

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО МАССИРОВАНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ МЯСА И УЛЬТРАЗВУКА

ГАНЕНКО Сергей Владимирович, Южно-Уральский государственный аграрный университет
ГАРИПОВ Максим Касимович, Южно-Уральский государственный аграрный университет
ПОПОВА Светлана Юрьевна, Южно-Уральский технологический университет

В статье рассматривается методика определения функциональной зависимости продолжительности кавитационного массирования от толщины кусков свинины и мощности ультразвука на основе результатов проведенных ранее исследований. В процессе анализа экспериментальных данных было установлено, что толщина массируемого мяса и мощность ультразвука оказывают наиболее сильное влияние на продолжительность данной операции. Исходя из этого, был сделан вывод о наличии функциональной зависимости между данными факторами и длительностью массирования

Введение. Проведенные ранее авторами исследования по определению оптимальных режимов кавитационного массирования позволили получить конкретные значения продолжительности данной операции при установленных значениях мощности ультразвука и заданных значений толщины кусков свинины. Полученные экспериментальные данные представлены в виде табл. 1, в которой строки отвечают порядковому номеру опыта при заданной мощности, а столбцы – заданной толщине образцов. Ячейки, образованные пересечением строк и столбцов, содержат в себе численные значения продолжительности кавитационного массирования в минутах при заданных параметрах.

Данные из табл. 1 описывают лишь частные случаи кавитационного массирования, при этом нет возможности определения продолжительности данной операции при параметрах, отличных от табличных, что поставило задачу определения функциональной зависимости продолжительности кавитационного массирования от мощности ультразвука и толщины кусков мяса.

Необходимо отметить, что полученные экспериментальные данные и приведенные ниже расчеты справедливы лишь при фиксированной частоте ультразвука 22 кГц, поскольку при проведении эксперимента данное значение частоты было принято за априорную информацию ввиду отсутствия необходимого оборудования, позволяющего оперировать различной частотой ультразвуковых волн.

Методика исследований. Наиболее простой и известной формой зависимости между величинами является функциональная зависимость, при которой каждому значению аргумента соответствует строго определенное значение функции. Функциональная зависимость может быть и между случайными величинами. Существует иной, широко распространенный в природе тип зависимости между случайными величинами.

Эта зависимость проявляется в том, что закон распределения одной случайной величины изменяется при изменении другой. Такая зависимость называется статистической. Следует заметить, что функциональная зависимость бывает лишь в теоретических построениях или в условиях специально подготовленных опытов. Физический опыт в том и состоит, что исследователь старается по возможности исключить влияние всех посторонних факторов и наблюдать зависимость в чистом виде. Явления окружающего нас мира взаимосвязаны, и воздействие одной переменной на другую происходит при одновременном воздействии множества других переменных, поэтому даже функциональные зависимости проявляются как зависимости статистические [1].

Одним из основных методов статистического анализа взаимозависимости показателей является корреляционный анализ. При проведении корреляционного анализа предполагают, что данные наблюдений можно считать случайными и выбранными из генеральной совокупности, распределенной по нормальному закону. С помощью корреляционного анализа оценивают не только тесноту связи между показателями, но и решаются задачи отбора факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на зависимый признак, обнаружение ранее неизвестных причинных связей. Корреляционный анализ не выявляет причину связей между показателями, но устанавливает количественную меру этих связей и подтверждает достоверность суждений о наличии связи [1, 3].

Если между переменными существует нелинейная зависимость, то использовать коэффициент корреляции в качестве характеристики тесноты связи не имеет смысла. В этом случае для измерения тесноты связи можно воспользоваться таким показателем, как индекс корреляции (эмпирическое корреляционное отношение). Как показатель тесноты связи эмпирическое корреля-



ляционное отношение имеет более универсальный характер, поскольку может использоваться в случае линейной и нелинейной зависимости между показателями, а факторный признак может быть не только количественным, а ранговым и даже номинальным [2, 3].

Из табл. 1 видно, что зависимость между факторами h (толщина мяса, мм) и N (мощность, Вт) и результирующим признаком t (продолжительность массирования, мин) имеет нелинейный характер связи, т.к. имеют место скачки значений результирующего признака, которые не могут быть описаны арифметической прогрессией. Исходя из этого соображения, для оценки тесноты связи между данными величинами был применен расчет корреляционного соотношения, проведенный по следующей методике [2]:

Полученная генеральная выборка значений результирующего признака Y разбивалась на определенное количество интервалов k , определяющееся по формуле:

$$k = 1 + 3,3221g(n), \quad (1)$$

где n – объем генеральной совокупности.

Полученное значение k округляли до целого числа в большую сторону.

По формуле определялся шаг интервала:

$$b = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{k}, \quad (2)$$

где Y_{\max} и Y_{\min} – соответственно максимальное и минимальное значения результирующего признака Y в выборке.

Данные генеральной выборки группировали по интервалам таким образом, чтобы

$$n = \sum_{j=1}^k m_j, \quad (3)$$

где m_j – количество элементов выборки в j -м интервале группирования.

Вычисляли среднее значение результирующего признака Y в j -м интервале по формуле

$$\bar{y}_j = \sum_i \frac{m_{ji} y_{ji}}{m_j}. \quad (4)$$

Вычисляли общую среднюю результирующего признака Y по формуле

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k m_j \bar{y}_j. \quad (5)$$

Определяли межгрупповую дисперсию по формуле

$$S_{y_j}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k m_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2. \quad (6)$$

Рассчитывали общую дисперсию по формуле

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_j - \bar{y})^2. \quad (7)$$

Корреляционное отношение зависимой переменной Y по независимой переменной X получали из отношения межгрупповой дисперсии к общей дисперсии:

$$\eta = \sqrt{\frac{S_{y_j}^2}{S_y^2}} = \frac{S_{y_j}}{S_y}. \quad (8)$$

Силу связи между X и Y определяли величиной корреляционного отношения (табл. 2).

По характеру связи между факторами и результирующим признаком делали вывод о наличии между ними функциональной зависимости, которую определяли по следующей методике:

двухфакторный эксперимент приводили к трем однофакторным опытам, в которых определяли продолжительность массирования при различной толщине мяса (см. табл. 1);

для каждого из опытов определяли функциональную зависимость между толщиной мяса и продолжительностью массирования;

полученные функции приводили к общему виду и оценивали изменение отдельных его членов;

определяли функциональную зависимость между изменяющимися членами функции и мощностью ультразвука;

полученные функции суммировали в искомую.

Данная обработка данных проводилась с помощью программного продукта Microsoft Office Excel 2016.

Результаты исследований. По представленной выше методике определения корреляционного отношения была оценена сила связи между толщиной мяса и продолжительностью кавитационного массирования при различной мощности ультразвука. Так, расчет корреляционного соотношения для опыта 1 имел следующий вид:

Таблица 1

Экспериментальные данные

№ опыта	Мощность N , Вт	Толщина мяса h , мм								
		0	10	20	30	40	50	60	70	
1	150	0	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	
2	112,5	0	3	4	5	6	7	8	9	
3	75	0	4	6	8	10	12	14	16	



Сила связи в зависимости от величины корреляционного отношения

Сила связи	Величина корреляционного отношения
Полная	1
Сильная	от 0,7 до 1
Средняя	от 0,3 до 0,7
Слабая	от 0 до 0,3
Связь отсутствует	0

в табл. 3 занесены исходные данные для расчета; определяли количество интервалов по формуле (1):

$$k = 1 + 3,322 \lg(8) = 5;$$

определяли шаг интервала по формуле (2):

$$b = \frac{5 - 0}{5} = 1;$$

значения Y группировали по интервалам. В табл. 4 записаны номера интервалов и их границы, элементы интервалов и их количество, а также по формуле (4) было определено среднее значение Y в каждом интервале. В основу группировки брался фактор X ;

вычисляли общую среднюю по формуле (5):

$$\bar{y} = \frac{1}{8} \cdot (0 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3,75 \cdot 2 + 3,75 \cdot 2 + 4,75 \cdot 2) = 3,0625;$$

определяли межгрупповую дисперсию по формуле (6):

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{8} \cdot \left(1 \cdot (0 - 3,0625)^2 + 1 \cdot (2 - 3,0625)^2 + 2 \cdot (2,75 - 3,0625)^2 + 2 \cdot (3,75 - 3,0625)^2 + 2 \cdot (4,75 - 3,0625)^2 \right) = 2,17;$$

Исходные данные для опыта 1

Толщина мяса X , мм	0	10	20	30	40	50	60	70
Продолжительность Y , мин	0	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5

Таблица 4

Группировка значений Y по интервалам

№	Границы интервала	Значения Y в j -м интервале	m_j	\bar{y}_j
1	0-1	0	1	0
2	1-2	2	1	2
3	2-3	2,5; 3	2	2,75
4	3-4	3,5; 4	2	3,75
5	4-5	4,5; 5	2	4,75

$$S_y^2 = \frac{1}{8} \cdot \left((0 - 3,0625)^2 + (2 - 3,0625)^2 + (2,5 - 3,0625)^2 + (3 - 3,0625)^2 + (3,5 - 3,0625)^2 + (4 - 3,0625)^2 + (4,5 - 3,0625)^2 + (5 - 3,0625)^2 \right) = 2,21;$$

вычисляли общую дисперсию по формуле (7); определяли корреляционное отношение по формуле (8):

$$\eta = \sqrt{\frac{2,17}{2,21}} = 0,991.$$

Аналогичным образом было определено корреляционное соотношение для опытов 2 и 3, которое получилось равным 0,987 и 0,87 соответственно. Был сделан следующий вывод: толщина массируемого мяса оказывает сильное влияние на продолжительность массажируемого мяса, однако при уменьшении мощности ультразвука влияние толщины также уменьшается. Это можно объяснить следующим образом. При более мягких режимах массажируемого мяса, как видно из табл. 1, увеличивается продолжительность массажируемого мяса, следовательно, физико-химические процессы в мясе будут более продолжительными, затрагивая толщину мяса в большей степени, чем при более жестких режимах, следовательно, продолжительность массажируемого мяса будет в меньшей степени зависеть от его толщины.

Аналогично была оценена сила связи между мощностью ультразвука и продолжительностью массажируемого мяса при различной толщине мяса. Проведенные расчеты установили, что величина корреляционного отношения во всех случаях одинакова и равняется 1, т.е. мощность оказывает полное влияние на продолжительность операции.

Поскольку было установлено сильное влияние толщины мяса и мощности ультразвука на продолжительность массажируемого мяса, можно утверждать, что эти два фактора связаны функциональной зависимостью с результирующим признаком:

Таблица 3



$$t = f(h; N). \quad (9)$$

Опыт 1 проводили при мощности ультразвука, равной 150 Вт, полученные данные представлены в табл. 5.

По этим данным строился график, отражающий зависимость продолжительности массажирования от толщины мяса. Далее применялась функция «линия тренда», которая используется для выявления тенденций изменения результирующего признака. Среди предложенных вариантов линии тренда было видно, что лучше всего результаты опыта 1 отображает логарифмическая функция. График, построенный по экспериментальным данным, и линия тренда изображены на рис. 1.

Линия тренда в опыте 1 задается следующей функциональной зависимостью продолжительности массажирования от толщины мяса:

$$t = 2,2432 \ln(0,1h + 1) + 0,089. \quad (10)$$

Аналогичным образом были определены линии тренда в опытах 2 и 3, которые задаются следующими функциональными зависимостями продолжительности кавитационного массажирования от толщины мяса (функции (11) и (12) соответственно):

$$t = 4,1037 \ln(0,1h + 1) - 0,1897; \quad (11)$$

$$t = 7,4418 \ln(0,1h + 1) - 1,1147. \quad (12)$$

Полученные зависимости (11) и (12) приводили к общему виду:

$$t = a \ln(0,1h + 1) + b, \quad (13)$$

где a и b – соответственно коэффициент и свободный член функции.

Как видно из функций (10–12), при изменении мощности ультразвука изменяется и коэффициент, и свободный член, следовательно, они связаны функциональной зависимостью с мощностью:

$$a = f(N); \quad (14)$$

$$b = f(N). \quad (15)$$

Данные функции определяли аналогичным методом. В табл. 6 записаны значения коэффициента a , соответствующие различным мощностям ультразвука (см. функции (10–12)).

По этим данным строили график, отражающий зависимость значений коэффициента a от мощности ультразвука и линию тренда (рис. 2).

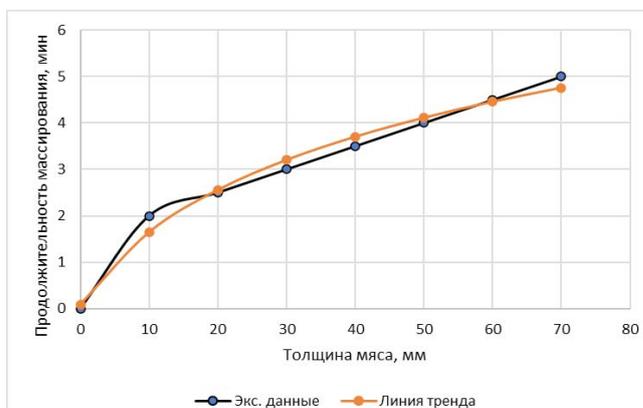


Рис. 1. График продолжительности массажирования и линия тренда для опыта 1

Среди предложенных вариантов линии тренда было видно, что данную зависимость лучше всего отражает экспоненциальная функция.

Полученная линия тренда задается следующей функциональной зависимостью коэффициента a от мощности ультразвука:

$$a = 24,724 e^{-0,016 \cdot N}. \quad (16)$$

Аналогичным образом была определена функциональная зависимость свободного члена b от мощности ультразвука:

$$b = 1,7723 \ln N - 8,7062. \quad (17)$$

Полученные функции (16) и (17) подставлялись в функцию (13) вместо коэффициента a и свободного члена b соответственно:

$$t = 27,724 e^{-0,016 \cdot N} \ln(0,1h + 1) + 1,7723 \ln N - 8,7062. \quad (18)$$

Формула (18) будет справедлива только для односторонних ультразвуковых массажей, в которых ультразвук проникает в мясо с одной стороны. Для возможности применения формулы (18) к двусторонним ультразвуковым массажерам, в нее был внесен коэффициент k , учитывающий вид ультразвукового массажера: $k = 1$ для односторонних, и $k = 0,5$ для двусторонних. Отсюда искомая функция приняла вид:

$$t = k (27,724 e^{-0,016 \cdot N} \ln(0,1h + 1) + 1,7723 \ln N - 8,7062). \quad (19)$$

Заключение. Проведенный анализ полученных экспериментальных данных показал, что мощность ультразвука и толщина массируемого мяса оказывают наибольшее влияние на продолжительность кавитационного массажирования.

Таблица 5

Экспериментальные данные опыта 1

Толщина мяса h , мм	0	10	20	30	40	50	60	70
Продолжительность t , мин	0	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5



Значения коэффициента a при различных мощностях ультразвука

Мощность N , Вт	150	112,5	75
Значение коэффициента a	2,2432	4,1037	7,4418

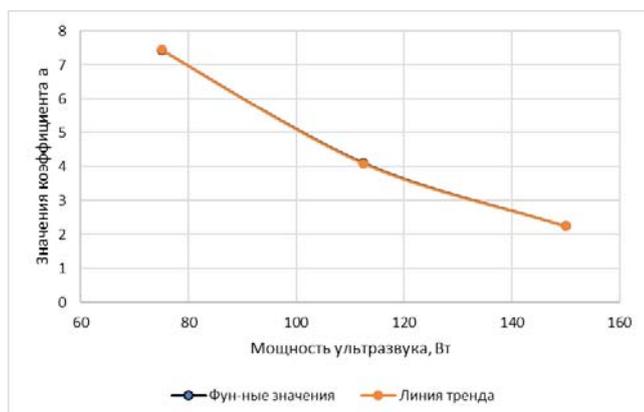


Рис. 2. График зависимости значения коэффициента a от мощности ультразвука

ния. Установлена функциональная зависимость между этими факторами и продолжительностью, которая показала, что продолжительность кавитационного массажа при частоте ультразвука 22 кГц и мощности ультразвука 150 Вт составит 4–5 мин при применении односторонних ультразвуковых мясомассажеров или 2,0–2,5 мин при применении двусторонних ультразвуковых мясомассажеров для отдельного куска свинины толщиной 50–70 мм (карбонад, шейка, корейка).

Как уже отмечалось выше, полученная выше функция описывает частный случай кавитационного массажа с фиксированной частотой ультразвуковых волн 22 кГц, поэтому есть смысл реализовать трехфакторный эксперимент и определить функциональную зависимость продолжительности кавитационного массажа от толщины мяса, мощности ультразвука и его частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буре В.М. Теория вероятностей и математическая статистика. – СПб.: Лань, 2013. – 416 с.

2. Орлова И.В., Половников В.А. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование. – М., 2007. – С. 186–190.

3. Туганбаев А.А., Крупин В.Г. Теория вероятностей и математическая статистика. – СПб.: Лань, 2011. – 223 с.

Ганенко Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасность жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия.

Гарипов Максим Касимович, магистрант, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Россия.

454080, г. Челябинск, просп. Ленина, 75.

Тел.: (8351) 266-65-19.

Попова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры «Техника и технологии», Южно-Уральский технологический университет, Россия.

454052, г. Челябинск, ул. Комаровского, 9-а.

Тел.: (8351) 265-56-08; e-mail: vetochka.79@mail.ru

Ключевые слова: мясопереработка; свинина; ультразвук; массажирование мяса; кавитационное массажирование.

DETERMINATION OF THE FUNCTIONAL DEPENDENCE OF THE DURATION OF CAVITATION MASSAGING ON THE PARAMETERS OF MEAT AND ULTRASOUND

Ganenko Sergey Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety", South Ural State Agrarian University, Russia.

Garipov Maxim Kasimovich, Magstrandt, South Ural State Agrarian University, Russia.

Popova Svetlana Yurevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Engineering and Technology", South Ural University of Technology, Russia.

Keywords: meat processing; pork; ultrasound; massaging meat; cavitation massage.

The article reviews a method for determining the functional dependence of the duration of cavitation massaging on the thickness of pork pieces and the power of ultrasound based on the results of previous studies. In the process of analyzing the experimental data, it was found that the thickness of the massaged meat and the power of ultrasound have the strongest effect on the duration of this operation. Based on this, it was concluded that there is a functional relationship between these factors and the duration of cavitation massaging

