

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В ПАРОКОНВЕКЦИОННОМ АППАРАТЕ

А.В. Иванов, А.А. Смоляк, А.В. Кирик

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.

Введение

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.

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 удается.

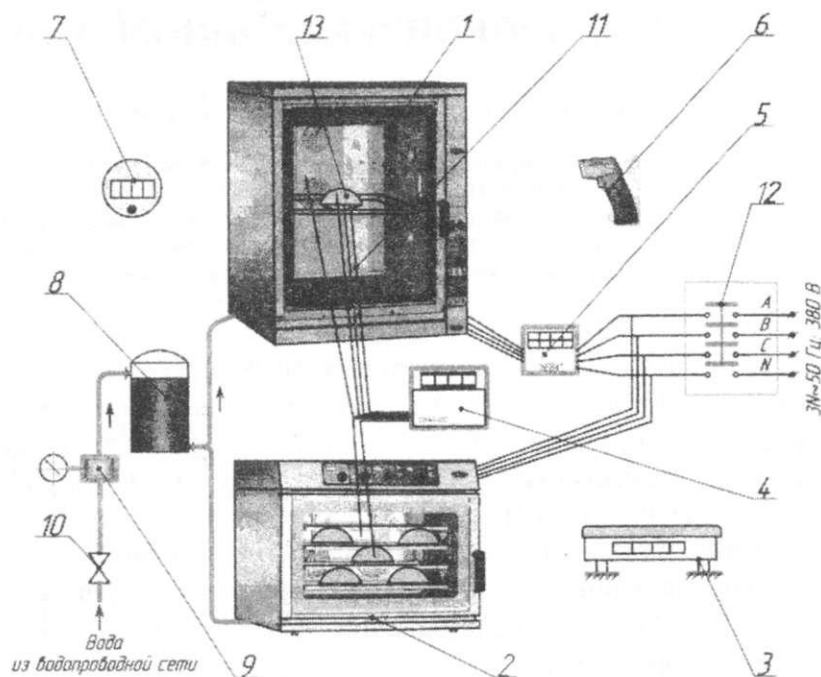
По результатам обработки экспериментальных измерений на основе теории подобия были получены расчетные критериальные уравнения, описанные в литературе [2] и [6]. Но эти уравнения позволяют получить только наружную температуру тестовой заготовки на начальном этапе выпечки. Кроме того, для их применения 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. Поэтому в настоящей работе сделана попытка получить аналитическое описание изменения температуры в центре ВТЗ на основе обработки экспериментальных измерений с использованием теории подобия.

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.

Результаты исследований и их обсуждение

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

Основу экспериментальной установки составляет пароконвекционный аппарат 1 инжекторного типа, позволяющий работать в следующих режимах: водяной пар с температурой до $+105^{\circ}\text{C}$; сухая конвекция с температурой, регулируемой в диапазоне от комнатной до $+250^{\circ}\text{C}$; пароконвекция (возможно произвольное изменение и регулировка как температуры, так и уровня относительной влажности).



- 1 – аппарат пароконвекционный; 2 – шкаф расстойный; 3 – весы электронные лабораторные SC 4010; 4 – измеритель-регулятор «Сосна-012»; 5 – счетчик трехфазный «Нева»; 6 – пирометр Centr-350; 7 – счетчик-секундомер электронный; 8 – колонка ионообменная DEF; 9 – клапан редукционный с манометром ИТАР; 10 – кран пробковый; 11 – преобразователь термоэлектрический ТХА(К); 12 – пускатель магнитный ПМЕ; 13 – заготовка тестовая

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Уровень относительной влажности в пароконвекционном аппарате обеспечивается путем впрыска воды в рабочую камеру и регулируется вручную с панели управления аппарата от 0 до 100% (точность регулирования достигается только при постоянном давлении воды в водопроводной сети, регулируемом при помощи редукционного клапана 9 и контролируемом манометром).

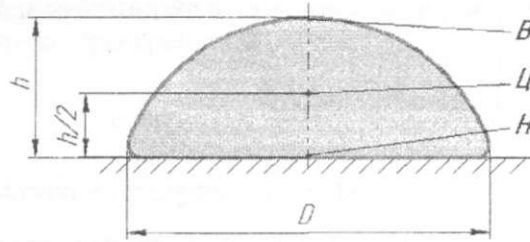
Для проведения организованной расстойки тестовых заготовок используется специализированный расстойный шкаф 2, в котором устанавливаются и поддерживаются: время процесса, температура и относительная влажность воздуха в камере.

Пароконвекционный аппарат 1 подключается к источнику трехфазного переменного тока через магнитный пускатель 12 типа ПМЕ, счетчик электрический трехфазный 5 типа «Нева-105» (используется для определения расхода электроэнергии при выпечке), а также к заземляющему контуру испытательной лаборатории. Для обеспечения пароувлажнения рабочей камеры аппарат подключается к водопроводной сети с давлением 0,2–0,4 МПа через пробковый кран 10, редукционный клапан 9 с манометром и ионообменную колонку 8.

Параллельно к источнику трехфазного переменного тока через магнитный пускатель 12 подключается расстойный шкаф 2, аналогично подключенный к водопроводной сети.

Измерение температур в различных точках тестовой заготовки 13, дополнительный контроль за температурным режимом в рабочей камере пароконвекционного аппарата осуществляется с помощью термоэлектрических преобразователей 11 ТХА с диаметром

термоэлектродов 0,5 мм в кремнеземной оплетке, подключенных к измерительно-регулятору 6 «Сосна-012». Расположение термопар в ВТЗ при измерении температуры в различных ее слоях изображено на рисунке 2.



В – точка измерения температуры ВТЗ в подкорковом слое; *Ц* – точка измерения температуры в центре ВТЗ; *Н* – точка измерения температуры в нижней корке

Рисунок 2 – Схема расположения термопар в различных слоях ВТЗ

Температура наружной поверхности ВТЗ измеряется с помощью пирометра 6 типа «Сентр-350». Масса тестовой заготовки до и после выпечки определяется с помощью весов электронных лабораторных 3 типа SC4010. Габаритные размеры тестовой заготовки до и после выпечки измеряются с помощью линеек и штангенциркуля. Время проведения эксперимента фиксируется с помощью контроллера пароконвекционного аппарата и отдельно счетчиком-секундомером 7.

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.

В теории нестационарной теплопроводности изменение температуры во времени в каждой точке тела при его нагревании и охлаждении определяется бесконечным рядом [10]:

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

где θ – безразмерная температура, определяемая как

$$\theta = \frac{t_{г.с.} - t}{t_{г.с.} - t_0}, \quad (2)$$

где $t_{г.с.}$ – температура греющей среды, °С;

t – температура ВТЗ в момент времени

τ , °С; t_0 – начальная температура ВТЗ, °С;

Fo – число Фурье, определяемое как

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

где 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/м²·К;

λ – коэффициент теплопроводности нагреваемого тела, Вт/м·К.

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_1 и μ_1 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°С. 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 [12–14] 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 $\ln \vartheta = f(\tau)$ изображается прямой линией в полупологарифмических координатах « $\ln \vartheta - \tau$ » (здесь $\vartheta = t_{np} - t$). Одним из условий, при котором функция становится линейной, является условие $t_{np} = 100^\circ\text{C}$. Тогда $\vartheta = 100 - t$. Данный процесс представлен на рисунке 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 $t_{г.с.}$

При такой обработке

$$\vartheta = t_{г.с.} - t, \quad \vartheta_0 = t_{г.с.} - t_0 \quad (6)$$

и безразмерная температура определялась по формуле (2).

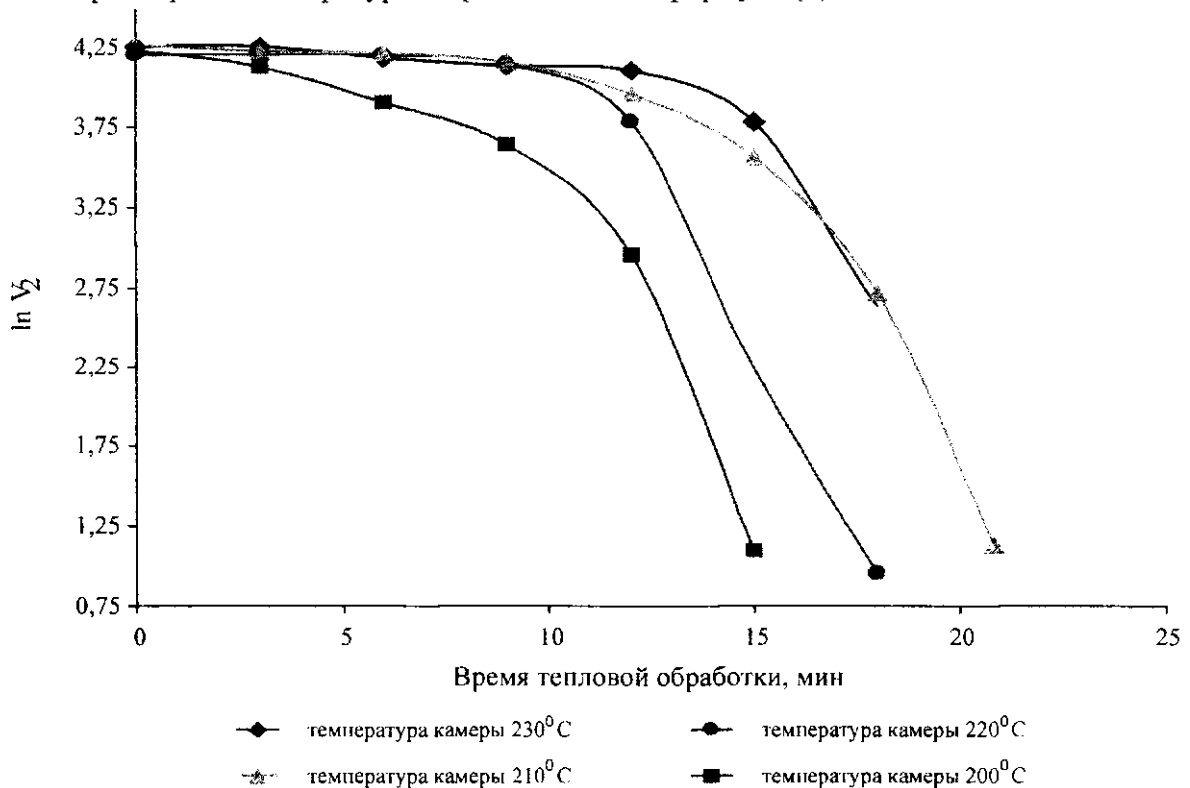


Рисунок 3 – График изменения $\ln \vartheta$ от времени тепловой обработки без увлажнения камеры в процессе выпечки пшеничного хлеба

Представление результатов измерений с такой безразмерной температурой показано на рисунке 4. В качестве определяющего геометрического размера системы при этом принята половина высоты изделия ($h/2$).

Как видно из рисунка 4, кривые $\theta = f(Fo)$ имеют S-образный вид, т.е. закономерности регулярного режима не проявляются, и уравнение (5) не приемлемо.

Однако изделие из теста в качестве одного из основных компонентов содержит воду в жидком состоянии, и количество влаги, испарившейся за время выпечки, значительно меньше ее количества, остающейся в изделии. Следовательно, на протяжении всего процесса выпечки изделие прогревается до температуры, стремящейся к 100°C , оставаясь влажным телом. При атмосферном давлении температура 100°C – это температура насыщения водяного пара, и вода в жидком состоянии не может иметь температуру выше этого значения.

При температуре на поверхности изделия выше 100°C образуется корка, в которой влага находится в парообразном состоянии. Под коркой имеется поверхность, разделяющая жидкое состояние влаги от парообразного. При подводе теплоты извне происходит испарение влаги из изделия, из-за чего поверхность испарения будет медленно перемещаться внутрь, а толщина корки увеличиваться. На этой поверхности испарения температура всегда будет постоянной, равной температуре насыщенного пара $t_{н.}$

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.

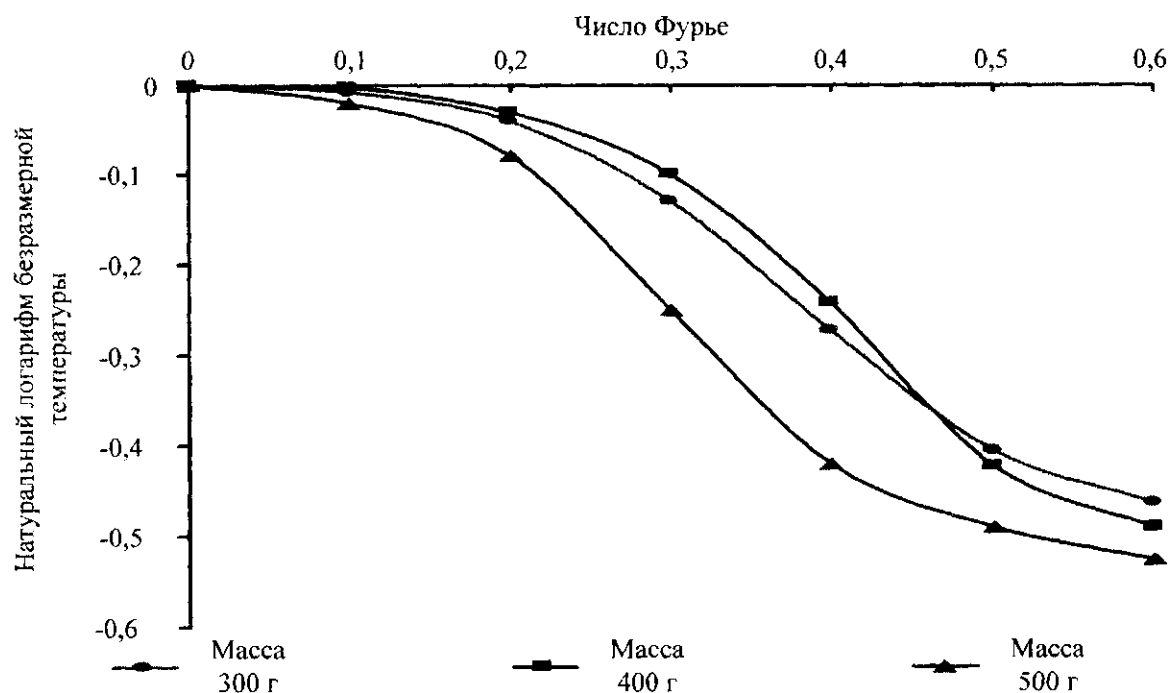


Рисунок 4 – График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье, определяемой в полулогарифмических координатах

Таким образом, на внешней границе влажного теста (на границе влажной заготовки с сухой коркой) соблюдается условие $t_{с.к} = 100^{\circ}\text{C} = t_{н}$. 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 $t_{нр} = t_{н} = 100^{\circ}\text{C}$ при атмосферном давлении. Тогда безразмерная температура будет определяться из выражения

$$\theta = \frac{100 - t}{100 - t_0} \quad (7)$$

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

На рисунке 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.

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 искажаю-

щие 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.

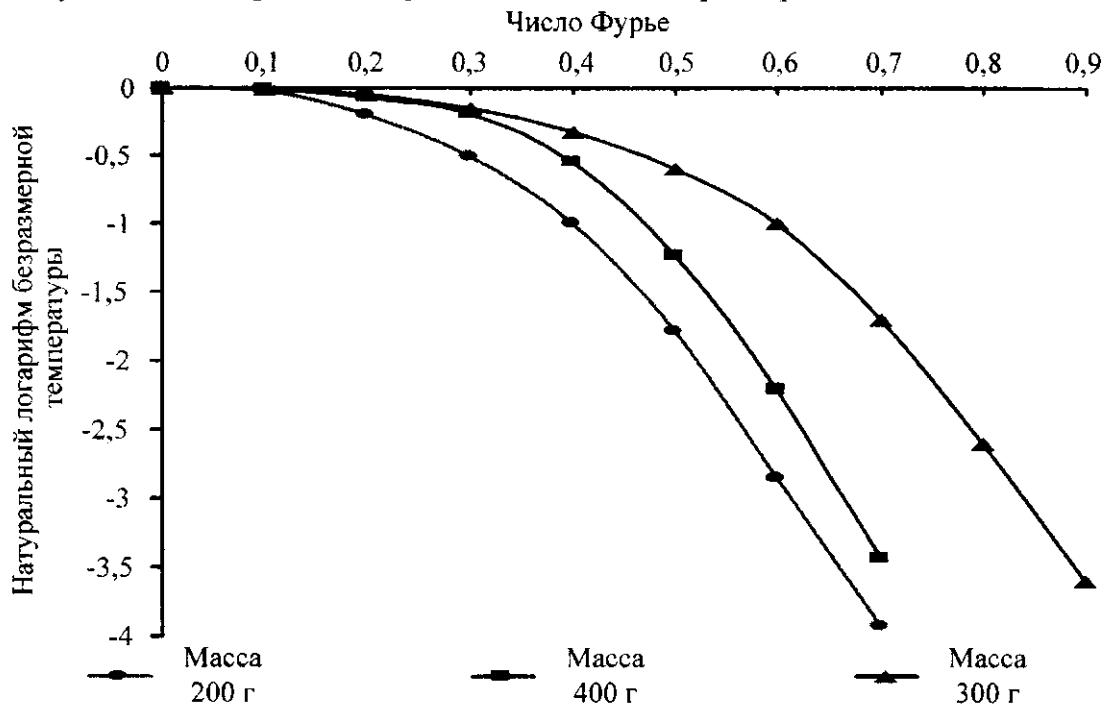


Рисунок 5 – График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье в полулогарифмических координатах для выпекаемых тестовых заготовок разной массы (предварительные данные)

Уравнение (5) является уравнением подобия (критериальным уравнением), которое должно обобщать экспериментальные результаты. Однако на рисунке 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.

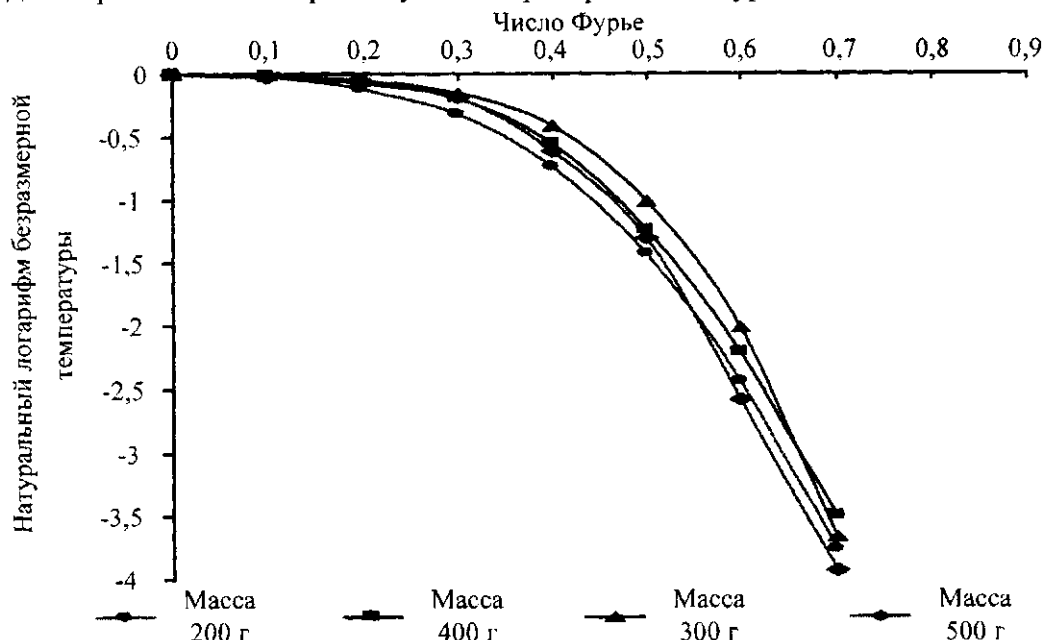


Рисунок 6 – График зависимости безразмерной температуры от числа Фурье в полулогарифмических координатах для выпекаемых тестовых заготовок разной массы (уточненные данные)

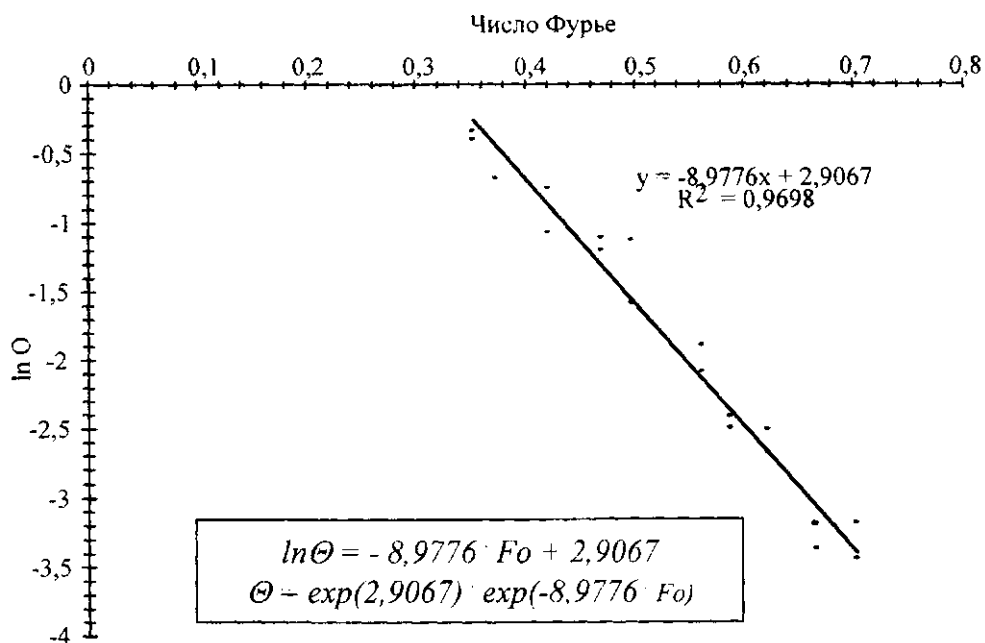


Рисунок 7 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных, представленных на рисунке 6

Аппроксимация измерений, представленных на рисунке 6, показана на рисунке 7 и дает следующее уравнение, описывающее процесс прогрева изделия на его второй стадии:

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

Данное уравнение получено для изделий из слобного 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 .

Заключение

Процесс нагрева выпекаемых тестовых заготовок с течением времени приобретает характер, который практически можно считать регулярным режимом теплопроводности и может аналитически выражаться зависимостью (5). Предельной температурой, к которой стремится температура внутри влажной выпекаемой тестовой заготовки, является температура насыщения пара (температура кипения) при данном давлении. Температура греющей среды не влияет на характер изменения температуры внутри выпекаемой тестовой заготовки на стадии регулярного режима, она влияет на процесс прогрета выпекаемой тестовой заготовки 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 выпекаемой тестовой заготовки 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 / А.С. Гинзбург. – М.: Пищепромиздат, 1955. – 475 с.
- 2 Михелев, А.А. Расчет и проектирование хлебопекарных печей / А.А. Михеев, Н.М. Ицкович. – М.: Пищевая промышленность, 1964. – 568 с.
- 3 Фогель, В.О. Аналитическое исследование влияния теплового режима на начальную фазу выпечки хлеба / В.О. Фогель // Труды ВНИИХП. – М.: Пищепромиздат, 1953. – С. 199–208.
- 4 Смирнов, М.С. Применение сопряженных задач теплопроводности с подвижной границей к анализу процесса выпечки / М.С. Смирнов // 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 / А.Т. Лисовенко. – 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. – Минск: Изд. центр БГУ, 2005. – 205 с.
- 9 Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплотехнических 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. – М.: Энергия, 1985. – 240 с.
- 12 Иванов, А.В. Результаты экспериментальных исследований процессов выпечки тестовых заготовок в пароконвекционном аппарате / А.В. Иванов, Е.А. Назаренко, А.В. Кирик // Техника и технология пищевых производств: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 мая 2009 г.: в 2 ч. / Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч.2 – С. 102–103.
- 13 Смоляк, А.А. Результаты экспериментальных исследований процесса гидротермической обработки заготовок из пшеничного теста / А.А. Смоляк А.А., А.В. Кирик // Техника и технология пищевых производств: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 мая 2009 г.: в 2 ч. / Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2009. – Ч.2 – С. 119–120.
- 14 Иванов, А.В., Анализ результатов экспериментальных исследований процесса гидротермической обработки тестовых заготовок в пароконвекционном аппарате / А.В. Иванов, А.А. Смоляк, А.В. Кирик // Тем. зб. наук. пр./ Донецкий нац. ун-т экон. і торг. – Донецьк, 2009. – Вип. 22: Обладнання та технології харчових виробництв. – С.67–72.

Поступила в редакцию 15.10.2010