

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ГИДРОБИОНТОВ

DOI: 10.24143/2073-5529-2020-2-142-152
УДК 664.952/.957 + [51-74]

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЫБНЫХ ФАРШЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ В ПАРОКОНВЕКТОМАТЕ

Д. В. Титов, Н. В. Долганова

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

В качестве альтернативы процессу обжаривания рыбных фаршевых изделий предложено их запекание в пароконвектомате в режиме конвекции. Для определения оптимальных технологических параметров термической обработки в пароконвектомате разработана методика оптимизации. Оптимизация технологических параметров термообработки осуществлялась на основе математического моделирования. Для этого использовали методы корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализов. Была построена оптимизационная математическая модель, состоящая из целевой функции и системы ограничений. Целевая функция представляет собой двухфакторную регрессионную модель, которая функционально связывает выход готовых изделий (параметр оптимизации), температуру и продолжительность процесса запекания. Целевая функция подлежала условной максимизации. Система ограничений состоит из одного уравнения и четырех неравенств. Данные ограничения учитывают кулинарную готовность и органолептические свойства изделий, энергетические затраты, а также диапазон изменения температуры в рабочей камере пароконвектомата. Максимальное значение целевой функции с учетом всех ограничений было найдено в программе MS Excel методом обобщенного приведенного градиента. В результате были получены оптимальные технологические параметры процесса термообработки в пароконвектомате: температура 231 °С, продолжительность процесса – 11 минут. При этом выход готовых рыбных фаршевых изделий составил 86,7 %, а энергетические затраты не превышают 1 кВт·ч. Полученные результаты экспериментально подтверждены. Готовые изделия имели высокие органолептические показатели качества: суммарная оценка составила 19,5 баллов. Была определена пищевая и энергетическая ценность биточков из тилапии. В 100 г продукта количество белков составляет 12,8 г, жиров – 3,8 г, углеводов – 11,4 г, энергетическая ценность – 128 ккал.

Ключевые слова: оптимизация, оптимальные технологические параметры, термическая обработка, рыбные фаршевые изделия, пароконвектомат, математическая модель.

Для цитирования: Титов Д. В., Долганова Н. В. Оптимизация технологических параметров термической обработки рыбных фаршевых изделий в пароконвектомате // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2020. № 2. С. 142–152. DOI: 10.24143/2073-5529-2020-2-142-152.

Введение

Термическую обработку фаршевых кулинарных изделий на предприятиях индустрии питания по традиционной технологии осуществляют в электрических сковородах (обжаривание в растительном масле) и доводят до готовности в духовых шкафах или пароконвектоматах. Данный способ термообработки требует определенных затрат электроэнергии, которые влияют

на себестоимость готовой продукции. В Астраханской области цена на электроэнергию для малых предприятий в 2019 г., по сравнению с 2015 г., повысилась в 2 раза (3 руб. и 6 руб. за кВт · ч соответственно). Стремительный рост стоимости энергоресурсов поднимает вопрос об экономичном и энергосберегающем производстве. Кроме того, обжаривание как способ тепловой обработки имеет ряд недостатков:

- жареная пища не полезна (в продукте содержатся перекиси и гидроперекиси, трансизомеры жирных кислот, меланоидины, которые уменьшают пищевую и биологическую ценность белков, и другие токсичные соединения, которые образуются в процессе жарки);
- обжаривание – трудоемкий процесс, требующий постоянного контроля (переворачивание изделий, очистка масла от кусочков пищи);
- использование масла для жарки увеличивает себестоимость и стоимость готовых изделий.

Существует альтернатива процессу обжаривания – это запекание в пароконвектомате. Но для использования этой технологии необходимо определить оптимальные технологические параметры термообработки (температуру и продолжительность процесса запекания), которые позволят снизить энергетические затраты, увеличивая при этом экономическую эффективность производства. Также это обеспечит максимальный выход готовых изделий, высокий уровень качества и поможет сделать данную продукцию более конкурентоспособной.

Целью данного научного исследования являлось совершенствование технологии рыбных фаршевых изделий путем оптимизации технологических параметров термической обработки в пароконвектомате.

Объекты и методы исследования

Объектами данного научного исследования выступали:

- образцы рыборастворительных фаршевых полуфабрикатов («Биточки из тилапии по-деревенски»);
- образцы термически обработанных рыборастворительных фаршевых полуфабрикатов («Запеченные биточки из тилапии по-деревенски»).

Биточки из тилапии имеют круглую приплюснутую форму, высота изделия – 20 мм, диаметр – 65 мм, масса биточка – 75 г (рис. 1).



Рис. 1. «Биточки из тилапии по-деревенски» (полуфабрикат)

Используемое для приготовления биточков из тилапии сырье (филе тилапии, яйца куриные, манная крупа, картофель, лук репчатый, морковь, чеснок свежий, зелень укропа, поваренная соль, перец черный молотый, сухари пшеничные панировочные, масло подсолнечное рафинированное) соответствовали требованиям действующей нормативно-технической документации, в том числе СанПиН 2.3.2.1078-01 [1].

Обработку и анализ данных проводили с использованием математических методов (регрессионный, корреляционный и дисперсионный анализы, дифференцирование функций с несколькими переменными, метод ротатабельного центрального композиционного планирования, метод обобщенного приведенного градиента), которые были реализованы средствами компьютерных программ MS Excel, Mathcad, Statistica v.10.

Для установления пищевой ценности биточков из тилапии определяли количество белка методом Кьельдаля, количество жира – методом Сокслета, углеводы – расчетным способом (для этого определяли количество воды арбитражным методом и золы – методом озоления без ускорителя). Количество углеводов, г, рассчитывали по формуле [2]

$$У = 100 - Б - Ж - В - З,$$

где 100 – масса продукта, г; Б – количество белка, г; Ж – количество жира, г; В – количество воды, г; З – количество золы, г.

Энергетическую ценность, ккал, готовых изделий определяли по формуле

$$ЭЦ = 4 \cdot Б + 9 \cdot Ж + 3,75 \cdot У,$$

где 4, 9 и 3,75 – коэффициенты, характеризующие энергетическую ценность белков, жиров и усвояемых углеводов соответственно при окислении в организме человека, ккал/г; Б – количество белка, г; Ж – количество жира, г; У – количество углеводов, г.

Определение органолептических показателей качества запеченных кулинарных изделий проводилось согласно ГОСТ 31986-2012 [3]. Качество изделий оценивалось по 5-балльной шкале. Дегустационная комиссия состояла из 5 человек.

Методика оптимизации технологических процессов термической обработки в пароконвектомате

Для разработки оптимизационной математической модели процесса термической обработки в пароконвектомате необходимо получить целевую функцию и выбрать ограничения.

Построение целевой функции. Априорное ранжирование параметров оптимизации показало, что наиболее значимыми из них являются выход готовых изделий, органолептические свойства изделий, энергетические затраты и количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), или общая бактериальная обсемененность. Параметром оптимизации был выбран выход готовых изделий y , %. Температура термообработки T , °С, и продолжительность процесса τ , мин, являются входными независимыми факторами, которые наиболее вероятно оказывают влияние на параметр оптимизации y . Фактор T варьировали в пределах 180–240 °С с шагом в 15 °С, а фактор τ – в диапазоне от 5 до 26 мин. Для определения целевой функции процесса термической обработки в пароконвектомате $y = f(T, \tau)$ составили план эксперимента (табл. 1).

Таблица 1

План эксперимента по установлению зависимости $y = f(T, \tau)$

| Номер опыта | Входные факторы | | Номер опыта | Входные факторы | |
|-------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|--------------|
| | T , °С | τ , мин | | T , °С | τ , мин |
| 1 | 240 | 10 | 9 | 225 | 13 |
| 2 | 180 | 21 | 10 | 210 | 10 |
| 3 | 225 | 18 | 11 | 210 | 20 |
| 4 | 240 | 5 | 12 | 180 | 26 |
| 5 | 225 | 8 | 13 | 240 | 15 |
| 6 | 195 | 24 | 14 | 210 | 15 |
| 7 | 180 | 16 | 15 | 195 | 14 |
| 8 | 195 | 19 | – | – | – |

Биточки из тилапии (по 3 шт. на опыт) обрабатывали в режиме конвекции пароконвектомата Unox XVC 304 (рис. 2) в соответствии с табл. 1.



Рис. 2. Пароконвектомат Unox XVC 304

После проведения каждого опыта готовые биточки взвешивали на электронных весах и рассчитывали их выход, %, по формуле

$$y = \frac{M_{\text{ги}}}{M_{\text{пф}}} \cdot 100,$$

где y – выход готовых изделий, %; $M_{\text{ги}}$ – масса готовых изделий, г; $M_{\text{пф}}$ – масса полуфабриката. Для установления целевой функции были использованы наиболее подходящие типы регрессионных моделей, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Типы используемых регрессионных моделей

| Тип уравнения регрессии | Название уравнения регрессии |
|--|---------------------------------|
| $\hat{y} = a_0 + a_1 T + a_2 \tau$ * | Линейная |
| $\hat{y} = a_0 + a_1 \ln T + a_2 \tau$ | Линейно-логарифмическая |
| $\hat{y} = a_0 + a_1 T + a_2 \ln \tau$ | Линейно-логарифмическая |
| $\hat{y} = a_0 + a_1 \ln T + a_2 \ln \tau$ | Двойная линейно-логарифмическая |
| $\ln \hat{y} = a_0 + a_1 T + a_2 \tau$ | Логарифмически-линейная |
| $\ln \hat{y} = a_0 + a_1 \ln T + a_2 \tau$ | Двойная логарифмическая |
| $\ln \hat{y} = a_0 + a_1 T + a_2 \ln \tau$ | Двойная логарифмическая |
| $\ln \hat{y} = a_0 + a_1 \ln T + a_2 \ln \tau$ | Тройная логарифмическая |

* \hat{y} – параметр оптимизации; a_0, a_1, a_2 – искомые коэффициенты регрессии.

В программе MS Excel на основе полученных данных определяли коэффициенты регрессии, коэффициенты множественной детерминации (R^2), F-критерии Фишера и t-критерии Стьюдента (уровень значимости 5 %). После проведения сравнительного анализа из восьми регрессионных моделей была выбрана одна самая лучшая и адекватная.

Построение системы ограничений. Первым ограничением является установление температурного диапазона. Для нахождения оптимальной температуры термообработки необходимо задать значения минимальной температуры T_{min} и максимально возможной температуры T_{max} .

Второе ограничение должно соответствовать кулинарной готовности и санитарным нормативам (КМАФАНМ не более $1 \cdot 10^4$). Поэтому необходимо построить двухмерную регрессионную модель вида $\tau = g(T)$, которая позволит установить корреляцию между фактором T и фактором τ . Для выполнения этой задачи был составлен план эксперимента (табл. 3).

Таблица 3

План эксперимента по установлению зависимости $\tau = g(T)$

| Номер опыта | Температура | Номер опыта | Температура |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | $T, ^\circ\text{C}$ | | $T, ^\circ\text{C}$ |
| 1 | 200 | 4 | 190 |
| 2 | 180 | 5 | 210 |
| 3 | 220 | 6 | 230 |

Чтобы получить модель кулинарной готовности с учетом санитарных нормативов, необходимо определять температуру в центре изделий. Согласно СанПиН 2.3.4.050-96 [4] температура внутри рыбных кулинарных изделий должна быть не ниже 80°C . При достижении температуры в 80°C необходимо продлить термообработку еще на 5 мин, чтобы изделия соответствовали требованиям качества.

По плану, приведенному в табл. 3, было проведено 6 опытов (3 биточка на опыт). Температуру в центре изделий определяли с помощью встроенного в пароконвектомат термощупа. После каждого опыта проводилась органолептическая оценка готовых биточков, которая подтвердила полученные данные по продолжительности термообработки в зависимости от различных значений температур.

Для установления зависимости $\tau = g(T)$ были использованы наиболее подходящие типы регрессионных моделей:

$$\tau = c_0 + c_1 T; \tau = c_0 + c_1 \ln T; \ln \tau = c_0 + c_1 \ln T; \tau = c_0 + c_1 T^{-1},$$

где c_0, c_1 – искомые коэффициенты регрессии.

В программе MS Excel на основе полученных данных определяли коэффициенты регрессии, коэффициенты детерминации (R^2), F-критерии Фишера и t-критерии Стьюдента (уровень значимости 5 %). После проведения сравнительного анализа из пяти регрессионных моделей была выбрана одна самая лучшая и адекватная.

Третье ограничение – зависимость $\hat{q} = Q(T, \tau)$ – двухфакторная регрессионная модель органолептических свойств изделий после термообработки, где Q – функция связи между выходным фактором q и входными факторами T и τ ; \hat{q} – расчетное значение суммы баллов органолептической оценки; $Q(T, \tau) \geq 18$, т. е. изделие должно иметь не меньше 18 баллов по итогам органолептической оценки.

Для установления эмпирической зависимости $\hat{q} = Q(T, \tau)$ между органолептической оценкой формованных кулинарных изделий (сумма баллов органолептической оценки) q , температурой T и продолжительностью термообработки τ был составлен ротатабельный центральный композиционный план для двух факторов (табл. 4).

Таблица 4

Ротатабельный центральный композиционный план для моделирования органолептических свойств запеченных рыбных фаршевых изделий

| Система опытов | № опыта | Температура термообработки | | Продолжительность термообработки | |
|---------------------------|---------|-------------------------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| | | Кодированные значения X_1^* | Натуральные значения $T, ^\circ\text{C}$ | Кодированные значения X_2^* | Натуральные значения τ , мин |
| ПФЭ** типа 2 ² | 1 | +1 | 225 | +1 | 22 |
| | 2 | +1 | 225 | -1 | 12 |
| | 3 | -1 | 185 | +1 | 22 |
| | 4 | -1 | 185 | -1 | 12 |
| Опыты в звездных точках | 5 | -1,414 | 177 | 0 | 17 |
| | 6 | +1,414 | 233 | 0 | 17 |
| | 7 | 0 | 205 | -1,414 | 10 |
| | 8 | 0 | 205 | +1,414 | 24 |
| Опыты в центре плана | 9 | 0 | 205 | 0 | 17 |
| | 10 | 0 | 205 | 0 | 17 |
| | 11 | 0 | 205 | 0 | 17 |
| | 12 | 0 | 205 | 0 | 17 |
| | 13 | 0 | 205 | 0 | 17 |

* X_1 и X_2 – кодированные значения для натуральных значений входных факторов.

** Полный факторный эксперимент типа 2², где основание степени 2 – количество уровней варьирования каждого входного фактора, а показатель степени 2 – количество входных факторов.

Кодированное значение фактора (X_i) определяли по формуле [5]

$$X_i = \frac{c_i - c_{i0}}{\varepsilon_i},$$

где i – номер входного фактора; X_i – кодированное значение фактора; c_i и c_{i0} – натуральные значения фактора (текущее значение и на основном уровне соответственно); ε_i – интервал варьирования.

Реализация опытов по плану эксперимента позволяет построить модель вида

$$\hat{q} = b_0 + b_1 T + b_2 \tau + b_{12} T\tau + b_{11} T^2 + b_{22} \tau^2,$$

где $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ – искомые коэффициенты полиномиальной модели.

Четвертое ограничение – минимальные энергетические затраты. Номинальная мощность пароконвектомата составляет 5,3 кВт. Тогда, если фактор τ измеряется в минутах, уравнение расхода электроэнергии имеет следующий вид: $W = 0,0883 \cdot \tau$. Минимальные энергетические

затраты, которые требуются для термообработки, не должны превышать 1 кВт·ч, т. е. ограничение принимает вид неравенства $0,0883 \cdot \tau \leq 1$.

Задача оптимизации – найти условный максимум целевой функции. Структура оптимизационной математической модели в общем виде имеет вид

$$\hat{y} = f(T, \tau) \rightarrow \max \begin{cases} Q(T, \tau) \geq 18; \\ \tau - g(T) = 0; \\ 0,0883\tau \leq 1; \\ T \geq T_{\min}; \\ T \leq T_{\max}. \end{cases}$$

Значения оптимальных факторов T и τ находили в MS Excel методом обобщенного приведенного градиента. Оптимальные технологические параметры термической обработки соответствуют максимальному выходу продукции, минимальным энергетическим затратам и высоким органолептическим показателям качества.

Разработка оптимизационной математической модели

Оптимизационная математическая модель термической обработки рыбных фаршевых изделий в пароконвектомате позволит определить оптимальные значения параметров – температуры и продолжительности термообработки.

После осуществления плана эксперимента (см. табл. 1) были получены данные, представленные в табл. 5.

Таблица 5

Стохастическая связь между y , T и τ

| Номер опыта | Входные факторы | | Параметр оптимизации Выход, y , % | Номер опыта | Входные факторы | | Параметр оптимизации Выход, y , % |
|-------------|-----------------|--------------|--|-------------|-----------------|--------------|--|
| | T , °C | τ , мин | | | T , °C | τ , мин | |
| 1 | 240 | 10 | 88,5 | 9 | 225 | 13 | 85,5 |
| 2 | 180 | 21 | 82,5 | 10 | 210 | 10 | 91,0 |
| 3 | 225 | 18 | 80,0 | 11 | 210 | 20 | 80,0 |
| 4 | 240 | 5 | 96,0 | 12 | 180 | 26 | 81,5 |
| 5 | 225 | 8 | 92,0 | 13 | 240 | 15 | 82,0 |
| 6 | 195 | 24 | 80,5 | 14 | 210 | 15 | 87,0 |
| 7 | 180 | 16 | 89,0 | 15 | 195 | 14 | 88,0 |
| 8 | 195 | 19 | 83,0 | – | – | – | – |

На основе этих данных были получены двухфакторные регрессионные модели с помощью MS Excel, обобщенная характеристика которых приведена в табл. 6.

Таблица 6

Обобщенная характеристика регрессионных моделей

| Уравнение регрессии | R^2 | F-критерий Фишера | t-критерий Стьюдента | | | \bar{A}^* , % |
|--|-------|-------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------------|
| | | | t_{a_0} | t_{a_1} | t_{a_2} | |
| $\hat{y} = 127,468 - 0,121T - 1,042\tau$ | 0,912 | 61,89 | 18,72 | 4,52 | 10,45 | 1,37 |
| $\hat{y} = 239,105 - 25,649 \ln T - 1,0463\tau$ | 0,916 | 65,76 | 7,95 | 4,72 | 10,80 | 1,35 |
| $\hat{y} = 147,822 - 0,118T - 14,005 \ln \tau$ | 0,964 | 159,22 | 27,94 | 7,01 | 16,83 | 0,85 |
| $\hat{y} = 253,373 - 24,408 \ln T - 13,959 \ln \tau$ | 0,963 | 158,81 | 12,56 | 7,00 | 16,84 | 0,83 |
| $\ln \hat{y} = 4,939 - 0,0014T - 0,0121\tau$ | 0,917 | 66,57 | 65,04 | 4,79 | 10,88 | 1,50 |
| $\ln \hat{y} = 6,255 - 0,303 \ln T - 0,0121\tau$ | 0,922 | 70,99 | 18,69 | 5,00 | 11,26 | 1,30 |
| $\ln \hat{y} = 5,168 - 0,0014T - 0,161 \ln \tau$ | 0,957 | 132,93 | 77,72 | 6,51 | 15,41 | 1,10 |
| $\ln \hat{y} = 6,399 - 0,285 \ln T - 0,161 \ln \tau$ | 0,957 | 132,27 | 25,20 | 6,50 | 15,40 | 0,91 |

*A – средняя относительная ошибка аппроксимации.

Наиболее подходящая модель выбиралась исходя из следующих условий:

– $R^2 > 0,5$;

– расчетные значения F-критерия и t-критериев должны превосходить табличные: $F_{\text{табл}}(0,05; 2; 12) = 3,88$; $t_{\text{табл}}(0,05; 12) = 2,18$;

– средняя относительная ошибка аппроксимации $\bar{A} < 10\%$.

Проведя сравнительный анализ моделей регрессии, выбираем линейно-логарифмическую модель $\hat{y} = 147,822 - 0,118T - 14,005 \ln \tau$ (целевая функция), которая соответствует всем вышеперечисленным условиям.

Коэффициент детерминации R^2 , равный 0,964, показывает, что вариация выхода готовых изделий на 96,4 % обусловлена факторами T и τ . Следовательно, эти факторы существенно влияют на параметр оптимизации. Модель является адекватной с вероятностью более 95 %.

Интерпретация математической модели

Для определения наибольшего влияния входных факторов на параметр оптимизации применяют средние коэффициенты эластичности, рассчитываемые по формулам

$$\Theta_T = \frac{\partial \hat{y}}{\partial T} \frac{\bar{T}}{\hat{y}(\bar{T}, \bar{\tau})}; \quad (1)$$

$$\Theta_\tau = \frac{\partial \hat{y}}{\partial \tau} \frac{\bar{\tau}}{\hat{y}(\bar{T}, \bar{\tau})}, \quad (2)$$

где $\partial \hat{y} / \partial T$ ($\partial \hat{y} / \partial \tau$) – частная производная функции \hat{y} по переменной T (τ); \bar{T} ($\bar{\tau}$) – среднее значение переменной T (τ); $\hat{y}(\bar{T}, \bar{\tau})$ – значение функции \hat{y} при среднем значении переменных T и τ .

Рассчитаем коэффициенты эластичности по формулам (1), (2):

$$\Theta_T = \frac{\partial(147,822 - 0,118\bar{T} - 14,005 \ln \bar{\tau})}{\partial \bar{T}} \frac{\bar{T}}{147,822 - 0,118\bar{T} - 14,005 \ln \bar{\tau}} = -0,118 \frac{210}{84,629} = -0,292;$$

$$\Theta_\tau = \frac{\partial(147,822 - 0,118\bar{T} - 14,005 \ln \bar{\tau})}{\partial \bar{\tau}} \frac{\bar{\tau}}{147,822 - 0,118\bar{T} - 14,005 \ln \bar{\tau}} = \frac{-14,005}{\bar{\tau}} \frac{\bar{\tau}}{84,629} = -0,165.$$

Сравнение средних коэффициентов эластичности приводит к следующему выводу: наибольшее влияние на выход готовых изделий оказывает фактор T – увеличение температуры на 1 % приводит к уменьшению выхода на 0,292 %, а повышение продолжительности τ на 1 % приводит к снижению выхода всего лишь на 0,165 %.

Трехмерный график целевой функции изображен на рис. 3.

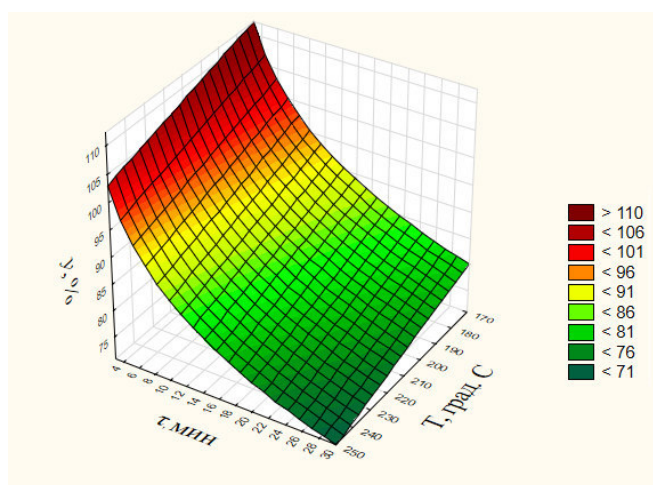


Рис. 3. Трехмерный график целевой функции

Графическая модель наглядно показывает, что с ростом температуры и продолжительности термообработки выход готовой продукции уменьшается. По графику целевой функции нельзя определить область локализации оптимальных параметров.

На следующем этапе необходимо выбрать ограничения, накладываемые на целевую функцию. *Первым ограничением* является установление температурного диапазона. Минимальная температура термообработки – 170 °С. Максимальная температура составляет 260 °С. Поэтому данное ограничение должно отвечать неравенству $170 \leq T \leq 260$.

Вторым ограничением является модель кулинарной готовности $\tau = g(T)$. После осуществления плана эксперимента (см. табл. 3) были получены данные, представленные в табл. 7.

Таблица 7

Стохастическая связь между τ и T

| Номер опыта | Температура T , °С | Продолжительность термообработки τ , мин |
|-------------|----------------------|---|
| 1 | 200 | 14,0 |
| 2 | 180 | 15,5 |
| 3 | 220 | 12,0 |
| 4 | 190 | 14,5 |
| 5 | 210 | 13,0 |
| 6 | 230 | 11,5 |

На основе этих данных были получены однофакторные регрессионные модели с помощью MS Excel, обобщенная характеристика которых приведена в табл. 8.

Таблица 8

Обобщенная характеристика однофакторных моделей

| Уравнение регрессии | R^2 | F-критерий Фишера | t-критерий Стьюдента | | \bar{A} , % |
|--|--------|-------------------|----------------------|-----------|---------------|
| | | | t_{a_0} | t_{a_1} | |
| $\tau = 30,1095 - 0,0814T$ | 0,991 | 443,05 | 37,84 | 21,05 | 0,88 |
| $\tau = 101,7908 - 16,613 \ln T$ | 0,9908 | 432,14 | 23,94 | 20,79 | 0,82 |
| $\ln \tau = 3,8411 - 0,0061T$ | 0,9903 | 411,46 | 62,11 | 20,28 | 0,86 |
| $\ln \tau = 9,1994 - 1,2423 \ln T$ | 0,987 | 308,78 | 24,46 | 17,57 | 0,99 |
| $\tau = -3,123 + 3366,97 \cdot T^{-1}$ | 0,988 | 329,02 | 3,41 | 18,14 | 0,93 |

Наиболее подходящая модель выбиралась исходя из следующих условий:

– $R^2 > 0,5$;

– расчетные значения F-критерия и t-критериев должны превосходить табличные:

$F_{\text{табл}}(0,05;1;4) = 7,71$; $t_{\text{табл}}(0,05;4) = 2,78$;

– средняя относительная ошибка аппроксимации $\bar{A} < 10$ %.

Проведя сравнительный анализ моделей регрессии, выбираем линейную модель $\tau = 30,1095 - 0,0814T$, которая соответствует всем вышеперечисленным условиям. Коэффициент детерминации R^2 , равный 0,991, показывает, что вариация продолжительности термообработки на 99,1 % обусловлена таким фактором, как температура. Модель является адекватной с вероятностью более 95 %.

Третье ограничение – $\hat{q} = Q(T, \tau)$ – двухфакторная регрессионная модель органолептических свойств изделий после термообработки.

В результате реализации плана эксперимента (см. табл. 4) была получена стохастическая связь между q , T и τ . На основе этих данных была разработана адекватная математическая модель, которая точно характеризует органолептические свойства готовых рыбных кулинарных изделий:

$$\hat{q} = -161,2931 + 1,1887T + 7,4946\tau - 0,02625T\tau - 0,001898T^2 - 0,07036\tau^2.$$

Третье ограничение задается неравенством $\hat{q} \geq 18$.

Четвертое ограничение – минимальные энергетические затраты, которые задаются неравенством $0,0883 \cdot \tau \leq 1$.

В результате оптимизационная модель термической обработки выглядит следующим образом:

$$\hat{y} = 147,822 - 0,118T - 14,005 \ln \tau \rightarrow \max;$$

$$\begin{cases} -161,2931 + 1,1887T + 7,4946\tau - 0,02625T\tau - 0,001898T^2 - 0,07036\tau^2 \geq 18; \\ \tau - 30,1095 + 0,0814T = 0; \\ 0,0883\tau \leq 1; \\ T \geq 170; \\ T \leq 260. \end{cases}$$

Максимальное значение целевой функции находили в MS Excel методом обобщенного приведенного градиента. В итоге было найдено оптимальное решение: $T = 230,77$ °С, $\tau = 11,33$ мин, $y = 86,7$ %.

Таким образом, для термообработки биточков из тилапии в пароконвектомате в режиме конвекции оптимальными параметрами являются: температура 231 °С, продолжительность процесса 11 мин. При найденном оптимальном режиме выход готовых изделий является максимальным и составляет приблизительно 87 %.

Разработанная оптимизационная математическая модель была экспериментально подтверждена. Органолептическая оценка кулинарной продукции, приготовленной с использованием режимов, рассчитанных на основании этих исследований, показала, что суммарный балл органолептической оценки запеченных биточков из тилапии составил 19,5 при максимальном балле 20, что свидетельствует о высоком качестве данных изделий.

Анализ пищевой и энергетической ценности биточков из тилапии показал, что в 100 г продукта количество белков составляет 12,8 г, жиров – 3,8 г, углеводов – 11,4 г, энергетическая ценность – 128 ккал.

Заключение

В работе представлены результаты исследований по усовершенствованию технологии рыбных фаршевых изделий путем оптимизации параметров термической обработки в пароконвектомате в режиме конвекции. На основе построенной оптимизационной математической модели были определены оптимальные технологические параметры термообработки в пароконвектомате: температура 231 °С, продолжительность 11 мин. При этом выход готовых рыбных фаршевых изделий составил 86,7 %, а энергетические затраты не превышают 1 кВт·ч. Полученные результаты были экспериментально подтверждены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М., 2001. 269 с.
2. Грищенко Е. Г. Физиология питания: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления 260800.62 «Технология продукции и организация общественного питания». Астрахань: Изд-во АГТУ, 2012. 50 с.
3. ГОСТ 31986-2012. Услуги общественного питания. Метод органолептической оценки качества продукции общественного питания. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.
4. СанПиН 2.3.4.050-96. Предприятия пищевой и перерабатывающей промышленности (технологические процессы, сырье). Производство и реализация рыбной продукции. Санитарные правила и нормы. М., 1996. 64 с.
5. Хамханов К. М. Основы планирования эксперимента: метод. пособие. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2001. 50 с.

Статья поступила в редакцию 18.01.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Титов Дмитрий Валерьевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры технологии товаров и товароведения; dimatitov90@mail.ru.

Долганова Наталья Вадимовна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры технологии товаров и товароведения; Dolganova-natalya@yandex.ru.



**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS
OF HEAT TREATMENT OF MINCED FISH PRODUCTS
IN COMBI STEAMER**

D. V. Titov, N. V. Dolganova

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article considers the process of baking minced fish products in the convection mode in a combi steamer as an alternative to roasting them. There has been developed an optimization technique to determine the optimal technological parameters of heat treatment in a combi steamer. Optimization of technological parameters of heat treatment was carried out on the basis of mathematical modeling. To do this, there were used the methods of correlation-regression and variance analysis. An optimization mathematical model consisting of a target function and a system of constraints was constructed. The target function is a two-factor regression model that functionally relates the output of finished products (optimization parameter), temperature, and duration of the baking process. The target function was subject to conditional maximization. The system of constraints consists of one equation and four inequalities. These restrictions take into account the culinary readiness and organoleptic properties of products, energy costs, as well as the range of temperature changes in the working chamber of the combi steamer. The maximum value of the target function, subject to all restrictions, was found in MS Excel software by using the generalized reduced gradient method. In the result, the optimal technological parameters of heat treatment process in the combi steamer were the following: temperature = 231°C, process duration = 11 minutes. At the same time, the yield of finished fish minced products made 86.7%, and energy costs did not exceed 1 kWh. The results obtained have been confirmed experimentally. The finished products have high organoleptic qualities: the total score = 19.5. The nutritional and energy value of tilapia meatballs was determined. In 100 g of product the amount of protein = 12.8 g, fats = 3.8 g, carbohydrates = 11.4 g, energy value = 128 kcal.

Key words: optimization, optimal technological parameters, heat treatment, minced fish products, combi steamer, mathematical model.

For citation: Titov D. V., Dolganova N. V. Optimization of technological parameters of heat treatment of minced fish products in combi steamer. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2020;2:142-152. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-5529-2020-2-142-152.

REFERENCES

1. SanPiN 2.3.2.1078-01. *Gigienicheskie trebovaniia bezopasnosti i pishchevoi tsennosti pishchevykh produktov. Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normativy* [Sanitary Regulations and Norms 2.3.2.1078-01. Hygienic requirements for food safety and nutritional value. Sanitary and epidemiological rules and regulations]. Moscow, 2001. 269 p.
2. Gritsienko E. G. *Fiziologiya pitaniia: metodicheskie ukazaniia k vypolneniiu laboratornykh rabot dlia studentov napravleniia 260800.62 «Tekhnologiya produktsii i organizatsiia obshchestvennogo pitaniia»* [Physiology of nutrition: tutorial for implementation of laboratory work for students of speciality 260800.62 Product technology and catering organization]. Astrakhan', Izd-vo AGTU, 2012. 50 p.

3. GOST 31986-2012. *Uslugi obshchestvennogo pitaniia. Metod organolepticheskoi otsenki kachestva produktsii obshchestvennogo pitaniia* [GOST 31986-2012. Catering services. Method of organoleptic quality assessment of catering products]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 15 p.

4. SanPiN 2.3.4.050-96. *Predpriiatiia pishchevoi i pererabatyvaiushchei promyshlennosti (tekhnologicheskie protsessy, syr'e). Proizvodstvo i realizatsiia rybnoi produktsii. Sanitarnye pravila i normy* [Sanitary Regulations and Norms 2.3.4.050-96. Food and processing industry enterprises (technological processes, raw materials). Production and sale of fish products. Sanitary rules and regulations]. Moscow, 1996. 64 p.

5. Khamkhanov K. M. *Osnovy planirovaniia eksperimenta: metodicheskoe posobie* [Principles of experiment planning: tutorial]. Ulan-Ude, Izd-vo VSGTU, 2001. 50 p.

The article submitted to the editors 18.01.2020

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Titov Dmitriy Valerevich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Technology of Products and Merchandising; dimatitov90@mail.ru.

Dolganova Natalia Vadimovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Technology of Products and Merchandising; Dolganova-natalya@yandex.ru.

