

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕЛ  
БЕСКОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ ЗАПЕКАНИЯ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЯСНОГО ФАРША В КОНВЕКЦИОННЫХ  
АППАРАТАХ**

**Смагина М.Н.**

**Научный руководитель – Смоляк А.А., к.т.н., доцент  
Могилевский государственный университет продовольствия  
г. Могилев, Беларусь**

В настоящее время товарный рынок мясопродуктов характеризуется широким ассортиментом, потребительский спрос на традиционные изделия полностью удовлетворен. В результате при насыщенном рынке возникает задача поиска новых изделий и совершенствование существующих. Производители все большее внимание обращают на выпуск мелкоштучных изделий, освоение нетрадиционной продукции, среди которой запеченные изделия из мясных фаршей, внедрение в производственный процесс современных конвекционных и ротационных аппаратов.

Процессы нагревания при запекании изделий из мясного фарша изучены недостаточно в сравнении с процессами копчения, сушки, варки, вяления и ограничены рассмотрением частных случаев для тел конечных размеров и конкретных рецептур.

В данной работе поставлена задача провести математическое описание процесса нестационарной теплопроводности для операций запекания изделий из мясного фарша в условиях вынужденной циркуляции греющей среды при прямом контакте теплоносителя с поверхностью продукта.

При проведении данных исследований приняли решение отойти от традиционно принятого изучения особенностей нагревания изделий конкретных рецептур, заданных форм и размеров и переходить к обобщающим исследованиям для безразмерных тел. Подобный подход позволит выявить общие закономерности изучаемых процессов, определить коэффициенты для расчета процесса нагревания мясопродуктов безграничных форм в конвекционных и ротационных печах, применять их в практической деятельности при работе с конкретными изделиями, которые физически являются телами конечных размеров, т.е. частными случаями безграничных тел.

Вместо конкретных рецептур фаршей работали с двумя вариантами измельченного мяса. Фарш из куриного филе без кожи характеризуется высоким содержанием белка, низким содержанием жира, высокой влажностью. Фарш из лопаточной части свинины характеризуется средним содер-

жанием белка, высоким содержанием жира, низкой влажностью. Исследование данных образцов позволяет изучить влияние на процесс нагревания мясных фаршей различных нутриентов и оценить влияние движения влаги, плавления жира и денатурации белков.

При расчете зависимости  $\theta = f(Bi, Fo, x/l)$ , описывающей регулярный режим нестационарной теплопроводности, возникают вопросы учета изменения теплофизических характеристик материала при нагревании, выбора фиксирующей температуры внешней греющей среды, влияния нутриентного состава и пр.

Проведенные исследования выявили определенное влияние на характер протекания теплообменных процессов физико-химических изменений нутриентов. Так, при исследованных температурных режимах, вариантов форм и фаршей наблюдается искажение характера регулярного режима (деформация кривой  $\theta = f(Fo)$ ), соответствующих температуре активных денатурационных процессов белка.

Предложено ввести в расчет эквивалентные числа Био и Фурье, учитывающие изменения теплофизических характеристик материала. Для внутренних слоев значения коэффициентов теплопроводности и теплопроводности в процессе преобразования сырого фарша в готовый продукт целесообразно определять как среднее для граничных значений. Для поверхностных слоев в ходе преобразования из сырого фарша в запеченную корку характерен параболический закон изменения температуры, что определяет применяемую формулу расчета коэффициентов. Итоговые значения теплофизических коэффициентов, применяемых при расчетах числа Фурье и Био для конкретных изделий, находятся с учетом толщины корки и полутолщины внутренних слоев.

В качестве фиксированной температуры в описании процесса нагревания внутренних слоев согласно проведенным экспериментальным исследованиям предпочтительно применять температуры греющей среды в рабочей камере, нежели температуру насыщения водяных паров, образующихся в корке изделия.

Регулярный режим теплопроводности в процессе нагревания изделий позволяет по итогам проведенных исследований получить критериальные уравнения изменения безразмерной температуры в центре от числа Фурье.

Применение в экспериментальных исследованиях тел бесконечных размеров позволяет сравнить полученные коэффициенты  $N(Bi)$  и  $\mu_1^2$  с табличными значениями для одномерных твердых тел. Характер и динамика изменения коэффициентов  $N(Bi)$  и  $\mu_1^2$  с ростом числа Био в целом идентичны и для процесса нагревания твердых тел и для процесса нагревания мясных фаршей

Полученные в ходе эксперимента коэффициенты  $N(Bi)$  и  $\mu_1^2$  имеют несколько меньшие значения по сравнению с табличными данными для твер-

дых тел (таблица 1). Снижение интенсивности теплообмена обусловлено активными массообменными процессами в толще изделия и дополнительными затратами теплоты на процессы денатурации белковых соединений, плавления жиров, испарения свободной влаги и пр.

Также обращает внимание несколько меньшие значения расчетных коэффициентов для изделий, обработанных в паровоздушной среде высокой влажности. Данный эффект связан с особенностями колебаний температурных градиентов в начальный и основной этап тепловой обработки при использовании в качестве теплоносителя нагретого воздуха или перегретого пара, выявленными в ходе исследований.

Таблица 1–Критериальные уравнение  $\theta = f(Fo)$  для центра изделий при использовании эквивалентных значений  $Bi$  и  $Fo$

Вид материала	Температура греющей среды, °С	Греющая среда			
		нагретый воздух		паровоздушная смесь влажностью 70-80%	
		$Bi_{экв}$	уравнение	$Bi_{экв}$	уравнение
Форма – бесконечный цилиндр					
Фарш вода – 73,5%, жир – 1,9%, белок – 3,6%	160	2,54	$\Theta = 1,224e^{-2,48Fo}$	2,44	$\Theta = 1,053e^{-2,118Fo}$
	180	2,56	$\Theta = 1,227e^{-2,54Fo}$	2,47	$\Theta = 1,091e^{-2,12Fo}$
	200	2,59	$\Theta = 1,239e^{-2,5412Fo}$	2,51	$\Theta = 1,117e^{-2,123Fo}$
	220	2,63	$\Theta = 1,275e^{-2,564Fo}$	2,55	$\Theta = 1,135e^{-2,127Fo}$
Фарш вода – 55,1 %, жир – 29,4 %, белок – 14,7%	160	2,38	$\Theta = 1,158e^{-2,045Fo}$	2,24	$\Theta = 1,042e^{-2,0109Fo}$
	180	2,4	$\Theta = 1,165e^{-2,057Fo}$	2,27	$\Theta = 1,087e^{-2,0114Fo}$
	200	2,44	$\Theta = 1,169e^{-2,062Fo}$	2,31	$\Theta = 1,112e^{-2,0116Fo}$
	220	2,48	$\Theta = 1,171e^{-2,065Fo}$	2,35	$\Theta = 1,128e^{-2,012Fo}$
Форма – бесконечная пластина					
Фарш вода – 73,5%, жир – 1,9%, белок – 23,6%	160	1,68	$\Theta = 1,121e^{-0,55Fo}$	1,22	$\Theta = 1,086e^{-0,547Fo}$
	180	1,69	$\Theta = 1,125e^{-0,561Fo}$	1,24	$\Theta = 1,098e^{-0,55Fo}$
	200	1,71	$\Theta = 1,142e^{-0,568Fo}$	1,25	$\Theta = 1,126e^{-0,552Fo}$
	220	1,73	$\Theta = 1,1614e^{-0,57Fo}$	1,28	$\Theta = 1,145e^{-0,555Fo}$
Фарш вода – 55,1 %, жир – 29,4 %, белок – 14,7%	160	1,51	$\Theta = 1,037e^{-0,48Fo}$	1,15	$\Theta = 1,022e^{-0,4419Fo}$
	180	1,52	$\Theta = 1,061e^{-0,4805Fo}$	1,17	$\Theta = 1,061e^{-0,442Fo}$
	200	1,53	$\Theta = 1,074e^{-0,481Fo}$	1,19	$\Theta = 1,114e^{-0,4442Fo}$
	220	1,55	$\Theta = 1,105e^{-0,4812Fo}$	1,21	$\Theta = 1,135e^{-0,4422Fo}$