

В. Н. Куркотило, Ж. В. Васильева

Ресурсосберегающая технология переработки липидосодержащих отходов рыбной промышленности

Ресурсная составляющая рыбных отходов, в полной мере обладающих уникальными свойствами рыбного сырья, в настоящее время используется недостаточно. Актуальным направлением исследований является поиск новых технологий переработки отходов с получением рыбного жира как ценного источника полиненасыщенных жирных кислот, жирорастворимых витаминов и других биологически активных веществ. С этой целью в работе апробирована технология ферментативного извлечения жира из отходов рыбной промышленности и проведено сравнение с традиционной тепловой технологией получения жира из рыбных отходов. Объектом исследования являлись замороженные отходы переработки сельди. Оптимальные параметры получения рыбного жира из отходов переработки определяли путем моделирования процесса методом математического планирования эксперимента с применением ортогонального центрального композиционного плана второго порядка для двух факторов. Варьирование факторов тепловой обработки осуществлялось в диапазоне температур 60 ± 10 °С в течение 120 ± 20 мин. Ферментативный гидролиз выполнялся с использованием ферментного препарата протеолитического действия Протосубтилин Г3х (Protosubtilin G3x) в диапазоне варьирования факторов $0,20 \pm 0,05$ г/кг дозы фермента в течение 80 ± 20 мин при оптимальной температуре проведения гидролиза. Органолептические показатели жира (внешний вид, цвет, запах, вкус, прозрачность) определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 7636-85, ГОСТ 7631-2008. Полученный липидный препарат подвергался исследованиям по показателям безопасности в соответствии с требованиями Технического регламента Таможенного союза "О безопасности пищевой продукции". Показатели безопасности полученных образцов жира (перекисное и кислотное числа) устанавливали стандартными методами в соответствии с ГОСТ Р 51487-99, ГОСТ Р 50457-92. Построенные математические модели способствуют оптимизации процессов переработки рыбных отходов. Сравнение показателей качества и безопасности полученных препаратов рыбного жира позволило обосновать преимущества ферментативной переработки рыбных отходов.

Ключевые слова: рыбные отходы, рыбный жир, ферментативное извлечение рыбного жира, ферменты, показатели безопасности, моделирование.

Введение

Устойчивым трендом развития рыбоперерабатывающей отрасли является эффективное и комплексное использование сырья, высокая степень конверсии отходов рыбной промышленности, сокращение энергоемкости и материалоемкости процессов. Перспективным направлением в этой связи является поиск инновационных подходов и совершенствование классических методов переработки рыбных отходов, в том числе липидосодержащих.

Неполноценное использование отходов, образующихся на разных стадиях переработки рыбных ресурсов, заключается не только в ограниченности существующих технологий, но и в недоиспользовании ресурсных возможностей рыбного сырья, уникальные свойства которого позволяют получить широкий спектр высоко востребованной биотехнологической продукции: биологически активных веществ (БАВ), добавок (БАД), минерально-витаминных комплексов, биологически ценных компонентов питания и других инновационных материалов на основе вторичного рыбного сырья.

Существенный вклад в создание ресурсосберегающих технологий переработки липидосодержащих отходов рыбной индустрии в нашей стране внесли такие отечественные ученые, как Боева Н. П., Бредихина О. В., Бочкарев А. И., Дубровин С. Ю., Лебская Т. К., Мукатова М. Д., Петров Б. Ф., Ржавская Ф. М. и др.

Липидосодержащие отходы переработки рыбы являются ценным источником полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), особенно эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой кислот (ДГК), жирорастворимых витаминов А, D и E, фосфолипидов и других биологически активных веществ, которые нормализуют жировой обмен, способствуют выведению из организма избытка холестерина, снижают гиперлипидемию, являются жизненно необходимыми для функций мозга и глаз, обладают противовоспалительными и иммуностимулирующими свойствами [1–7].

Важным в этой связи является поиск технологий переработки липидосодержащего сырья, в максимальной степени сохраняющих биологическую ценность рыбного жира при снижении энергоемкости и материалоемкости процесса.

В то же время в нашей стране одним из традиционных направлений переработки рыбного сырья с целью получения рыбного жира является тепловая переработка с использованием измельчения, нагретия,

прессования и сепарации [8]. Однако указанный способ не позволяет получать липидный продукт высокого качества, так как при высоких температурах происходит деградация качественных характеристик получаемого жира при высокой энергозатратности и длительности процесса.

За рубежом активно ведутся работы по изысканию новых биотехнологических подходов для разработки технологий эффективного извлечения жира из рыбных отходов [9; 10]. Одним из инновационных методов, позволяющих получать липидный продукт высокого качества из рыбных отходов, является ферментативный гидролиз, или так называемая ферментативная экстракция [9–11]. Этот процесс заключается в использовании протеиназ различной этимологии для проведения ферментативного разрушения белковых структур клеточных оболочек жиросодержащих тканей. Ферментативный гидролиз рыбных отходов, по мнению многочисленных исследователей, позволяет эффективно выделять рыбный жир, снижая при этом образование продуктов окисления, свойственное традиционным тепловым процессам извлечения жира, и в высокой степени сохраняет эссенциальные ПНЖК и другие ценные компоненты рыбного жира [9; 11–16]. Значительная часть работ в этом направлении посвящена поиску новых эффективных протеолитических агентов, обеспечивающих высокий выход и качество получаемых липидных препаратов с учетом широкой вариабельности видов рыбных отходов [12; 14–16]. Отдельные работы посвящены поиску оптимальных параметров ферментативной экстракции липидосодержащих рыбных отходов [17].

В нашей стране ферментативный гидролиз с целью получения жира из рыбных отходов менее распространен, но известно, что он нашел применение в технологиях, предусматривающих выделение жира при производстве кормовой муки из отходов переработки рыбы [18; 19], а также исследован в отношении переработки голов лососевых рыб [20].

С учетом вышеизложенного актуальной задачей является исследование возможности получения рыбного жира путем ферментативного гидролиза отходов переработки рыбы и установление оптимальных параметров процесса.

Цель работы заключалась в математическом моделировании, оптимизации и сравнении процессов традиционного теплового и ферментативного методов переработки рыбных отходов с целью получения высококачественного препарата рыбного жира.

Материалы и методы

В качестве сырья для проведения исследований использовались замороженные отходы переработки сельди (*Clupea harengus*): головы, кости, плавники с прирезами мышечной ткани. Сырье размораживали на воздухе при температуре 18 ± 2 °С, а затем измельчали.

В работе применяли современные методы физико-химических исследований с привлечением математической обработки результатов экспериментальных работ. Оптимальные параметры получения рыбного жира из отходов переработки определяли путем моделирования процесса методом математического планирования эксперимента с применением ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка для двух факторов [21]. Построение графических зависимостей осуществляли с помощью программ Microsoft Office Excel 2007, Statistica 12.0.

Для моделирования процесса получения жира из отходов тепловым способом измельченную массу подвергали тепловой обработке в диапазоне температур 60 ± 10 °С в течение 120 ± 20 мин при перемешивании. Затем в течение 30 мин проводили центрифугирование (4 000 об/мин) с целью разделения водно-белковой и жировой фракций.

Для моделирования процесса ферментализации рыбных отходов в качестве ферментного препарата использовали Протосубтилин Г3х (Protosubtilin G3x), получаемый путем высушивания культуральной жидкости после глубинного выращивания культуры *Bacillus subtilis* (ГОСТ 23636-90)¹. Ферментный препарат представляет собой однородный пылеобразный порошок бежевого цвета, хорошо растворимый в воде. Общая протеолитическая активность составляет 120 ед/г. Оптимум действия данного ферментного препарата наблюдается при температуре 45–50 °С, в диапазоне pH 6,0–7,0. Диапазон вносимой дозы фермента составлял $0,20 \pm 0,05$ г/кг сырья. Ферментацию проводили при ранее установленной оптимальной температуре 45 ± 1 °С в течение 80 ± 20 мин. По окончании процесса проводили отделение водно-белковой фракции от жировой путем центрифугирования (4 000 об/мин) в течение 30 мин.

Показатели общего химического состава отходов переработки сельди определяли стандартными методами согласно ГОСТ 7636-85. Органолептические показатели жира (внешний вид, цвет, запах, вкус, прозрачность) определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 7636-85, ГОСТ 7631-2008². Полученный

¹ ГОСТ 23636-90. Препарат ферментный протосубтилин Г3х. Технические условия. М., 2005. 7 с.

² ГОСТ 7636-85. Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. М., 1985. 140 с. ; ГОСТ 7631-2008. Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Методы определения органолептических и физических показателей. М., 2011. 12 с.

липидный препарат подвергали исследованиям по показателям безопасности в соответствии с требованиями Технического регламента Таможенного союза "О безопасности пищевой продукции" (ТР ТС 021/2011)³, согласно которому предел значений кислотного числа рыбного жира составляет не более 4 мг КОН/г жира, перекисного числа – не более 10 моль активного кислорода/кг. Выход жира рассчитывали по отношению к массовому содержанию жира в рыбных отходах, подвергаемых обработке. Показатели безопасности полученных образцов жира (перекисное и кислотное числа) устанавливали стандартными методами в соответствии с ГОСТ Р 51487-99, ГОСТ Р 50457-92⁴.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования общего химического состава образцов отходов (головы, кости, плавники с прирезами мышечной ткани) позволили установить, что отходы переработки сельди характеризуются высоким содержанием жира ($15,7 \pm 0,1$ %) и могут быть использованы в качестве сырья для получения рыбного жира (табл. 1).

Таблица 1. Химический состав отходов переработки сельди
Table 1. Chemical composition of herring processing waste

Наименование образца	Содержание, %			
	Влага	Белки	Липиды	Зола
Отходы (головы, кости, плавники с прирезами мышечной ткани)	$66,9 \pm 0,2$	$14,7 \pm 0,3$	$15,7 \pm 0,1$	$2,7 \pm 0,3$

Установление оптимальных значений факторов процесса переработки рыбных отходов с целью получения рыбного жира осуществляли с использованием ОЦКП второго порядка, при этом в качестве варьируемых частных факторов, подлежащих оптимизации, по результатам предварительно проведенных экспериментов предложены: для традиционной тепловой технологии – температура вытапливания жира (x_1 , °С) и время вытапливания (x_2 , мин); для технологии ферментативного получения жира – время ферментализации (x_1 , мин) и количество фермента (x_2 , г/кг сырья). Значения изменяемых факторов, их интервалы и пределы варьирования приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Значения изменяемых факторов, их интервалы и пределы варьирования для традиционной тепловой технологии

Table 2. The values of the modifiable factors, their ranges and the limits of variation for the traditional thermal technology

Факторы	Размерность	Уровень			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Температура вытапливания, x_1	°С	50	60	70	10
Время вытапливания, x_2	мин	100	120	140	20

Таблица 3. Значения изменяемых факторов, их интервалы и пределы варьирования для ферментативного получения жира

Table 3. The values of the modifiable factors, their ranges and the limits of variation for enzymatic production of fat

Факторы	Размерность	Уровень			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Время ферментализации, x_1	мин	60	80	100	20
Количество фермента, x_2	г/кг сырья	0,15	0,20	0,25	0,05

Параметром оптимизации математических моделей была выбрана совокупная безразмерная характеристика Y (обобщенный параметр качества), объединяющая три частных отклика: перекисное и кислотное числа полученного жира, выход жира. Выбор первых двух откликов обусловлен требованиями обеспечения безопасности получаемого продукта в соответствии с ТР ТС 021/2011. Для объединения разных частных откликов с учетом устанавливаемых для перекисного и кислотного чисел вышеуказанными

³ О безопасности пищевой продукции : технический регламент Таможенного союза ТР ТС 021/2011 : утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 9 дек. 2011 г. № 880.

⁴ ГОСТ Р 51487-99. Масла растительные и жиры животные. Метод определения перекисного числа. М., 2008. 6 с. ; ГОСТ Р 50457-92. Жиры и масла животные и растительные. Определение кислотного числа и кислотности. М., 2006. 7 с.

нормативными документами значений этих показателей как максимально-допустимых значений нормативов предельного допустимого уровня содержания принимали, что "идеал" для первых двух откликов стремится к нулю, а для частного отклика "выход жира" – к 100. Для расчета обобщенного параметра оптимизации применяли следующую формулу обобщенного отклика эксперимента:

$$Y = \sum_{u=1}^n a_u \left(\frac{Y_u - Y_{0u}}{Y_{\Delta 0}} \right)^2, \quad (1)$$

где Y – обобщенный параметр оптимизации; u – отклик; Y_u – значение u -го отклика; Y_{0u} – значение "идеального" отклика для u -го отклика; $Y_{\Delta 0}$ – максимальное отклонение Y_u от Y_{0u} ; a_u – вес u -го отклика.

План эксперимента по моделированию процессов получения жира традиционным тепловым и ферментативным способами и результаты его реализации представлены в табл. 4, 5.

Таблица 4. Результаты реализации эксперимента по моделированию и оптимизации технологии вытапливания

Table 4. The results of the experiment on simulation and optimization of melting technology

Номер опыта	План эксперимента				Частные отклики			Обобщенный параметр оптимизации, Y
	Температура вытапливания		Время вытапливания		Кислотное число, мг КОН/г жира	Перекисное число, моль активного кислорода/кг	Выход, %	
	По матрице, (x_1)	В натуральном выражении, °С	По матрице, (x_2)	В натуральном выражении, мин				
1	-1	50	-1	100	4,7	1,4	12,2	0,39
2	0	60	0	120	7,1	3,9	16,1	0,52
3	+1	70	+1	140	10,0	9,9	26,4	0,91
4	-1	50	+1	140	6,5	5,9	18,6	0,54
5	0	60	-1	100	5,8	1,9	30,2	0,33
6	+1	70	0	120	8,5	7,4	17,1	0,72
7	-1	50	0	120	5,1	2,8	15,6	0,40
8	0	60	+1	140	7,9	6,4	18,8	0,63
9	+1	70	-1	100	7,4	1,4	24,4	0,45

Примечание. Вес u -го отклика (a_u) для кислотного числа составлял 0,4, для перекисного числа – 0,3, для выхода жира – 0,3.

Таблица 5. Результаты реализации эксперимента по моделированию и оптимизации технологии ферментативного извлечения рыбного жира

Table 5. The results of implementing the experiment on modeling and optimizing the technology of enzymatic extraction of fish oil

Номер опыта	План эксперимента				Частные отклики			Обобщенный параметр оптимизации, Y
	Время ферментализации		Количество фермента		Кислотное число, мг КОН/г жира	Перекисное число, моль активного кислорода/кг	Выход, %	
	По матрице, (x_1)	В натуральном выражении, мин	По матрице, (x_2)	В натуральном выражении, г/кг				
1	-1	60	-1	0,15	4,6	2,1	56,9	0,38
2	0	80	0	0,20	4,7	1,8	42,6	0,51
3	+1	100	+1	0,25	3,5	3,2	49,9	0,44
4	-1	60	+1	0,25	2,5	0,5	60,8	0,19
5	0	80	-1	0,15	4,6	2,2	45,4	0,49
6	+1	100	0	0,20	5,5	5,1	47,7	0,78
7	-1	60	0	0,20	2,0	0,3	75,8	0,04
8	0	80	+1	0,25	5,2	2,8	49,8	0,53
9	+1	100	-1	0,15	7,2	3,7	42,9	0,85

Сравнительный анализ результатов, представленных в табл. 4, показал, что ни в одном из проведенных опытов значение частного отклика по величине кислотного числа не соответствовало требованиям вышеуказанных нормативных документов, находясь в интервале 4,7–10,0 мг КОН/г при допустимом уровне 4,0 мг КОН/г жира. Диапазон значений второго частного отклика составлял 1,4–9,9 моль активного кислорода/кг, что не превышает установленных значений перекисного числа – не более 10 моль активного кислорода/кг. Величина выхода рыбного жира достигала наибольших значений в экспериментах под номерами 3, 5, 9, составляя соответственно 26,4; 30,2; 24,4 %.

Анализ результатов моделирования процессов ферментативного гидролиза рыбных отходов с целью получения жира (табл. 5) показал, что минимальные значения частного отклика по величине кислотного числа жира имели место в экспериментах под номерами 3, 4, 7, что составило 3,5; 2,5; 2,0 мг КОН/г жира, это соответствует требованиям ТР ТС 021/2011. При этом минимальные значения второго отклика по величине перекисного числа были отмечены для опытов под номерами 2, 4, 7, что составило соответственно 1,8; 0,5; 0,3 моль активного кислорода/кг. Таким образом, опыты 4 и 7, характеризующиеся продолжительностью ферментации 60 мин, позволяли получить липидный продукт с наилучшими значениями показателей безопасности. Увеличение продолжительности процесса при сохранении температурной нагрузки (установленной постоянной температуре ферментации 45 ± 1 °C) ухудшало показатели качества липидного продукта, что, вероятно, объясняется деструкционным воздействием температурного фактора. Наибольший выход жира наблюдался в экспериментах под номерами 1, 4, 7, составляя 56,9; 60,8; 75,8 % соответственно. Очевидно, что опыты под номерами 4, 7 позволили осуществить ферментацию при наиболее благоприятных условиях, получая липидный продукт с высокой степенью соответствия вышеуказанным стандартам. Обобщенный параметр оптимизации принимал наименьшие значения, соответствующие "наиболее идеальным" условиям процесса, также в условиях опытов 7, 4 и 1, что в полной мере соответствует результатам анализа изменений показателей качества рыбного жира. Диапазон величин выхода рыбного жира при ферментативном гидролизе находился в пределах значений от 42,6 до 70,8 %.

По результатам проведения процесса теплового вытапливания жира было отмечено, что (табл. 4) значения кислотного и перекисного чисел закономерно увеличивались с увеличением температуры процесса обработки в каждом диапазоне времени вытапливания. Так, увеличение температуры при неизменном времени вытапливания 120 мин в опытах 7, 2, 6 соответственно 50; 60; 70 °C приводило к закономерному росту кислотного и перекисного чисел: 5,1; 7,1; 8,5 мг КОН/г и 2,8; 3,9; 7,4 моль активного кислорода/кг соответственно.

Для процесса ферментативного извлечения жира (табл. 5) значимым фактором, влияющим на повышение значения перекисного числа, являлась продолжительность ферментации. Так, увеличение продолжительности ферментации при одинаковой дозе фермента в опытах 4, 8, 3 соответственно 60; 80; 100 мин приводило к росту перекисного числа: 0,5; 2,8; 3,2 моль активного кислорода/кг, аналогичная закономерность наблюдалась во всех случаях варьирования продолжительности процесса ферментации в условиях постоянной дозы фермента (опыты 2, 6, 7 и 1, 5, 9).

Сравнительная оценка технологий традиционного теплового и ферментативного процессов извлечения жира в отношении величин выхода жира показала высокую эффективность биотехнологического подхода для извлечения липидов рыб, при этом показатель выхода достигал максимума 75,8 % при диапазоне варьирования значений от 42,6 до 75,8 %. Тепловой способ позволял обеспечивать выход жира из обрабатываемых рыбных отходов в пределах 12,2 до 30,2 %.

Реализация плана эксперимента и обработка его данных позволили получить уравнение регрессии (2), адекватно описывающее процесс получения рыбного жира путем тепловой переработки рыбных отходов:

$$Y = 4,1467 - 0,0127x_2 - 0,1241x_1 - 1,25E^{-5}x_2^2 + 0,0004x_1x_2 + 0,0007x_1^2. \quad (2)$$

Для процессов получения рыбного жира путем ферментации рыбных отходов получено уравнение (3):

$$Y = -1,4211 + 0,0485x_1 - 3,3331x_2 + 0,0002x_1^2 - 0,0551x_1x_2 + 14,6667x_2^2. \quad (3)$$

Графическая визуализация моделей исследуемых процессов позволяет оценить влияние варьируемых факторов на обобщенный параметр оптимизации (рис. 1, 2).

Результаты моделирования и оптимизации процессов переработки рыбных отходов с целью получения рыбного жира традиционным и ферментативным способами были подтверждены результатами сравнительной оценки характеристик полученного липидного продукта, приведенных в табл. 6. Рыбный жир, полученный в результате традиционной тепловой обработки, характеризовался неудовлетворительными органолептическими показателями: отмечено изменение цвета (потемнение), мутность, появление окисленного вкуса и запаха. Липидный препарат, полученный в результате ферментативного извлечения, по запаху, вкусу и цвету имел соответствующие характерные признаки, обладая приятным цветом, вкусом и запахом, свойственными рыбному жиру.

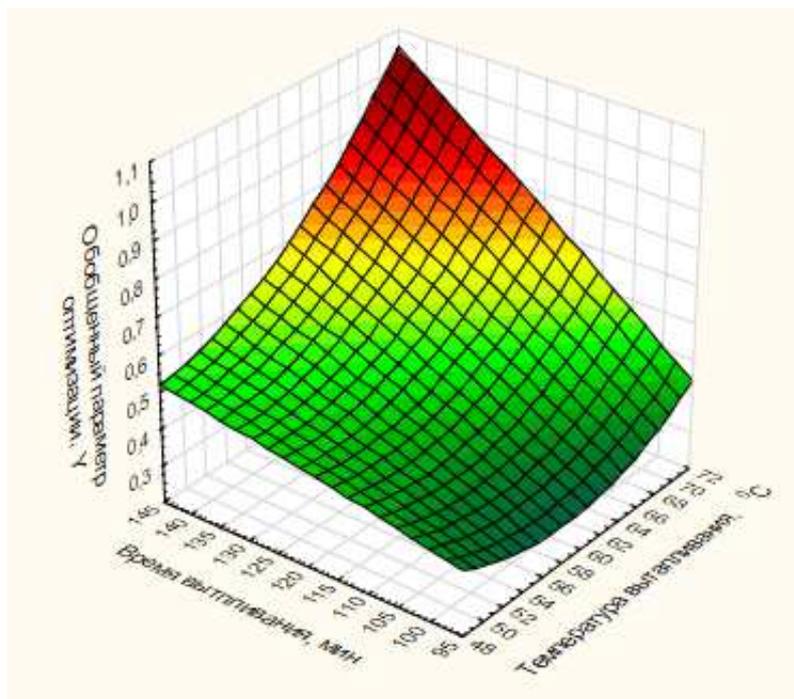


Рис. 1. Зависимость обобщенного параметра оптимизации процесса получения рыбного жира путем тепловой переработки рыбных отходов от варьируемых параметров температуры (x_1 , °C) и времени вытапливания (x_2 , мин)

Fig. 1. The dependence of the generalized parameter optimization of the process of fish oil obtaining by thermal processing of fish waste on the varied temperature parameters (x_1 , °C) and melting time (x_2 , min)

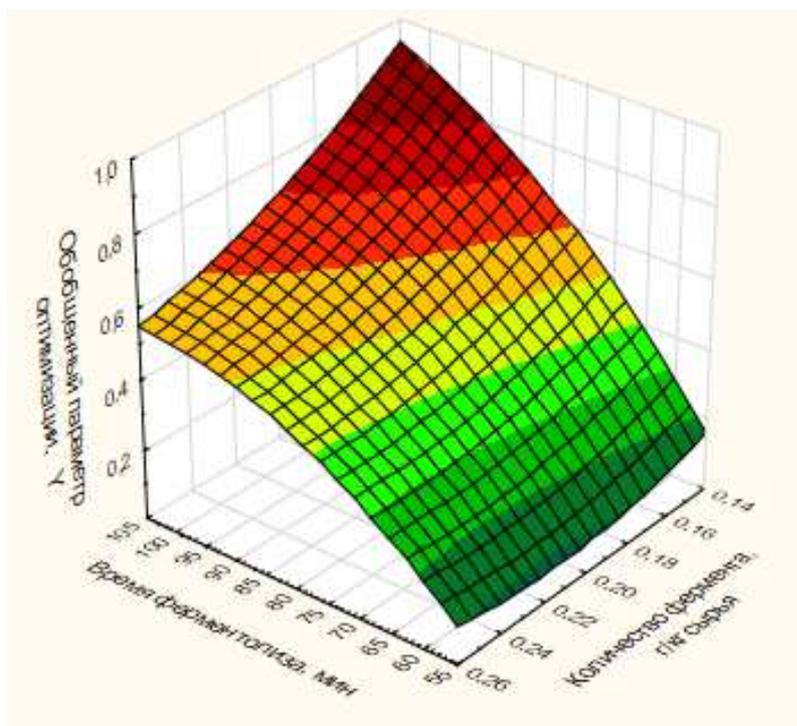


Рис. 2. Зависимость обобщенного параметра оптимизации процесса получения рыбного жира путем ферментативного гидролиза рыбных отходов от варьируемых параметров x_1 (время ферментации, мин) и x_2 (количество фермента, г/кг сырья)

Fig. 2. The dependence of the generalized parameter optimization of the process of fish oil obtaining by enzymatic hydrolysis of fish waste on the variable parameters x_1 (enzymatic hydrolysis, min) and x_2 (amount of enzyme, g/kg)

Таблица 6. Сравнительная характеристика образцов жира из отходов переработки сельди, полученного разными способами
Table 6. The comparative characteristics of samples of oil from herring wastes obtained by various ways

Показатель	Способ получения жира		Характеристика и норма по ГОСТ 8714-72
	Тепловой способ	Ферментативный гидролиз	
Выход, %	12,2–30,2	42,6–75,8	–
Прозрачность	Мутный	Прозрачный	Прозрачный или слегка опалесцирующий над осадком при температуре не выше 40 °С
Вкус и запах	Слегка окисленного жира	Свойственный рыбному жиру	Свойственные данному виду жира, без прогорклости и посторонних привкусов
Цвет при визуальном определении (при 40 °С)	Темно-желтый	Светло-желтый	От желтого до светло-коричневого

Заключение

Проведено сравнительное исследование процессов традиционного теплового и ферментативного способов переработки рыбных отходов с целью получения препарата рыбного жира и установления соответствия полученного продукта показателям безопасности и качества (ТР ТС 021/2011). Получен актуальный фактический материал по результатам использования ферментного препарата Протосубтилин Г3х (Protosubtilin G3x) для проведения ферментативного извлечения рыбного жира из отходов переработки сельди.

Показано, что проведение процесса ферментативного извлечения рыбного жира, обеспечивающего мягкую деструкцию белковых структур клеточных оболочек жиросодержащих тканей, позволяет получить продукт с улучшенными характеристиками качества по сравнению с традиционным тепловым способом извлечения жира, повысить эффективность выделения жира из рыбных отходов. Очевидно, специфичность действия использованного ферментного препарата Протосубтилин Г3х (Protosubtilin G3x) позволяет избежать деструкции ценных компонентов рыбного сырья, одновременно увеличив степень разрушения клеточных оболочек жиросодержащих тканей, что обеспечивает высокий выход жира из обрабатываемых отходов переработки сельди (до 75,8 %).

Моделирование процессов традиционного теплового и ферментативного извлечения рыбного жира из отходов переработки сельди позволило определить оптимальные параметры процессов, установить закономерности изменений перекисного и кислотного чисел в пределах варьирования выбранных факторов. Исследование функций отклика в графической визуализации показало области локализации оптимальных значений варьируемых параметров процесса.

Библиографический список

1. Khoddami A., Ariffin A. A., Bakar J. et al. Fatty acid profile of the oil extracted from fish waste (head, intestine and liver) (Sardinellalemuru) // World Applied Sciences Journal. 2009. V. 7 (1). P. 127–131.
2. Kumar A., Zuta C. P., Simpson B. K., Chan H. M. et al. Concentrating PUFA from mackerel processing waste // Journal of the American Oil Chemists' Society. 2003. V. 80, Iss. 9. P. 933–936.
3. Kim J. S., Park J. W. Mince from seafood processing by-products and surimi as food ingredients // Maximising the Value of Marine By-Products / ed. by F. Shahidi. Cambridge : Woodhead Publishing, 2007. P. 196–228.
4. Dietary supplementation with omega-3 polyunsaturated fatty acids and vitamin E after myocardial infarction: results from the GISSI-Prevenzione trial / GISSI – Prevenzione Investigators // Lancet. 1999. V. 354, Iss. 9177. P. 447–455.
5. Iso H., Rexrode K. M., Stampfer M. J. Intake of fish and omega-3 fatty acids and risk of stroke in women // JAMA. 2001. V. 285 (3). P. 304–312.
6. Kalmijn S., Feskens E. J., Launer L. J. Polyunsaturated fatty acids, antioxidants, and cognitive function in very old men // American Journal of Epidemiology. 1997. V. 145, Iss. 1. P. 33–41.
7. Keli S. O., Feskens E. J., Kromhout D. Fish consumption and risk of stroke – The Zutphen Study // Stroke. 1994. V. 25, Iss. 2. P. 328–332.
8. Артюхова С. А., Богданов В. Д. Технология продуктов из гидробионтов. М. : Колос, 2001. 496 с.
9. Kumar A., Bhaskar N., Baskaran V. Bioefficacy of EPA-DHA from lipids recovered from fish processing wastes through biotechnological approaches // Food Chemistry. 2013. V. 136, Iss. 1. P. 80–86.

10. Christie W. W. Preparation of lipid extracts from tissues // *Advances in Lipid Microbiology-II*. 1993. V. 98 (2). P. 195–213.
11. Mbatia B., Adlercreutz D., Adlercreutz P. et al. Enzymatic oil extraction and positional analysis of ω -3 fatty acids in Nile perch and salmon heads // *Process Biochemistry*. 2010. V. 45, Iss. 5. P. 815–819.
12. Linder M., Fanni J., Parmentier M. Proteolytic extraction of salmon oil and PUFA concentration by lipases // *Marine Biotechnology*. 2005. V. 7, Iss. 1. P. 70–76.
13. Batista I., Ramos C., Mendonca R. et al. Enzymatic hydrolysis of sardine (*Sardina pilchardus*) by-products and lipid recovery // *Journal of Aquatic Food Product Technology*. 2009. V. 23, Iss. 1. P. 120–134.
14. Ramakrishnan V. V., Ghaly A. E., Brooks M. S. et al. Extraction of oil from mackerel fish processing waste using Alcalase enzyme // *Enzyme Engineering*. 2013. V. 2, Iss. 2. P. 1–10.
15. Slizyte R., Rustad T., Storro I. Enzymatic hydrolysis of cod (*Gadus morhua*) by-products: Optimization of yield and properties of lipid and protein fractions // *Process Biochemistry*. 2005. V. 40, Iss. 12. P. 3680–3692.
16. Gbogouri G. A., Linder M., Fanni J. et al. Analysis of lipids extracted from salmon (*Salmo salar*) head by commercial proteolytic enzymes // *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2006. V. 108, Iss. 9. P. 766–775.
17. Routray W., Deepika D., Vegneshwaran V. et al. Production of high quality fish oil by enzymatic protein hydrolysis from cultured Atlantic salmon by-products: Investigation on effect of various extraction parameters using central composite rotatable design // *Waste and Biomass Valorization*. 2017. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-017-9998-6>.
18. Боева Н. П., Бредихина О. В., Бочкарев А. И. Технология рыбы и рыбных продуктов. Кормовые и технические продукты из водных биологических ресурсов. М. : Изд-во ВНИРО, 2008. 118 с.
19. Технология рыбы и рыбных продуктов / под ред. А. М. Ершова. СПб. : ГИОРД, 2006. 720 с.
20. Боева Н. П., Петрова М. С., Артемова А. Г. Новые подходы к технологии пищевого рыбного жира из голов лососевых рыб рода *Oncorhynchus* // *Труды ВНИРО*. 2015. Т. 158. С. 162–166.
21. Адлер Ю. П., Маркова Е. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. С. 32–47.

References

1. Khoddami A., Ariffin A. A., Bakar J. et al. Fatty acid profile of the oil extracted from fish waste (head, intestine and liver) (*Sardinellalemuru*) // *World Applied Sciences Journal*. 2009. V. 7 (1). P. 127–131.
2. Kumar A., Zuta C. P., Simpson B. K. et al. Concentrating PUFA from mackerel processing waste // *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 2003. V. 80, Iss. 9. P. 933–936.
3. Kim J. S., Park J. W. Mince from seafood processing by-products and surimi as food ingredients // *Maximising the Value of Marine By-Products* / ed. by F. Shahidi. Cambridge : Woodhead Publishing, 2007. P. 196–228.
4. Dietary supplementation with omega-3 polyunsaturated fatty acids and vitamin E after myocardial infarction: results from the GISSI-Prevenzione trial / GISSI – Prevenzione Investigators // *Lancet*. 1999. V. 354, Iss. 9177. P. 447–455.
5. Iso H., Rexrode K. M., Stampfer M. J. Intake of fish and omega-3 fatty acids and risk of stroke in women // *JAMA*. 2001. V. 285 (3). P. 304–312.
6. Kalmijn S., Feskens E. J., Launer L. J. Polyunsaturated fatty acids, antioxidants, and cognitive function in very old men // *American Journal of Epidemiology*. 1997. V. 145, Iss. 1. P. 33–41.
7. Keli S. O., Feskens E. J., Kromhout D. Fish consumption and risk of stroke – The Zutphen Study // *Stroke*. 1994. V. 25, Iss. 2. P. 328–332.
8. Artyuhova S. A., Bogdanov V. D. Tehnologiya produktov iz gidrobiontov [Technology of products from hydrobionts]. M. : Kolos, 2001. 496 p.
9. Kumar A., Bhaskar N., Baskaran V. Bioefficacy of EPA-DHA from lipids recovered from fish processing wastes through biotechnological approaches // *Food Chemistry*. 2013. V. 136, Iss. 1. P. 80–86.
10. Christie W. W. Preparation of lipid extracts from tissues // *Advances in Lipid Microbiology-II*. 1993. V. 98 (2). P. 195–213.
11. Mbatia B., Adlercreutz D., Adlercreutz P. et al. Enzymatic oil extraction and positional analysis of ω -3 fatty acids in Nile perch and salmon heads // *Process Biochemistry*. 2010. V. 45, Iss. 5. P. 815–819.
12. Linder M., Fanni J., Parmentier M. Proteolytic extraction of salmon oil and PUFA concentration by lipases // *Marine Biotechnology*. 2005. V. 7, Iss. 1. P. 70–76.
13. Batista I., Ramos C., Mendonca R. et al. Enzymatic hydrolysis of sardine (*Sardina pilchardus*) by-products and lipid recovery // *Journal of Aquatic Food Product Technology*. 2009. V. 23, Iss. 1. P. 120–134.
14. Ramakrishnan V. V., Ghaly A. E., Brooks M. S. et al. Extraction of oil from mackerel fish processing waste using Alcalase enzyme // *Enzyme Engineering*. 2013. V. 2, Iss. 2. P. 1–10.

15. Slizyte R., Rustad T., Storro I. Enzymatic hydrolysis of cod (*Gadus morhua*) by-products: Optimization of yield and properties of lipid and protein fractions // *Process Biochemistry*. 2005. V. 40, Iss. 12. P. 3680–3692.

16. Gbogouri G. A., Linder M., Fanni J. et al. Analysis of lipids extracted from salmon (*Salmo salar*) head by commercial proteolytic enzymes // *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2006. V. 108, Iss. 9. P. 766–775.

17. Routray W., Deepika D., Vegneshwaran V. et al. Production of high quality fish oil by enzymatic protein hydrolysis from cultured Atlantic salmon by-products: Investigation on effect of various extraction parameters using central composite rotatable design // *Waste and Biomass Valorization*. 2017. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-017-9998-6>.

18. Boeva N. P., Bredihina O. V. Bochkarev A. I. *Tehnologiya ryby i rybnyh produktov. Kormovye i tehnicheckie produkty iz vodnyh biologicheskikh resursov* [Technology of fish and fish products. Fodder and technical products from aquatic biological resources]. M. : Izd-vo VNIRO, 2008. 118 p.

19. *Tehnologiya ryby i rybnyh produktov* [Technology of fish and fish products] / pod red. A. M. Ershova. SPb. : GIOR, 2006. 720 p.

20. Boeva N. P., Petrova M. S., Artemova A. G. *Novye podhody k tehnologii pischevogo rybnogo zhira iz golov lososevyh ryb roda Oncoorhynchus* [New approaches to the technology of edible fish oil from the heads of salmonids of the genus *Oncoorhynchus*] // *Trudy VNIRO*. 2015. V. 158. P. 162–166.

21. Adler Yu. P., Markova E. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh usloviy* [Planning of the experiment in the search for optimal conditions]. M. : Nauka, 1976. P. 32–47.

Сведения об авторах

Куркотило Виктория Николаевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, магистрант; e-mail: vkurkotilo@yandex.ru

Kurkotilo V. N. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Undergraduate Student; e-mail: vkurkotilo@yandex.ru

Васильева Жанна Вячеславовна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: kuchugura@mail.ru

Vasilieva Zh. V. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: kuchugura@mail.ru

V. N. Kurkotilo, Zh. V. Vasilieva

Resource-saving recycling technology of lipid-containing waste of the fishing industry

Nowadays the resource component of fish waste is underutilized, while it has unique properties of fish raw material. The topical area of research is the search for new technologies for processing waste to produce fish oil as a valuable source of polyunsaturated fatty acids, fat-soluble vitamins and other biologically active substances. In the work the technology of enzymatic hydrolysis of fish wastes has been tested and compared with the traditional thermal technology of obtaining fat from fish waste. The object of the study has been frozen waste from the herring processing. The optimal parameters of obtaining fish oil from processing wastes has been determined by simulating the process by the method of mathematical planning of experiment using orthogonal central composite plan of the second order for two factors. The variation of the factors of traditional thermal processing has been carried out in the temperature range of 60 ± 10 °C for 120 ± 20 min. Enzymatic hydrolysis has been held using the enzyme preparation of proteolytic action Protosubtilin G3x (Protosubtilin G3x) in the range factors of 0.20 ± 0.05 g/kg dose of enzyme for 80 ± 20 min at the optimal temperature of hydrolysis. Organoleptic indicators of fat (appearance, color, smell, taste, transparency) have been determined in accordance with the requirements of state standards. The derived lipid drug has been subjected to research on indicators of safety in accordance with the requirements of Technical regulations of the Customs Union "On safety of food products". The safety performance of the obtained samples of fat (peroxide and acid numbers) has been determined by the standard methods. The constructed mathematical models contribute to optimizing the processing of fish waste. Comparison of the quality and safety indices of the obtained fish oil preparations has allowed substantiate the advantages of enzymatic processing of fish waste.

Key words: fish waste, fish oil, enzymatic extraction of fish oil, enzymes, safety performance, mathematical modeling.