

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МЯСНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПАРОВОЗДУШНЫХ СРЕДАХ

А. А. Смоляк, Д. А. Смагин, М. Н. Смагина

Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса нагревания мясных рубленых изделий. Показано, что закономерности нестационарной теплопроводности однородных тел допустимо применять для пищевых продуктов (на примере мясных рубленых изделий), подвергаемых тепловой обработке в среде перегретого водяного пара. Выведены математические зависимости продолжительности жарки изделий эллипсоидной формы из натурального мясного фарша от радиуса, коэффициента температуропроводности и начальной температуры изделия, рекомендуемые к применению в производственной деятельности.

Введение

В настоящее время все народное хозяйство республики ориентировано на экономию топлива, воды, электроэнергии. Стоимость этих видов ресурсов значительна, и в целях их рационального расходования на предприятиях перерабатывающей промышленности осуществляется разработка и внедрение энергосберегающих технологий.

Одним из направлений в области энергосбережения при переработке сельскохозяйственной продукции является повышение эффективности тепловой обработки пищевых продуктов за счет сокращения ее продолжительности. Добиться реализации поставленной цели возможно путем применения теплоносителей с высоким коэффициентом теплоотдачи и методики, позволяющей заранее прогнозировать продолжительность тепловой обработки. Создание подобной методики может быть осуществлено на основе изучения процесса теплообмена в пищевых продуктах с позиции учения о нестационарной теплопроводности.

Обзор литературы [1–4] свидетельствует, что для реализации первой задачи рационально использовать паровоздушные смеси высокой влажности вместо традиционно применяемого нагретого воздуха. Проведенные исследования свидетельствуют, что применение данных теплоносителей позволяет снизить продолжительность тепловой обработки при производстве самой различной продукции.

На решение второй задачи обращалось значительно меньшее внимание. В связи с отсутствием методики прогнозирования продолжительности тепловой обработки возникает необходимость постоянного контроля за процессом приготовления пищевой продукции. Момент наступления кулинарной готовности определяется следующими способами: визуально по внешнему виду обрабатываемых изделий; ориентировочно по рекомендуемой продолжительности обработки; при помощи термометрических устройств, измеряющих температуру в толще продуктов.

Неопределенность продолжительности процесса жарения приводит к перерасходу тепловой энергии, недостаточному прогреванию изделий или к их перегреву. При недогреве отсутствует уверенность в санитарно-гигиенической доброкачественности готовых изделий даже при соблюдении всех требуемых параметров и рекомендаций. При перегреве в изделиях усиливаются негативные последствия тепловой обработки (деструкция белков, повышенное окисление жиров, образование канцерогенов, формирование толстой корочки, неравномерность колера поверхности, локальное наличие подгорелостей и т.д.).

Целью работы является разработка методики, позволяющей прогнозировать продолжительность тепловой обработки, провести оптимальную по продолжительности тепловую обработку, снизить расходы тепловой энергии, улучшить потребительские характеристики готовой продукции.

Теоретические предпосылки

Продолжительность тепловой обработки пищевых продуктов определяется количеством времени, необходимого для нагревания всего объема заготовки до достижения температуры, определяющей кулинарную готовность.

Тип теплового аппарата на интенсивность нагревания пищевого полуфабриката оказывает незначительное влияние, т.к. процессы независимо от конструкции применяемых аппаратов протекают аналогично. Основное влияние оказывает используемый теплоноситель, который определяет не только особенности протекания физико-химических процессов, но и изменение температурных параметров в толще обрабатываемых продуктов.

С позиций учения о теплообмене тепловая обработка пищевых продуктов классифицируется как переходный процесс нестационарной теплопроводности. Продукт с одинаковой температурой во всех точках в начальный момент времени погружается в рабочую камеру аппарата с неизменной температурой греющей среды. Применение закономерностей нестационарной теплопроводности позволяет определять продолжительность тепловой обработки, исходя из геометрических параметров и значения коэффициента температуропроводности обрабатываемых тел. Представление о нестационарной теплопроводности при обработке пищевых продуктов нашло применение в вопросах, относящихся к технологии консервирования мяса холодом [5, 6]. На основе данного представления Бол С. и Ольсон Ф. [7] предложили методы контроля процессов пастеризации и стерилизации консервов. Однако не рассматривались вопросы применения закономерностей нестационарной теплопроводности по отношению к процессам жарки и запекания пищевых продуктов.

Таким образом, можно выдвинуть предположение о целесообразности применения закономерностей нестационарной теплопроводности по отношению к жарочно-пекарным процессам.

На условия нагревания пищевых продуктов влияет большое количество переменных величин, связанных со свойствами обрабатываемых изделий, – внутренняя макроскопическая неоднородность, сложность стереометрической формы, наличие физико-химических и массообменных процессов, изменение теплофизических свойств, испарение влаги с поверхности, образование корки. При использовании паровоздушных смесей высокой влажности процесс нагревания усложняется за счет изменения значения коэффициента теплоотдачи от греющей среды к поверхности изделий в связи с переходом от процессов теплоотдачи за счет свободной конвекции к процессам теплоотдачи при наличии конденсации. В совокупности данные факторы могут обуславливать изменение особенностей протекания теплообменных процессов.

Моделирование прогнозного расчета продолжительности тепловой обработки

Для получения предварительных выводов предлагается применить для расчета продолжительности тепловой обработки пищевых продуктов классические математические зависимости, описывающие нагревание однородных тел при нестационарной теплопроводности.

В качестве объектов исследований выбраны мясные рубленые изделия, занимающие высокий удельный вес в ассортименте продукции пищевой промышленности и общественного питания. В наших исследованиях за критерий готовности примем температуру в центре изделия, равную +85 °С, что обусловлено технологическими и санитарно-гигиеническими требованиями, предъявляемыми к готовой продукции [8].

При проведении расчетов принимаем ряд допущений:

- мясные изделия условно рассматриваем как однородные тела;
- теплотой, поступающей от поверхности посуды, пренебрегаем;
- за модель тела принимаем конечный цилиндр (форма колбас, мясных хлебов и мясных котлет близка к данной модели);
- считаем, что массообменные процессы, протекающие в исследуемых изделиях, не оказывают влияния на процесс нагревания.

Процесс нагревания однородных тел характеризуется безразмерной температурой тела [9]:

$$\Theta = \frac{t_{ж} - t}{t_{ж} - t_0}, \quad (1)$$

где t – температура тела в момент времени τ , °С;
 $t_{ж}$ – температура греющей среды, °С;
 t_0 – начальная температура тела, °С.

Безразмерная температура тела определяется безразмерной координатой, числом Био и числом Фурье:

$$\Theta = f(\xi, Bi, Fo), \quad (2)$$

где ξ – безразмерная координата;
 Bi – число Био;
 Fo – число Фурье.

Для тел цилиндрической формы радиусом r_0 безразмерная координата R по радиусу r находится следующим образом:

$$R = \frac{r}{r_0}, \quad (3)$$

$$Bi = \frac{\alpha \times R}{\lambda}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности изделия, Вт/(м·°С);
 α – коэффициент теплоотдачи от греющей среды к нагреваемому телу, Вт/(м²·°С).

$$Fo = \frac{a \times \tau}{R^2}, \quad (5)$$

где a – коэффициент температуропроводности материала тела, м²/с.

Уравнение, описывающее нестационарное температурное поле в теле, имеет следующий вид [9]:

$$\Theta = \sum_{n=1}^{\infty} A(\mu_n) U(\mu_n \bar{\xi}) e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (6)$$

где A , U – табличные функции;

μ_n – корни характеристического уравнения $\mu = \mu(Bi)$.

Уравнение (6) описывает температурное поле тела при неупорядоченном режиме теплопроводности, характеризующимся большим влиянием начального распределения температуры.

Для бесконечного цилиндра при $Fo \geq 0,25$ ряд (6) становится быстро сходящимся, что для практических расчетов достаточно ограничиться первым членом. В этом случае изменение во времени безразмерной температуры Θ_0 на оси цилиндра $r = 0$ описывается уравнением [9], и характеризует наступление регулярного режима теплопроводности:

$$\Theta_0 = N(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo). \quad (7)$$

Уравнение (7) описывает температурные изменения при регулярном режиме теплопроводности. На данной стадии процесс полностью определяется условиями нагревания на гра-

нице тела и среды, физическими свойствами тела, его геометрической формой и размерами и не зависит от первоначального распределения температур.

Проверяем возможность расчета процесса нагревания исследуемых изделий для регулярного режима. Средний радиус натуральных рубленых изделий типа котлет и шницелей составляет 10...15 мм [8, 10]. Для расчетов принимаем величину определяющего линейного размера равную $r = 15$ мм. Продолжительность жарки мясных котлет без предварительного обжаривания на плите – 12...15 мин [11]. Расчет ведем для $\tau = 10$ мин.

Для мясной котлеты расчетное значение числа Фурье составит:

$$Fo = \frac{13,0 \times 10^{-8} \times 600}{0,015^2} = 0,346$$

Выходит $Fo > 0,25$, что свидетельствует о достижении регулярного режима нестационарной теплопроводности и позволяет использовать в расчетах уравнение (7).

Пищевые продукты представляют собой влажные тела. При тепловой обработке с поверхности изделий происходит испарение влаги. Так как греющей средой является перегретый водяной пар, то подсушивание поверхности изделий значительно снизится. Конденсация перегретого водяного пара в ходе тепловой обработки происходит, если температура поверхности изделия $t_{\text{пов}}$ ниже температуры насыщения водяного пара t_n . В результате на поверхности может образоваться пленка конденсата с толщиной, намного превышающей расстояние эффективного действия межмолекулярных сил. В объеме пара происходит конвективный теплообмен однофазной среды, осложненный поперечным потоком массы конденсирующегося пара – имеет место как бы отсос пара в пленку конденсата. Сконденсировавшийся пар отдает пленке свою теплоту фазового перехода и теплоту перегрева. Кроме того, конвективной теплоотдачей к пленке подводится часть теплоты несконденсировавшегося пара.

В результате температура на поверхности изделий в течение длительного времени не будет превышать температуру насыщения водяного пара при данном давлении в связи с наличием конденсатной пленки. К этой же температуре будет стремиться температура в центре обрабатываемых изделий. Поэтому при расчете продолжительности тепловой обработки картофеля и мясных котлет в среде перегретого водяного пара температура на поверхности принимаем постоянной и равной температуре насыщения конденсирующегося пара.

Таким образом, фиксированная температура $t_{\text{ж}}$, которая определяет граничные условия для поверхности изделий, будет равной температуре насыщения t_n . Отсюда

$$\Theta = \frac{t_H - t}{t_H - t_0} \quad (8)$$

Постоянная температура на поверхности тела соответствует $Bi \rightarrow \infty$.

Для бесконечного цилиндра при $Bi \rightarrow \infty$ $N(Bi) = 1,606$, $\mu_1 = -5,787$ [9], что позволяет в расчетах использовать следующее уравнение:

$$\Theta_r = 1,606 \exp(-5,787 Fo) \quad (9)$$

Конечный цилиндр рассматривается как результат пересечения бесконечного цилиндра диаметром $2r_0$ шаром диаметром $2r$. Следовательно, безразмерную температуру можно записать в следующем виде:

$$\Theta = \Theta_r \Theta_z \quad (10)$$

Для бесконечного шара при $Bi \rightarrow \infty$ $N(Bi) = 2,0$, $\mu_1 = -9,87$, что позволяет в расчетах использовать следующее уравнение:

$$\Theta_z = 2,0 \exp(-9,87Fo) \quad (11)$$

Расчетные данные свидетельствуют о прогнозном достижении кулинарной готовности мясных рубленых изделий исследованных размеров при тепловой обработке в среде перегретого водяного пара в пределах 10...11 мин, что соответствует нормативным рекомендациям. Таким образом, можно предположить, что законы нестационарной теплопроводности однородных тел могут быть применены по отношению к процессу нагревания пищевых продуктов.

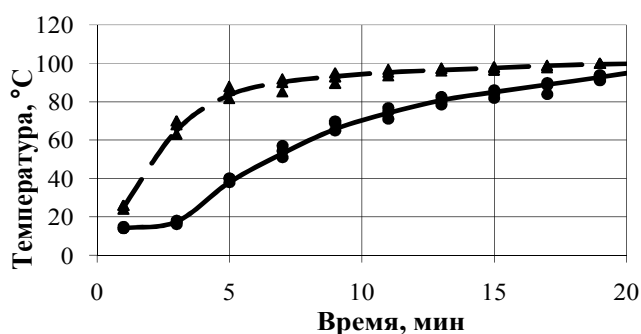
Проведенные ранее исследования показывают, что фактическое значение продолжительности жарки котлет в среде перегретого водяного пара составляет 9,5...10,5 мин. Расчетное значение близко к экспериментальному, что свидетельствует о перспективности использования закономерностей нестационарной теплопроводности для создания методики определения продолжительности тепловой обработки пищевых продуктов. Для точного прогнозирования продолжительности нагревания пищевых продуктов необходимо получение формул экспериментальным путем.

Результаты исследований и их обсуждение

Тепловая обработка исследуемых изделий осуществлялась на сетчатых поверхностях до достижения температуры в центре изделия 85°C . Температура контролировалась при помощи алюмель-хромелевых термопар сечением $0,3 \text{ мм}^2$. Жарка опытных образцов производилась в экспериментальном стенде, который представляет собой теплоизолированный шкаф с подачей перегретого водяного пара, жарка контрольных образцов – в жарочном шкафу ШЖЭ-0,51; температура греющей среды составляла 200°C .

Продолжительность тепловой обработки исследуемых изделий определялась при помощи секундомера. Секундомер включался при помещении емкости с продуктами в рабочую камеру.

На рисунке 1 представлены характерные графики зависимости роста температуры от времени при жарке мясных рубленых изделий (котлеты из натурального говяжьего фарша).



- ▲ опытные данные изменения температуры на поверхности продукта
- опытные данные изменения температуры в центре продукта

Рисунок 1 – Изменение температуры центра и подкоркового слоя изделий

В прогнозном расчете продолжительности тепловой обработки мясных рубленых изделий в среде перегретого водяного пара число Би было принято стремящимся к бесконечности. Это означает, что температура поверхности тела становится равной температуре окружающей среды в самом начале нагревания. В таком случае процесс нагревания определяется физическими свойствами и размерами тела.

Быстрый рост подкорковой температуры свидетельствует о скором прогреве поверхности мясных рубленых изделий, что в совокупности с медленным прогревом центра подтверждает выдвинутое предположение о высоком значении числа Био при тепловой обработке исследуемых изделий в среде перегретого водяного пара.

При дальнейшей обработке полученных экспериментальных данных отсчет температуры изучаемых тел для любого момента времени будем вести от температуры насыщения конденсирующегося водяного пара:

$$\vartheta = |t_n - t|, \quad (12)$$

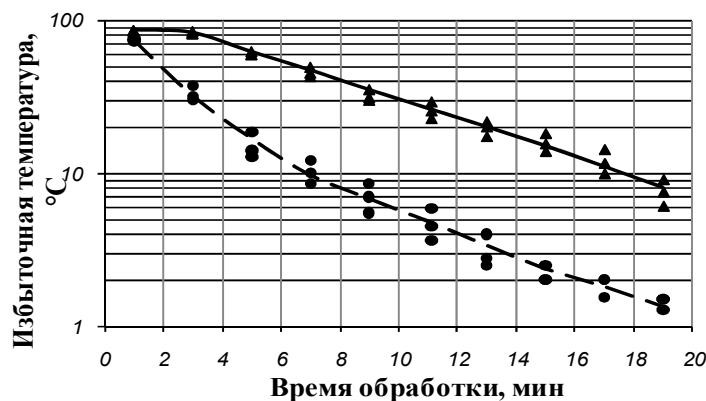
где ϑ – избыточная температура тела, °С;

t – температура тела в данный момент времени, °С;

t_n – температура насыщения конденсирующегося водяного пара, °С.

Для исследования характера процесса нагревания изделий с точки зрения теории нестационарной теплопроводности изменение избыточной температуры во времени представляем в полулогарифмических координатах.

Из рисунка 2 видно, что через 5...6 мин графики изменения избыточной температуры изображаются прямыми линиями, что соответствует регулярному режиму теплопроводности в однородном теле. При нагревании исследуемых изделий процесс нагревания осложняется дополнительными явлениями. В результате нагревания поверхности тела происходит процесс диффузии влаги из центра изделия к периферии и одновременно несколько уменьшается содержание влаги в изделии, что должно привести к некоторому изменению теплофизических свойств. Однако графики на рисунке 2 показывают, что эти явления не искажают характер регулярного режима теплопроводности. Этим экспериментально подтверждается, что законы нестационарной теплопроводности однородных тел практически можно распространить на мясные рубленые изделия, подвергаемые тепловой обработке в среде перегретого водяного пара.



▲ опытные данные изменения температуры на поверхности продукта

● опытные данные изменения температуры в центре продукта

Рисунок 2 – Изменение во времени избыточной температуры

Построенные графики свидетельствуют о наличии двух стадий в процессе тепловой обработки мясных рубленых изделий в среде перегретого водяного пара, обусловленные наличием неупорядоченного и регулярного режимов нестационарного процесса теплопроводности. На протяжении первых минут тепловой обработки исследуемых изделий скорость изменения температур внутри тела зависит от начального распределения температур, что характерно

для неупорядоченного режима. В дальнейшем начальные условия играют второстепенную роль и процесс теплопроводности определяется только условиями нагревания на границе продукта и среды, физическими свойствами тела и его геометрической формой и размерами, что свидетельствует о наступлении регулярного режима.

Регулярный режим теплопроводности в процессе нагревания изделий позволяет по итогам проведенных исследований получить критериальные уравнения (обобщающие расчетные зависимости) изменения безразмерной температуры в центре изделий от числа Фурье. Критериальные уравнения изменения безразмерной температуры в центре изделий от числа Фурье позволяют рассчитать изменения температуры в центре исследуемых изделий различных размеров.

Зависимости изменения безразмерной температуры от числа Фурье показывают, что переход к регулярному режиму теплопроводности происходит при значении числа Фурье $Fo > 0,2$ (рисунок 3).

Критериальное уравнение изменения безразмерной температуры в центре изделий для изделий из мясного натурального фарша эллипсоидной формы с отношением большего диаметра к меньшему от 1,5 до 2,0 при $Fo > 0,2$ (для меньшего диаметра) имеет вид

$$\Theta = 1,4 \exp(-4,67Fo). \quad (13)$$

Графические зависимости изменения безразмерной температуры от числа Фурье, полученные на основании расчетов по формуле (13) представлены на рисунке 3 в виде наложения на экспериментальные данные.

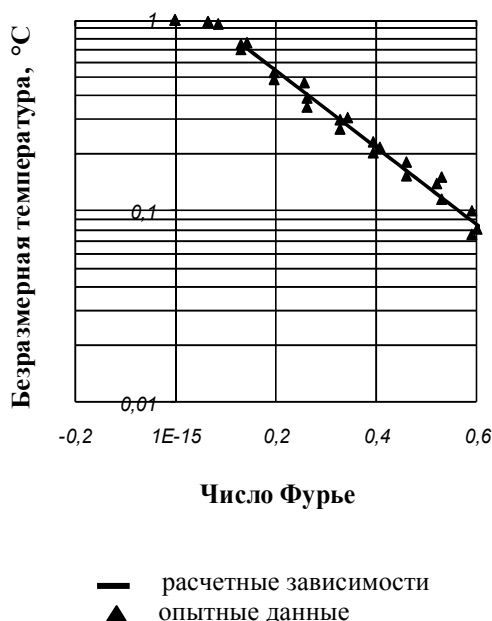


Рисунок 3 – Изменение безразмерной температуры от числа Фурье

Численные константы в полученных уравнениях не являются табличными величинами для тел правильной геометрической формы. Они являются эмпирическими коэффициентами для данной конкретной эллипсоидной формы изделий с конкретными соотношениями диаметров и особенностями, связанными с физической природой.

Найденные теоретические уравнения необходимо проверить на адекватность. Для малых выборок (с числом измерения менее 30) обычно применяют критерий согласия Фишера [12].

Расчетное значение критерия Фишера составило 1,25 при критическом значении 5,0, что свидетельствует об адекватности расчетных зависимостей реальному технологическому процессу. Доверительный интервал составляет $p_{л} = 0,95$.

Таким образом, уравнение (13) может быть использовано для определения продолжительности тепловой обработки продуктов.

С учетом вышеуказанных конечной температуры кулинарной готовности (+85 °С) и заданной фиксированной температуры (+100 °С) уравнение (13) преобразуем путем подстановки в него выражений (3) и (5). В результате получаем выражения (14) для определения продолжительности нагревания:

– для изделий из мясного натурального фарша эллипсоидной формы с отношением большего диаметра к меньшему от 1,5 до 2,0:

$$\Theta = 1,4 \exp(-4,67Fo)$$

$$\frac{t_{жс} - t}{t_{жс} - t_0} = 1,4 \exp\left(-4,67 \frac{a \times \tau}{r^2}\right)$$

$$\frac{100 - 85}{100 - t_0} = 1,4 \exp\left(-4,67 \frac{a \times \tau}{r^2}\right)$$

$$\tau = -\frac{r^2}{4,67a} \ln \frac{10,7}{100 - t_0}, \quad (14)$$

где r – радиус изделия, м;

a – коэффициент температуропроводности материала изделия, м²/с;

t_0 – начальная температура изделия, °С.

В качестве пояснений приведем примеры расчета для мясных рубленых изделий.

Пример 1.

Дано:

изделие – котлета эллипсоидной формы;

значение большего диаметра – 50 мм;

значение меньшего диаметра – 30 мм;

состав фарша: говядина – 80 %, жир-сырец – 20 %;

изделие хранилось в холодильном шкафу при температуре +7 °С.

Проверяем соотношение диаметров эллипсоида путем деления длины изделия на толщину:

$$\frac{50}{30} \approx 1,67.$$

Полученное значение находится в пределах от 1,5 до 2,0:

$$1,5 < 1,67 < 2,0.$$

Коэффициент температуропроводности a для указанного фарша согласно [13] принимаем $15,0 \times 10^{-8}$ м²/с.

Определяем продолжительность тепловой обработки изделия по (14):

$$\tau = -\frac{0,015^2}{4,67 \times 0,00000015} \ln \frac{10,7}{100 - 7} \approx 11,5 \text{ мин.}$$

Заключение

Показано, что закономерности нестационарной теплопроводности однородных тел допустимо применять для пищевых продуктов (на примере мясных рубленых изделий), подвергаемых тепловой обработке в среде перегретого водяного пара.

Получены обобщающие расчетные зависимости изменения безразмерной температуры в центре изделий от числа Фурье.

Выведены математические зависимости продолжительности жарки изделий эллипсоидной формы из натурального мясного фарша от радиуса, коэффициента температуропроводности и начальной температуры изделия, рекомендуемые к применению в производственной деятельности.

Литература

- 1 Кравченко, В. М. Научное обеспечение процессов тепловой обработки пищевого растительного сырья перегретым паром. Автор. докт. дис. – Воронеж, 2004. – 40 с.
- 2 Остриков, А.Н. Развитие научных основ и разработка способов тепловой обработки пищевого растительного сырья с использованием перегретого пара. Автор. канд. дис. – Воронеж, 1993. – 35 с.
- 3 Шевцов, С.А. Научное обеспечение процесса сушки культивируемых грибов перегретым паром при комбинированных гидродинамических режимах. Автор. канд. дис. – Воронеж, 2004. – 20 с.
- 4 Tang Z., Dehydration dynamics of potatoes in superheated steam and hot air. *Canad. Agr. Engg.*, 2000. – P. 43–49.
- 5 Головкин, Н.А. Продолжительность подмораживания говяжьих полутуш //Н.А.Головкин, Р.Г. Гейнц. – Холодильная техника, 1969. – № 2. – С. 15–21.
- 6 Ионов, А.Г. Определение конечной температуры в замороженных пищевых продуктах /А.Г. Ионов, С.Я. Мекеницкий. – Холодильная техника, 1971. – № 11 – С. 26–32.
- 7 Ball C.O., Olson F.C.: Sterilization in food technology. McGraw-Hill Book Comp. Inc. New York, Toronto, 1977. – P. 123–129.
- 8 Баранов, В.С. Технология производства продукции общественного питания: Учебник для студентов, обуч. по спец. 1011 «Технология и орг. общественного питания» / В.С. Баранов, А.И. Мглинец, Л.М. Алешина и др. – М.: Экономика, 1986. – 400 с.
- 9 Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общей редакцией Е.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с., ил. – (Теплоэнергетика и теплотехника).
- 10 Сборник рецептур блюд и кулинарных изделий для предприятий общественного питания всех форм собственности / сост. Вержбицкая В.Д., Корольчик Т.А. – Минск: «Белорусская ассоциация кулинаров», 1996. – 616 с.
- 11 Геймберг, В.Г. Гигиеническое обоснование режима тепловой обработки рубленых мясных изделий. – Вопросы питания, 1966. № 2. – С. 71 – 76.
- 12 Пытьев, Ю.П. Математические методы интерпретации эксперимента: Учеб. пособие для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1989. – 351 с.
- 13 Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник/ А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская. – М.: Агропромиздат, 1990. – 211 с.

Поступила в редакцию 22.05.2018