

О. А. Голубева, С. А. Титова, Е. О. Греков

Криоэкструзия в технологии производства рыбных кормов

Исследован процесс измельчения рыбного сырья в замороженном состоянии с использованием полезной модели экструдера-измельчителя поршневого типа с охлаждаемыми рабочими органами. Получен новый кормовой продукт – рыбный криофарш. Обоснована возможность замены стандартных технологических операций (дефростация и последующее измельчение сырья) одной – криоэкструзией. Планирование экспериментальной части выполнено по методу комбинационных квадратов. В ходе эксперимента определен объем образцов, их удельная поверхность, масса, начальная и конечная температуры рабочей камеры, температура сырья, температура полученного фарша, усилие продавливания, время эксперимента, масса отходов. Определены рациональная форма и размер отверстий фильеры для продавливания сырья. При этом установлено, что при использовании фильеры с формой отверстий "песочные часы" диаметром 4,5 мм и 7 мм длительность процесса продавливания для исследованных видов рыб составляет от 47 до 130 с. Готовый продукт – криофарш – имеет достаточно однородную структуру, сочную консистенцию, температура в толще продукта на выходе равна температуре сырья до начала его переработки (минус 18 °С). Определен гранулометрический состав полученного криофарша с использованием ситового анализа. Статистическая обработка результатов экспериментов по определению усилия продавливания мороженого рыбного сырья методом нелинейной регрессии проведена при помощи программы DataFit версия 9.1.32. Получено уравнение регрессии, описывающее влияние комплексного параметра – коэффициента формы отверстия, учитывающего диаметр и форму отверстия матрицы, и степени измельчения сырья, на усилие продавливания. Доказана целесообразность использования матрицы "песочные часы", позволяющей получить наименьшее усилие продавливания для костных рыб Северного бассейна.

Ключевые слова: измельчение, криоэкструзия, рыба, кормовой фарш, криофарш.

Введение

В настоящее время в Мурманской области в рамках реализации приоритетных направлений государственной политики осуществляется формирование устойчивого рыбохозяйственного кластера в целях реализации значительного ресурсного потенциала в сфере добычи морских водных биологических ресурсов, в первую очередь рыбы.

Государственной программой Мурманской области "Развитие рыбохозяйственного комплекса", целью которой является повышение эффективности использования имеющегося ресурсного и природно-климатического потенциала для развития рыбохозяйственного комплекса Мурманской области, в качестве приоритетных задач в числе прочих определено создание условий для повышения эффективности добычи (вылова) водных биоресурсов, а также стимулирование модернизации основных производственных фондов и внедрение инновационных технологий.

В основе существующих традиционных технологий изготовления кормовых рыбных фаршей лежит процесс измельчения предварительно размороженного сырья (как правило, свежая или замороженная малоченная рыба, рыбные отходы и пр.). При этом в технологическом цикле всегда присутствует процедура дефростации, предшествующая измельчению, вследствие осуществления которой возможно не только ухудшение внешнего вида сырья, но и наблюдаются его потери. Наряду с этим пищевая ценность получаемого продукта снижается из-за утраты тканевой влаги, белков, гидролиза и окисления жиров.

Таким образом, способ изготовления кормового рыбного фарша, в основу которого положены инновационные технологии, должен существенно улучшать его пищевую ценность и обеспечивать высокие питательные свойства получаемого продукта, в том числе максимальную сохранность химического состава и особенно одного из наиболее важных в пищевом отношении компонентов – протеина.

В целом, технологии приготовления кормов животного происхождения, включая кормовые рыбные фарши, в общем виде складываются из набора операций: дефростация, мойка, поэтапное измельчение, смешивание и гомогенизация. К наиболее значимым факторам, оказывающим влияние на энергозатраты операции измельчения, следует отнести: скорость резания, вид режущего инструмента и его расположение, геометрические параметры режущего инструмента (в особенности угол заточки и угол скольжения лезвия ножа), температура измельчаемого сырья [1]. Таким образом, основные энергозатраты (до 50 % всех затрат энергии) приходится на операцию измельчения, причем большая часть энергии расходуется нерационально, трансформируясь в тепло и другие виды энергии.

Необходимо отметить, что измельчение является операцией, обязательной в технологическом процессе приготовления кормов, так как в результате измельчения корма образуется множество частиц с высокоразвитой поверхностью, что способствует ускорению процессов пищеварения и повышению усвояемости питательных веществ [2; 3].

В научной литературе описаны четыре стадии процесса измельчения рыбных кормов: предварительное, грубое, тонкое и окончательное измельчение. Каждая из этих стадий осуществляется на определенном виде оборудовании и сопровождается потерей кормов [2].

В свою очередь, использование криоэкструзии при производстве рыбных кормовых фаршей объединяет несколько стадий измельчения и повышает сохранность в перерабатываемом сырье питательных веществ, а также исключает из стандартного технологического цикла применение режущих инструментов (заменяя резание продавливанием), дефростацию сырья, повторное замораживание готового продукта. Кроме того, криоэкструзия обеспечивает постоянство температуры измельчаемого рыбного сырья [1; 4].

В технологии производства кормовых фаршей из рыбы, в основу которой положен метод криоэкструзии, сырье продавливается через охлаждаемую фильеру с определенными диаметром и формой отверстий [5], при этом измельчение при продавливании происходит путем разрезания волокон мышечной ткани сырья кристалликами внутриклеточного и межклеточного льда, так как сырье не подвергается размораживанию, обеспечивая тем самым предотвращение потерь влаги, белка и иных важных составляющих готового кормового продукта.

Актуальность исследований по использованию данного метода обосновывается возможностью получения кормовой продукции из гидробионтов с повышенными качественными характеристиками и предполагает вовлечение в переработку недоиспользуемых объектов морского промысла (например, путассу, сайки, ската звездчатого и т. д.) [4].

Цель данной работы – разработка и обоснование оптимальных режимов измельчения малоиспользуемого мороженого сырья на примере путассу с применением криоэкструзии для создания ресурсосберегающей технологии производства рыбных кормов. Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию в технологиях производства рыбных кормов.

Материалы и методы

В качестве исследуемого сырья выбраны: мороженая путассу (*Micromesistius poutassou*), по качеству не ниже 1 сорта, отвечающая требованиям ГОСТ 32366-2013 "Рыба мороженая. Технические условия"¹ [4].

Новый способ получения кормового рыбного фарша на основе криоэкструзии был разработан на кафедре технологического и холодильного оборудования Мурманского государственного технического университета (МГТУ) и изучался с применением созданной в условиях кафедры полезной модели экструзионной установки поршневого типа с охлаждаемыми рабочими органами [5]. Установка используется для измельчения различных видов сырья в замороженном состоянии. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

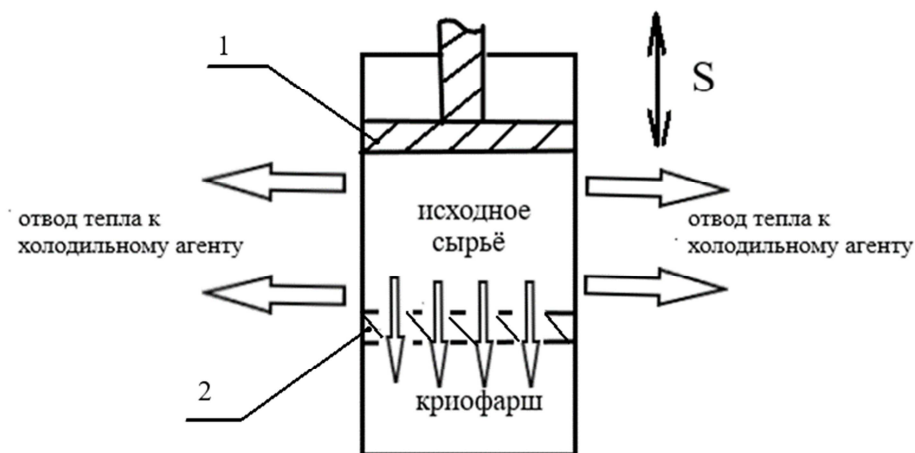


Рис. 1. Структурная схема экструзионной установки:

1 – движущийся поршень (плунжер); 2 – сменная измельчительная решетка (матрица)

Fig. 1. Structural diagram of the extrusion plant:

1 – moving piston (plunger); 2 – replaceable grinding lattice (matrix)

Рабочая часть установки выполнена в виде камеры, снабженной охлаждающей рубашкой. В охлаждающую рубашку подается циркулирующий холодильный агент или хладоноситель, который снижает температуру рабочих органов до минус 18 °С. Внутри камеры расположены охлаждаемые рабочие органы: движущийся поршень (плунжер) 1 и сменная измельчительная решетка (матрица) 2, которая

¹ ГОСТ 32366-2013. Рыба мороженая. Технические условия. М., 2014. 22 с.

устанавливается в проточку в стакане, предназначенном для приема измельченного полуфабриката. В стакане имеется отверстие для установки термопары. Подробное описание установки представлено в работе [5]. Отношение диаметра рабочего цилиндра установки к ходу поршня составляет 1 : 2, объем рабочей камеры 185 см³. Мощность гидропривода – 1,6 кВт.

Планирование экспериментальной части выполнено по методу комбинационных квадратов [6].

Предварительно блок сырья нарезался на куски. В ходе эксперимента методом Архимеда определялся объем кусков и рассчитывался их эквивалентный диаметр, а затем – степень измельчения. Масса кусков и отходов определялась методом периодического взвешивания. Удельная поверхность кусков – как отношение полной поверхности образца к его массе. Начальная и конечная температура рабочей камеры, температура сырья и полученного фарша измерялись при помощи термопары типа "К" с мультиметром М838. Усилие продавливания определялось манометром, время эксперимента – секундомером.

В ходе проведения эксперимента объем кусков изменялся от 1,84 до 16,4 см³, эквивалентный диаметр – от 7,6 до 15,8 мм, удельная поверхность – от 0,1702 до 0,5701 м²/кг. Куски по эквивалентному диаметру были объединены в партии. Масса каждой партии, загружаемой в рабочую камеру экструзионной установки, составляла от 70 до 170 г. Повторяемость для каждой партии равна трем. Температура рабочей камеры, сырья и фарша составили –18 °С.

Предварительные исследования позволили ограничить форму отверстий матриц тремя видами: "конус – цилиндр", "конус – конус" ("песочные часы") и "конфузор". Высота каждой части отверстия составляла ½ часть толщины матрицы, тангенс угла наклона боковой поверхности отверстий матриц к горизонтальной поверхности постоянен и равен 6. Коэффициент геометрической формы отверстий определялся по формулам:

– для отверстия типа "конус"

$$K_k = \frac{\pi \cdot d_1^3 \cdot d_2^3 \cdot z}{128 \cdot (d_1^2 + d_1 \cdot d_2 + d_2^2) \cdot \delta}, \quad (1)$$

где K_k – коэффициент геометрической формы конического отверстия, см³; z – количество отверстий; d_1, d_2 – диаметры нижней и верхней части конуса, см; δ – высота отверстия, см;

– для отверстий цилиндрической формы

$$K_{ц} = \frac{\pi \cdot z \cdot d^4}{128 \cdot \delta}, \quad (2)$$

где $K_{ц}$ – коэффициент геометрической формы цилиндрического отверстия, см³;

– для отверстий сложной формы ("конус – цилиндр", "конус – конус")

$$K = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{1}{K_i}, \quad (3)$$

где K_i – коэффициент геометрической формы простых отверстий (цилиндрических, конических), см³, изменялся в диапазоне 0,0211 до 0,5347 см³, диаметр отверстий составил 4,5 и 7 мм.

Характеристика отверстий матриц представлена в таблице.

Таблица. Характеристика отверстий матриц
 Table. Characterization of die apertures

Форма отверстия, количество отверстий	Диаметр отверстия, мм	Коэффициент геометрической формы отверстия, см ³
Конус – цилиндр, 19 шт.	8/7/7	0,534748
Конус – конус, 19 шт.	8/7/8	0,323057
Конус, 19 шт.	9/7	0,100694
Конус – цилиндр, 19 шт.	5,5/4,5/4,5	0,095059
Конус – конус, 19 шт.	5,5/4,5/5,5	0,062635
Конус, 19 шт.	6,5/4,5	0,021198

Длительность процесса измельчения по всем видам матриц составила от 33,26 до 120 с при изменении давления от 105 до 185 кгс/см² и степени измельчения от 1,09 до 3,5.

Для определения гранулометрического состава полученного криофарша был использован ситовый анализ с набором сит 7,0; 5,0; 4,5; 3,5; 3,0; 2,0; 1,0. Перед проведением эксперимента ситовая колонна охлаждалась до температуры криофарша.

Статистическая обработка результатов экспериментов по определению усилия продавливания мороженого рыбного сырья методом нелинейной регрессии была проведена при помощи программы DataFit версия 9.1.32. Адекватность полученных математических моделей определялась стандартным методом с применением критерия Фишера и коэффициента детерминации, значимость коэффициентов уравнения регрессии – по критерию Стьюдента [7].

Функцией отклика являлось давление измельчения y , кгс/см², а варьируемыми факторами: коэффициент геометрической формы отверстия x_1 , см³ и степень измельчения сырья x_2 , безразмерная величина.

Результаты и обсуждение

В результате реализации плана эксперимента и обработки полученных данных по определению рациональных режимов измельчения мороженого сырья получено уравнение регрессии, адекватно описывающее влияние коэффициента формы отверстия рабочей матрицы и степени измельчения на усилие продавливания

$$y = 23,466 + 149,452x_1 + 641,498 x_1^2 + 747,119 x_1^3 + 88,904/x_2 + 77,364/ x_2^2, \quad (4)$$

где x_1 – коэффициент геометрической формы отверстия, см³; x_2 – степень измельчения сырья, безразмерная величина.

Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,889$, статически значим. С учетом коэффициента детерминации $0,889 > 0,5$ модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения – значимы [8].

Из представленной поверхности отклика факторного пространства следует, что минимальное давление измельчения соответствует 105 кгс/см² (10,3 МПа) и наблюдается при коэффициенте геометрической формы отверстия матрицы 0,32 см³, что соответствует матрице "песочные часы" диаметра 7 мм, и степени измельчения 1,36 (рис. 2).

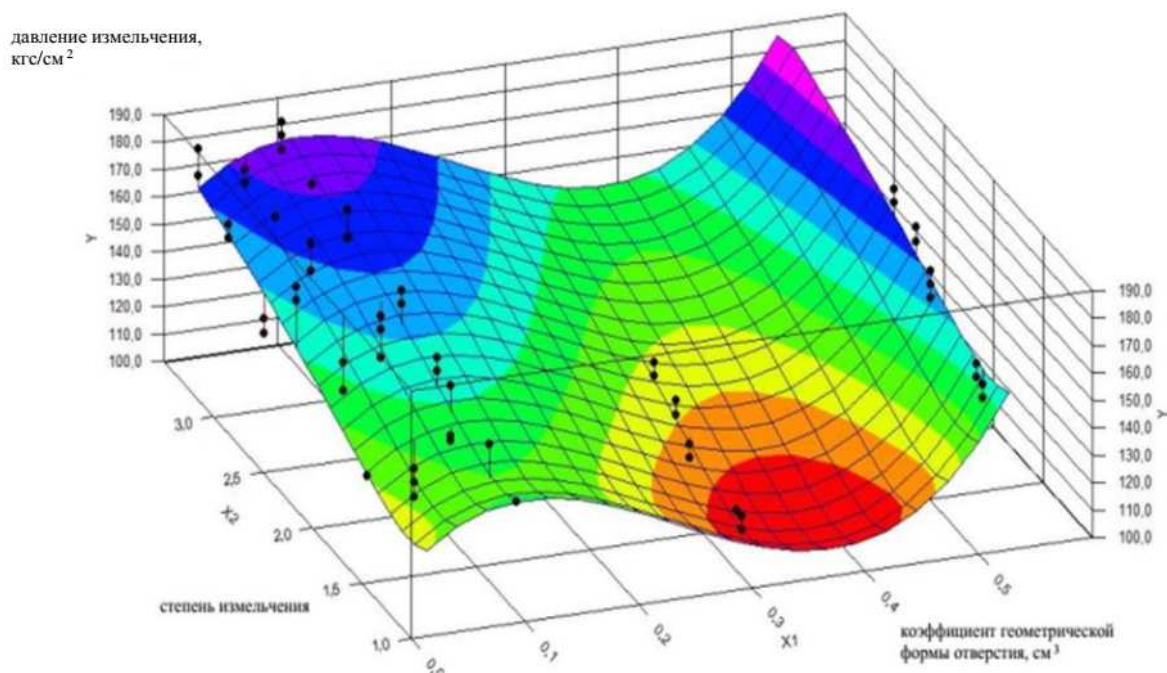


Рис. 2. Поверхность отклика факторного пространства для давления измельчения путассу мороженой
Fig. 2. The response surface of the factor space for the pressure of chopping blue whiting

На основании вышеизложенного следует, что матрица "песочные часы" с диаметром отверстий 7 мм является предпочтительной. Полученные результаты подтверждены экспериментально с трехкратным повторением. Давление измельчения на выбранной матрице составило от 105 до 125 кгс/см² (от 10,30 до 12,26 МПа) при длительности процесса от 77 до 120 с и степени измельчения от 1,36 до 2,03. С увеличением степени измельчения усилие продавливания увеличивается практически линейно.

По результатам ситового анализа построена гистограмма распределения частиц криофарша при измельчении на матрице "песочные часы" с диаметром отверстий 7 мм (рис. 3).

Анализ гистограммы показывает, что полученный фарш имеет достаточно однородную структуру: крупные фракции (от 4,5 до 7 мм) составляют 81,38 %, мелкие фракции (от 1 до 4 мм) – 18,62 % от общей массы криофарша.

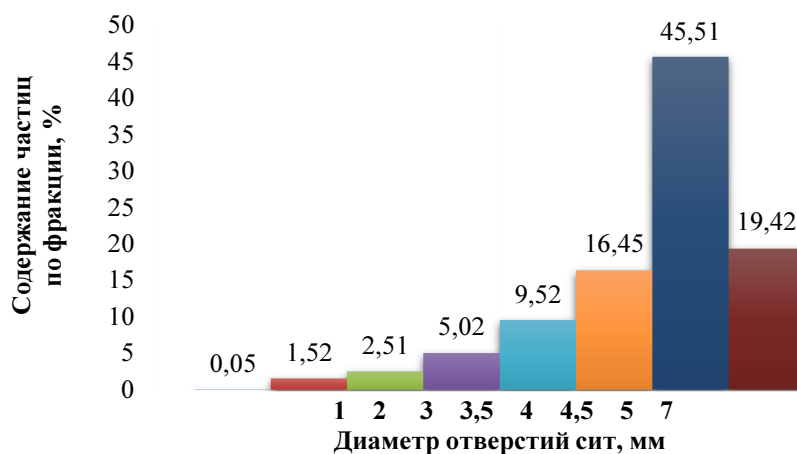


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц криофарша, полученного на матрице типа "песочные часы" с диаметром отверстий 7 мм

Fig. 3. Histogram of the distribution of cryopharms particles obtained on an hourglass-type matrix with the hole diameter equal to 7 mm

При проведении органолептической оценки криофарша подтверждено, что он имеет достаточно однородную структуру, сочную, рассыпчатую консистенцию. Размер отверстий фильеры, используемой для продавливания, принципиально не влияет на изменение органолептических свойств конечного продукта, что позволяет повышать производительность процесса измельчения, используя более крупные отверстия в фильере.

Заключение

В результате проведенного исследования определены оптимальные режимы измельчения малоиспользуемого мороженого сырья на примере путассу с применением криоэкструзии для создания ресурсосберегающей технологии производства рыбных кормов. В ходе проведения экспериментов доказана целесообразность использования матрицы "песочные часы" диаметром 7 мм.

При использовании указанной матрицы давление измельчения изменялось от 105 до 125 кгс/см² (от 10,30 до 12,26 МПа) при длительности процесса от 77 до 120 с и степени измельчения от 1,36 до 2,25. Таким образом, увеличение степени измельчения в 1,5 раза вызывает повышение давления измельчения в 1,19 раза.

Получено уравнение регрессии, описывающее влияние комплексного параметра – коэффициента геометрической формы отверстия, учитывающего диаметр и форму отверстия матрицы, и степени измельчения сырья, на давление измельчения.

Измельчительная матрица "песочные часы" диаметром отверстий 7 мм рекомендована к использованию при производстве кормовых фаршей из путассу мороженой, поскольку позволяет получить наименьшее давление измельчения, которое составляет 105 кгс/см² (10,3 МПа) при степени измельчения 1,36 и коэффициенте геометрической формы отверстия матрицы 0,32 см³, длительность процесса составляет в среднем 93 с (от 77 до 109 с). При производительности экструзионной установки 70 кг/ч энергозатраты на измельчение составят 0,023 кВт/кг. Фактические потери сырья в процессе подготовки блока к измельчению и непосредственно измельчения составляют от 1 до 2,5 %.

Таким образом, криоэкструзия может быть использована для разработки ресурсосберегающих технологий переработки малоценного рыбного сырья Северного бассейна с целью получения кормовых фаршей.

Библиографический список

1. Гаврилов Т. А. Повышение эффективности приготовления кормов для пушных зверей // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2015. № 4 (149). С. 77–79.
2. Гаврилов Т. А. Исследование эффективности работы оборудования для тонкого измельчения мясо-рыбных кормов // Научный журнал КубГАУ : политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 87 (03). URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/28.pdf>.

3. Гаврилов Т. А., Няникова А. В., Паталайнен Л. С., Широких А. К. Повышение эффективности звероводческого производства путем совершенствования методики составления рационов кормления // Научный журнал КубГАУ : политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 91(07). URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/07/pdf/52.pdf>.

4. Титова С. А., Голубева О. А., Куранова Л. К., Гроховский В. А. Получение кормового рыбного фарша методом криоэкструзии из замороженного рыбного сырья // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 4. С. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-11-17>.

5. Поршневым экструдер – измельчитель : пат. 163424 Рос. Федерация / Голубева О. А., Греков Е. О. № 2016103972/02 ; заяв. 08.02.2016 ; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.

6. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов. М. : Наука, 1970. 76 с.

7. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 279 с.

8. Балдин К. В., Башлыков В. Н., Рукосуев А. В. Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд. М. : Дашков и К, 2016. 472 с.

References

1. Gavrillov T. A. Povyshenie effektivnosti prigotovleniya kormov dlya pushnyh zverey [Increase in the efficiency of preparing fodder for fur animals] // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. N 4 (149). P. 77–79.

2. Gavrillov T. A. Issledovanie effektivnosti raboty oborudovaniya dlya tonkogo izmelcheniya myaso-rybnyh kormov [Research of the efficiency of the equipment for fine grinding meat and fish forages] // Nauchnyi zhurnal KubGAU : politematicheskiy setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. N 87 (03). URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/28.pdf>.

3. Gavrillov T. A., Nyanikova A. V., Patalaynen L. S., Shirokih A. K. Povyshenie effektivnosti zverovodcheskogo proizvodstva putem sovershenstvovaniya metodiki sostavleniya ratsionov kormleniya [Increase of the efficiency of fur production by improving the methods of compiling diets of feeding] // Nauchnyi zhurnal KubGAU : politematicheskiy setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. N 91(07). URL: <http://ej.kubagro.ru/2013/07/pdf/52.pdf>.

4. Titova S. A., Golubeva O. A., Kuranova L. K., Grohovskiy V. A. Poluchenie kormovogo rybnogo farsha metodom kriоекструзии из замороженного рыбного сырья [Production of fodder fish minced by cryoextrusion from frozen fish raw materials] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernyh tehnologiy. 2016. N 4. P. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-4-11-17>.

5. Porshnevoy ekstruder – izmelchitel [Piston extruder – shredder] : pat. 163424 Ros. Federatsiya / Golubeva O. A., Grekov E. O. N 2016103972/02 ; zayav. 08.02.2016 ; opubl. 20.07.2016, Byul. N 20.

6. Protodyakonov M. M., Teder R. I. Metodika ratsionalnogo planirovaniya eksperimentov [Methods of rational experiment planning]. M. : Nauka, 1970. 76 p.

7. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyh usloviy [Planning of an experiment in the search for optimal conditions]. M. : Nauka, 1976. 279 p.

8. Balдин K. V., Bashlykov V. N., Rukosuev A. V. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of probability and mathematical statistics]. 2-e izd. M. : Dashkov i K, 2016. 472 p.

Сведения об авторах

Голубева Ольга Алексеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: golubevaoa@mstu.edu.ru

Golubeva O. A. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: golubevaoa@mstu.edu.ru

Титова Светлана Аскольдовна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, аспирант; e-mail: sobmolotkova@yandex.ru

Titova S. A. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Ph. D. Student; e-mail: sobmolotkova@yandex.ru

Греков Евгений Олегович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, аспирант; e-mail: zhenya-gr@mail.ru

Grekov E. O. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Ph. D. Student; e-mail: zhenya-gr@mail.ru

O. A. Golubeva, S. A. Titova, E. O. Grekov

Cryoextrusion in technology of fish feed production

The process of grinding the frozen fish raw materials using the useful model of a piston-type extruder with cooled working bodies has been investigated. A new feed product – cryo minced fish feed – has been obtained. The possibility of replacing the standard manufacturing operations of the defrosting and subsequent grinding of raw materials by one operation of cryoextrusion has been justified. Planning of the experimental part has been performed by the method of combination squares. During the experiment, the volume of samples, their specific surface area, mass, initial and final temperatures of the working chamber, the temperature of raw materials, the temperature of the resulting minced meat, the pressure force, the time of the experiment, the mass of waste have been determined. The rational shape and size of the die holes for the extrusion of raw materials have been determined. It has been found that when using a nozzle with the "hourglass" shape of holes with a diameter of 4.5 mm and 7 mm, the duration of the extrusion process for the studied fish species is 47 to 130 s. The finished product – cryo minced fish feed – has a fairly homogeneous structure and juicy texture, the temperature in the thickness of the product is equal to the temperature of the raw material before its processing (-18°C). The granulometric composition of the cryo minced fish feed using the sieve analysis has been determined. The statistical processing of the results of experiments to determine the pressure of frozen fish raw material by the method of nonlinear regression has been carried out using the program DataFit version 9.1.32. The regression equation describing the influence of the complex parameter – the coefficient of the hole shape, taking into account the diameter and shape of the matrix hole, and the degree of grinding of raw materials on the force of extrusion has been obtained. The expediency of using the matrix "hourglass" which allows to obtain the lowest pressure force for bony fish of the North Sea basin has been proved.

Key words: grinding, cryoextrusion, fish, fish minced feed, cryo minced fish feed.