

Ранее при обработке результатов экспериментальных исследований процесса тепловой обработки тестовых заготовок из пшеничного теста выявлено, что при некоторых условиях процесс нагревания изделий из теста в его второй стадии можно рассматривать как регулярный режим нагревания тел в классической теории нестационарной теплопроводности. Для этого режима функция $\ln \mathcal{G} = f(\tau)$ изображается прямой линией в полулогарифмических координатах « $\ln \mathcal{G} - \tau$ » (здесь $\mathcal{G} = t_{np} - t$). Одним из условий, при котором функция становится линейной, является условие $t_{np} = 100^\circ\text{C}$. Тогда $\mathcal{G} = 100 - t$. Данный процесс представлен на рис. 3.

Как указывалось выше, процесс теплопроводности в тестовых заготовках при выпечке изделий сопровождается многими процессами, и, прежде всего, диффузией влаги. Кроме того, физико-химические изменения в заготовке должны приводить к изменению коэффициента температуропроводности a и других физических свойств.

Выпечка изделий из теста отличается еще и тем, что в процессе тепловой обработки высота изделий возрастает примерно в 1,5 раза. Поэтому оправданно предположить, что закономерности регулярного режима в данном случае не проявляются, что и было первоначально обнаружено при обработке результатов исследований, когда разности температур отсчитывались от температуры греющей среды $t_{z.c.}$.

При такой обработке

$$\mathcal{G} = t_{z.c.} - t, \quad \mathcal{G}_0 = t_{z.c.} - t_0,$$

и безразмерная температура равна

$$\theta = \frac{t_{гп} - t}{t_{гп} - t_0}. \quad (6)$$

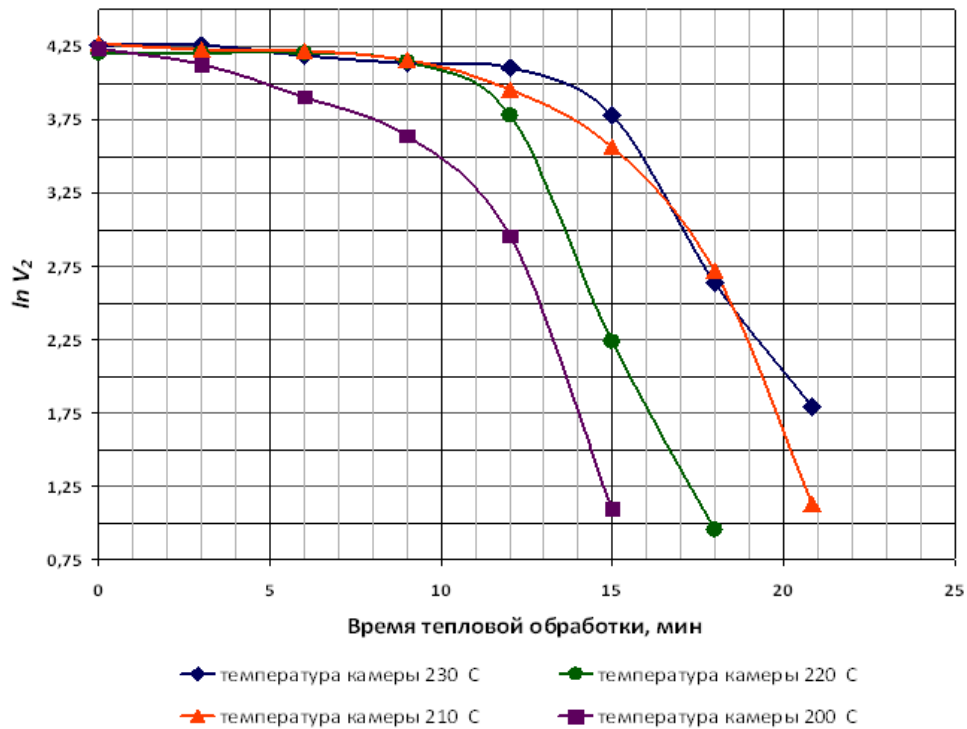


Рис. 3. Графік зміни $\ln V_2$ від часу теплової обробки без зволоження камери в процесі випічки пшеничного хліба.

Представлення результатів вимірювань з такою безрозмірною температурою показано на рис. 4. В якості визначаючого геометричного розміру системи при цьому прийнята половина висоти изделия ($h/2$).

Як видно з рис. 4, криві $\theta = f(Fo)$ мають S-образний вигляд, т.е. закономірності регулярного режиму не проявляються, і рівняння (5) не прийнятно.

Однак изделие з тесту в якості одного з основних компонентів містить воду в рідкому стані, і кількість вологи, випарованої за час випічки, значно менше її кількості, залишкової в изделиї. Отже, на протязі всього процесу випічки изделие прогривається до температури, наближеної до 100 °C, залишаючись вологим тілом. При атмосферному тиску температура 100 °C – це температура насичення водяного пару і вода в рідкому стані не може мати температуру вище цього значення.

При температурі на поверхні изделия вище 100 °C утворюється скорка, в якій вологи знаходиться в пароподібному стані. Під скоркою існує поверхня, що розділяє рідкий стан вологи від пароподібного. При підводі теплоти ззовні відбувається випаровування вологи з изделия, через що поверхня випаровування буде поступово переміщатися всередину, а товщина скорки збільшуватися. На цій по-

верхности испарения температура всегда будет постоянной, равной температуре насыщенного пара t_n .

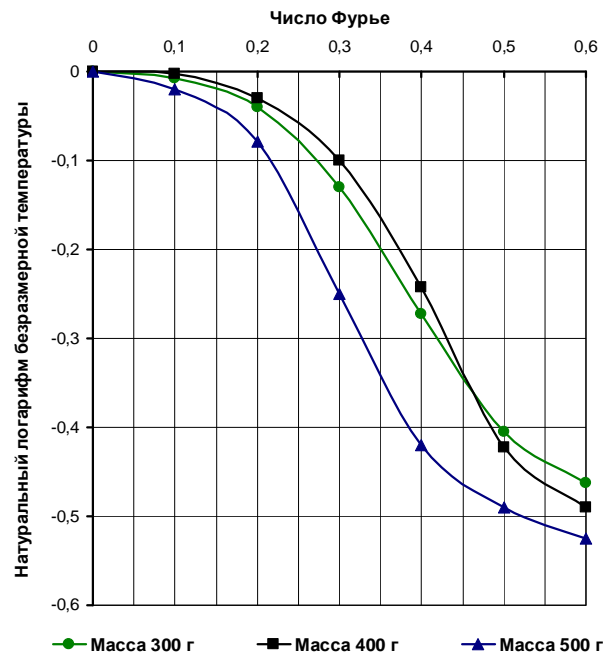


Рис. 4. График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье, определяемой в полулогарифмических координатах.

Все это приводит к предложению при рассмотрении нестационарного процесса теплопроводности в изделии из теста нагреваемым телом считать только влажное изделие, включающее воду в жидком состоянии, а корку отнести к окружающей среде. Через корку к нагреваемому изделию передается теплота от греющей среды.

Таким образом, на внешней границе влажного теста (на границе влажной заготовки с сухой коркой) соблюдается условие $t_{2,c} = 100^\circ\text{C} = t_n$. По теории нестационарной теплопроводности это граничное условие аналогично условию $Bi \rightarrow \infty$. Поэтому для температурного поля внутри тестовой заготовки в качестве температуры окружающей среды (или предельной температуры) целесообразно принимать $t_{np} = t_n = 100^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. Тогда безразмерная температура будет определяться из выражения

$$\theta = \frac{100 - t}{100 - t_o}. \quad (7)$$

Результаты тех же измерений для изделий разной массы с безразмерной температурой, определяемой по формуле (7), в координатах $\ln\theta = f(Fo)$ представлены на рис. 5.

На рис. 5 видно, что на втором этапе выпечки зависимость логарифма безразмерной температуры от числа Фурье может считаться

прямой линией. Это подтверждает ранее выдвинутое предположение, что процесс нагревания изделий из теста в его второй стадии практически можно рассматривать как регулярный режим нагревания тел в классической теории нестационарной теплопроводности.

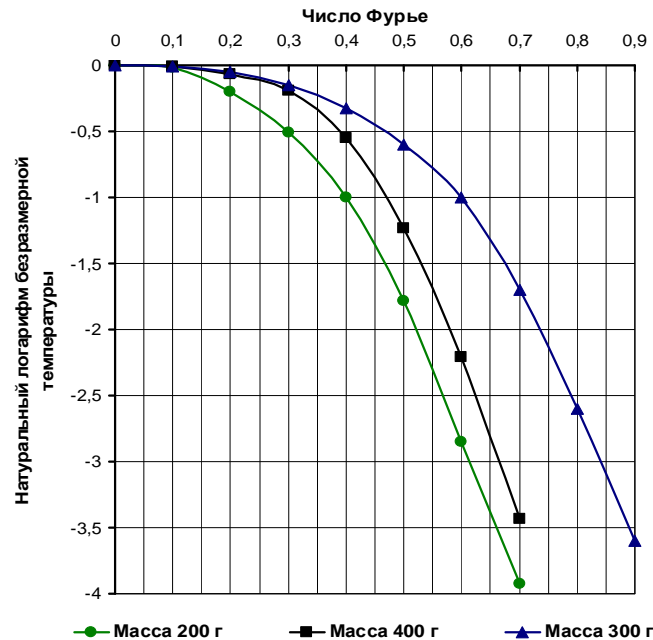


Рис. 5. График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье в полулогарифмических координатах для выпекаемых тестовых заготовок разной массы (предварительные данные).

Конечно же, процесс в выпекаемой тестовой заготовке ввиду множества сопутствующих и усложняющих процессов и факторов нельзя считать чистой теплопроводностью. Такой результат может объясняться следующими соображениями.

Во-первых, процесс диффузии влаги в изделии из-за его подсушивания сам приобретает особенности, свойственные регулярному режиму теплопроводности. В этом случае качественная особенность процесса нагревания сохраняется.

Во-вторых, диффузия влаги, изменение теплофизических свойств и другие искажающие факторы играют более слабую роль в процессе прогрева тестовой заготовки, не искажают существенно характер процесса, а вносят искажение влияния в основном на его количественные характеристики, т.е. на значения численных констант в уравнении (5). В целом процесс можно рассматривать как эквивалентную теплопроводность, а уравнение (5) – как приближенное решение, пригодное для инженерных расчетов.

Уравнение (5) является уравнением подобия (критериальным уравнением), которое должно обобщать экспериментальные результа-

ты. Однако на рис. 5 зависимости для изделий различной массы хоть и приобретают в конце вид прямой линии, но заметно расходятся. Это может означать, что в проведенных измерениях нет полного подобия. Первоначально повторение серий измерений показало, что взаимное расположение линий полностью не повторяется. Поэтому, вероятнее всего, что для этих серий причины, вызывающие рассеяние линий для изделий с различной массой, были случайными.

В первую очередь уравнение обобщает результаты для изделий одной формы. Форма исследуемых выпекаемых тестовых заготовок представляет шаровой сегмент с диаметром D и высотой h . Высота при этом была в 5-6 раз меньше диаметра. Следовательно, изделие по форме ближе к пластине ограниченных размеров. Поэтому, в качестве определяющего размера при определении числа Фурье нами была принята половина высоты выпекаемой тестовой заготовки, т.е. $h/2$.

В процессе подготовки тестовых заготовок к выпечке соотношение D/h первоначально не контролировалось и форма изделий могла отличаться. При небольшой высоте тестовой заготовки неточность установки термопары в ее центре также могла давать заметную погрешность. Могла играть роль и неоднородность самого теста в разных тестовых заготовках, обусловленная изменяющимися параметрами расстойки, и другие факторы.

Для устранения влияния этих факторов были приняты меры для более точной установки термопар на половине высоты и в центре по диаметру изделия. В тестовых заготовках были также по возможности выдержаны одинаковые соотношения D/h .

Результаты этой серии измерений представлены на рисунке 6. Число Фурье при этом вычислялось при определяющем размере, равном половине начальной высоты h_n тестовой заготовки после расстойки перед помещением в рабочую камеру, т.е. $h_n/2$.

Здесь можно наблюдать хорошее совмещение линий, позволяющее объединять данные для изделий разной массы при получении критериального уравнения. Аппроксимация измерений, представленных на рис. 6, показана на рис. 7, и дает следующее уравнение, описывающее процесс прогрева изделия на его второй стадии

$$\theta = 18,3 \cdot e^{-8,98Fo}. \quad (8)$$

Данное уравнение получено для изделий из сдобного теста массой 200...400 г с соотношением диаметра к начальной высоте $D/h_n \approx 5:1$ и справедливо при $Fo \geq 0,35$.

Это уравнение рекомендуется для инженерных расчетов при определении температуры в центре изделий по истечении определенного времени или при определении необходимого времени до достижения заданной температуры в центре выпекаемой тестовой заготовки.

Уравнение (8) описывает изменение температуры в центре заготовок конкретной формы (шаровой сегмент) с конкретным геометрическим параметром D/h_n .

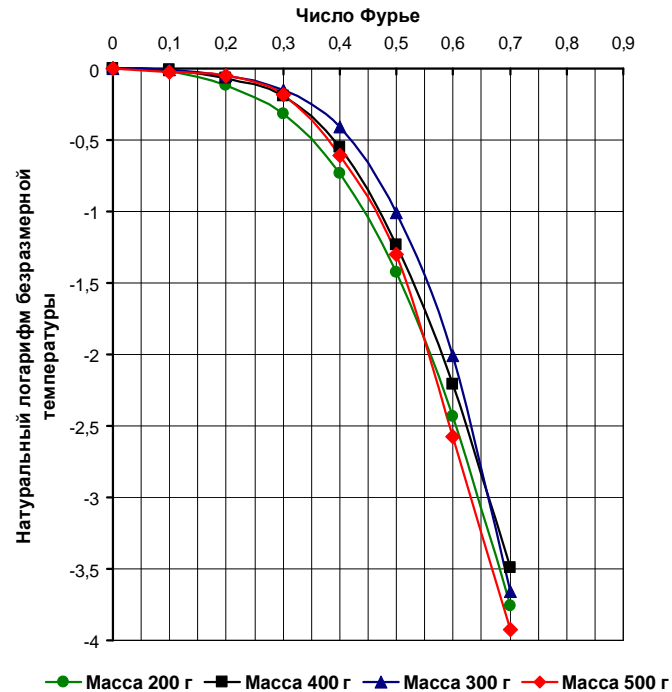


Рис. 6. График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье в полулогарифмических координатах для выпечаемых тестовых заготовок разной массы (уточненные данные).

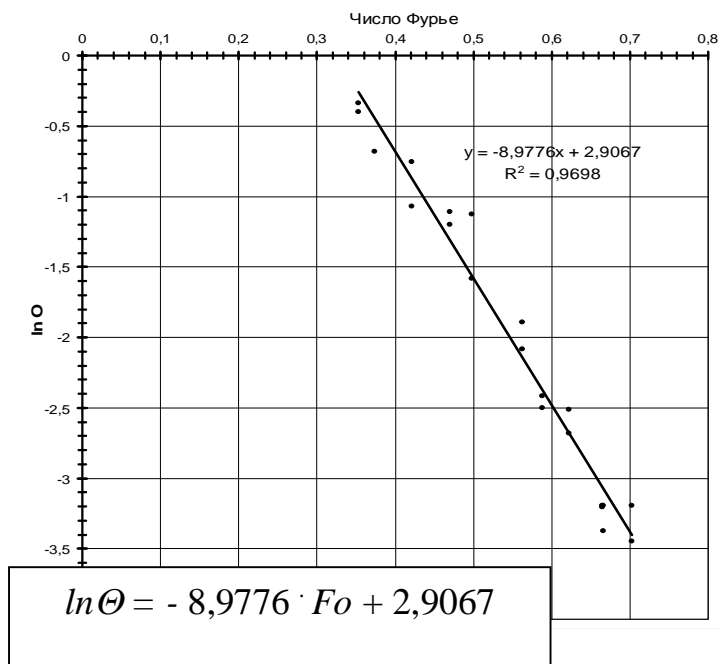


Рис. 7. Результаты аппроксимации экспериментальных данных, представленных на рис. 6.

Для осуществления процессов тепловой обработки пищевых продуктов, в том числе и выпечки изделий из теста, нами совместно с «Гомельским заводом торгового машиностроения» разработан пароконвекционный аппарат инжекторного типа АПК-0,85 (схема представлена на рис. 8), на который получен патент Республики Беларусь на полезную модель, что позволяет снизить зависимость в данном оборудовании от импортных производителей.

Аппарат состоит из корпуса 1, внутри которого расположена теплоизолированная рабочая камера 2, по внутренним боковым стенкам которой расположены направляющие 3 и 4 для гастроемкостей 5 и лампа освещения 6. Днище 7 выполнено с наклоном к центру и имеет патрубок 8 для отвода образующегося конденсата.

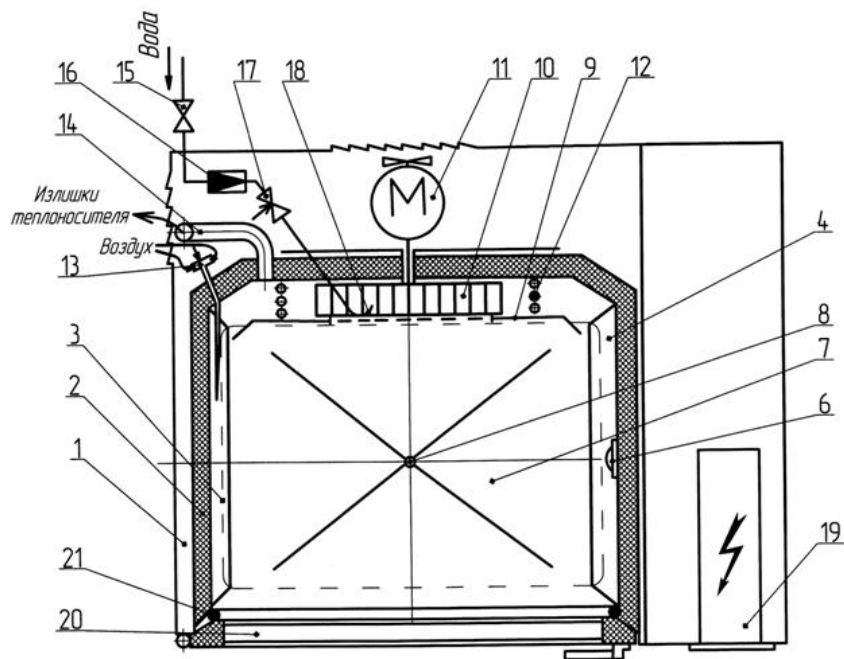


Рис. 8. Инжекторный пароконвектомат.

Вертикальной перегородкой 9 камера условно разделена на переднюю рабочую камеру, где размещаются емкости, и заднюю камеру обогрева, в которой установлены турбина вентилятора 10, приводимая в движение реверсивным электродвигателем 11, и ТЭНы 12, расположенные вокруг турбины.

В рабочей камере 2 на 1/3 ее высоты установлен воздушный патрубок с электромагнитным клапаном 13, предназначенный для подсоса свежего воздуха. На задней стенке камеры под потолком расположен патрубок 14 для отвода излишка теплоносителя. Вентиль 15, редукционный клапан 16 и управляемый электромагнитный клапан 17 служат для подвода воды из системы холодного водоснабжения

внутрь турбины вентилятора 10 через подводящий патрубок 18. Регулировка пароувлажнения рабочей камеры осуществляется с панели управления 19 электрическим сигналом на электромагнитный клапан 17. Рабочая камера закрывается дверцей 20, выполненной в виде разъемного двойного стеклопакета с боковым открыванием. Герметичность закрытия обеспечивается использованием уплотнителя 21, расположенного по всему периметру дверцы.

Пароконвектомат АПК-0,85, оснащенный электронным блоком управления, представленный на рис. 9, позволяет не только точно устанавливать и контролировать параметры технологического процесса, но и программировать циклы приготовления различных кулинарных изделий. Данный аппарат позволяет устанавливать температуру в рабочей камере до 270 °С, уровень относительной влажности воздуха – от 20 до 95%, контролировать температуру внутри продукта с помощью «термозонда».



Рис. 9. Пароконвекционный аппарат АПК-0,85.

Выводы. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- процесс нагрева ВТЗ с течением времени приобретает характер, который практически можно считать регулярным режимом теплопроводности и может аналитически выразиться зависимостью (5);
- предельной температурой, к которой стремится температура внутри влажной ВТЗ, является температура насыщения пара (температура кипения) при данном давлении;

– температура греющей среды не влияет на характер изменения температуры внутри ВТЗ на стадии регулярного режима, она влияет на процесс прогрева ВТЗ в начальный период неупорядоченного режима и на его продолжительность, а также на процессы, происходящие в корке изделия и на его поверхности;

– для инженерных расчетов при определении температуры в центре ВТЗ рекомендуется уравнение подобия (8), которое получено для изделий из сдобного теста массой 200-500 г с соотношением диаметра к начальной высоте $D/h_n \approx 5:1$ и справедливо при $Fo \geq 0,35$.

Литература

1. *Гинзбург А.С.* Теплофизические основы процесса выпечки. – М.: Пищепромиздат, 1955. – 475 с.
2. *Михелев А.А.* Расчет и проектирование хлебопекарных печей / *А.А. Михелев, Н.М. Ицкович* – М.: Пищевая промышленность, 1964. – 568 с.
3. *Фогель В.О.* Аналитическое исследование влияния теплового режима на начальную фазу выпечки хлеба // Труды ВНИИХП. – М.: Пищепромиздат, 1953. – С. 199–208.
4. *Смирнов М.С.* Применение сопряженных задач теплопроводности с подвижной границей к анализу процесса выпечки // Реферативный сборник. Серия: Хлебопекарная, макаронная и дрожжевая промышленность. – М.: ЦИНТИпищепром, 1969. – Вып. 21. – С.15–22.
5. *Лыков А.В.* Теория тепло- и массопереноса / *А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов* – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
6. *Лисовенко А.Т.* Процесс выпечки и тепловые режимы в современных хлебопекарных печах. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 214 с.
7. *Плаксин Ю.М.* Процессы и аппараты пищевых производств / *Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин.* – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: КолосС, 2006. – 760 с.
8. Технологическое оборудование пищевых производств (лабораторный практикум): Учеб. пособие / *В.Я. Груданов, И.М. Кирик.* Под ред. *В.Я. Груданова.* – Мн.: Изд. центр БГУ, 2005. – 205 с.
9. *Преображенский В.П.* Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов». / *В.П. Преображенский.* – 3-е изд., перераб. – М.: «Энергия», 1978. – 704 с.
10. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. РАН *А.В. Клименко* и проф.

В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 564 с.

11. *Исаченко, В.П.* Теплопередача / *В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.* – 3-е изд. – Москва: Энергия, 1975. – 486 с.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ТІСТОВИХ ЗАГОТІВОК У ПАРОКОНВЕКТОМАТІ

Кірік І.М., Кірік А.В.

Анотація

В статті наведено результати розробки та досліджень універсального теплового апарата для об'єктів громадського харчування – пароконвектомата. Досліджений процес теплопровідності в тістовій заготовці з пшеничної муки. Показано, що при обробці експериментальних даних граничною температурою для внутрішньої маси виробу слід вважати температуру насиченого пара. Отримано критеріальне рівняння для визначення температури в центрі тістової заготовки для інженерних розрахунків.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DOUGH THERMAL PROCESSING IN THE STEAM CONVECTION APPARATUS

I. Kirik, A. Kirik

Summary

In the article the results of the elaboration and research of the universal thermal apparatus for the catering, referred to as steam convector, are cited. The process of heat conductivity in the wheat dough under the baking is investigated. Experimental data processing shows that saturated steam temperature must be considered as temperature limit for inner part of dough. Criterion equation for temperature determination in the dough centre under baking for engineering calculation is derived.