






Экспериментальное исследование диэлектрических свойств печени сома как объекта микроволновой сушки






Игорь Ю. Алексанян	¹	16081960igor@gmail.com	 0000-0001-5494-1226
Альберт Х.-Х. Нугманов	¹	albert909@ya.ru	 0000-0002-4093-9982
Екатерина В. Соколова	¹	k_sokolova93@mail.ru	 0000-0003-2663-1786
Ольга И. Коннова	¹	okonnova 88@gmail.com	 0000-0002-2146-5443
Светлана А. Свирина	¹	svetlanasv97@ya.ru	 0009-0002-1646-2421

¹ Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия

Аннотация. Рыбные субпродукты являются потенциальным источником ценных веществ с важными функциональными свойствами. В настоящее время повышение ценности рыбных субпродуктов является обязательным условием для получения чистых и безотходных продуктов рыбоперерабатывающей промышленности. Печень рыб как сырьё вторичной переработки содержит комплекс низкомолекулярных соединений и ферментов, которые служат основой для дорогих и дефицитных биологически активных премиксов и субстанций высокой очистки. Объектом изучения является печень сома обыкновенного, при этом исследованию подвергалась сырая и высушенная печень при воздействии микроволнового излучения. Экспериментальные исследования по определению диэлектрической проницаемости и ее мнимой части через величину тангенса угла диссипации для образцов исходной сырой печени с влажностью 68% и конечного высушенного продукта с влажностью 5% проводили с применением метода резонаторных возмущений на частоте 2,450 ГГц в температурном диапазоне от 60 до 100 °С. Для исследуемой печени диэлектрическая проницаемость и проводимость в значительной степени зависели от содержания в ней влаги, частоты микроволнового излучения, температуры, плотности и толщины слоя печени сома, которые варьировались при обезвоживании. Были получены графические закономерности варьирования определению диэлектрической проницаемости и ее мнимой части в зависимости от влажности и температуры печени сома и определено, что с увеличением влажности субпродукта при всех температурах увеличивается и диэлектрическая проницаемость. Диэлектрические потери также увеличиваются с увеличением влажности во всем его диапазоне. Получены математические зависимости мнимой части диэлектрической проницаемости от влажности в диапазоне от 0,05 до 0,68 кг/кг, соответственно для температур в диапазоне от 60°C до 100°C. Растущий интерес к переработке рыбного сырья с помощью микроволновых технологий обуславливает необходимость дальнейших исследований диэлектрических свойств различных пищевых продуктов.

Ключевые слова: печень сома, диэлектрическая проницаемость, микроволновая сушка, частота излучения, мощность излучения, тангенс угла диссипации, глубина проникновения микроволновой мощности, мощность внутреннего источника тепла.

Experimental study of the dielectric properties of catfish liver as an object of microwave drying

Igor Y. Aleksanyan	¹	16081960igor@gmail.com	 0000-0001-5494-1226
Albert H. Nugmanov	¹	albert909@ya.ru	 0000-0002-4093-9982
Ekaterina V. Sokolova	¹	k_sokolova93@mail.ru	 0000-0003-2663-1786
Olga I. Konnova	¹	okonnova 88@gmail.com	 0000-0002-2146-5443
Svetlana A. Svirina	¹	svetlanasv97@ya.ru	 0009-0002-1646-2421

¹ Astrakhan State Technical University, st. Tatishcheva, building 16/1, Astrakhan, 414056, Russia

Abstract. Fish by-products are a potential source of valuable substances with important functional properties. Improving the value of fish by-products is currently essential for producing clean and waste-free products in the fish processing industry. Fish liver, as a secondary raw material, contains a complex of low-molecular compounds and enzymes, which serve as the basis for expensive and scarce biologically active premixes and highly purified substances. The liver of the common catfish was studied, with both raw and dried liver exposed to microwave radiation. Experimental studies to determine the permittivity and its imaginary part through the dissipation tangent for samples of the original raw liver with a moisture content of 68% and the final dried product with a moisture content of 5% were conducted using the resonator perturbation method at a frequency of 2.45 GHz in the temperature range from 60°C to 100°C. For the liver studied, permittivity and conductivity significantly depended on moisture content, microwave frequency, temperature, density, and thickness of the catfish liver layer, which varied during dehydration. Graphical patterns were obtained for the variation of permittivity and its imaginary part depending on the moisture content and temperature of the catfish liver. It was determined that with increasing moisture content of the by-product, at all temperatures, the permittivity also increases. Dielectric loss also increases with increasing moisture content across its entire range. Mathematical dependencies of the imaginary part of permittivity on moisture content were obtained in the range from 0.05 to 0.68 kg/kg, respectively, for temperatures ranging from 60°C to 100°C. Growing interest in processing fish raw materials using microwave technologies necessitates further research into the dielectric properties of various food products.

Keywords: catfish liver, permittivity, microwave drying, radiation frequency, radiation power, dissipation angle tangent, microwave power penetration depth, internal heat source power.

Для цитирования

Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х., Соколова Е.В., Коннова О.И., Свирина С.А. Экспериментальное исследование диэлектрических свойств печени сома как объекта микроволновой сушки // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 148–156. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-148-156

For citation

Aleksanyan I.Y., Nugmanov A.Kh., Sokolova E.V., Konnova O.I., Svirina S.A. Experimental study of the dielectric properties of catfish liver as an object of microwave drying. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 148–156. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-148-156

Введение

Субпродукты рыбного происхождения можно использовать, как базу для выработки ценных компонентов, в частности, функциональной ориентации, которые будут способствовать дополнительной рыночной востребованности пищевых материалов путём повышения их качественных показателей и биологической ценности. Одним из важных субпродуктов считается печень рыбной природы, которая включает ряд низкомолекулярных и ферментных комплексов и может служить базой для дефицитных и, как следствие, дорогостоящих биологически активных добавок [1, 2].

Известно, что рыба печень богата кальцием, фосфором и железом, которые полезны для развития костей и кроветворения, эффективно лечит анемию, помогает защитить зрение и предотвратить заболевания печени, снижает уровень холестерина в крови, снимает усталость, восстанавливает зрение, улучшает функцию печени и имеет длительный срок хранения [3].

Для организации процессов обезвоживания материалов животного происхождения, в том числе вторичных рыбных ресурсов, используются различные способы организации сушки. В частности, в технологии получения сухой печени известно применение сушки при высокой температуре [4], вакуумной [5] и распылительной сушки [3].

В способе производства питательной и вкусной рыбной кости и куриной печени в виде волокон [4] объектом обезвоживания являются вторичные ресурсы животного происхождения – размягченные рыбные кости и куриная печень, приготовленная на пару. Рыбные кости имеют сильный рыбный запах, куриная печень имеет неприятный запах субпродуктов, при этом продукт изготовлен с использованием особых ароматизаторов и обладает привлекательным запахом, натуральным освежающим и тягучим вкусом, а также бодрящим послевкусием. Процесс на первом этапе включает в себя следующие технологические стадии: размораживание, очистку и промывку костей и печени. Второй этап включает в себя приготовление маринада с использованием таких натуральных специй, как полынь, мята, сафлор, имбирь, лук, лимонник. Третий этап включает маринование рыбных костей и куриной печени в приготовленных натуральных специях в течении 40–80 минут. Далее замаринованные ингредиенты высушивают в течение 15–50 минут. Размягченные, обезвоженные рыбные кости при высокой температуре помещают в контейнер при температуре 116–120 °С на 60–70 минут, а куриную печень на пару готовят при температуре 110 °С в течение 30 минут. Следующим этапом является

сушка при высокой температуре. Когда сырьё достигнет степени сухости 10–25%, его измельчают в порошок и хранят отдельно. Преимуществом данного способа является то, что продукт безопасен, он не содержит добавок и консервантов, не имеет рыбного запаха, что делает его приемлемым. Однако указанный метод имеет ряд недостатков, среди которых продолжительность проведения процесса сушки.

Известен способ вакуумной сушки вторичных рыбных ресурсов [5]. Для того, чтобы переработать молоки лосося, которые богаты нуклеопротеином, необходимо на первом этапе удалить соединительную ткань и жир из молок. На втором этапе необходимо сырьё очистить с применением раствора цитрата натрия. На третьем этапе молоки измельчают в гомогенизаторе со скоростью 8000–10000 об/мин в течение 1–2 минут. На четвертом и пятом этапе влить равный объем раствора NaCl концентрацией 2–3 моль/л, тщательно перемешать, а затем поместить в ледяную баню, а затем отфильтровать рыбы молоки и осадить надосадочную жидкость с помощью удвоенного количества 95% этанола. На шестом этапе необходимо полученный осадок нарезать на мелкие кусочки, поместить в стакан и гомогенизировать в течение 1–2 минут. Седьмым шагом будет фильтрование и осаждение фильтрата 95%-ым этанолом. Далее проводят промывку 70%-ым этанолом. На заключительном этапе полученную суспензию высушить в вакууме. Преимущество данного способа заключается в том, что использование данной технологии позволяет в полной мере использовать вторичные рыбные ресурсы, превращая отходы в ценный ресурс. Однако вышеописанный метод является довольно сложным, поскольку переработка проводится специфическим методом, который состоит из большого числа операций. Использование этанола для осаждения и промывки несколько снижает безопасность пищевой продукции. Помимо этого, вакуумная сушка является энергозатратной операцией.

Известен способ получения порошка печени трески [3], полученного с помощью распылительной сушки. Метод включает в себя несколько технологических этапов. Первый этап включает в себя размораживание рыбьей печени и ее измельчение до размера небольших ломтиков. На втором этапе начинается процесс маринования, который длится 30–60 минут и для его организации необходимо добавление приправ – перец чили, молотый перец, добавление сахара, шампанского вина, глутамата натрия, соли, воды, соевого соуса, чеснока и зеленого лука. Использование большого количества компонентов также необходимо для удаления рыбного запаха. Следующая технологическая

стадия включает в себя приготовление маринованной рыбной печени на пару, ее дальнейшую варку и процеживание. На заключительном этапе необходимо провести операцию по фильтрации полученной суспензии. Далее суспензия проходит технологическую стадию сушки с помощью распылительной сушилки и упаковку полученного продукта. Преимуществом данного способа является высокое качество приправы при одновременной экономии времени и потребляемой энергии на технологические процессы, что приводит к заметному снижению себестоимости продукции. Однако вышеописанный метод является довольно сложным, поскольку включает большое количество технологических операций.

Одним из наиболее распространенных способов сушки продуктов животного происхождения является СВЧ-сушка.

Кроме выявления рациональных режимов влагоудаления при СВЧ или микроволновом энергоподводе [6, 7], особенное внимание следует обратить на механизм и последствия взаимодействия объекта термической обработки с электромагнитным полем для рационального технического исполнения СВЧ-генератора (магнетрона) [8]. Для оценки кинетики микроволновой сушки и ее моделирования необходимо выявить и учитывать ряд характеристик, таких как частота и мощность излучения, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диссипации или диэлектрических потерь, глубина проникновения микроволновой мощности, мощность внутреннего источника тепла в слое.

Цель работы – выявление диэлектрических параметров печени сома в увязке с магнетронами для определения кинетических закономерностей её обезвоживания при СВЧ-энергоподводе, а также построения и решения его математической модели.

Материалы и методы

Объектами анализа послужила печень сома обыкновенного (*Silurus glanis*), как в свежем, так и в обезвоженном при СВЧ-энергоподводе состоянии. В работе применялись как традиционные, так и экспериментальные методы исследования.

Взаимодействие СВЧ-излучения с объектом влагоудаления оценивают посредством ряда показателей и, в частности, его комплексной диэлектрической проницаемости ε , Ф/м [9, 10]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_2; \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_2' + i\varepsilon_2''; \quad (2)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_2''}{\varepsilon_2'}. \quad (3)$$

Здесь ε_0 является данным показателем в вакууме, а ε_2 – комплексным параметром, в котором действительная часть ε_2' представляется, как энергия, накапливаемая в объекте облучения при контакте с СВЧ-полем, а произведение ε_2'' , и мнимой единицы i обуславливает трансформацию данной энергии в тепловую. По отношению обозначенных составляющих, то есть тангенсу угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ (3), можно определить поглощательную по отношению к СВЧ-поток способность объекта облучения и эффективность рассеивания тепловой энергии во внешней среде, то есть $\tan \delta$ обуславливает эффективность СВЧ-обработки, а также глубины прохождения СВЧ-потока d_p (м), как отрезок при прохождении которого плотность СВЧ-потока падает на величину $1/e$ по отношению к плотности падающего на поверхность облучаемого материала микроволнового потока:

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon_2' [\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1]}}, \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме, м/с; f – частота излучения, Гц.

ε и d_p печени сома обусловлены ее влажностью W , f , температурой T , плотностью ρ , относительным содержанием солей и высотой слоя, которые являются влияющими и варьируемыми факторами при СВЧ-влагоудалении при структурных и биохимических трансформациях [10]. Одной из задач приведенного анализа служит оценка воздействия обозначенных факторов на диэлектрические характеристики печени сома при $f = 2,450$ ГГц.

Данная f выбрана потому, что она позитивно воздействует на d_p печень сома, что обусловлено ее высокой исходной долей влаги, поглощательная способность которой соответствует $f = 20,0$ ГГц, но при этом глубина прогрева пограничного водного слоя меньше $0,0001$ м и ниже лежащие прослойки жидких смесей не прогреваются даже при интенсивном поверхностном парообразовании. В случае, когда $f = 2,450$ ГГц, поглощательная способность водной среды в 4 раза ниже по отношению к $f = 20,0$ ГГц, однако d_p в поверхностном водном слое при этом составляет $0,013$ м, что обуславливает нагрев большего ареала водной среды, что и позволяет отдать предпочтение данной f [11, 12].

Целевое изучение результатов известных работ в ракурсе диэлектрических характеристик ряда биополимеров приводит к выводу о том, что закономерность варьирования ϵ_2' и ϵ_2'' в рамках изменения T от 60,0 до 100,0 °C и W от 95,0 до 5,0% можно принять линейной [2]. При СВЧ-обезвоживании печени сома вырабатывается порошковый материал. При этом изменение диэлектрических характеристик обусловлено в большей степени варьированием W и T . При такой постановке задачи варьирование ϵ_2' и ϵ_2'' для печени сома с различной W можно оценить при начальной и итоговой W , равной 68,0 и 5,0% в рамках варьирования T от 60,0 до 100,0 °C.

Для выявления диэлектрических характеристик использовался опытный стенд для анализа диэлектрика посредством способа резонаторных возмущений [13, 14] при $f = 2,450$ ГГц. Стенд скомпонован из «СВЧ-анализатора» с СВЧ-излучателем и приемником, системой накопления данных USB и стального «коаксиального зонда открытого типа». Для размещения образца реализовывали трубки из полипропилена диаметром 0,012 и длиной 0,075 м. Для заданных f и объемов проб ϵ определялась посредством программного продукта (Measurement Kit, Vials v3.01).

С целью выявления ϵ_2' и ϵ_2'' обезвоженного образца примем во внимание то, что он является композицией частиц с воздушной средой, то есть необходимо воспользоваться соотношением смешения данных составляющих порошка, опираясь на их параметры в чистом виде. В варианте обезвоженной печени сома применяли следующее соотношение:

$$\sqrt{\epsilon_m} = x_1 \sqrt{\epsilon_1} + x_2 \sqrt{\epsilon_2}, \quad (5)$$

где ϵ_m – диэлектрические характеристики для смеси, а ϵ_1 и ϵ_2 для воздушной ($\epsilon_1 \approx 1$)

и вещества, при этом x_1 и x_2 соответствуют их объемным долям в навеске.

Трансформируя (5) при $\epsilon_1 \approx 1$ имеем:

$$\epsilon_2' = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_m} - x_1}{x_2} \right)^2. \quad (6)$$

С целью определения x_1 и x_2 целесообразно найти насыпную ρ_n порошка печени сома на основе объемов частиц и пустот, которые снижают ρ_n по сравнению с истинной и физической. Для определения ρ_n 100,0 мл диспергированной печени сома при $W = 5,0\%$ помещали в ёмкость и взвешивали при известной её массе, вычитая которую определяли массу образца, отнеся которую к его объёму находили ρ_n . Зная ρ и ρ_n находили x_1 и x_2 . Определение T в объёме образца при тепловом воздействии СВЧ-излучением посредством термопар затруднительно по причине вероятности непосредственного воздействия СВЧ-потока на термодатчик в тонком слое печени сома, что обуславливает целесообразность моделирования теплопереноса.

При этом в дифференциальном уравнении теплопереноса необходимо учесть ω – мощность внутреннего источника тепла в единице объёма образца, Вт/м³ при СВЧ-воздействии [15].

$$\omega = 5,55 \times 10^{-12} \epsilon_2' \tan \delta f E^2, \quad (7)$$

где E – напряженность внешнего поля, В/м, изменяющаяся при варьировании мощности магнетрона N , Вт.

Результаты и обсуждение

Данные по ρ_n обезвоженной печени сома представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Данные по ρ_n обезвоженной печени сома

Table 1.

Data on ρ_n dehydrated catfish liver

Эксперимент	Масса образца, г	Объём образца, мл	ρ_n , г/мл
1	38,50	100,0	0,3850
2	37,40		0,3740
3	36,00		0,3600
4	35,90		0,3590
5	34,20		0,3420
Средняя величина			364,0 кг/м ³

Из таблицы 1 следует то, что средняя величина массы 100 мл образца составляет 36,40 г, а объём чистого материала будет: $36,40/0,7460 = 48,790$ мл, при этом объём пустот с воздушной средой найдем, как:

$100,0 - 48,790 = 51,210$ мл. Тогда $x_1 = 0,51210$, а $x_2 = 0,48790$.

Опытные данные по ϵ_2' , ϵ_2'' и $\tan \delta$ печени сома при $W = 68,0$ и $5,0\%$, $f = 2,450$ ГГц T от 60,0 до 100,0 °C сведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2.

Опытные данные по ϵ_2' , ϵ_2'' и $\tan \delta$ сырой печени сома

Table 2.

Experimental data on ϵ_2' , ϵ_2'' and $\tan \delta$ of raw catfish liver

$T, ^\circ\text{C}$	ϵ_2'	$\tan \delta$	ϵ_2''
60,0	73,120	0,1940	14,190
70,0	70,890	0,2030	14,390
80,0	68,140	0,2230	15,190
90,0	67,280	0,2300	15,470
100,0	65,270	0,2490	16,250

Таблица 3.

Опытные данные по ϵ_2' , ϵ_2'' и $\tan \delta$ сухой печени сома

Table 3.

Experimental data on ϵ_2' , ϵ_2'' and $\tan \delta$ of dry catfish liver

$T, ^\circ\text{C}$	ϵ_m	ϵ_2'	$\tan \delta$	ϵ_2''
60,0	6,140	16,230	0,2590	4,200
70,0	5,860	15,300	0,3090	4,730
80,0	5,690	14,740	0,3360	4,950
90,0	5,370	13,690	0,3740	5,120
100,0	5,320	13,530	0,3860	5,220

На рисунках 1 и 2 показаны закономерности изменения ϵ_2' и ϵ_2'' печени сома при W от 0,050 до 0,680 кг/кг и T от 60,0 до 100,0 $^\circ\text{C}$.

Из рисунка 1 видно, что ϵ_2' увеличивается при любой T , что обусловлено ростом доли влаги в свободном состоянии в печени сома и, как следствие, стремлением ϵ_2' к показателю воды $\epsilon_2' = 80$. ϵ_2'' тоже повышается при росте W (рисунок 2), причём ϵ_2' уменьшается с ростом T (рисунок 1), а ϵ_2'' увеличивается (рисунок 2), что определяется долей влаги в свободном состоянии.

Приведённые на рисунках 1 и 2 закономерности изменения диэлектрических характеристик линейно описаны уравнениями 8–12 описаны для ϵ_2' при W от 0,050 до 0,680 кг/кг и для T , равной 60,0; 70,0; 80,0; 90,0 и 100,0 $^\circ\text{C}$.

$$\epsilon_2' = 90,3020W + 11,7150; \quad (8)$$

$$\epsilon_2' = 88,2380W + 10,8880; \quad (9)$$

$$\epsilon_2' = 84,7620W + 10,5020; \quad (10)$$

$$\epsilon_2' = 85,0630W + 9,43680; \quad (11)$$

$$\epsilon_2' = 82,1270W + 9,42370; \quad (12)$$

Для при тех же условиях имеем.

$$\epsilon_2'' = 15,8570W + 3,40710; \quad (13)$$

$$\epsilon_2'' = 15,3330W + 3,96330; \quad (14)$$

$$\epsilon_2'' = 16,2540W + 4,13730; \quad (15)$$

$$\epsilon_2'' = 16,4290W + 4,29860; \quad (16)$$

$$\epsilon_2'' = 17,5080W + 4,34460; \quad (17)$$

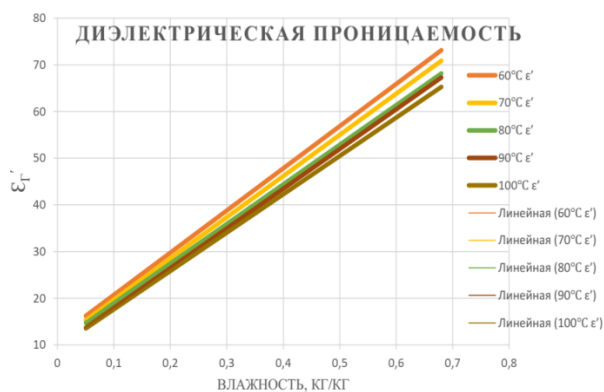


Рисунок 1. Зависимость ϵ_2' от W и T печени сома

Figure 1. Dependence of ϵ_2' on W and T of catfish liver

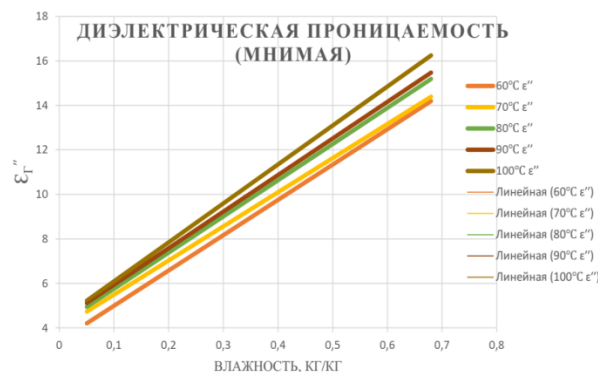


Рисунок 2. Зависимость ϵ_2'' от W и T печени сома

Figure 2. Dependence of ϵ_2'' on W and T of catfish liver

На рисунке 3 представлены закономерности варьирования d_p в см при T от 60,0 до 100,0 °C при крайних в процессе обезвоживания W печени сома. При меньшей W d_p растёт.

Соотношения 18 и 19 описывают закономерность варьирования d_p (см) при изменении T при обозначенных выше условиях.

$$d_p = -0,00510T + 1,49380; \quad (18)$$

$$d_p = -0,01170T + 2,51320; \quad (19)$$

Анализ варьирования диэлектрических характеристик способствует выявлению механизма поглощения и трансформации СВЧ-энергии в тепловую для печени сома при влагоудалении.

В таблице 4 показаны результаты определения ω печени сома.

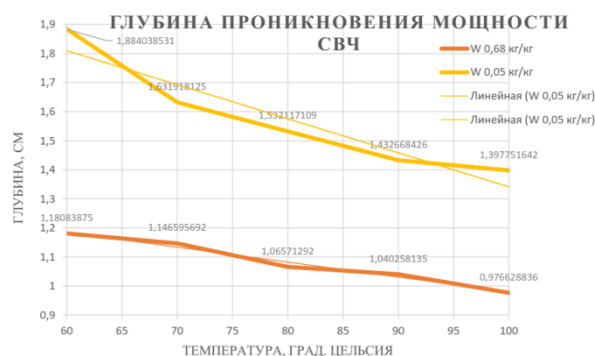


Рисунок 3. Закономерности варьирования d_p при изменении T и W для печени сома

Figure 3. Patterns of variation of d_p with changes in T and W for catfish liver

Таблица 4.

Данные для определения ω внутреннего источника тепла

Table 4.

Data for determining ω of the internal heat source

N, Вт	f , МГц	E, В/м	ϵ_2'	$\tan \delta = \epsilon_2'' / \epsilon_2'$
90,0	2450,0	900,0	$\epsilon_2' = 88,2380W + 10,8880$	$\epsilon_2'' = 15,3330W + 3,96330$
180,0	2450,0	1400,0		

На рисунках 4 и 5 показаны закономерности изменения ω при мощности магнетрона

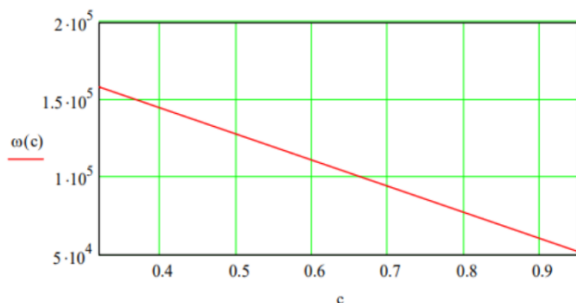


Рисунок 4. Закономерность варьирования ω в печени сома при 90 Вт

Figure 4. Pattern of ω variation in catfish liver at 90 W

90,0 и 180,0 Вт от относительного содержания сухих веществ печени сома.

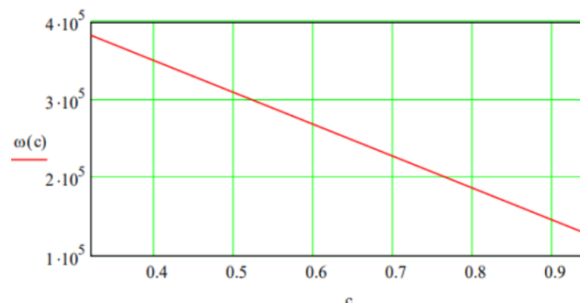


Рисунок 5. Закономерность варьирования ω в печени сома при 180 Вт

Figure 5. Pattern of ω variation in catfish liver at 180 W

Заключение

Экспериментально определены диэлектрические характеристики печени сома обыкновенного (*Silurus glanis*) как объекта микроволновой сушки. Методом резонаторных возмущений на частоте 2,45 ГГц в диапазоне температур от 60 до 100 °C измерены диэлектрическая проницаемость и её мнимая часть (через тангенс угла диэлектрических потерь) для сырой печени с влажностью 68 % и высушенного продукта с влажностью 5 %, а также определена насыпная плотность сухого порошка — 364 кг/м³.

Установлено, что диэлектрическая проницаемость печени сома возрастает с увеличением влагосодержания при всех исследованных температурах, что обусловлено ростом доли свободной влаги и приближением свойств системы к свойствам воды. С повышением температуры действительная часть проницаемости снижается, тогда как диэлектрические потери увеличиваются. В диапазоне влажности от 0,05 до 0,68 кг/кг зависимости диэлектрической проницаемости и её мнимой части от влагосодержания при фиксированных температурах (60, 70, 80, 90 и 100 °C) с достаточной точностью описываются линейными уравнениями (8)–(17).

Показано, что глубина проникновения микроволновой мощности возрастает по мере снижения влажности материала; соответствующие зависимости от температуры приведены в уравнениях (18)–(19). Выбор рабочей частоты 2,45 ГГц обоснован тем, что при более высокой частоте (20 ГГц) прогревается лишь поверхностный водный слой толщиной менее 0,0001 м, тогда как при 2,45 ГГц глубина проникновения в поверхностном слое достигает 0,013 м, что обеспечивает нагрев большего объема материала.

На основе измеренных характеристик рассчитана мощность внутреннего источника тепла в слое печени сома при мощности магнетрона 90 и 180 Вт (таблица 4, рисунки 4–5). Полученные диэлектрические зависимости и значения мощности внутреннего источника тепла служат

исходными данными для построения и решения математической модели тепломассопереноса при СВЧ-обезвоживании печени сома, а также для обоснованного выбора режимных параметров и технического исполнения магнетронов.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на верификацию построенной модели и определение рациональных режимов СВЧ-сушки, обеспечивающих сохранение биологически активных компонентов получаемого порошкового продукта.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального агентства по рыболовству (тема № 126030418352-7).

Литература


- 1 Самойлова Д.А., Цибилова М.Е. Вторичные ресурсы рыбной промышленности как источник пищевых и биологически активных добавок // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2015. № 2. С. 129–136.
- 2 Vázquez J.A., Meduña A., Durán A.I., Nogueira M. et al. Production of valuable compounds and bioactive metabolites from by-products of fish discards using chemical processing, enzymatic hydrolysis, and bacterial fermentation // *Marine Drugs*. 2019. V. 17. № 3. P. 139. doi: 10.3390/md17030139
- 3 Пат. CN104026640 Китай. Preparation method for instant fish liver powder flavoring bag / Lin Huimin, Ye Qi, Deng Shanggui, Zhang Bin; заявл. 04.03.2013; опублик. 10.09.2014.
- 4 Пат. CN102283341 Китай. Method for producing nutrient and delicious fishbone and chicken liver floss / Wang Baotai; заявл. 29.06.2011; опублик. 21.12.2011.
- 5 Пат. CN117024553 Китай. Preparation method and application of salmon protamine nucleoprotein / Wu Zhongying, Zhao Yunying, Diao Yanli, Zhang Yun, Yang Zengkun; заявл. 04.08.2023; опублик. 10.11.2023.
- 6 Анфиногентов В.И., Морозов Г.А., Морозов О.Г., Смирнов С.В. и др. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки органических отходов // Вестник НЦБЖД. 2020. № 3 (45). С. 142–149.
- 7 Ермачкова В.В., Игнатенков М.М., Игнатьева О.А. Интенсификация технологического процесса сушки мясного сырья // *Естественные и технические науки*. 2020. № 7 (145). С. 158–160.
- 8 Бурак Л.Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 2. С. 342–357. doi: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510
- 9 Захаров А.Н., Сусь Е.Б. Электропроводность мяса // *Все о мясе*. 2011. № 5. С. 48–49.
- 10 Красных С.Ю., Куанышев В.Т., Барбин Н.М. Особенности и методы измерения электрических характеристик жидких диэлектриков // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19. № 2. С. 10–24. doi: 10.55648/1998-6920-2025-19-2-10-24
- 11 Четвериков Е.А., Лягина Л.А., Волгин А.В., Моисеев А.П. Исследование характеристик магнетронного генератора при высоких уровнях мощности отраженного сигнала в установках сушки сельскохозяйственной продукции // Вестник Курганской ГСХА. 2022. № 2 (42). С. 72–80. doi: 10.52463/22274227_2022_42_72
- 12 Васильев А.А., Васильев А.Н., Тихомиров Д.А. Настройка параметров излучения волноводов для СВЧ-конвективных установок // Вестник аграрной науки Дона. 2023. Т. 16. № 4 (64). С. 91–101. doi: 10.55618/20756704_2023_16_4_91-101
- 13 Бобровский С.Ю., Лагарьков А.Н., Розанов К.Н. Методы измерения сверхвысокочастотной диэлектрической и магнитной проницаемости материалов // *Электричество*. 2020. № 11. С. 4–16. doi: 10.24160/0013-5380-2020-11-4-16
- 14 Kato Y., Horibe M. New permittivity measurement methods using resonant phenomena for high-permittivity materials // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017. V. 66. № 6. P. 1–10. doi: 10.1109/TIM.2017.2662558
- 15 Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х.Х., Ярцева Н.В., Худалиев Ю.М. и др. Моделирование кинетики тепломассопереноса в процессе вакуумного замораживания рыбного фаршевого сырья // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2020. № 2 (44). С. 11–21. doi: 10.17586/2310-1164-2020-10-2-11-21
- 16 Solyom K., Rosales López P., Esquivel P., Vásquez-Caicedo A.L. Effect of temperature and moisture contents on dielectric properties at 2.45 GHz of fruit and vegetable processing by-products // *RSC Advances*. 2020. V. 10. P. 16783–16790. doi: 10.1039/C9RA10639A
- 17 Roy V.C., Islam M.R., Sadia S., Yeasmin M. et al. Trash to treasure: an up-to-date understanding of the valorization of seafood by-products, targeting the major bioactive compounds // *Marine Drugs*. 2023. V. 21. № 9. P. 485. doi: 10.3390/md21090485
- 18 Ozogul F., Cagalj M., Šimat V., Ozogul Y. et al. Recent developments in valorisation of bioactive ingredients in discard/seafood processing by-products // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. V. 116. P. 559–582. doi: 10.1016/j.tifs.2021.08.014

- 19 Li Y., Wang X., Zhang M., Liu J. et al. Microwave drying of *Tricholoma matsutake*: dielectric properties, mechanism, and process optimization // *Foods*. 2025. V. 14. № 14. P. 3054. doi: 10.3390/foods14143054
- 20 Сергазиева О.Д., Климух А.А., Царьков М.Д. Технологические и биохимические свойства рыбных филе и фаршей из гибридов африканского клариевого сома для производства пищевых рыбопродуктов // Вестник ВГУИТ. 2025. Т. 87. № 3. С. 113–121.


References

- 1 Samoilova D.A., Tsibizova M.E. Secondary resources of the fishing industry as a source of food and biologically active additives. *Bulletin of ASTU. Series: Fisheries*. 2015. no. 2. pp. 129–136. (in Russian).
- 2 Vázquez J.A., Meduñña A., Durán A.I., Nogueira M. et al. Production of valuable compounds and bioactive metabolites from by-products of fish discards using chemical processing, enzymatic hydrolysis, and bacterial fermentation. *Marine Drugs*. 2019. vol. 17. no. 3. article 139. doi: 10.3390/md17030139.
- 3 Patent no. CN104026640 China. Preparation method for instant fish liver powder flavoring bag. Lin Huimin, Ye Qi, Deng Shangui, Zhang Bin; filed 04.03.2013; publ. 10.09.2014.
- 4 Patent no. CN102283341 China. Method for producing nutrient and delicious fishbone and chicken liver floss. Wang Baotai; filed 29.06.2011; publ. 21.12.2011.
- 5 Patent no. CN117024553 China. Preparation method and application of salmon protamine nucleoprotein. Wu Zhongying, Zhao Yunying, Diao Yanli, Zhang Yun, Yang Zengkun; filed 04.08.2023; publ. 10.11.2023.
- 6 Anfinogentov V.I., Morozov G.A., Morozov O.G., Smirnov S.V. et al. Mathematical modeling and experimental study of the microwave drying process of organic waste. *Bulletin of the Scientific Center for Life Safety*. 2020. no. 3 (45). pp. 142–149. (in Russian).
- 7 Ermachkova V.V., Ignatenkov M.M., Ignatieva O.A. Intensification of the technological process of drying meat raw materials. *Natural and Technical Sciences*. 2020. no. 7 (145). pp. 158–160. (in Russian).
- 8 Burak L.Ch., Zavalei A.P. Efficiency of combined exposure to ultrasound and microwaves in food processing. *Review. Technique and Technology of Food Production*. 2024. vol. 54. no. 2. pp. 342–357. doi: 10.21603/2074-9414-2024-2-2510 (in Russian).
- 9 Zakharov A.N., Sus E.B. Electrical conductivity of meat. *All About Meat*. 2011. no. 5. pp. 48–49. (in Russian).
- 10 Krasnykh S.Yu., Kuanyshev V.T., Barbin N.M. Features and methods for measuring electrical characteristics of liquid dielectrics. *Bulletin of SibSUTI*. 2025. vol. 19. no. 2. pp. 10–24. doi: 10.55648/1998-6920-2025-19-2-10-24 (in Russian).
- 11 Chetverikov E.A., Lyagina L.A., Volgin A.V., Moiseev A.P. Study of the characteristics of a magnetron generator at high levels of reflected signal power in drying plants for agricultural products. *Bulletin of Kurgan State Agricultural Academy*. 2022. no. 2 (42). pp. 72–80. doi: 10.52463/22274227_2022_42_72 (in Russian).
- 12 Vasiliev A.A., Vasiliev A.N., Tikhomirov D.A. Adjustment of waveguide radiation parameters for microwave-convective installations. *Bulletin of Don Agrarian Science*. 2023. vol. 16. no. 4 (64). pp. 91–101. doi: 10.55618/20756704_2023_16_4_91-101 (in Russian).
- 13 Bobrovsky S.Yu., Lagarkov A.N., Rozanov K.N. Methods for measuring microwave dielectric and magnetic permeability of materials. *Electricity*. 2020. no. 11. pp. 4–16. doi: 10.24160/0013-5380-2020-11-4-16 (in Russian).
- 14 Kato Y., Horibe M. New permittivity measurement methods using resonant phenomena for high-permittivity materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017. vol. 66. no. 6. pp. 1–10. doi: 10.1109/TIM.2017.2662558.
- 15 Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.Kh.Kh., Yartseva N.V., Khudaliev Yu.M. et al. Modeling of heat and mass transfer kinetics during vacuum freezing of fish mince raw materials. *Scientific Journal of ITMO University. Series: Processes and Apparatus for Food Production*. 2020. no. 2 (44). pp. 11–21. doi: 10.17586/2310-1164-2020-10-2-11-21 (in Russian).
- 16 Solyom K., Rosales López P., Esquivel P., Vásquez-Caicedo A.L. Effect of temperature and moisture contents on dielectric properties at 2.45 GHz of fruit and vegetable processing by-products. *RSC Advances*. 2020. vol. 10. pp. 16783–16790. doi: 10.1039/C9RA10639A.
- 17 Roy V.C., Islam M.R., Sadia S., Yeasmin M. et al. Trash to treasure: an up-to-date understanding of the valorization of seafood by-products, targeting the major bioactive compounds. *Marine Drugs*. 2023. vol. 21. no. 9. article 485. doi: 10.3390/md21090485.
- 18 Ozogul F., Cagalj M., Šimat V., Ozogul Y. et al. Recent developments in valorisation of bioactive ingredients in discard/seafood processing by-products. *Trends in Food Science & Technology*. 2021. vol. 116. pp. 559–582. doi: 10.1016/j.tifs.2021.08.014.
- 19 Li Y., Wang X., Zhang M., Liu J. et al. Microwave drying of *Tricholoma matsutake*: dielectric properties, mechanism, and process optimization. *Foods*. 2025. vol. 14. no. 14. article 3054. doi: 10.3390/foods14143054.
- 20 Sergazieva O.D., Klimuk A.A., Tsarkov M.D. Technological and biochemical properties of fish fillets and minces from African sharptooth catfish hybrids for the production of food fish products. *Bulletin of VSUET*. 2025. vol. 87. no. 3. pp. 113–121. (in Russian).

Сведения об авторах

Игорь Ю. Алексанян д.т.н., профессор, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, 1608196igor@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Information about authors

Igor Y. Aleksanyan Dr. Sci. (Engin.), professor, technological machines and equipment department, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, 1608196igor@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0001-5494-1226>

Альберт Х.-Х. Нугманов д.т.н., профессор, кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, albert909@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Екатерина В. Соколова к.т.н., кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, k_sokolova93@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2663-1786>

Ольга И. Коннова к.т.н., кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, okonnova 88@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2146-5443>

Светлана А. Свирина к.т.н., кафедра технологических машин и оборудования, Астраханский государственный технический университет, ул. Татищева, стр. 16/1, г. Астрахань, 414056, Россия, svetlanasv97@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0002-1646-2421>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Albert H. Nugmanov Dr. Sci. (Engin.), professor, technological machines and equipment department, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, albert909@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0002-4093-9982>

Ekaterina V. Sokolova Cand. Sci. (Engin.), technological machines and equipment department, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, k_sokolova93@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2663-1786>

Olga I. Konnova Cand. Sci. (Engin.), technological machines and equipment department, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, okonnova 88@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2146-5443>

Svetlana A. Svirina Cand. Sci. (Engin.), technological machines and equipment department, Astrakhan State Technical University, Tatishchev St., Bldg. 16/1, Astrakhan, 414056, Russia, svetlanasv97@ya.ru

<https://orcid.org/0009-0002-1646-2421>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 30/03/2026	После редакции 18/04/2026	Принята в печать 11/05/2026
Received 30/03/2026	Accepted in revised 18/04/2026	Accepted 11/05/2026