

УДК 664.951.014: 639.55: 627.8

Применение ультразвука в процессе выделения жира из отходов рыбопереработки

Д-р техн. наук О. Я. МЕЗЕНОВА*, канд. техн. наук С. В. АГАФОНОВА,
канд. техн. наук Н. Ю. РОМАНЕНКО, Н. С. КАЛИНИНА, В. В. ВОЛКОВ

Калининградский государственный технический университет

*E-mail: mezenova@klgtu.ru

Рыбные жиродержащие отходы являются перспективным источником липидов, используемых в микробиологическом синтезе продуктов биотехнологии. Традиционным способом получения жира является термический, основанный на высокотемпературном разрушении жировых клеток. Однако таким способом извлекаются только резервные жиры. Для повышения степени извлечения жира из рыбных отходов применяли комбинированный метод, основанный на предварительном воздействии на рыбное сырье ультразвуком с последующей термообработкой. Целью работы являлось изучение влияния ультразвука на степень выделения жира из рыбных отходов и его качество. Объектами исследования являлись отходы рыбопереработки предприятий Калининградской области: головы копченой кильки, внутренностей судака, головы скумбрии. Определяли выход жира при варьировании частоты ультразвука, температуры и продолжительности экстракции. В образцах жира анализировали кислотное, перекисное, йодное, тиобарбитуровое и анизидиновое числа, число омыления, содержание неомыляемых веществ и примесей при различных значениях pH в рыбоводной среде. Особенностью воздействия ультразвуком на рыбное сырье является повышенное образование белково-жировой эмульсии в экстрагируемой жировой массе, обусловленное возникающим явлением кавитации и повышенным количеством фосфолипидов в жирах рыбных отходов. Образование эмульсии снизило степень извлечения жира на 12,8–17,7% от его содержания в сырье. Получены математические модели экстракции жира, на основе которых оптимизированы ключевые факторы термической стадии комбинированного процесса. Рекомендуется выделять жир из рыбных отходов комбинированным способом в две стадии при следующих параметрах: 1 — ультразвуковое воздействие на рыбоводную массу частотой 40 кГц в течение 30 мин; 2 — термообработка при 83–90 °C в течение 22–30 мин. Экстрагированные с применением ультразвука из рыбных отходов жиры характеризуются показателями качества, благоприятными для использования в качестве источника углерода в микробном синтезе разрушаемых биопластиков — полигидроксикарбоновых кислот.

Ключевые слова: рыбные отходы, рыбный жир, ультразвук, комбинированный способ, показатели качества, продукты биотехнологии, полигидроксикарбоновые кислоты.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 31.01.2025, одобрена после рецензирования 21.02.2025, принята к печати 28.02.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-82-91

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Мезенова О. Я., Агафонова С. В., Романенко Н. Ю., Калинина Н. С., Волков В. В. Применение ультразвука в процессе выделения жира из отходов рыбопереработки. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 82–91. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-82-91

Ultrasound for separation of fat from fish processing waste

D. Sc. O. Ya. MEZENOVA*, Ph. D. S. V. AGAFONOVA,

Ph. D. N. Yu. ROMANENKO, N. S. KALININA,

V. V. VOLKOV

Kaliningrad State Technical University

*E-mail: mezenova@klgtu.ru

Fish fat-containing waste is a promising source of lipids used in the microbiological synthesis of biotechnology products. The traditional method of obtaining fat is thermal, based on high-temperature destruction of fat cells. However, only reserve fats are extracted in this way. To increase the degree of fat extraction from fish waste, a combined method was used based on preliminary exposure of fish raw materials to ultrasound followed by heat treatment. The aim of the work was to study the effect of ultrasound on the degree of fat extraction from fish waste and its quality. The objects of the study were waste from fish processing enterprises in the Kaliningrad region: smoked sprat heads, pike perch entrails, and mackerel heads.

The yield of fat was determined by varying the ultrasound frequency, temperature and duration of extraction. The acid, peroxide, iodine, thiobarbituric and anisidine values, saponification value, unsaponifiable matter and impurity content at different pH values in the fish-breeding environment were analyzed in the fat samples. A peculiarity of the ultrasound effect on fish raw materials is the increased formation of protein-fat emulsion in the extracted fat mass due to the emerging cavitation phenomenon and the increased amount of phospholipids in the fats of fish waste. The emulsion formation decreased the degree of fat extraction by 12.8–17.7% of its content in the raw material. Mathematical models of fat extraction were obtained, based on which the key factors of the thermal stage of the combined process were optimized. It is recommended to extract fat from fish waste using a combined method in two stages with the following parameters: 1 — ultrasound exposure to the fish-breeding mass with a frequency of 40 kHz for 30 minutes; 2 — heat treatment at 83–90 °C for 22–30 minutes. The fats extracted from fish waste using ultrasound are characterized by quality indicators favorable for use as a carbon source in the microbial synthesis of degradable bioplastics — polyhydroxyalkanoates.

Keywords: fish waste, fish oil, ultrasound, combined method, quality indicators, biotechnology products, polyhydroxyalkanoates.

Article info:

Received 31/01/2025, approved after reviewing 21/02/2025, accepted 28/02/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-82-91

Article in Russian

For citation:

Mezenova O. Ya., Agafonova S. V., Romanenko N. Yu., Kalinina N. S., Volkov V. V. Ultrasound for separation of fat from fish processing waste. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 2. p. 82-91. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-82-91

Введение

Липиды рыбных отходов отличаются от тканевых липидов рыб многообразием классов, при этом многие из них являются биологически активными веществами. Рыбное вторичное сырье (отходы от разделки — головы и внутренности) является природным жиросодержащим биологическим материалом, в котором липиды представлены триацилглицеридами (основной класс), а также фосфолипидами, свободными жирными кислотами, жирорастворимыми витаминами и другими классами органических веществ [1]–[3]. Жировой потенциал рыбных отходов рационально использовать в качестве углеродного субстрата для биотехнологического синтеза целевых продуктов — белков и биоразлагаемых пластиков (полигидроксикарбоанатов) [4, 5]. Особенностью рыбных жиров является присутствие в них значительных количеств ненасыщенных жирных кислот (ЖК) (66–74%), в том числе полиненасыщенных ЖК — ПНЖК (22–38%), среди которых 18–47% — это длинноцепочечные ЖК (свыше 18 атомов углерода), включая уникальные ЖК семейства омега 3 (12–45%) [1, 3, 5]. Последние являются прекрасным субстратом для микроорганизмов, синтезирующих полигидроксикарбоанаты [6]–[9].

Известно, что состав липидов рыб варьируется в зависимости от их вида, сезона вылова, условий хранения, метода предварительной обработки (варка, копчение, бланширование и др.). Состав и качество жира также зависят от способа его извлечения. Традиционным способом получения жира из рыбного сырья является термический (вытапливание); относительно новым считается биотехнологический (ферментативный) метод. Для интенсификации процесса экстракции жира на сырье воздействуют различными физическими энергиями (ультразвук, токи промышленной и высокой частоты, электромагнитное поле и др.), которые комбинируют с вытапливанием [10]–[14].

Термический способ выделения липидов из жиросодержащего рыбного сырья проводится при температу-

рах 50–100 °C и основан на тепловом разрушении оболочек жировых клеток рыбы [1, 11]. С его применением получают достаточно высокие показатели выхода жира из жиросодержащих рыбных отходов (9–24% от массы сырья или 60–75% от содержания жира в сырье). Однако таким способом извлекаются только резервные (нейтральные) жиры, а связанные липиды (фосфолипиды, гликолипиды), которых особенно много в головах и костях рыб, остаются не извлеченными [1, 3].

Повысить выход жира из вторичного рыбного сырья потенциально возможно применением современных интенсифицирующих методов деградации жировых клеток ультразвуковым (УЗ) воздействием, что при комбинировании с тепловым способом должно способствовать росту степени извлечения жира.

Эффективность такого метода извлечения жира основана на повышенном разрушении жировых клеток под действием механической кавитации (схлопывание пузырьков), вызванной ультразвуком. Образующиеся колебания при последующем термическом воздействии под действием термодиффузии должны интенсифицировать переход жира в экстракционную среду (воду). При обработке растительно-масличного сырья такой способ доказал свою эффективность и способствовал росту степени извлечения липидов [15]–[20].

Во избежание нежелательных физических и химических изменений в липидах, потери лабильных биологически активных веществ (каротиноидов, флавоноидов, дубильных и других БАВ) для экстракционного процесса с применением УЗ рекомендуется обрабатывать сырье на малых частотах (от 20 до 50 кГц) [20]. Возникающих колебаний достаточно для достижения критической величины гидродинамического и гидростатических давлений в биологической системе, появления акустических кавитации, т. е. создания пузырьков пара, разрушающих белковые оболочки жировых клеток с последующим извлечением из них жира [18]. В зависимости от сырья, продолжительности ультразвукового воздействия, спо-

соба дообработки из сырья можно извлекать до 80% жира от его содержания в сырье [17].

Однако широкого распространения УЗ-способ извлечения жира пока не получил по причине сложности аппаратного оформления и неоднородности состава жиросодержащих тканей. Например, при обработке животных тканей УЗ интенсифицирует пептизацию и экстракцию низкомолекулярных протеинов. Это в свою очередь вызывает в системе образование белково-жировой эмульсии, снижающей выход свободного жира. Устойчивость таких эмульсий особенно высока при обработке жиросодержащих рыбных отходов из-за присутствия в них натуральных эмульгаторов (фосфолипидов, свободных жирных кислот, пептидов), экстрагируемых вместе с липидами [16, 19].

В связи с потенциальным эмульгированием жиросодержащей рыбной системы под действием ультразвука при извлечении жира из рыбных отходов представляется рациональным комбинирование УЗ с термическим воздействием для достижения максимального выхода жира, обладающего показателями качества, благоприятными для целей биотехнологии.

Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования являлось изучение эффективности процесса извлечения жира из отходов рыбопереработки комбинированным способом, основанном на применении ультразвука в сочетании с термообработкой, при обеспечении максимального выхода жира и его качественного состояния, приемлемого для биотехнологического использования.

Конкретными задачами исследования являлись:

- обоснование рациональных параметров предварительной ультразвуковой обработки рыбных отходов;
- оптимизация режима последующей термообработки рыбного сырья на основе математического моделирования процесса;
- анализ показателей степени извлечения и качества жира, выделенного из жиросодержащего сырья комбинированным методом.

Материалы и методы исследования

При проведении экспериментов использовали рыбные отходы рыбоконсервного завода СПК «Рыболовецкий колхоз «За Родину» (п. Взморье, Калининградская обл.) и ОАО «Калининградский тарный комбинат».

Схема комбинированного способа извлечения жира приведена на рис. 1. Измельченное рыбное сырье, сме-

шанное с водой в соотношении 1:1, обрабатывали ультразвуком в установке Вилитек VBS (мощность 300 Вт). Далее сырье подвергали высокотемпературному воздействию при разных параметрах, после чего жир отделяли центрифугированием и декантированием. Продолжительность УЗ-воздействия на основании априорных экспериментов и литературных данных была принята 30 мин. Менее этого времени эффект кавитации не проявлялся, более 30 мин интенсифицировались процессы окисления жира под действием воздуха, появляющегося при схлопывании пузырьков [16, 17, 20].

На первом этапе исследований определяли наиболее эффективные значения частоты ультразвука, проводя обработку сырья УЗ с частотами 28 и 40 кГц, рекомендованными в литературе [16, 17, 19]. Режим температурного воздействия, термические режимы в данных экспериментах устанавливали на основе результатов ранее проведенных исследований [11]. При появлении в образцах выделенного жира эмульсии ее тщательно отделяли. В очищенной жировой фракции оценивали ряд показателей качества.

Для анализа качества жира применяли стандартные и общепринятые показатели и методы их исследования. Содержание жира, воды, белка, минеральных веществ в сырье, кислотное, перекисное и йодное числа жира, число омыления жира, содержание неомыляемых веществ в жире, количество в жире примесей нежирового характера определяли по ГОСТ 7636, анизидиновое число жира — по ГОСТ 31756, тиобарбитуровое число жира — спектрофотометрическим методом с применением йодометрического титрования.

Для уменьшения количества эмульсии в экстрагированной жировой системе изменяли активную кислотность (pH) среды, добавляя лимонную кислоту до величины pH 5,5, адекватной изоэлектрической точке рыбных белков, в которой их растворимость минимальная. Известно, что в данной точке минимизируется экстракция пептидов и низкомолекулярных азотистых веществ, эмульгирующих жировую систему [21].

На следующем этапе исследования комбинированного способа извлечения жира обосновывали режим термического воздействия на рыбное сырье, проводимого после УЗ-обработки с частотой 40 кГц. Для этого применяли математическое моделирование экспериментов на основе ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка для 2-х факторов. Продолжительность термического процесса (X_1) варьировали от 20 до 40 мин; температуру термического процесса (X_2) — от 50 до 90 °С.



Рис. 1. Схема извлечения жира с применением ультразвука

Fig. 1. Scheme of fat extraction by ultrasound

В качестве параметра оптимизации использовали обобщенный показатель, который включал три частных отклика: выход чистого жира (ВЖ), выход жировой эмульсии (ВЭ), а также тиобарбитуровое число жира (ТБЧ).

Статистическую обработку всех полученных экспериментальных данных осуществляли с использованием пакетов прикладных программ Microsoft Excel 2010 и Statistica 6.0 на 95%-ном доверительном уровне (надежность вывода $P=0,95$).

Результаты исследования, их обсуждение

Химический состав рыбных отходов, иллюстрирующий достаточно высокое содержание в них жиров (17,5–30,1%), приведен в табл. 1.

Результаты исследований по обоснованию рациональных значений частоты применяемого ультразвука

и pH среды при комбинированной экстракции жира из рыбных отходов с учетом выхода жира и количества эмульсии, а также качества жира по показателям гидролитических и окислительных изменений (кислотное и перекисное числа), приведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что изменение активной кислотности в кислую зону (понижение pH с 7,0 до 5,5) практически не влияет на выход чистого жира. При этом во всех случаях в рыбоводной системе формируется белково-жировая эмульсия в количестве от 2,0 до 10,0% к массе сырья. Важно, что масса образующейся эмульсии была практически равной или превосходила выход свободного жира (в % от массы сырья) и составляла: из голов копченой кильки 2,0–6,4%; из внутренностей судака — 2,5–6,0%; из голов скумбрии — 2,0–10,0%. Особенно высокой была массовая доля эмульсии при

Таблица 1

Химический состав рыбных отходов, использованных в исследованиях комбинированного способа извлечения жира

Table 1

Chemical composition of fish waste used in studying the combined method of fat extraction

Сырье	Вода, %	Белок, %	Жир, %	Минеральные вещества, %
Головы копченой кильки	49,8	25,1	17,5	7,6
Головы скумбрии	58,6	17,6	20,3	3,5
Внутренности судака	58,3	11,3	30,1	0,30

Таблица 2

Результаты экспериментов по комбинированному извлечению жира из рыбных отходов при различных значениях частоты ультразвука и активной кислотности среды

Table 2

Results of experiments on combined extraction of fat from fish waste at different values of ultrasound frequency and active acidity of the environment

УЗ-обработка		Показатели процесса		Показатели качества жира	
Частота, кГц	Продолжительность, мин	Выход эмульсии (ВЭ), г, % сырья	Выход жира (ВЖ), % массы сырья	Кислотное число (КЧ), мг КОН/г жира	Перекисное число (ПЧ), ммоль активного кислорода/кг
Головы копченой кильки					
В водной нейтральной среде, pH 7,0					
28	30	5,2	4,0	16,3	43,0
40	30	2,0	6,0	16,0	43,5
С добавлением лимонной кислоты, pH 5,5					
28	30	6,4	6,4	16,5	57,9
40	30	5,2	6,4	16,4	59,9
Внутренности судака					
В водной нейтральной среде pH 7,0					
28	30	2,5	5,8	19,41	8,86
40	30	3,75	4,5	21,35	8,88
С добавлением лимонной кислоты, pH 5,5					
28	30	3,75	4,0	20,97	22,29
40	30	6,0	4,3	19,91	25,19
Головы скумбрии					
В водной нейтральной среде pH 7,0					
28	30	2,2	0,4	54,23	87,32
40	30	6,8	1,0	63,81	92,14
С добавлением лимонной кислоты, pH 5,5					
28	30	2,8	0,4	67,86	95,12
40	30	10	1,0	72,34	101,34

комбинированной обработке голов скумбрии (до 50% к массе жира), при этом свободный жир из данного сырья практически не извлекался и составлял всего 0,4–1,0% от его массы. Причиной этого, очевидно, является повышенные количества в головах скумбрии фосфолипидов, являющихся активными эмульгаторами, а также экстрактивных азотистых веществ, связывающих триацилглицериды.

При анализе влияния частоты УЗ-обработки на показатели выхода жира можно заметить, что увеличение частоты с 28 до 40 кГц приводит к росту выхода жира из всех рыбных отходов, особенно из внутренностей судака — с 5,75 до 12,5% к массе сырья (с 17,3 до 41,5% к массе жира). Однако при этом в 3,0–4,5 раза возрастает также массовая доля эмульсии в системе (до 10% к массе сырья), что является нежелательным фактором.

Сравнительный анализ показателей качества жиров (см. табл. 2) позволяет заметить, что рост частоты УЗ-обработки способствует увеличению их кислотного и перекисного чисел, особенно при обработке голов скумбрии (КЧ=54,23–72,34 мг КОН/г жира; ПЧ=87,32–101,34 ммоль акт. кислорода/кг). В других жирах также отмечена тенденция увеличения показателей гидролиза и окисления жиров. Добавление в экстракционную систему лимонной кислоты (изменение pH до изоэлектрической точки белков) не привело к ожидаемому результату. Количество белково-жировой эмульсии в жировой системе, извлеченной из голов копченой кильки, наоборот, при этом увеличилось с 2,0 до 5,2% к массе сырья.

На основе полученных результатов было установлено, что предварительную обработку рыбных отходов ультразвуком рациональнее проводить частотой 40 кГц в нейтральной зоне pH.

Таблица 3

План эксперимента по установлению оптимальных значений температуры и продолжительности обработки рыбных отходов при комбинированном способе извлечения жира (ультразвук 40 кГц+термообработка) и результаты его реализации

Table 3

Experimental plan for establishing optimal values of temperature and duration of fish waste processing using a combined method of fat extraction (ultrasound 40 kHz+heat treatment) and the results of its implementation

№ опыта	Факторы процесса				Параметры оптимизации			
	Температура, X ₁ , °C		Продолжительность, X ₂ , мин		Частные отклики			Обобщенный параметр оптимизации, Y
	кодирован- ные	натуральные	кодирован- ные	натуральные	ВЖ, % к массе сырья	ВЭ, % к массе сырья	ТБЧ, ед. опт. плотности	
Головы копченой кильки								
1	1	90	1	40	9,0	0,8	1,580	937,88
2	–1	50	1	40	4,8	6,0	0,269	141,65
3	1	90	–1	20	9,3	0,8	0,511	86,51
4	–1	50	–1	20	3,3	7,5	0,124	199,80
5	1	90	0	30	9,3	0,8	0,560	105,54
6	–1	50	0	30	3,8	6,5	0,224	157,67
7	0	70	1	40	7,8	1,4	1,367	698,27
8	0	70	–1	20	8,0	1,9	0,165	14,35
9	0	70	0	30	8,0	1,8	0,242	22,72
Внутренние органы судака								
1	1	90	1	40	9,8	4,8	0,242	0,71
2	–1	50	1	40	2	20,5	0,336	35,32
3	1	90	–1	20	9	5,2	0,201	0,89
4	–1	50	–1	20	2	20,5	0,292	35,07
5	1	90	0	30	9,8	4,8	0,222	0,68
6	–1	50	0	30	3,5	17,3	0,30	23,68
7	0	70	1	40	8,8	8	0,326	3,53
8	0	70	–1	20	7,9	9,3	0,333	5,24
9	0	70	0	30	8,3	8,8	0,358	4,75
Головы скумбрии								
1	1	90	1	40	7,8	3,5	0,231	0,17
2	–1	50	1	40	3,3	4,7	2,761	164,69
3	1	90	–1	20	7,5	3,8	0,202	0,21
4	–1	50	–1	20	4,3	3,5	2,401	121,55
5	1	90	0	30	7,5	3,8	0,214	0,21
6	–1	50	0	30	4,5	3,5	2,512	133,82
7	0	70	1	40	7,2	3,8	1,261	28,32
8	0	70	–1	20	6	3,5	1,155	23,08
9	0	70	0	30	6,3	3,5	1,768	61,72

Обоснование оптимальных параметров последующей термообработки рыбного сырья при комбинированном извлечении жира проводили на основании данных, полученных математическим моделированием (табл. 3).

После обработки экспериментальных данных, приведенных в табл. 3, по алгоритмам ОЦКП были получены математические модели (1-3).

Головы копченой кильки:

$$y=2024,0598-33,1923x_1-56,9528x_2+0,3431x_1x_2+0,1511x_1^2+0,62819x_2^2.$$
 (1)

Внутренние органы судака:

$$y=230,698-4,795x_1-2,2449x_2-0,00053x_1x_2+0,0289x_1^2+0,0376x_2^2.$$
 (2)

Головы скумбрии:

$$y=467,4928-13,2174x_1+9,9333x_2-0,05397x_1x_2+0,081x_1^2-0,0891x_2^2.$$
 (3)

На основе полученных моделей (формулы (1)–(3) были построены геометрические зависимости процессов и рассчитаны оптимальные значения факторов термического воздействия на рыбное сырье после УЗ-обработки (рис. 2).

Дифференцирование полученных моделей (1)–(3) с целью поиска координат экстремума их поверхностей (рис. 2) позволило установить оптимальные значения температуры и продолжительности термического воздействия при комбинированном способе извлечения жира: для голов копченой кильки, внутренних органов судака, голов скумбрии соответственно: 84,5 °С и 22,2 мин; 83,2 °С; 30,1 мин; 89,9 °С и 28 мин.

Таким образом, комбинированный способ выделения жира из рыбных отходов с целью получения максимального количества чистого жира с пониженным содержанием нежелательных продуктов его гидролиза и окисления следует проводить в 2 стадии по следующим режимам:

1 операция — УЗ-обработка с частотой 40 кГц в течение 30 мин;

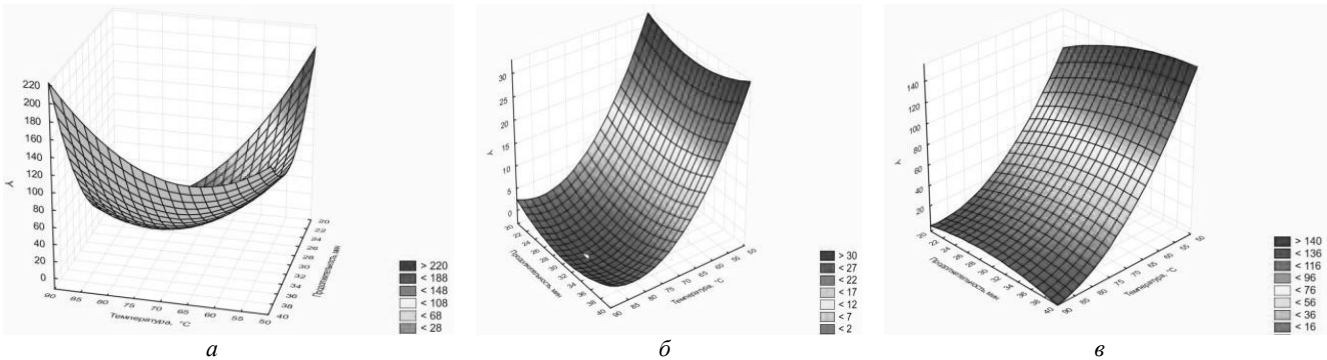


Рис. 2. Геометрические изображения математических зависимостей обобщенного параметра оптимизации процесса извлечения жира из голов копченой кильки (а), внутренностей судака (б), голов скумбрии (в) от температуры и продолжительности термообработки после УЗ-воздействия

Fig. 2. Geometrical representation of mathematical models for the dependence of the generalized parameter of fat extraction optimization from smoked sprat heads (a), pike-perch entrails (б), and mackerel heads (в) on the temperature and duration of heat treatment after ultrasound exposure

Таблица 4

Показатели качества жиров, полученных по оптимизированным режимам комбинированного извлечения из рыбных отходов

Table 4

Quality indicators of fats obtained using optimized modes of combined extraction from fish waste

Показатели	Головы копченой кильки	Внутренности судака	Головы скумбрии
Выход жира (ВЖ), г/100 г сырья	9,4	22,3	7,3
Выход эмульсии (ВЭ), г/100 г сырья	3,1	4,2	2,6
Кислотное число (КЧ), мг КОН/г жира	11,7	18,0	23,9
Перекисное число (ПЧ), ммоль акт. О/кг	12,5	13,1	33,2
Тиобарбитуровое число (ТБЧ), ед. опт. плотности	0,29	0,29	1,89
Анизидиновое число (АЧ), у. е.	18,2	5,4	22,5
Йодное число (ЙЧ), г йода/100 г жира	148,7	129,2	181,6
Число омыления (ЧО) мг КОН/г жира	194,1	213,5	201,3
Неомыляемые вещества (НВ), %	3,22	1,12	2,91
Содержание влаги (СВ), %	0,31	0,41	0,89
Содержание примесей нежирового характера (ПНХ), %	0,79	1,23	2,26

2 операция — термообработка температурой 83–90 °C в течение 22–30 мин.

На следующем этапе проводили оценку качества жира, извлеченного из рыбных отходов комбинированным способом по обоснованным параметрам. Полученные характеристики жира приведены в табл. 4.

Из данных табл. 4 следует, что полученные жиры имеют выход свободных липидов соответственно: 9,4% (из голов кильки); 7,3% (из голов скумбрии); 22,3% (из внутренностей судака), что означает соответствующую степень извлечения (в % от массы жира) 53,7; 35,8 и 74,1. Эти значения несколько ниже, чем при термическом способе извлечения жира, что объясняется дополнительным эмульгированием системы под действием ультразвука [10, 11].

Полученный жир имеет несколько повышенные значения кислотного, перекисного, тиобарбитурового, анизидинового чисел и других показателей качества жира, что свидетельствует о наличии продуктов гидролиза и окисления и, очевидно, обусловлено явлением кавитации при УЗ-обработке: КЧ=11,7÷23,9 мг КОН/г жира; ПЧ=12,5÷33,2 ммоль акт. О/кг; ТБЧ=0,29÷1,89 ед. опт. плотности; АЧ=5,4÷22,5 у. е. При этом значения чисел, характеризующих природу жира, содержание в них ценных полиненасыщенных жирных кислот и степень гидролиза, остаются на уровне, свойственном натуральным рыбным жирам (ЙЧ=129,2÷181,6 г йода/100 г; ЧО=194,1÷213,5 мг КОН/г жира). Следует отметить относительно низкое содержание во всех жирах неомыляемых веществ, влаги и примесей нежирового характера (НВ=1,12÷3,22%; СВ=0,31÷0,89%; ПНХ=0,79÷2,26%), что свидетельствует об эффективности способа по чистоте экстрагируемых липидов, содержащих преимущественно триацилглицериды.

Анализ значений показателей качества позволяет заключить, что жиры, полученные из рыбных отходов по рациональным режимам комбинированного извлечения с применением ультразвука, обладают характеристиками, благоприятными для их использования в качестве углеродного субстрата в микробном синтезе разрушаемых биопластиков — полигидроксиспиртов [3, 6, 7, 8, 9, 22–25].

Негативным следствием УЗ-воздействия при комбинировании с термообработкой является значительное содержание эмульсии в экстрагированной жировой системе (2,6–4,2% от массы сырья), что уменьшает выхода жира (в % от массы жира в сырье) на 17,7% (головы копченой кильки), 14% (внутренности судака) и 12,8% (головы скумбрии).

Таким образом, применение ультразвука при извлечении жира из рыбных отходов термическим способом сопровождается его эмульгированием, что не способствует повышению выхода чистого жира, при этом качество полученного жира соответствует критериям его использования, как источника углерода в биотехнологическом синтезе биоразлагаемых пластиков.

Выводы

Установлены рациональные параметры УЗ-воздействия (мощность 300 Вт, частота 40 кГц, продолжительность 30 мин), позволяющие при комбинированном способе выделения жира из рыбных отходов в сочетании с термообработкой при температуре 83–90 °C в течение 22–30 мин получать его в количестве (в % от массы рыбы): 7,3% (головы скумбрии), 9,4% (головы копченой кильки) и 22,3% (внутренности судака), что соответствует степени извлечения (в % от содержания жира в сырье) 36%, 53% и 74%.

Применение ультразвука интенсифицирует эмульгирование экстрагируемого рыбного жира, что уменьшает его выход в чистом виде на 12,8–17,7%. Для повышения эффективности процесса комбинированного извлечения жира с применением ультразвука следует учитывать индивидуальные особенности химического состава рыбных отходов (количество фосфолипидов, пептидов, азотистых веществ), выполняющих роль эмульгаторов.

Экстрагированные по рациональным режимам из отходов рыбопереработки жиры обладают характеристиками, благоприятными для их применения в качестве источника углерода в микробном синтезе разрушаемых биопластиков — полигидроксиспиртов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-64-10007, <https://rscf.ru/project/23-64-10007/>

Литература

- Боева Н. П., Бредихина О. В., Петрова М. С., Баскакова Ю. А. Технология жиров из водных биологических ресурсов: монография. М.: Изд-во ВНИРО, 2016. 107 с.
- Отходы рыбопереработки — перспективный субстрат для синтеза целевых продуктов биотехнологии / Жила Н. О., Волков В. В., Мезенова О. Я., Киселев Е. Г., Волова Т. Г. // Журнал СФУ. Биология. 2023. Т. 16 (3). С. 386–397. <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/151781>.
- Properties of degradable polyhydroxyalkanoates synthesized from new waste fish oils (WFO) / N. O. Zhila, E. G. Kiselev, V. V. Volkov, O. Ya. Mezenova, K. Yu. Sapozhnikova, E. I. Shishatskaya, and T. G. Volova // *Int J Mol Sci*. 2023. Oct 5; 24 (19):14919. DOI: 10.3390/ijms241914919.
- Разработка технологии получения жира из жиродержащих отходов переработки промысловых рыб Волжско-Каспийского бассейна / М. Д. Мукатова, Н. А. Киричко, М. С. Моисеенко.

References

- Boeva N. P., Bredikhina O. V., Petrova M. S., Baskakova Yu. A. Technology of fats from aquatic biological resources: monograph. M.: Publishing house VNIRO, 2016. 107 p. (in Russian)
- Fish processing waste — a promising substrate for the synthesis of target biotechnology products / Zhila N. O., Volkov V. V., Mezenova O. Ya., Kiselev E. G., Volova T. G. *SFU Journal. Biology*. 2023. Vol. 16 (3), pp. 386–397. <https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/151781>. (in Russian)
- Properties of degradable polyhydroxyalkanoates synthesized from new waste fish oils (WFO) / N. O. Zhila, E. G. Kiselev, V. V. Volkov, O. Ya. Mezenova, K. Yu. Sapozhnikova, E. I. Shishatskaya, and T. G. Volova // *Int J Mol Sci*. 2023. Oct 5; 24 (19):14919. doi: 10.3390/ijms241914919. (in Russian)
- Development of technology for obtaining fat from fat-containing waste from processing commercial fish of the Volga-Caspian basin / M. D. Mukatova, N. A. Kirichko, M. S. Moiseenko.

- сеенко, С. А. Соколов // Известия ТИНРО, 2018. Т. 193. С. 211–222. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-211-222.
5. Мезенова О. Я., Агафонова С. В., Романенко Н. Ю., Калинина Н. С., Волков В. В., Киселев Е. Г., Жила Н. О., Дамбарович Л. В. Оценка потенциала липидов вторичного рыбного сырья в качестве биотехнологического субстрата для синтеза целевых продуктов // Известия КГТУ. 2024. № 74. С. 78–91. DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-78-91.
 6. D. V. Thuoca, V. T. M. Anh. Bioconversion of Crude Fish Oil Into Poly-3-hydroxybutyrate by *Ralstonia* sp. M91 // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2021, Vol. 57, No. 2, pp. 219–225. DOI: 10.1134/S0003683821020162
 7. Correa-Galeote David, Argiz Lucia, Val del Rio Angeles, Mosquera-Corral Anuska, Juarez-Jimenez Belen, Gonzalez-Lopez Jesus and Rodelas Belen. Dynamics of PHA-Accumulating Bacterial Communities Fed with Lipid-Rich Liquid Effluents from Fish-Canning Industries. // *Polymers*. 2022, 14, 1396. DOI: 10.3390/polym14071396.
 8. Doan Van Thuoc, Dam Ngoc My, Tran Thi Loan, Kumar Sudesh. Utilization of waste fish oil and glycerol as carbon sources for polyhydroxyalkanoate production by *Salinivibrio* sp. M318. // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 141. pp. 885–892. DOI: 10.1016/j.ijbiomac. 2019.09.063.
 9. Gonzalez-Cabaleiro Rebeca, Correa-Galeote David, Val del Rio Angeles, Mosquera-Corral Anuska. Open-culture biotechnological process for triacylglycerides and polyhydroxyalkanoates recovery from industrial waste fish oil under saline conditions Lucia Argiza // *Separation and Purification Technology*. 270 (2021) 118805. DOI: 10.1016/j.seppur. 2021.118805
 10. Мезенова О. Я., Агафонова С. В., Романенко Н. Ю., Калинина Н. С., Волков В. В. Исследование процесса выделения жира из отходов рыбопереработки в качестве сырья для биотехнологического синтеза полигидроксиканоатов. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 50–59. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-50-59.
 11. Обоснование рациональных режимов термического выделения липидов из жиросодержащих рыбных отходов/О. Я. Мезенова, С. В. Агафонов, Н. Ю. Романенко, Н. С. Калинина, В. В. Волков // Рыбное хозяйство. 2023. № 4. С. 103–110. DOI: 10.37663/0131-6184-2023-4-99-106.
 12. Мезенова О. Я., Агафонова С. В., Романенко Н. Ю., Калинина Н. С., Волков В. В., Дамбарович Л. В., Федоров Д. С., Федорова О. С., Ячников Д. В. Исследования по оптимизации ферментативного процесса выделения жира из вторичного рыбного сырья для использования в биотехнологии. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 3. С. 43–55. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-43-55.
 13. Nahidur R., Shaharior H., Shireen A., Jakia S. J. Impact of various extraction methods on fatty acid profile, physicochemical properties, and nutritional quality index of Pangus fish oil. // *Food Science & Nutrition*. 2023. 11 (8). DOI: 10.1002/fsn3.3431
 14. Pinela José, Fuente Beatrizdela, Rodrigues Matilde et al. Fish By-Products into Bioactive Fish Oil: The Suitability of Microwave-Assisted Extraction. // *Biomolecules*. 2022. 13 (1). DOI: 10.3390/biom13010001
 15. Шестаков С. Д. Технология и оборудование для обработки пищевых сред с использованием кавитационной дезинтеграции: Учебное пособие для вузов/С. Д. Шестаков, О. Н. Красуля, В. И. Богущ [и др.]. СПб.: ГИОРД, 2013. 152 с.
 - S. A. Sokolov. *Izvestia TINRO*, 2018. Vol. 193, pp. 211–222. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-193-211-222. (in Russian)
 5. Mezenova O. Ya., Agafonova S. V., Romanenko N. Yu., Kalinina N. S., Volkov V. V., Kiselev E. G., Zhila N. O., Dambarovich L. V. Evaluation of the potential of secondary fish raw material lipids as a biotechnological substrate for the synthesis of target products. *Bulletin of KSTU*. 2024. No. 74. Pp. 78–91. DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-78-91. (in Russian)
 6. D. V. Thuoca, V. T. M. Anh. Bioconversion of Crude Fish Oil Into Poly-3-hydroxybutyrate by *Ralstonia* sp. M91. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2021. Vol. 57. No. 2, pp. 219–225. DOI: 10.1134/S0003683821020162
 7. Correa-Galeote David, Argiz Lucia, Val del Rio Angeles, Mosquera-Corral Anuska, Juarez-Jimenez Belen, Gonzalez-Lopez Jesus and Rodelas Belen. Dynamics of PHA-Accumulating Bacterial Communities Fed with Lipid-Rich Liquid Effluents from Fish-Canning Industries. *Polymers*. 2022, 14, 1396. DOI: 10.3390/polym14071396.
 8. Doan Van Thuoc, Dam Ngoc My, Tran Thi Loan, Kumar Sudesh. Utilization of waste fish oil and glycerol as carbon sources for polyhydroxyalkanoate production by *Salinivibrio* sp. M318. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. Vol. 141. pp. 885–892. DOI: 10.1016/j.ijbiomac. 2019.09.063.
 9. Gonzalez-Cabaleiro Rebeca, Correa-Galeote David, Val del Rio Angeles, Mosquera-Corral Anuska. Open-culture biotechnological process for triacylglycerides and polyhydroxyalkanoates recovery from industrial waste fish oil under saline conditions Lucia Argiza. *Separation and Purification Technology*. 270 (2021) 118805. DOI: 10.1016/j.seppur. 2021.118805
 10. Mezenova O. Ja., Agafonova S. V., Romanenko N. Yu., Kalinina N. S., Volkov V. V. The process of fat extraction from fish processing waste as a raw material for biotechnological synthesis of polyhydroxyalkanoates. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 1. p. 50–59. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-50-59 (in Russian)
 11. Justification of rational modes of thermal extraction of lipids from fat-containing fish waste/O. Ya. Mezenova, S. V. Agafonov, N. Yu. Romanenko, N. S. Kalinina, V. V. Volkov // *Fishery*, 2023, No. 4, pp. 103–110. DOI: 10.37663/0131-6184-2023-4-99-106. (in Russian)
 12. Mezenova O. Ya., Agafonova S. V., Romanenko N. Yu., Kalinina N. S., Volkov V. V., Dambarovich L. V., Fedorov D. S., Fedorova O. S., Yachnikov D. V. Optimization of the enzymatic process of fat isolation from secondary fish raw materials for use in biotechnology. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 3. p. 43–55. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-3-43-55 (in Russian)
 13. Nahidur R., Shaharior H., Shireen A., Jakia S. J. Impact of various extraction methods on fatty acid profile, physicochemical properties, and nutritional quality index of Pangus fish oil. *Food Science & Nutrition*. 2023. 11 (8). DOI: 10.1002/fsn3.3431.
 14. Pinela José, Fuente Beatrizdela, Rodrigues Matilde et al. Fish By-Products into Bioactive Fish Oil: The Suitability of Microwave-Assisted Extraction. *Biomolecules*. 2022. 13 (1). DOI: 10.3390/biom13010001
 15. Shestakov S. D. Technology and equipment for processing food media using cavitation disintegration»: Textbook for universities/S. D. Shestakov, O. N. Krasulya, V. I. Bogush [et al.]. St. Petersburg: GIORД, 2013. 152 P. (in Russian)

16. Хмелев В. Н. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких и дисперсионных жидких сред/В. Н. Хмелев, С. С. Хмелев, Р. Н. Голых, А. В. Шалунов // Ползуновский вестник. 2014. № 4. Т. 2. С. 110–115.
17. Капустин С. В. Применение ультразвуковой кавитации в пищевой промышленности/С. В. Капустин, О. Н. Красуля // Интерактивная наука. 2016. № 2. С. 101–103.
18. Потороко И. Ю., Калинина И. В., Фаткуллин Р. И., Иванова Д., Киселова-Канева Й. Д. Результаты влияния кавитационных эффектов ультразвука на степень экстракции биологически активных веществ из растительного сырья // Аграрный вестник Урала. 2017. № 10 (164). С. 76–83.
19. Елапов А. А., Кузнецов Н. Н., Марахова А. И. Применение ультразвука в экстракции биологически активных соединений из растительного сырья, применяемого или перспективного для применения в медицине. // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2021. № 10 (4). С. 96–116. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116
20. Стремин А. А., Федоренко Б. Н. Использование ультразвука для ускорения экстракции в пищевой промышленности // Вестник науки. 2023. Т. 5 (65). С. 725–729
21. Альраджаб М. Получение пищевого жира из сардины иваси/М. Альраджаб, Л. В. Шульгина, С. П. Касьянов // Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: инноватика в современном мире». Уфа: НИЦ Вестник науки, 2021. С. 18–22.
22. Volova T., Sapozhnikova K., Zhila N. Cupriavidus necator B-10646 growth and polyhydroxyalkanoates production on different plant oils. // International Journal of Biological Macromolecules. 2020 no 164, p. 121–130. DOI: 10.1016/j.ijbiomac. 2020.07.095.
23. Kanokphorn Sangkharak, Nisa Paichid, Tewon Yunu, Sappasith Klomklao, Poonsuk Prasertsan. Utilisation of tuna condensate waste from the canning industry as a novel substrate for polyhydroxyalkanoate production // Biomass Conversion and Biorefinery, 2021. 11:2053–2064. DOI: 10.1007/s13399-019-00581-4.
24. Saad Victoria, Gutschmann Bjo, Grimm Thomas, Widmer Torsten, Neubauer Peter, Riedel Sebastian L. Low-quality animal by-product streams for the production of PHA-biopolymers: fats, fatprotein-emulsions and materials with high ash content as low-cost feedstocks // Biotechnol. Lett. 2021. 43:579–587. DOI: 10.1007/s10529-020-03065-y
25. Tran Thi Loana, Dao Thi Quynh Tranga, Pham Quang Huyc, Pham Xuan Ninh, Doan Van Thuoca. A fermentation process for the production of poly (3-hydroxybutyrate) using waste cooking oil or waste fish oil as inexpensive carbon substrate // Biotechnology Reports. March 2022. Vol. 33. DOI: 10.1016/j.btre. 2022. e00700.
16. Khmelev V. N. Ultrasonic cavitation treatment of viscous and dispersive liquid media/V. N. Khmelev, S. S. Khmelev, R. N. Golykh, A. V. Shalunov. *Polzunovsky Bulletin*. 2014. No. 4. Vol. 2, pp. 110–115. (in Russian)
17. Kapustin S. V. Application of ultrasonic cavitation in the food industry/S. V. Kapustin, O. N. Krasulya. *Interactive Science*. 2016. No. 2. pp. 101–103 (in Russian)
18. Potoroko I. Yu., Kalinina I. V., Fatkullin R. I., Ivanova D., Kiselova-Kaneva I. D. Results of the influence of cavitation effects of ultrasound on the degree of extraction of biologically active substances from plant materials. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2017. No. 10 (164). P. 76–83 (in Russian).
19. Elapov A. A., Kuznetsov N. N., Marakhova A. I. Application of ultrasound in the extraction of biologically active compounds from plant materials used or promising for use in medicine. *Development and registration of drugs*. 2021. No. 10 (4), pp. 96–116. DOI: 10.33380/2305-2066-2021-10-4-96-116. (in Russian)
20. Stremim A. A., Fedorenko B. N. Use of ultrasound to accelerate extraction in the food industry. *Bulletin of Science*. 2023. Vol. 5 (65), pp. P. 725–729 (in Russian)
21. Alrajab M. Obtaining edible fat from sardine Iwashii/M. Alrajab, L. V. Shulgina, S. P. Kasyanov. Collection of scientific articles based on the materials of the International scientific and practical conference «Fundamental and applied scientific research: innovation in the modern world». Ufa: NITs Vestnik nauki. 2021. P. 18–22 (in Russian)
22. Volova T., Sapozhnikova K., Zhila N. Cupriavidus necator B-10646 growth and polyhydroxyalkanoates production on different plant oils. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. No 164. p. 121–130. DOI: 10.1016/j.ijbiomac. 2020.07.095.
23. Kanokphorn Sangkharak, Nisa Paichid, Tewon Yunu, Sappasith Klomklao, Poonsuk Prasertsan. Utilisation of tuna condensate waste from the canning industry as a novel substrate for polyhydroxyalkanoate production. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. 11:2053–2064 DOI: 10.1007/s13399-019-00581-4.
24. Saad Victoria, Gutschmann Bjo, Grimm Thomas, Widmer Torsten, Neubauer Peter, Riedel Sebastian L. Low-quality animal by-product streams for the production of PHA-biopolymers: fats, fatprotein-emulsions and materials with high ash content as low-cost feedstocks. *Biotechnol. Lett*. 2021. 43:579–587. DOI: 10.1007/s10529-020-03065-y
25. Tran Thi Loana, Dao Thi Quynh Tranga, Pham Quang Huyc, Pham Xuan Ninh, Doan Van Thuoca. A fermentation process for the production of poly (3-hydroxybutyrate) using waste cooking oil or waste fish oil as inexpensive carbon substrate. *Biotechnology Reports*. March 2022. Vol. 33. DOI: 10.1016/j.btre. 2022. e00700.

Сведения об авторах

Мезенова Ольга Яковлевна

Д. т. н., профессор, зав. кафедрой пищевой биотехнологии, Калининградский государственный технический университет, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1, mezenova@klgtu.ru. ORCID 0000-0002-4716-2571

Information about authors

Mezenova Olga Ja.

D. Sc., Professor, Chair of the Department of food biotechnology, Kaliningrad State Technical University, 236022 Russia, Kaliningrad, Sovetskiy Ave. 1, mezenova@klgtu.ru. ORCID 0000-0002-4716-2571

Агафонова Светлана Викторовна

К. т. н., доцент кафедры пищевой биотехнологии,
Калининградский государственный технический
университет, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1,
svetlana.agafonova@klgtu.ru.
ORCID ID: 0000-0002-5992-414X

Agafonova Svetlana V.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Food
Biotechnology, Kaliningrad State Technical University,
236022 Russia, Kaliningrad, Sovetskiy Ave. 1,
svetlana.agafonova@klgtu.ru.
ORCID ID: 0000-0002-5992-414X

Романенко Наталья Юрьевна

К. т. н., доцент кафедры пищевой биотехнологии,
Калининградский государственный технический
университет, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1,
nataliya.mezenova@klgtu.ru. ORCID 0000-0002-7433-7189

Romanenko Natalya Yu.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Food
Biotechnology, Kaliningrad State Technical University, 236022
Russia, Kaliningrad, Sovetskiy Ave. 1,
nataliya.mezenova@klgtu.ru. ORCID 0000-0002-7433-7189

Калинина Наталья Сергеевна

Зав. лабораториями кафедры пищевой биотехнологии,
Калининградский государственный технический
университет, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1,
natalya.kalinina@klgtu.ru. ORCID 0000-0003-0942-5411

Kalinina Natalya S.

Head of the Laboratory of the Department of Food Biotechnology,
Kaliningrad State Technical University, 236022 Russia,
Kaliningrad, Sovetskiy Ave. 1, natalya.kalinina@klgtu.ru.
ORCID 0000-0003-0942-5411

Волков Владимир Владимирович

Директор Центра белка кафедры пищевой биотехнологии,
Калининградский государственный технический
университет, 236022, Россия, Калининград, Советский пр. 1,
vladimir.volkov@klgtu.ru. ORCID 0000-0001-5560-7131

Volkov Vladimir V.

Director of the Protein Center of the Department of Food
Biotechnology, Kaliningrad State Technical University, 236022
Russia, Kaliningrad, Sovetskiy Ave. 1,
vladimir.volkov@klgtu.ru. ORCID 0000-0001-5560-7131



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

О Перечне рецензируемых научных изданий

В связи с вступлением в силу новой редакции номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Минобрнауки России от 24 февраля 2021 г. № 118, издано распоряжение Минобрнауки России от 1 февраля 2022 г. № 33-р о Перечне рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Вестник Международной академии холода, включенный в Перечень рецензируемых научных изданий (по состоянию на 19.05.2025 г.) под № 555, принимает статьи по следующим научным направлениям:

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики
- 1.3.8. Физика конденсированного состояния
- 1.3.10. Физика низких температур
- 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники
- 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
- 4.3.3. Пищевые системы
- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"

https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~