

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОСОЛКИ СВИНОЙ ШЕЙКИ
ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ВАКУУМ-МАССАЖА
И УЛЬТРАЗВУКА**

**Investigation of the kinetics of pork neck salting under
the combined influence of vacuum massage and ultrasound**

В. С. Тимофеев, магистрант

Н. В. Тихонова, доктор технических наук, профессор

Уральский государственный аграрный университет

(Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42)

Аннотация

В статье представлены результаты исследования процесса посола мышечной ткани свиной шейки (*m. splenius*) при использовании комбинированного физического воздействия. Цель работы – изучение кинетики распределения хлорида натрия и нитрита натрия в сырье при совместном применении вакуум-массажа и низкочастотного ультразвука (УЗ) и оценка их влияния на структурно-механические и цветоформирующие характеристики мяса. Разработана трехфакторная математическая модель, описывающая динамику изменения концентрации соли в геометрическом центре образца в зависимости от времени (30–180 мин), температуры рассола (2–8°C) и применения УЗ-обработки (частота 25 кГц, интенсивность 0.5 Вт/см²). Установлено, что комбинированное воздействие (вакуум-массаж + УЗ) сокращает продолжительность достижения равновесной концентрации соли (3.2%) в центре образца с 150 до 85 минут, что на 43% эффективнее традиционного вакуум-массажа. Интегральный показатель степени просаливания (отношение концентраций в центре и на периферии) составил 0.92 против 0.78 в контроле. УЗ-воздействие способствовало более равномерному распределению нитрита, что подтверждается повышением стабильности окраски готового продукта (оценка по *a**-координате CIELab после термообработки) на 28%. Текстульный анализ показал увеличение упругости просоленного сырья на 15% по сравнению с контролем, что связано с оптимизацией гидратации миофибриллярных белков. Полученные данные позволяют интенсифицировать процесс посола при производстве сырокопченых и сыровяленых изделий из свинины.

Ключевые слова: посол мяса, свиная шейка, кинетика просаливания, вакуум-массаж, ультразвуковая обработка, цветообразование, математическое моделирование.

Summary

The article presents the results of a study on the salting process of pork neck muscle tissue (*m. splenius*) using combined physical influence. The aim of the work is to study the kinetics of sodium chloride and sodium nitrite distribution in raw materials with the combined use of vacuum massage and low-frequency ultrasound (US) and to assess their impact on the structural, mechanical and color-forming characteristics of meat. A three-factor mathematical model has been developed, describing the dynamics of salt concentration change in the geometric center of the sample depending on time (30–180 min), brine temperature (2–8°C) and the use of US treatment (frequency 25 kHz, intensity 0.5 W/cm²). It was found that combined treatment (vacuum massage + US) reduces the time to reach equilibrium salt concentration (3.2%) in the sample center from 150 to 85 minutes, which is 43% more efficient than traditional vacuum massage. The integral indicator of the salting degree (ratio of concentrations in the center and on the periphery) was 0.92 versus 0.78 in the control. US treatment contributed to a more uniform distribution of nitrite, which is confirmed by a 28% increase in the color stability of the finished product (assessment by the *a** coordinate of CIELab after heat treatment). Texture analysis showed a 15% increase in the elasticity of salted raw material compared to the control, which is

associated with optimized hydration of myofibrillar proteins. The obtained data make it possible to intensify the salting process in the production of dry-cured and dry-salted pork products.

Keywords: meat salting, pork neck, salting kinetics, vacuum massage, ultrasonic treatment, color formation, mathematical modeling.

Посол является фундаментальной технологической операцией в переработке мясного сырья, определяющей микробиологическую стабильность, вкусоароматические, структурно-механические и цветовые характеристики готовых продуктов (вяленых, копченых, соленых изделий) [1]. Классические методы (сухой, мокрый, смешанный посол) требуют значительных временных затрат (от нескольких суток до недель) для достижения равномерного распределения посолочных ингредиентов, что ограничивает производственную мощность и увеличивает цикл оборачиваемости сырья [2].

Для интенсификации массопереноса широко применяются физические методы, такие как вакуум- и тумблинг-массаж, способствующие разрушению мышечной структуры и ускорению диффузии [3]. Однако даже эти методы не всегда обеспечивают быстрое и равномерное проникновение солей, особенно нитрита натрия, в геометрический центр крупнокускового сырья. Одним из перспективных направлений является применение ультразвуковой (УЗ) кавитации, которая за счет микровзрывов и локального нагрева способна интенсифицировать диффузионные процессы и активировать мышечные белки [4]. Однако исследования синергетического эффекта от комбинации вакуум-массажа и УЗ-обработки в процессе посола свинины, особенно с моделированием кинетики, носят ограниченный характер.

Целью данного исследования являлось изучение кинетики распределения хлорида и нитрита натрия в мышечной ткани свиной шейки при комбинированном физическом воздействии (вакуум-массаж + УЗ) и оценка влияния данного метода на технологические свойства сырья.

Материалы и методы

Объект исследования: свиная шейка (*m. splenius*) категории ГОСТ, охлажденная. Сырье нарежали на образцы-цилиндры (диаметр 80 ± 2 мм, высота 100 ± 2 мм, масса ~ 450 г).

Рассол: Концентрация NaCl – 12%, NaNO₂ – 0.1%, стабилизатор окраски (аскорбиновая кислота) – 0.05%. Температура рассола: 2, 5, 8°C.

Схемы обработки (продолжительность 30, 60, 90, 120, 150, 180 мин):

1. Контроль (К): Статическое погружение в рассол.
2. Вакуум-массаж (ВМ): Обработка в вакуумном массажере (частота вращения барабана 12 об/мин, остаточное давление 0.08 МПа, цикл: 10 мин работа / 5 мин пауза).
3. Комбинированная (ВМ+УЗ): Вакуум-массаж с одновременным УЗ-воздействием на ванну с рассолом (частота 25 кГц, интенсивность 0.5 Вт/см², импульсный режим 5 с/5 с).

Методы анализа:

- Кинетика просаливания: После обработки образцы замораживали в жидком азоте и разрезали. Из периферийной (глубина 5 мм) и центральной зон отбирали пробы. Содержание NaCl определяли по методу Мора, NaNO₂ – фотоколориметрически с реактивом Грисса.

- Цвет: Измеряли в системе CIELab (колориметр Konica Minolta CR-400) до и после кратковременной термообработки (80°C, 15 мин) для оценки стабильности нитрозомиоглобина.

- Текстура: Определяли прочность на сжатие (текстуrometer TAxT Plus, цилиндрический зонд P/20, скорость 1 мм/с, деформация 50%).

- Математическое моделирование: На основе экспериментальных данных методом нелинейного регрессионного анализа построена модель вида $C_{\text{центр}}(t, T, I) = C_{\text{равн}} * (1 - \exp(-k$

$k \cdot (1 + \alpha I) \cdot \exp(-E_a/(RT))$), где k – константа скорости, α – коэффициент влияния УЗ, E_a – энергия активации.

Статистическая обработка: дисперсионный анализ (ANOVA), доверительный интервал $p < 0.05$.

Результаты и обсуждение

Таблица 1

**Кинетические параметры процесса посола свиной шейки
при различных методах обработки
(Т рассола = 5°C)**

Метод обработки	Время достижения 3.2% NaCl в центре, мин	Коэффициент скорости просаливания (k), мин ⁻¹	Интегральный показатель равномерности просаливания (C_центр/C_периферия)	Содержание NaNO ₂ в центре, % от внесенного
Контроль (К)	>180 (не достигнуто)	0.0085 ± 0.0003	0.65 ± 0.04	58.2 ± 2.5
ВМ	150 ± 8	0.0152 ± 0.0005	0.78 ± 0.03	72.5 ± 3.1
ВМ+УЗ	85 ± 5	0.0241 ± 0.0007	0.92 ± 0.02	89.8 ± 2.8

Данные таблицы 1 свидетельствуют о значительном синергетическом эффекте от комбинированного воздействия. Применение УЗ на фоне вакуум-массажа позволило сократить время достижения целевой концентрации соли в центре образца практически вдвое по сравнению с ВМ. Коэффициент скорости просаливания увеличился на 58%. Наиболее важным результатом является достижение высокой равномерности распределения как хлорида, так и нитрита натрия (показатель 0.92), что критически важно для обеспечения стабильного цвета и подавления микрофлоры по всему объему продукта.

Таблица 2

Влияние метода посола на технологические свойства мясного сыра

Показатель	Контроль (К)	ВМ	ВМ+УЗ
Упругость (модуль Юнга), кПа	125 ± 10	135 ± 8	144 ± 7
Стабильность окраски (Δa* после термообработки)	-3.5 ± 0.3	-2.2 ± 0.2	-1.6 ± 0.1
Влагоудерживающая способность, %	63.5 ± 1.5	68.2 ± 1.3	71.8 ± 1.2

Обработка ВМ+УЗ привела к статистически значимому улучшению всех исследуемых технологических свойств (Таблица 2). Увеличение упругости на 15% относительно контроля связано с более полной экстракцией и гидратацией солерастворимых белков под действием

кавитации. Минимальное изменение координаты красного цвета (a^*) после термообработки (-1.6 против -3.5 в контроле) подтверждает эффективность равномерного распределения нитрита и формирования стабильного пигмента нитрозомиоглобина.

Заключение

1. Установлено, что комбинированное физическое воздействие (вакуум-массаж и низкочастотный ультразвук интенсивностью 0.5 Вт/см^2) позволяет интенсифицировать процесс посола свиной шейки, сокращая время достижения равновесной концентрации соли (3.2%) в геометрическом центре продукта на 43% (с 150 до 85 мин) по сравнению с традиционным вакуум-массажем.

2. Разработана трехфакторная математическая модель, адекватно описывающая кинетику просаливания в зависимости от времени, температуры и фактора ультразвукового воздействия ($R^2 = 0.97$). Модель может быть использована для прогнозирования и оптимизации режимов посола.

3. Комбинированная обработка обеспечивает высокую равномерность распределения посолочных ингредиентов: интегральный показатель просаливания составил 0.92, а доля нитрита натрия, достигшая центра образца, – 89.8% от внесенного количества.

4. Технологические свойства просоленного сырья значительно улучшаются: упругость возрастает на 15%, влагоудерживающая способность – на 13%, а стабильность окраски после термообработки повышается на 28% по сравнению с контролем, что обусловлено оптимизацией белково-водных взаимодействий и фиксации нитрозопигмента.

5. Предложенный комбинированный метод является эффективным инструментом для сокращения производственного цикла и повышения качества сырокопченых и сыровяленых изделий из свинины и может быть рекомендован для внедрения в мясоперерабатывающей отрасли.

Библиографический список

1. Топоров В. А., Гущина А. С. Технология посола мясного сырья: современные тенденции и физические методы интенсификации. СПб.: Профессия, 2020. 264 с.
2. Чарыкова О. Н., Леонова Е. А. Кинетические закономерности массопереноса при посоле мясного сырья // Известия вузов. Пищевая технология. 2019. № 4. С. 45-49.
3. Inguglia E. S., Zhang Z., Tiwari B. K., Kerry J. P., Burgess C. M. Salt reduction strategies in processed meat products – A review // Trends in Food Science & Technology. 2017. Vol. 59. P. 70–78.
4. Kang D., Zhang W., Lorenzo J.M., Chen X. Structural and functional modification of food proteins by high power ultrasound and its application in meat processing // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021. Vol. 61(11). P. 1914-1933.
5. Симонян Р. О., Филиппов В. И. Применение ультразвука для интенсификации технологических процессов в мясной промышленности // Мясная индустрия. 2022. № 6. С. 40-44.