

Исследование процесса получения экструдированных снеков на основе картофеля

О.И. Аксенова, oks280491@yandex.ru

д-р техн. наук **Г.В. Алексеев**

Университет ИТМО

Россия, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

И.С. Сырокоренский, Sirokorensky@mail.ru

филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в Смоленске

Россия, 214013, Смоленск, Энергетический проезд, 1

Исследовали процесс получения экструдированных снеков на основе картофеля в одношнековом экструдере, разрабатывали способы производства картофельных снеков, обогащенных белками из побочных продуктов переработки лососевых рыб. Выбор компонентов рыборастворительной смеси обосновывался такими факторами, как сбалансированность состава проектируемой смеси, максимальная биологическая ценность, распространенность, стоимость и традиционность сырья. В серии экспериментов использовали рыбный порошок из приголовков, наростов и тешей лосося в количестве 0–25% к массе картофельных хлопьев. Верхняя граница дозировки определялась органолептическими, физико-химическими показателями и экономической целесообразностью получения нового экструдированного продукта. Экструдаты анализировали по органолептическим свойствам, конечной влажности, насыпной плотности и коэффициенту расширения. Установлено, что добавление 10% порошка из приголовков, наростов и тешей лосося к картофельным хлопьям обеспечивает высокую пищевую ценность, хорошие органолептические и физико-химические показатели во всех пробах экструдата. Эмпирически выявлено, что основными факторами, влияющими на протекание процесса экструзии, являются площадь сечения формующего канала матрицы и начальная влажность рецептурной смеси. Установлены кинетические закономерности экструзии рыбно-картофельной смеси: зависимости между начальной влажностью смеси и давлением в рабочей камере экструдера, и начальной влажностью смеси и температурой в рабочей камере экструдера – обратно пропорциональные; зависимость между коэффициентом расширения и содержанием крахмала в экструдированной смеси прямо пропорциональная, между коэффициентом расширения и диаметром формующего канала обратно пропорциональная. Получено, что оптимальными параметрами технологического процесса экструзии рыбно-картофельной смеси, при которых достигаются наибольший коэффициент расширения $S = 315\%$ и пористая структура экструдата – являются влажность рецептурной смеси 14%, температура 135–140°C и давление в предматричной зоне 3,5–4 МПа, площадь поперечного сечения формующего канала $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Полученные разработки могут быть использованы для оптимизации режимов экструзии картофельных снеков, улучшения количественных и качественных характеристик рецептурной смеси, снижения затрат.

Ключевые слова: производство пищевых концентратов; снеки; термопластическая экструзия; переработка картофеля; побочные продукты рыбопереработки, коэффициент расширения.

DOI: 10.17586/2310-1164-2019-12-4-55-66

Obtaining potato based extruded snacks

Olga I. Aksenova, oks280491@yandex.ru

D. Sc. **Gennady V. Alekseev**

ITMO University

9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia

Ilya S. Sirokorensky, Sirokorensky@mail.ru

Branch of the MPEI National Research University in Smolensk

1, Energy dr., Smolensk, 214013, Russia

The aim is to study the process of producing extruded potato-based snacks on a single screw extruder, to develop production process of potato-based snacks enriched with proteins from salmon processing byproducts. The choice of the mixture components was due to recipe mixture balance, its maximum biological value, availability, and the cost and traditional character of the raw materials. Fish powder from the pieces behind head, excrescences, and belles of salmon in the mass fraction of – 0–25% to the

potato flakes was used for the experiment. The upper dosage limit was determined by organoleptic and physicochemical indicators, as well as economic feasibility of new extruded product production. Extrudate samples were analyzed in terms of their organoleptic properties, final moisture content, bulk density, and coefficient of extension. As a result of the study it was established that the addition of 10% of the powder from the pieces behind head, excrescences, and belles of salmon to potato flakes provides a fairly high biological value, good organoleptic and physicochemical parameters in all extrudate samples. It was revealed that the major factors influencing the course of the extrusion process are cross-sectional area of the molding die canal and initial moisture of the recipe mixture. The kinetic laws of extrusion of a fish-potato mixture have been established; the relationship between the initial moisture of the mixture and the pressure in the extruder working chamber as well as the initial moisture of the mixture and the temperature in chamber are inversely proportional; the relationship between expansion coefficients and the starch content of the extruded mixture is directly proportional; the relationship between the expansion coefficient and the diameter of the die channel is inversely proportional. Experiments have revealed that the optimal parameters of the technological process of extrusion of fish and potato mixture at which the highest expansion coefficient $S = 315\%$ and the uniform porous texture of the extrudate is achieved are as follows: the moisture of the mixture – 14%, the temperature – 135–140°C, and the pressure – 3.5–4 MPa, sectional area of the die canal $3.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. The results obtained can be used by enterprises engaged in the production of extruded snacks, to optimize the extrusion regimes of potato snacks, and to improve the quantitative and qualitative characteristics of the recipe mixture, as well as to reduce costs.

Keywords: production of food concentrates; snacks; thermoplastic extrusion; potato processing; fish processing byproducts; coefficient of expansion.

Введение

Сегодня в рационе питания населения России увеличивается доля продуктов быстрого приготовления: полуфабрикатов для разогрева в микроволновой печи и снеков. Основными критериями, предъявляемыми к снекам потребителями, являются удобство их употребления, привлекательный внешний вид и структура, легкость регулирования размера порции [1]. В настоящее время специалисты по вопросам питания отмечают несбалансированный состав снеков, их повышенную калорийность и биологическую неполноценность рецептур, негативно влияющих на здоровье человека при регулярном потреблении снеков. Смещение питания в сторону таких продуктов приводит к дефициту белка в рационах, так в среднем на одного человека приходится 55 грамм белка при необходимой суточной норме 100 грамм [2]. Проблему недостатка белка в рецептуре современных снеков целесообразно решать за счет их производства с заранее спроектированным составом, сбалансированным по питательным компонентам.

Основная доля потребления среди всех видов закусочных продуктов в нашей стране приходится на картофельные чипсы (более 30%) – около 0,8 кг на человека ежегодно [3] – в том числе экструдированные чипсы, производимые из картофельных хлопьев.

Картофельные хлопья являются привлекательным сырьем для производства расширенных экструдатов, поскольку удовлетворяют требованиям процесса экструзии к свойствам сырья без применения предварительных технологических операций, производятся из широко возделываемого в нашей стране сырья, имеют постоянные качественные показатели и длительный срок хранения [4–7]. Исследованию параметров технологического процесса экструзии и качественных показателей готового продукта при разработке биологически полноценных снеков на основе картофельных хлопьев посвящены работы А.Н. Острикова, Р.В. Ненахова, А. Cheyne, A.D. Calvo-Lopez, A. Nath и В. Nayak. Однако объем проведенных исследований экструзии картофеля во много раз меньше объема исследований экструзии зерновых и бобовых культур, таким образом, необходимо продолжение исследований в данном направлении для расширения базы знаний о параметрах процесса.

Экструдированные снеки – наиболее перспективный продукт нового поколения для улучшения их состава, а обогащение питательными веществами за счет побочных продуктов перерабатывающих производств позволяет снизить стоимость готового продукта. В настоящее время уже проведен ряд исследований [8–11], направленных на разработку экструдированных снеков, улучшение состава которых проводилось благодаря добавлению в рецептуры побочных продуктов перерабатывающих производств, подтвердивших перспективность и актуальность данного направления.

Целесообразно обогащать снеки из картофеля белками за счет рыбного сырья, поскольку с одной стороны сочетание вкусов рыбы и картофеля является традиционным, а с другой – белки рыбы обладают наибольшей степенью усвояемости в желудочно-кишечном тракте; при этом большие объемы ресурсов для океанского лова и производства товарной рыбы и продуктов рыбопереработки в условиях ограниченного современной политической ситуацией импорта ожидаемо приведут к активному росту отрасли внутри страны. Основная доля потребления рыбы приходится на продукты рыбопереработки, в результате производства которых образуются побочные продукты – 40–60% от массы перерабатываемой рыбы, по своему химическому составу не уступающие рыбному сырию. При этом более 70% объема вторичного сырья рыбопереработки используется на кормовые цели, что в свою очередь приводит к исключению из поля зрения производителей пищевых продуктов биологически ценного и дешевого сырья [12, 13]. Исследования ученых подтверждают, что рециклинг таких отходов для нужд пищевой промышленности обеспечивает расширение сырьевой базы агропромышленного комплекса при снижении издержек производства [14, 15].

Обогащение экструдированных снеков на основе картофеля белками из побочных продуктов переработки лососевых рыб является целесообразным и экономически выгодным направлением для Северо-Западного и Дальневосточного регионов, так как с одной стороны они обладают высокой биологической ценностью, а с другой – высокая жирность данных продуктов усложняет их дальнейшую переработку и хранение [13].

Переработка отходов лососевых рыб требует решения комплекса технологических проблем, среди которых определяющей является создание энергоэффективной и экологически безопасной технологии комплексной переработки, качество конечного продукта которой не будет уступать качеству аналогичного продукта из первичного сырья. Одним из самых технологичных и востребованных в последнее время комбинированных методов переработки вторичного сырья является экструзия. Использование побочных продуктов перерабатывающих производств в совокупности с малоотходной технологией экструзии ведет к максимальному сбережению производственных ресурсов [10, 13, 14, 16, 17].

Актуальность работы состоит в создании новых экструдированных картофельных снеков, позволяющих снизить уровень дефицита белка в рационах питания населения мегаполисов, и обосновании режимов экструзии с целью расширения ассортимента и снижения себестоимости выпускаемой продукции за счет использования побочных продуктов рыбоперерабатывающих производств. Необходимость проведения исследований в области разработки закусочных продуктов с заданными характеристиками качества, способных обеспечить физиологические потребности разных групп населения при ускоренном темпе жизни, подтверждается распоряжением Правительства РФ «Об утверждении Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года».

Цель работы – исследование процесса получения экструдированных снеков на основе картофеля в одношнековом экструдере; разработка на основании проведенного эмпирического исследования способа производства картофельных снеков, обогащенных белками из побочных продуктов переработки лососевых рыб.

Достижение цели возможно при выполнении задач:

- научное обоснование выбора рецептурного состава смеси для производства биологически полноценных снеков;
- выявление основных факторов, влияющих на протекание процесса экструзии;
- установление закономерностей процесса экструзии рыбно-картофельной смеси от переменных параметров исследуемого процесса в одношнековом экструдере;
- выбор рациональных параметров процесса производства картофельных снеков, обогащенных белками, в одношнековом экструдере;

Материалы и методы

Для обоснования выбора компонентов рыборастворительной смеси принимали во внимание следующие факторы: сбалансированность состава проектируемой смеси, максимальная биологическая ценность, распространенность, стоимость и традиционность сырья [2, 18]. В качестве исходного сырья использовали картофельные хлопья (ТУ 9166-010-48435440-2016 Картофельные хлопья), теши, наросты и приголовки лосося (ГОСТ 814-96 Рыба охлажденная. Технические условия).

При проектировании рецептуры рыборастворительной смеси учитывали технологические особенности проведения процесса экструзии: содержание крахмала и белков, жиров в рецептурной смеси, влажность смеси. Содержание крахмала и белков в рецептурной смеси должно быть выбрано заранее в зависимости от желаемых органолептических свойств готового продукта, поскольку основная роль этих ингредиентов состоит в обеспечении требуемой структуры, текстуры и плотности [19]. Так, при содержании крахмала менее 60%, продукт обладает волокнистой структурой, определяемой преобразованием глобулярной структуры белка в фибриллярную, которая свойственна белковым продуктам; при содержании крахмала более 60% – развитой пористой (альвиолярной) структурой, определяемой степенью разрыва крахмальных зерен и свойственной, в том числе, экструдированным снекам. Таким образом, для производства расширенных снеков с развитой пористой структурой содержание картофельных хлопьев, как основного крахмалосодержащего компонента смеси, должно быть не менее 60% от массы смеси. При этом необходимо отметить, что при 60–80% содержании крахмала в рецептурной смеси наблюдается инверсия фаз в расплаве биополимеров, что приводит к неоднородности структуры получаемого экструдата и, как следствие, ухудшению органолептических характеристик снека [4, 19]. Содержание жиров в рецептурной смеси не должно превышать 5%, так как в противном случае снижается коэффициент расширения экструдата, продукт имеет плотную не развитую или малоразвитую пористую структуру. При более высоком содержании жиров в рецептурной смеси так же уменьшается срок хранения экструдатов, что мало приемлемо для такой категории продуктов, как снеки. Для получения пористой структуры экструдатов вследствие глубоких изменений качественных свойств исходного сырья – влажность рецептурной смеси при горячей экструзии должна находиться в диапазоне 10–20% [2].

Содержание рыбного сырья в рецептурной смеси определяли на основании необходимости максимального обогащения экструдированного снека белками с целью достижения лечебно-профилактической или физиологической дозы и достижения приятного рыбного вкуса и аромата, не изменяющих традиционные органолептические характеристики картофельных снеков.

Следует отметить, что белок рыбного сырья более полноценен и имеет самую высокую степень усвояемости, так организм усваивает примерно 40 из 100 г белков рыбы. Белок рыбного порошка из побочных продуктов переработки лосося (наростов, приголовков и тешей) по содержанию незаменимых аминокислот превышает эталонный белок ФАО/ВОЗ (36,0 г на 100 г белка) и при этом практически не имеет лимитирующих аминокислот. Минимальный аминокислотный скор составляет 87%. Липиды рыбного порошка содержат до 29% полиненасыщенных жирных кислот. Рыбный порошок содержит около 15 макро- и микроэлементов. Преобладающими макроэлементами являются фосфор, калий и магний; микроэлементами – кобальт, медь, селен, хром, цинк. Поскольку технологические особенности проведения процесса горячей экструзии накладывают ограничения на влажность рецептурной смеси, рыбное сырье перерабатывали в порошок с влажностью 10–12%, что так же увеличивало длительность хранения рыбного сырья. Таким образом, рыбный порошок из тешей, наростов и приголовков лосося (далее рыбный порошок) является важным источником белков, жиров и минеральных веществ при разработке экструдатов нового поколения.

В таблице 1 представлен химический и аминокислотный состав компонентов, используемых для производства экструдированных снеков на основе картофеля.

Для разработки состава комбинированной смеси использовалась методика расчета, приведенная в [2]. По результатам расчета выбирается наилучшее соотношение компонентов, либо несколько таких соотношений, проводится серия экспериментов, в результате которой по органолептическим показателям готового продукта выбирается оптимальная рыбно-картофельная смесь. Данная методика оптимизации рецептурного состава поликомпонентной смеси позволяет сформировать научно обоснованные подходы к выбору исходных компонентов и рассчитать их процентное содержание в смеси при производстве экструдированных снеков на основе картофеля с учетом критериев оптимизации.

В серии экспериментов использовали рыбный порошок из приголовков, наростов и тешей лосося в количестве 0–25% к массе картофельных хлопьев. Верхняя граница дозировки определялась органолептическими и физико-химическими показателями, а также экономической целесообразностью получения нового экструдированного продукта. Экструдаты анализировали по органолептическим свойствам, конечной влажности, насыпной плотности и коэффициенту расширения.

Таблица 1 – Химический и аминокислотный состав компонентов, используемых для производства экструдированных картофельных снеков [20]

Table 1. Chemical and amino-acid composition of components used in the production of extruded potato-based snacks [20]

Показатель/Продукт	Картофельные хлопья	Рыбный порошок
Вода, %	12,0	12,0
Белок, %	11,8	23,5
Жиры, %	0,3	6,6
Углеводы общие, %	71,6	0,0
Крахмал, %	66,6	0,0
Неусвояемые углеводы (пищевые волокна), %	10,8	0,0
Энергетическая ценность, ккал/100 г продукта	317,0	153,0
Минеральные вещества, мг/100 г		
Na	18,0	45,0
K	1988,0	420,0
Ca	35,0	15,0
Mg	80,0	25,0
P	203,0	210,0
Fe	4,0	0,8
Витамины, мг/100 г		
РЭ (ретиноловый эквивалент), мкг/100 г	0,00	30,00
В ₁ (тиамин)	0,12	0,30
В ₂ (рибофлавин)	0,10	0,20
НЭ (ниациновый эквивалент)	5,20	9,50
ТЭ (токофероловый эквивалент)	0,30	2,20
Витамин С	11,0	0,00
Аминокислоты, мг/1 г белка		
Валин	4,3	10,2
Изолейцин	2,7	9,1
Лейцин	4,3	16,1
Лизин	4,6	18,2
Метионин+Цистиин	2,4	8,0
Треонин	2,7	8,7
Триптофан	0,8	2,2
Фенилаланин+Тирозин	7,2	14,4

Для получения закусочного продукта высокого качества подбирались такие рабочие параметры технологического процесса, как температура и давление внутри корпуса экструдера, которые являются определяющими при формировании хрусткости, прочности и органолептических характеристик снека, влияющих на успех принятия потребителем. Определение оптимальных режимов экструзии рыбно-картофельных снеков проводили на одношнековом экструдере КЭШ-2. Формующий орган экструдера представляет собой усеченный конус с наружной резьбой. Для более эффективной обработки при небольших габаритных размерах экструдер имеет сборный шнек, состоящий из модульных наборных элементов, насаженных на вал, между которыми установлены прессующие кольца. Однозаходные наборные элементы шнека выполнены с постоянным шагом винтовой нарезки, уменьшающейся глубиной нарезки и возрастающей шириной гребня витка. Искусственного обогрева корпусов и матрицы экструдера не предусмотрено. Разогрев смеси осуществляется за счет сил внутреннего трения перерабатываемой смеси об элементы корпусов и шнек экструдера. Питающий и прессующий корпуса имеют продольные канавки для задания направления движения экструдруемой смеси.

Для измерения температуры в предматричной зоне и по длине шнека использовали термопары хромель-алюминий ДТПК-01-0,7/2. Величину давления в предматричной зоне измеряли преобразователем давления ПД100-ДИ6,0-111-1,0. Показания датчиков температуры и давления через модули аналогового ввода передавались на ПК.

Для исследования влияния величины площади поперечного сечения формующего канала на величину давления в предматричной зоне использовался набор матриц, имеющих диаметр

формулирующего канала 19–23 мм. Регулирование давления в предматричной зоне экструдера осуществляли варьированием зазора между конусом шнека и конусом матрицы, увеличивая или уменьшая степень закручивания матрицы в корпус экструдера.

Важным показателем, отражающим глубину физико-химических изменений питательных веществ при экструзии крахмалсодержащего сырья, является коэффициент расширения экструдата, определяемый по формуле

$$S = \frac{d_3}{d_m},$$

где S – коэффициент расширения, %;

d_3 – диаметр поперечного сечения жгута экструдата, м;

d_m – диаметр формующего канала матрицы, м.

Подготовку рецептурной смеси осуществляли следующим образом. Дефростированные теши, наросты и приголовки лосося измельчали на куттере в фарш с размером частиц 2–5 мм. Затем фарш тонким равномерным слоем (около 5 мм) выкладывали на противни сушильного конвекционного шкафа и сушили при постоянной температуре, равной 60°C до конечной влажности 10–12%. Влажность высушенного рыбного порошка измеряли экспресс методом на приборе Чижовой. После чего картофельные хлопья и рыбный порошок в рассчитанном соотношении смешивали в течение 20 мин в миксере до однородности.

Определение кинетических закономерностей процесса получения экструдированных картофельных снеков из рыбно-картофельной смеси рассчитанного состава проводили следующим образом: в предварительно разогретый пропусканием подсолнечного жмыха до требуемой температуры экструдер КЭШ-2 загружали полученную смесь. Первая порция смеси с влажностью, заданной для получения требуемых свойств экструдата, приводила к колебаниям давления и температуры в рабочей камере экструдера, после 60 с устанавливался рабочий режим, затем рыбно-картофельную смесь обрабатывали в установленном режиме при разных значениях начальной влажности 10–18% и площади поперечного сечения формующего канала $0,3 \cdot 10^{-3}$ – $0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Полученный экструдат отбирался трехкратно с перерывом в 60 с. При этом измеряли температуру внутри рабочей камеры экструдера по длине шнека, давление в предматричной зоне экструдера, диаметр расширенного жгута экструдата.

Исследование основных кинетических закономерностей процесса получения экструдированных картофельных снеков позволяет понять и оценить физику процесса экструзии [1, 2, 7, 9, 11, 19]. Изучение изменения температуры экструдата по длине рабочей камеры экструдера является необходимым условием для определения оптимальных условий процесса, определяющих качество экструдированных снеков, поскольку значительные отклонения приводят к разложению термолабильных питательных веществ. В процессе экструзии давление определяет глубину физико-химических изменений в рыборастительной смеси в ходе процесса, то есть качество готового экструдата.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования влияния содержания рыбного порошка в рыбно-картофельной смеси на показатели качества готового экструдата приведены в таблице 2. Внешний вид полученных экструдатов при разном содержании рыбного порошка в рецептурной смеси показан на рисунке 1.

Из анализа таблицы 2 и рисунка 1 следует, что увеличение доли рыбного порошка до 10% оказывает умеренное влияние на органолептические характеристики экструдата, при этом достигается достаточно высокий коэффициент расширения и отсутствует переход «взорванная-волокнистая» структура, который не позволяет достичь стабильного протекания процесса экструзии.

Таким образом, в результате расчета по использованной методике [2] и серии экспериментов определено, что по органолептическим и физико-химическим показателям полученного экструдата целесообразно внесение не более 10% порошка из тешей, наростов и приголовков лосося к массе картофельных хлопьев. Увеличение содержания рыбного порошка свыше 10% приводит к ухудшению физико-химических показателей во всех пробах в результате перехода «взорванная-волокнистая» структура, наблюдаемом при содержании крахмала в рецептурной смеси в диапазоне 80–60%, а также ухудшении органолептических характеристик из-за явно выраженного рыбного вкуса и аромата.

Таблица 2 – Влияние содержания рыбного порошка на показатели качества экструдата
 Table 2. The influence of fish powder percentage of extrudate quality indicators

Содержание рыбного порошка, % к массе смеси	Органолептические показатели		Физико-химические показатели экструдата		
	Цвет	Вкус и аромат	массовая доля влаги, %	насыпная плотность кг/м ³	коэф-т расширения S, %
0	светло-желтый	свойственный экструдату из картофеля с ароматом жареного картофеля	5,9	337	169
5	желтый с коричневым оттенком	свойственный экструдату из картофеля со слабовыраженным рыбным вкусом и ароматом жареного картофеля	5,9	342	178
10	желтый с коричневым оттенком	свойственный экструдату из картофеля с рыбным вкусом и ароматом жареного картофеля и рыбы	6,2	345	220
15	светло-желтый	свойственный экструдату из картофеля с явно выраженным рыбным вкусом и ароматом рыбы	6,3	347	170
20	коричневый	свойственный экструдату из картофеля с явно выраженным рыбным вкусом и ароматом рыбы, стойкое рыбное послевкусие	6,0	343	237
25	темно-коричневый	рыбный вкус и аромат, не свойственные экструдату из картофеля	6,9	348	226

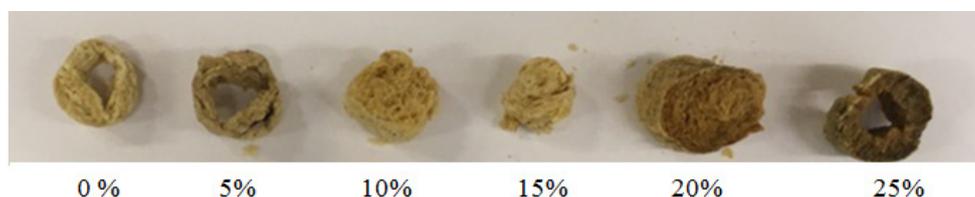


Рисунок 1 – Внешний вид экструдатов при различном содержании рыбного порошка в смеси
 Figure 1. Extrudates with different percentage of fish powder in the mixture

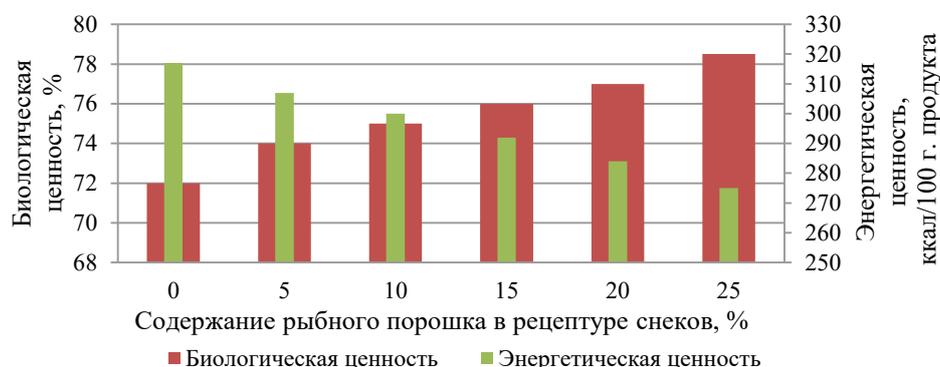


Рисунок 2 – Биологическая и энергетическая ценность экструдатов при разном содержании рыбного порошка в рецептурной смеси

Figure 2. Biological and energetic value of extrudates with different percentage of fish powder in the recipe mixture

На рисунке 2 отражена биологическая и энергетическая ценность экструдатов, полученных при разном содержании рыбного порошка в рецептурной смеси. Анализ диаграммы показывает, что экструдат с содержанием рыбного порошка 10% обладает достаточно высокой пищевой ценностью при сохранении органолептических свойств, характерных для закусочных продуктов из картофеля.

При сравнении биологической и энергетической ценности полученного экструдата с традиционными снеками из картофеля (картофельные чипсы: биологическая ценность 59%, энергетическая ценность 520 ккал/100 г. продукта), очевидно – разработанный экструдат обладает большей биологической и меньшей энергетической ценностью, что позволит избежать избытка калоража и дисбаланса рациона при регулярном употреблении экструдированного снека на основе картофеля в качестве перекуса.

По результатам протоколов кинетических исследований процесса экструзии рыборастворительной смеси были построены графики, приведенные на рисунках 3–6.

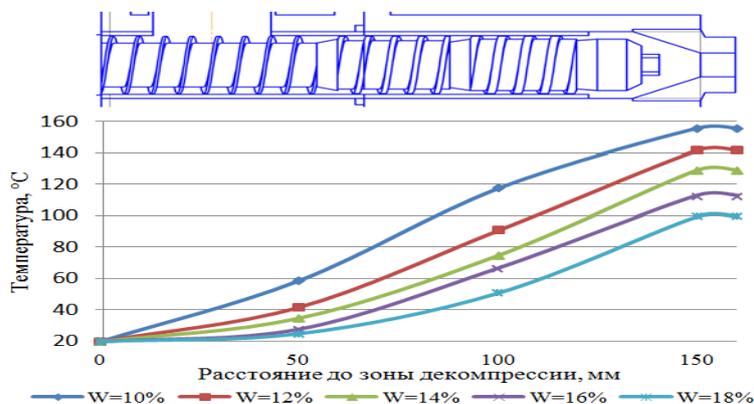


Рисунок 3 – Зависимость температуры в рабочей камере экструдера от расстояния до конца зоны формирования при начальной влажности рыборастворительной смеси $W = 10–18\%$ и диаметре формирующего канала $d = 0,019$ м
 Figure 3. The dependence of temperature in the extruder chamber on the distance to the molding zone end at initial moisture of the mixture $W = 10–18\%$ and the diameter of forming channel $d = 0,019$ m

Из графика на рисунке 3 следует, что распределение температуры в рабочей камере экструдера по длине шнека характеризуется плавным возрастанием от загрузочной зоны (питающий корпус) к зоне сжатия (прессующий корпус) вплоть до формирующего узла. В матрице изменения температуры не происходит, что связано с относительно небольшой длиной формирующего канала матрицы и отсутствием дополнительного подвода тепла от внешних источников (автогенный режим работы). В дальнейшем при выходе жгута экструдата из формирующего канала характерно резкое снижение температуры, объяснимое выделением значительного количества энергии за короткое время, которая затрачивается на фазовый переход влаги, находящейся в экструдированной смеси. Необходимо отметить, что при движении рыбо-картофельной смеси от загрузочного отверстия к матрице тепловая и сдвиговая энергии, прикладываемые к сырью, вызывают не только изменение структуры (переход из дисперсно-сыпучего состояния в вязко пластичное), но количественные и качественные изменения в пищевой ценности готового продукта, обусловленные денатурацией белков, разрушением термолабильных витаминов, фитохимических соединений, антиоксидантов, окислением жиров, образованием вкусовых веществ, желатинизацией и разрушением крахмальных зерен, увеличением растворимости и минеральной биодоступности диетических волокон.

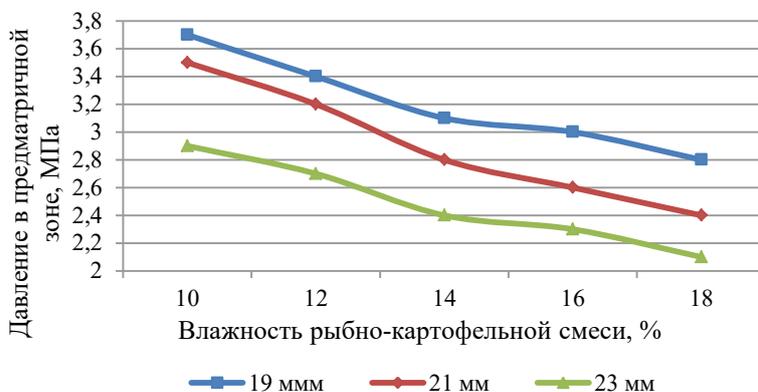


Рисунок 4 – Зависимость давления в предматричной зоне экструдера от начальной влажности рыбо-картофельной смеси при диаметре формирующего канала $d = 19–23$ мм и температуре 120°C
 Figure 4. The dependence of pressure in pre-matrix zone of the extruder on initial moisture of the mixture at the diameter of the forming channel $d = 19–23$ mm and the temperature of 120°C

Из рисунка 4 следует, что зависимость между давлением в рабочей камере экструдера и начальной влажностью рыбно-картофельной смеси обратно пропорциональная, что объясняется уменьшением вязкости, а следовательно, трения и температуры с увеличением влажности рыборастворительной смеси. Кроме того, необходимо отметить, что при чрезмерно больших значениях площади поперечного сечения формирующего канала матрицы экструдера требуемое давление не достигается, таким образом, отсутствует переход компонентов смеси в расплав вследствие недостаточного количества энергии. В свою очередь увеличить давление в рабочей зоне экструдера можно уменьшив площадь поперечного сечения формирующего канала матрицы экструдера, что обусловлено большим сопротивлением выходному потоку (противодавление создаваемое матрицей), и как следствие, увеличением эффекта диссипации. Однако при малых ($0,3 \cdot 10^{-3}$) значениях площади проходного сечения давление возрастает чрезмерно, приводя к увеличению времени нахождения продукта в рабочей камере экструдера, что с ростом давления способствует увеличению температуры и приводит к пригоранию экструдата и нарушению стабильной работы экструдера.

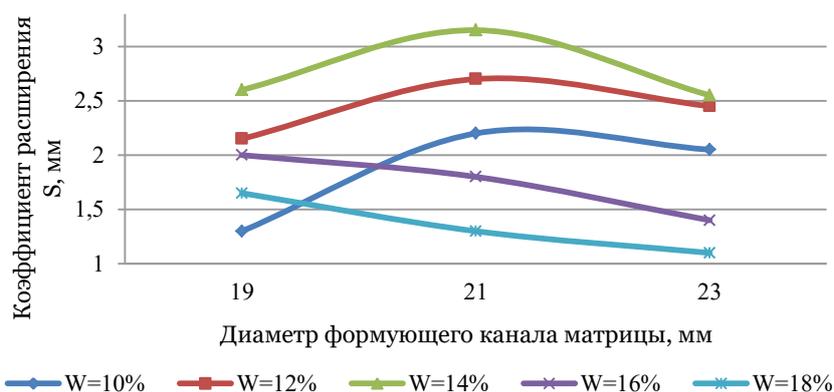


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента расширения экструдата от диаметра формирующего канала при начальной влажности рыбно-картофельной смеси $W = 10-18\%$ и температуре 140°C

Figure 5. The dependence of extrudate expansion coefficient on the diameter of the forming channel at initial moisture of the mixture $W = 10-18\%$ and the temperature of 140°C

Из рисунка 5 следует, что с уменьшением диаметра формирующего канала матрицы коэффициент расширения S сначала увеличивается, а затем уменьшается, за исключением образцов с начальной влажностью 16 и 18%. Для образцов с начальной влажностью 10–14% характер кривой объясняется тем, что при уменьшении диаметра формирующего канала до определенного значения коэффициент расширения увеличивается за счет отсутствия эффекта пригорания продукта, который не наблюдается при таких размерах формирующего канала в образцах с влажностью 16–18%. При этом низкий уровень влажности рыбно-картофельной смеси так же ограничивает расширение экструдата вследствие недостаточного образования пара при взрывном вскипании влаги.

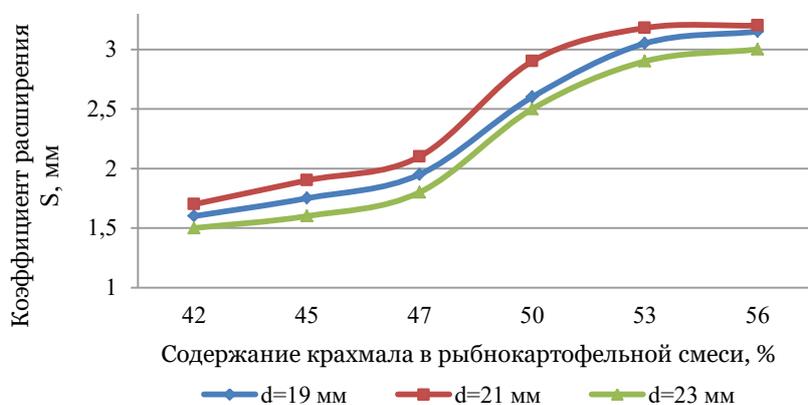


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента расширения экструдата от содержания крахмала в рыбно-картофельной смеси при диаметре формирующего канала $d = 19-23$ мм и температуре 140°C

Figure 6. The dependence of extrudate expansion coefficient on starch content in the mixture at the diameter of the forming channel $d = 19-23$ мм and the temperature of 140°C

Как видно из рисунка 6, зависимость между коэффициентом расширения S и содержанием крахмала в экструдированной смеси прямо пропорциональная. Это может объясняться тем, что с увеличением содержания крахмала в смеси возрастет доля разорвавшихся крахмальных зерен, что в свою очередь приводит к большему расширению и увеличению количества пор в текстуре экструдата. В зависимости от величины перепада давлений и реологических свойств сырья экструдаты будут обладать порами разного размера и разной толщиной стенок пор. При этом необходимо отметить, что увеличение площади проходного сечения формирующего канала матрицы приводит к уменьшению коэффициента расширения вследствие уменьшения величины перепада давления между атмосферой и давлением в предматричной зоне экструдера, необходимого для высвобождения энергии достаточной для разрыва крахмальных зерен.

Заключение

1. Научно обоснован выбор картофельных хлопьев и порошка из побочных продуктов переработки (приголовков, наростов и тешей) лососевых рыб в качестве рецептурных ингредиентов с учетом специфики перерабатываемых отраслей и сельскохозяйственной деятельности Северо-Западного и Дальневосточного регионов. Установлено, что содержание 10% рыбного порошка в рецептурной смеси обеспечивает во всех пробах экструдата высокую биологическую ценность равную 75% и сниженную в сравнении с картофельными чипсами энергетическую ценность равную 300 кКал/100 г. продукта; хорошие органолептические свойства – экструдат обладает вкусом и ароматом характерными для исходного сырья, и удовлетворительные физико-химические показатели – насыпная плотность равна 345 кг/м³, массовая доля влаги равна 6,2% и коэффициент расширения равен 220%.

2. В ходе проведенного исследования было выявлено, что основными факторами, влияющими на протекание процесса экструзии, являются площадь сечения формирующего канала матрицы и начальная влажность рецептурной смеси.

3. Установлены кинетические закономерности экструзии рыбно-картофельной смеси: зависимости между начальной влажностью смеси и давлением в рабочей камере экструдера, и начальной влажностью рыбно-картофельной смеси и температурой в рабочей камере экструдера – обратно пропорциональные; зависимость между коэффициентом расширения и содержанием крахмала в экструдированной смеси прямо пропорциональная, между коэффициентом расширения и диаметром формирующего канала обратно пропорциональная; с уменьшением площади проходного сечения формирующего канала матрицы экструдера давление и температура в рабочей зоне экструдера увеличиваются.

4. Эксперименты позволили выявить, что оптимальными параметрами технологического процесса экструзии рыбно-картофельной смеси, при которых достигаются требуемые физические качественные показатели расширенных снеков – наибольший коэффициент расширения $S = 315\%$ и пористая структура экструдата – являются влажность рецептурной смеси 14%, температура в предматричной зоне 135–140°C, давление в предматричной зоне 3,5–4 МПа и площадь поперечного сечения формирующего канала $3,5 \cdot 10^{-4}$ м².

Добавление в рецептуру экструдированных снеков на основе картофеля побочных продуктов переработки лососевых рыб позволяет, с одной стороны, производить снеки с высокой биологической ценностью и низкой себестоимостью, с другой – решить проблему экономически невыгодной утилизации побочных продуктов переработки лососевых рыб для предприятий Северо-Западного и Дальневосточного регионов.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния особенностей конструкции рабочего и формирующего органов экструдера и обоснованное результатами экспериментов совершенствование конструкции одношнекового экструдера.

Литература

1. Aksenova O.I., Alekseev G.V., Krivopustov V.V., Yakovlev P.C., Lobacheva N.N., Derkanosova A.A. From traditional recipes to biologically complete food products: review on snacks extrusion. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2017, no. 12, pp. 349–353.
2. Остриков А.Н., Василенко В.Н., Соколов И.Ю. Коэкструзионные продукты: новые подходы и перспективы. М.: ДеЛипринт, 2009. 232 с.
3. Россия в цифрах. 2017: крат. стат. сб. М.: Росстат, 2017. 511 с.
4. Calvo-Lopez A.D., Martinez-Bustos F. Optimization of extrusion process of expanded snakes based on potato starch

- in a single step for the formation of type IV resistant starch. *Plant Food for Human Nutrition*. 2017, V. 72, Is. 3, pp. 243–249.
5. Аксенова О.И. Эмпирическое исследование кинетических зависимостей экструдирования рыборастворительной смеси для производства расширенных картофельных снеков // Ползуновский вестник. 2018. №3. С 3–9.
 6. Остриков А.Н., Желтоухова Е.Ю., Терёхина А.В., Копылов М.В., Болгова И.Н. Исследование кинетических зависимостей процесса радиационно-конвективной сушки пластин картофеля // Продовольственная безопасность: научное, кадровое и информационное обеспечение: сб. науч. статей. Воронеж. Ритм, 2018. С. 515–516.
 7. Nath A., Chattopadhyay P. K. Effect of process parameters and soy flour concentration on quality attributes and microstructure changes in ready-to-eat potato-soy snack using high-temperature short time air puffing. *LWT Food Sci. Technol.* 2008, no. 41, pp. 707–715.
 8. Navneet K., Sarkar B.S., Sharma H.K. Development and characterization of extruded product of carrot pomade, rice flour and pulse powder. *African Journal of Food Scientist*. 2010, no. 4, pp. 703–717.
 9. Ванишин В.В., Туктамышева А.Р., Новикова Л.В., Халитова Э.Ш., Зинюхина А.Г. Экструдирование поликомпонентной смеси крахмалосодержащего сырья и мезги плодовоовощных культур // Вестник Оренбургского государственного университета. 2014. № 1. С. 157–160.
 10. Аксенова О.И., Копылов М.В. Разработка способа производства экструдированных картофелепродуктов в экструдере с динамической матрицей // Ползуновский вестник. 2019. №1. С 3–10.
 11. Stojceska V., Ainsworth P., Plunketta A., Ibanoglu S. The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology. *Journal of Cereal Scientist*. 2008, no. 47, pp. 469–479.
 12. Кузин В.И., Харин А.Г. Оценка производственного и финансового потенциалов российского рыбного хозяйств, как основы инвестиций в отрасль // Рыбное хозяйство. 2018. № 6. С. 22–26.
 13. Мезенова О.Я., Байдалинова Л.С., Землякова Е.С. и др. Вторичное рыбное сырье: состав, свойства, биотехнология переработки: монография. Калининград: Изд-во Калинингр. гос. техн. ун-та, 2015. 317 с.
 14. Алексеев Г.В., Аксенова О.И. Использование математического моделирования для ресурсосберегающих пищевых производств // Науч. журнал НИУ ИТМО. Сер.: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 3. С. 1–10.
 15. Кончина Л.В., Куликова М.Г., Гончарова И.А. Экспериментальная апробация внедрения межпредметных связей при проектировании объектов машиностроения // Естественные и технические науки. 2018. № 8(122). С. 158–159.
 16. Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Михайлова Н.А., Драган И.В., Таркаева В.А., Щепкина А.А. Конструкция экструдера // Новое в технологии и технике функциональных продуктов питания на основе медико-биологических воззрений: сб. тр. Воронеж: Изд-во Воронеж. Гос. ун-т инж. технологий, 2019. С. 490–492.
 17. Karkle E.N.L., Keller L., Dogan H., Alavi S. Matrix transformation in fiber-added extruded products: Impact of different hydration regimens on texture, microstructure and digestibility. *Journal of Food Engineering*. 2012, V. 108, Is. 1, pp. 171–181.
 18. Шанин В.А., Кончина Л.В. Перспективы применения принципов компоновки оборудования для оптимизации производных процессов // Агропродовольственная экономика. 2017. № 6. С. 49–56.
 19. Щербакова Л.В., Кончина Л.В. Влияние технологических факторов на качество хранения плодовоовощной продукции // Агропродовольственная экономика. 2017. № 6. С. 57–66.
 20. McCance and Widdowson's *The Composition of Foods*. Seventh summary edition. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2014. 570 p.

References

1. Aksenova O.I., Alekseev G.V., Krivopustov V.V., Yakovlev P.C., Lobacheva N.N., Derkanosova A.A. From traditional recipes to biologically complete food products: review on snacks extrusion. *Russian Journal of Agricultural and Socio-Economic Sciences*. 2017, no. 12, pp. 349–353.
2. Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Sokolov I.Yu. Co-extruded products: new approaches and prospects. Moscow, DeLiprint Publ., 2009. 232 p. (*In Russian*).
3. Russia in numbers. 2017: A brief statistical collection. Moscow, Rosstat Publ., 2017. 511 p. (*In Russian*).
4. Calvo-Lopez A.D., Martinez-Bustos F. Optimization of extrusion process of expanded snakes based on potato starch in a single step for the formation of type IV resistant starch. *Plant Food for Human Nutrition*. 2017, V. 72, Is. 3, pp. 243–249.
5. Aksenova O.I. An empirical study of the kinetic dependences of the extrusion of a fish-vegetabl mixture for the production of expanded potato snacks. *Polzunovsky vestnik*. 2018, no. 3, pp. 3–9 (*In Russian*).
6. Ostrikov A.N., Zheltoukhova E.Yu., Teryokhin A.V., Kopylov M.V., Bolgova I.N. Investigation of the kinetic dependences of the process of radiation-convective drying of potato plates. *Food Security: Scientific, Personnel and Information Support*. Collection of works. Voronezh. Ritm Publ., 2018, pp. 515–516 (*In Russian*).
7. Nath A., Chattopadhyay P. K. Effect of process parameters and soy flour concentration on quality attributes and microstructure changes in ready-to-eat potato-soy snack using high-temperature short time air puffing. *LWT*

- Food Sci. Technol.* 2008, no. 41, pp. 707–715.
8. Navneet K., Sarkar B.S., Sharma H.K. Development and characterization of extruded product of carrot pomade, rice flour and pulse powder. *African Journal of Food Scientist.* 2010, no. 4, pp. 703–717.
 9. Vanshin V.V., Tuktamysheva A.R., Novikova L.V., Halitova E.Sh., Zinyukhina A.G. Extrusion of a multicomponent mixture of starch-containing raw materials and pulp of fruit and vegetable crops. *Herald of the Orenburg State University.* 2014, no. 1, pp. 157–160 (*In Russian*).
 10. Aksenova O.I., Kopylov M.V. Development of a method for the production of extrudirone potato products in an extruder with a dynamic matrix. *Polzunovskiy vestnik.* 2019, no. 1, pp. 3–10 (*In Russian*).
 11. Stojceska V., Ainsworth P., Plunketta A., Ībanođlub S. The recycling of brewer's processing by-product into ready-to-eat snacks using extrusion technology. *Journal of Cereal Scientist.* 2008, no. 47, pp. 469–479.
 12. Kuzin V.I., Kharin A.G. Evaluation of the production and financial potentials of the Russian fisheries, as the basis for investment in the industry. *Fisheries.* 2018, no. 6, pp. 22–26 (*In Russian*).
 13. Mezenova O.Ya., Baydalina L.S., Zemlyakova E.S. and al. *Secondary fish raw materials: composition, properties, processing biotechnology.* Kaliningrad: Kaliningrad State Tech. University Publ., 2015. 317 p. (*In Russian*).
 14. Alekseev G.V., Aksenova O.I. The use of mathematical modeling for resource-saving food production. *Scientific Processes and Food Production Equipment.* 2014, no. 3, pp. 1–10 (*In Russian*).
 15. Konchina L.V., Kulikova M.G., Goncharova I.A. Experimental testing of the introduction of intersubject communications in the design of engineering facilities. *Natural and Technical Sciences.* 2018, no. 8(122), pp. 158–159 (*In Russian*).
 16. Vasilenko V.N., Frolova L.N., Mikhailova N.A., Dragan I.V., Tarkaeva V.A., Schepkina A.A. The design of the extruder. *New in the technology and technique of functional food based on medical and biological views.* Collection of work. Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technology Publ., 2019. pp. 490–492 (*In Russian*).
 17. Karkle E.N.L., Keller L., Dogan H., Alavi S. Matrix transformation in fiber-added extruded products: Impact of different hydration regimens on texture, microstructure and digestibility. *Journal of Food Engineering.* 2012, V. 108, Is. 1, pp. 171–181.
 18. Shanin V.A., Konchina L.V. Prospects for the application of equipment layout principles for the optimization of derivative processes. *Agrofood Economy.* 2017, no. 6, pp. 49–56 (*In Russian*).
 19. Shcherbakova L.V., Konchina L.V. The influence of technological factors on the quality of storage of fruits and vegetables. *Agrofood Economy.* 2017, no. 6, pp. 57–66 (*In Russian*).
 20. McCance and Widdowson's *The Composition of Foods.* Seventh summary edition. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2014. 570 p.

Статья поступила в редакцию 30.08.2019