

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья
УДК 66-963
DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-71-11
EDN: LEVINI

Сравнительный анализ скорости отжима бульона из рыбного влажного остатка в сепарирующей камере шнекового пресса при производстве кормовой рыбной муки

Татьяна Ивановна Ткаченко

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
Владивосток, Россия
tkachenko.ti@dgtru.ru, ORCID: 0000-0002-9210-2172

Аннотация. Основными технологическими процессами переработки рыбных отходов на кормовую муку являются процессы измельчения сырья, нагревания (разваривания), прессования и сушки. При этом процесс прессования имеет ряд проблем и характерных особенностей, которые происходят с материалом при его перемещении от приема к выходу: прилипание спрессованного сырья к шнековому валу, изменение соотношения массы и объема спрессованного материала, изменение содержания жира и влаги в сырье. В статье дан сравнительный анализ скорости отжима бульона из рыбного влажного остатка в сепарирующей камере шнекового пресса, входящего в состав рыбомучной установки (РМУ), а также скорости в сепарирующей камере модернизированного шнекового пресса. Скорость отжима рыбного бульона в модернизированном шнековом прессе больше за счет разделения сепарирующей камеры на 4 зоны, за счет чего происходит более быстрое и качественное разделение подпрессового бульона и твердой части рыбного сырья.

Ключевые слова: кормовая рыбная мука, рыбомучные установки, шнековый пресс, скорость отжима

Для цитирования: Ткаченко Т. И. Сравнительный анализ скорости отжима бульона из рыбного влажного остатка в сепарирующей камере шнекового пресса при производстве кормовой рыбной муки // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 71, № 1. С. 105–114.

FOOD SYSTEMS

Original article

Comparative analysis of the rate of extraction of broth from fish wet residue in the separation chamber of a screw press in the production of feed fish meal

Tatyana I. Tkachenko

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
tkachenko.ti@dgtru.ru, ORCID: 0000-0002-9210-2172

Abstract. The main technological processes of processing fish waste into feed flour are the processes of grinding raw materials, heating (boiling), pressing and drying. At the same time, the pressing process has a number of problems and characteristic features that occur with the material when it is moved from the intake to the outlet: adhesion of the compressed raw materials to the screw shaft, a change in the ratio of mass and volume of the pressed material, a change in the fat and moisture content in the raw materials. The article provides a comparative analysis of the rate of extraction of broth from fish wet residue in the separation chamber of the screw press, which is part of the fishmeal plant, as well as the speed in the separation chamber of the modernized screw press. The speed of squeezing fish broth in a modernized screw press is greater due to the division of the separating chamber into 4 zones, due to which the broth and the solid part of the fish raw material are separated more quickly.

Keywords: screw, fish meal, screw washers, feed meal, screw press, spin speed

For citation: Tkachenko T. I. Comparative analysis of the rate of extraction of broth from fish wet residue in the separation chamber of a screw press in the production of feed fish meal. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2025; 71(1): 105–114. (In Russ.).

Введение

Кормовая рыбная мука является питательным высокобелковым компонентом кормов, используемым не только в отраслях свиноводства и птицеводства, но также и в производстве аквакультуры. При этом ГОСТ 2116–2000 «Мука кормовая из рыбы, морских млекопитающих, ракообразных и беспозвоночных» [4] допускает содержание влаги до 12 % и липидов до 14 %, что «при хранении и экструдировании снижает её качество и делает менее безопасной ввиду того, что она значительно подвержена процессам окисления. Для того, чтобы увеличить долю качественной рыбной муки отечественного производства, необходимо решить задачу стабилизации качества выпускаемой продукции. Это в свою очередь позволит: получать продукцию со стабильно низкими показателями окисления липидов вне зависимости от сырья (тощее или жирное), направленного в переработку; получать высокобелковую продукцию (более 70 %) стабильного качества; снизить содержание золы в конечном продукте» [1].

Производство рыбной муки складывается из многих операций, цель которых – получение готового продукта, соответствующего требованиям ГОСТа. Основными технологическими процессами переработки рыбных отходов на кормовую муку являются процессы измельчения сырья, нагревания (разваривания), прессования и сушки. При этом процесс прессования имеет ряд проблем и характерных особенностей, которые происходят с материалом при его перемещении от приема к выходу: прилипание спрессованного сырья к шнековому валу, изменение соотношения массы и объема спрессованного материала, изменение содержания жира и влаги в сырье.

Как известно, «на эффективность процесса прессования влияют физические и механические свойства структуры сжимаемого материала и условия процесса прессования» [3, 6, 8, 10], основные из которых: влажность, температура, размер каналов сепаратора для выхода жира, давление в камере, размеры фильеры поперечного сечения выхода спрессованного рыбного сырья (кека), количество оборотов шнека.

Целью данной исследовательской работы является сравнительный анализ расчетной скорости отжима бульона из рыбного влажного остатка в сепарирующей камере шнекового пресса, входящего в состав РМУ, и расчетной скорости в сепарирующей камере модернизированного шнекового пресса. Этот тип оборудования характеризуется воздействием высокого давления на сырье с разрушением его структуры и выделением из него твердой фракции – кек и жидкой – бульон (содержащий в себе клеевую воду, жир, воду).

Объекты и методы исследований

Объект исследования – модернизированный шнековый пресс, изготовленный с использованием «технологии шайбочных шнеков». За счет конструктивных особенностей в модернизированном шнековом прессе была изменена геометрия шнека и сепарирующей камеры, скорость вращения шнека и геометрические параметры фильеры [12]. Шнековый пресс разделен на 4 зоны, в каждой из которых сырье проходит определенный этап преобразования (рис. 1):

– зона № 1 (зона загрузки) – рыбные отходы в виде хребтов, кожи, голов, плавников, внутренностей поступают через впускной приемный лоток, захватываются витками шнека и перемещаются вглубь корпуса, слегка уплотняясь. В зоне загрузки рыбные отходы витками шнека перемещаются по каналу экструдера, слегка уплотняясь, но отделения сырья от свободной жидкости в этой зоне не происходит;

– зона № 2 (напорная зона или зона сжатия) – рыбные отходы уплотняются, и создается давление за счет витков шнека и контрвинтового сепаратора, создавая обратное давление на витках шнека, необходимое для извлечения части жира и воды из мышечных тканей;

– зона № 3 (зона сепарирования) – в этой зоне происходит разделение бульона и твердой части рыбного сырья, давление продолжает увеличиваться, происходит дальнейший отжим мышечных тканей и остатков жира;

– зона № 4 (зона окончательного разделения) – давление достигает максимального значения, при котором отделение бульона прекращается ввиду того, что каналы для выхода бульона заполняются и извлечение жира и влаги прекращается, а кек выходит через фильеру пресса.

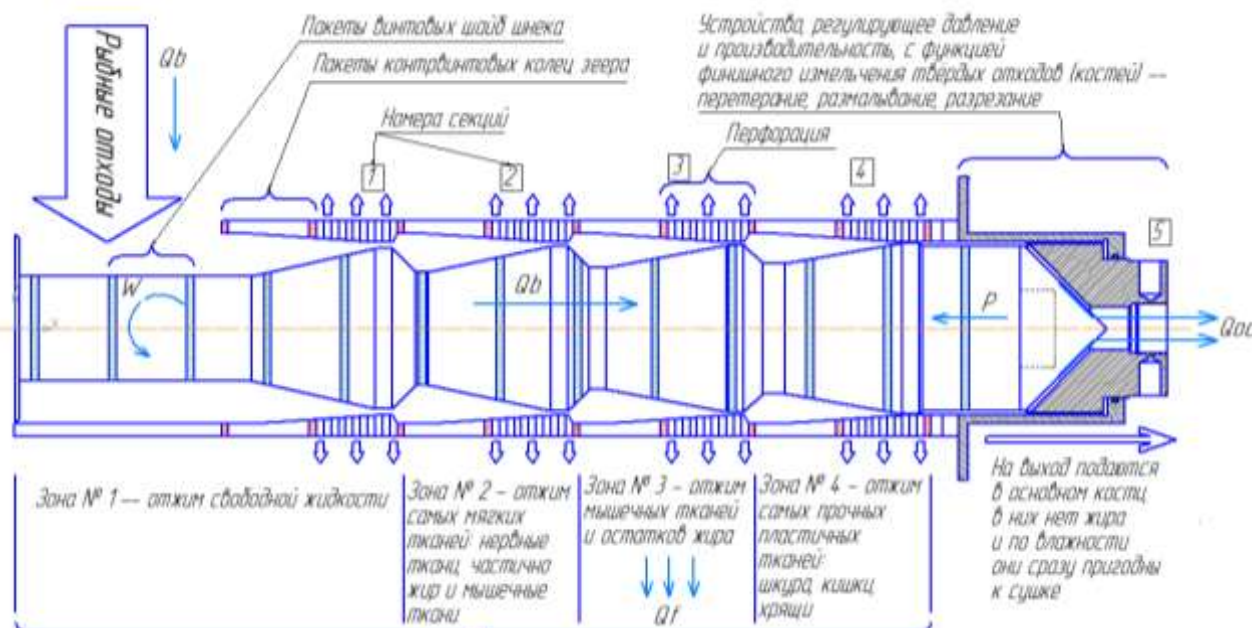


Рис. 1. Принципиальная схема рабочего узла модернизированного шнекового пресса: Q_b – объёмная емкость рыбных отходов, кг/ч; Q_f – объём выходящего жира, кг/ч; Q_{oc} – производительность пресса, кг/ч; P – сила противодействия в прессе, Н; ω – угловая скорость вращения, мин^{-1} .

Составлено автором

Fig. 1. Schematic diagram of the working unit of the upgraded screw press:

Q_b – the volume capacity of fish waste, kg/h; Q_f – the volume of fat coming out, kg/h; Q_{oc} – the press performance, kg/h; P – the power of opposition in the press, N; ω – angular velocity of rotation, min^{-1} . Compiled by the author

Результаты и их обсуждение

Процесс отжима бульона через мышечные ткани рыбного сырья «можно рассматривать на основе закона проницаемости жидкостей и газов в твердой среде – закона Дарси» [6, 10].

Скорость отжима бульона описывается следующим уравнением (1):

$$v = -\frac{k}{\eta_f} \cdot \text{grad}D, \quad (1)$$

где k – коэффициент проницаемости рыбных отходов, D (единица Дарси «Darcy») $1D = 10^{-12} \text{ м}^2$; η_f – вязкость рыбного жира, Па·с.

Структура мяса рыб является гидрофобной, следовательно, сквозное проникновение жидкости через эти ткани возможно только при полном их разрушении. Но коэффициент проницаемости зависит не только от проникновения жидкости через пористые структуры, но ещё и от скорости фильтрации через твердые среды [2, 5, 7, 11].

Для вычисления коэффициента необходимо знать условия протекания процесса: рабочее давление Δp , Па, в зоне № III (рис. 2) и время продолжительности процесса t , с. Согласно экспериментальным данным лабораторного образца, коэффициент проницаемости составляет $k = 10^{-3} \text{ м}^2$.

Вязкость рыбного жира $\eta_f = 35 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ (среднее значение при температуре $+40 \text{ }^\circ\text{C}$).

$$\text{grad}P = \frac{\Delta p}{l}, \quad (2)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – давление в сепараторе шнекового пресса, при котором бульон начинает отделяться от мышечной ткани, Па.

Давление в каналах экспериментального образца сепаратора $\Delta p = 40 \text{ мПа} = 40\,000 \text{ Па}$; l – длина сепарирующей зоны (0,5 м); давление p_1 , соответствующее началу отделения бульона.

В данном случае «процесс уплотнения и прессования материала можно принять термическим постоянным, и с учетом принятых допущений уравнение Дарси запишется следующим образом» [9]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

$$v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{p} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{k}{\eta_f \cdot p} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где v – скорость движения прессованной массы вдоль оси $0z$, м/с; p – давление в сепараторе, Па.

«Давление вдоль осей $0x$ и $0y$ равно нулю (4), скорость потока материала в шнековом прессе определяется вдоль осей x и y , т.е. $v = v(x, y)$. Согласно уравнению (3), давление создается только вдоль оси x , т.е. $p = p(x)$.

Тогда система уравнений (3–4) примет следующий вид» [6, 10]:

$$\frac{k}{\eta_f} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right). \quad (6)$$

«Рассматривая уравнение (4), можно заключить, что обе части уравнения по отдельности являются постоянными величинами, так как $\frac{dp}{dz}$ является функцией z и $\eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x^2} + \frac{\partial v}{\partial y^2} \right)$ является функцией x и y . Поэтому функцию z можно обозначить следующим образом» [6, 10]:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = const = -\frac{p_1 - p_2}{l} = -\frac{\Delta p}{l}, \quad (7)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – давление в камере шнекового пресса, при котором бульон начинает отделяться от мышечной ткани, Па.

«Уравнение (6) в oxy плоскости можно представить в виде линейной частной производной второго порядка:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = -\frac{\Delta p}{l}. \quad (8)$$

Схема канала сепаратора для выпуска бульона в камере экстракции шнекового пресса показана на рис. 2. Радиусы r_1 и R_1 остаются постоянными» [6, 10].

«Граничные условия для уравнения (8) – на стенках отверстия скорость перемещения бульона равна

$$Vc = 0, 0 \leq z \leq l, \quad (9)$$

где c – контур сечения, перпендикулярного оси Oz , которая является направляющей для цилиндрической поверхности, ограничивающей выход отверстия продукции» [6, 10].

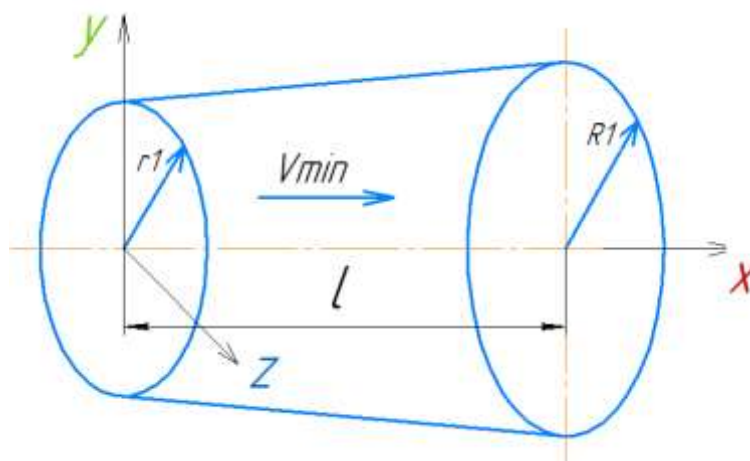


Рис. 2. Схема одного отверстия для выхода бульона из экстрагирующей камеры шнекового пресса [6, 10]. Составлено автором

Fig. 2. Diagram of one hole for the broth outlet from the extraction chamber of the screw press. Compiled by the author

Если «рассмотреть частный случай контура c , представляющего собой окружность с изменяющимися параметрами вдоль оси y , то контур отверстия для выхода бульона имеет два участка с разными диаметрами: $R_2 r_2$, в плоскости Oxy , в основе которой лежит окружность. Диаметры известны $R_2 = 2$ мм, а $r_2 = 1$ мм (размеры сняты с действующего пресса).

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (10)$$

Принимая во внимание уравнение (6) и граничные условия, представленные в уравнении (9), скорость перемещения бульона во второй зоне с постоянным диаметром отверстия R_2 и длиной секции l_1 будет иметь вид» [6, 10]

$$v_1 = A \cdot (R_2^2 - l_1^2 - r_2^2). \quad (11)$$

Чтобы выразить постоянную A , необходимо уравнение (11) подставить в (8), после чего получается (12–14)» [6, 10]:

$$v_{xx}'' + v_{yy}'' = \frac{\Delta p}{\eta_f \cdot l} \cdot k. \quad (12)$$

$$-2A - 2A = \frac{\Delta p}{\eta_f \cdot l} \cdot k. \quad (13)$$

$$A = \frac{\Delta p}{-4\eta_f \cdot l} \cdot k. \quad (14)$$

Затем определяем скорость перемещения бульона через отверстия канала сепаратора шнекового пресса

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta_f l} \cdot (l_1^2 - R_2^2 + r_2^2) \cdot k. \quad (15)$$

Коэффициент проницаемости k и коэффициент отжима K_f связаны соотношением [9]:

$$\frac{k}{\eta_f} = \frac{K_f}{\gamma}, \quad (16)$$

где γ – удельный вес, кгс/м³.

$$\frac{10^{-3}}{35 \cdot 10^3} = \frac{K_f}{11240}.$$

$$K_f = \frac{11242 \cdot 10^{-3}}{35 \cdot 10^3} = 3,21 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Удельный вес, равный γ , определяется по формуле

$$\gamma = \Delta \rho_{\text{рыбы}} \cdot g. \quad (17)$$

$$\gamma = 1147 \cdot 9,8 = 11240 \text{ кгс/м}^3,$$

где ρ – плотность мышечной ткани рыбного сырья составляет от 930–1100 кг/м³, плотность рыбной кожи 1298 кг/м³, хребтовой кости 1115 кг/м³ (средняя плотность составляет $\Delta \rho_{\text{рыбы}} = 1147 \text{ кг/м}^3$); g – ускорение силы тяжести, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

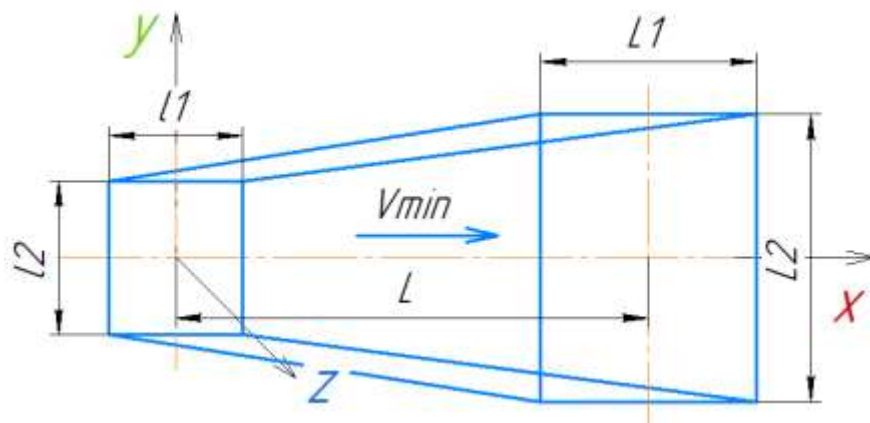


Рис. 3. Схема одного отверстия для выхода бульона из экстрагирующей камеры шнекового пресса [6, 10]. Составлено автором

Fig. 3. Diagram of one hole for the broth outlet from the extraction chamber of the screw press. Compiled by the author

Таким образом, скорость отжима бульона через один канал камеры сепаратора шнекового пресса

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta_f \cdot \Delta\rho_{\text{рыбы}} \cdot g \cdot l} \cdot (l_1^2 - R_2^2 + r_2^2) \cdot K_f. \quad (18)$$

$$v = \frac{36000}{4 \cdot 35000 \cdot 1147 \cdot 9.8 \cdot 0,4} \cdot (0,02^2 - 0,002^2 + 0,001^2) \cdot 3,21 \cdot 10^{-4} = 7,29 \cdot 10^{-12} \text{ м/с.}$$

Значение скорости отжима рыбного бульона низкое, так как это скорость, рассчитанная только для одного канала. Следующим этапом является определение скорости отжима сепаратора с конфигурацией из винтовых колец. Процесс отжима бульона через мышечные ткани рыбных отходов рассматривается на основе закона проницаемости жидкостей и газов в твердой среде – закона Дарси. Несмотря на аналогичность расчетов, необходимо учитывать конусную форму каналов сепаратора.

«На схеме канала сепаратора для выхода бульона в камере экстракции шнекового пресса, представленной на рис. 3, радиусы r_1 и R_1 также остаются постоянными.

На стенках отверстия скорость перемещения бульона будет определяться по уравнению (19):

$$Vlc = 0, 0 \leq z \leq l, \quad (19)$$

где C – уравнение контура сечения, перпендикулярного оси Oz , которая является направляющей для цилиндрической поверхности, ограничивающая выход отверстия продукции» [6, 10].

Контур отверстия для выхода бульона имеет два участка с разными периметрами четырехугольника P_1 и P_2 : $P_1 = L_2 + L_1 + L_2 + L_1$, $P_2 = l_2 + l_2 + l_1 + l_1$ в плоскости Oxy , в периметр четырехугольника.

Длины известны $L_2 = 2$ мм, $L_1 = 1,5$ мм, $l_2 = 1$ мм, $l_1 = 0,8$ мм (размеры сняты с натурального пресса).

$$x^2 + y^2 = P_1^2, \quad (20)$$

«Принимая во внимание уравнение (20) и граничные условия, представленные в уравнении (19), скорость перемещения бульона во второй зоне с постоянными периметрами отверстия P_2 , P_1 и длиной секции L будет иметь вид, длина секции $L = 23$ мм (21):

$$v_1 = A \cdot (P_2^2 - L^2 - P_1^2). \quad (21)$$

Затем, чтобы выразить постоянную А, подставив уравнение (20) в (15), можно получить» [6, 10]:

$$v''_{xx} + v''_{yy} = \frac{\Delta p}{\eta_f \cdot l} \cdot k. \quad (22)$$

$$-2A - 2A = \frac{\Delta p}{\eta_f \cdot l} \cdot k. \quad (23)$$

$$A = \frac{\Delta p}{-4\eta_f \cdot l} \cdot k. \quad (24)$$

Скорость перемещения бульона через отверстия канала сепаратора шнекового пресса определяется по формуле

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta_f l} \cdot (L^2 - P_2^2 + P_1^2) \cdot k. \quad (25)$$

Коэффициент проницаемости k и коэффициент отжима K_f связаны соотношением

$$\frac{k}{\eta_f} = \frac{K_f}{\gamma}, \quad (26)$$

где γ – удельный вес, кгс/м³

$$\frac{10^{-3}}{35 \cdot 10^3} = \frac{K_f}{11240}.$$

$$K_f = \frac{11240 \cdot 10^{-3}}{35 \cdot 10^3} = 3,21 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Удельный вес, равный γ , определяется по формуле

$$\gamma = \Delta \rho_{\text{рыбы}} \cdot g. \quad (27)$$

$$\gamma = 1147 \cdot 9,8 = 11240 \text{ кгс/м}^3,$$

где $\Delta \rho_{\text{рыбы}} = 1147 \text{ кг/м}^3$ – средняя плотность рыбы; g – ускорение силы тяжести, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Таким образом, скорость отжима бульона через один канал камеры сепаратора шнекового пресса

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta_f \cdot \Delta \rho_{\text{рыбы}} \cdot g \cdot l} \cdot (L^2 - P_2^2 + P_1^2) \cdot K_f. \quad (28)$$

$$v = \frac{36000}{4 \cdot 35000 \cdot 1147 \cdot 9,8 \cdot 0,4} \cdot \left(\frac{23^2}{1000} - \frac{7^2}{10000} + \frac{36^2}{10000} \right) \cdot 3,21 \cdot 10^{-4} = 9,94 \cdot 10^{-12} \text{ м/с}.$$

Заключение

Ввиду того, что в модернизированном шнековом прессе применяется шнек и зерер, это положительно влияет на рабочие характеристики машины: давление в стволе пресса на разных участках; разница температур входного и выходного сырья; процент мясокостного остатка.

Значение скорости отжима рыбного бульона протекания в сепарирующей камере модернизированного шнекового пресса также не высокое, так как определено только в одном канале. Но при этом полученное значение скорости отжима больше, чем в сепарирующей камере шнекового пресса, входящего в состав РМУ. Это объясняется разделением сепарирующей камеры модернизированного шнекового пресса на 4 зоны, за счет чего происходит более быстрое разделение бульона и твердой части рыбного сырья. Кроме того, за счет витков шнека и контрвинтового сепаратора в камере создается дополнительное давление, необходимое для более полного извлечения жира из мышечных тканей.

Список источников

1. Артемов, Р. В. О путях повышения качества кормовой рыбной муки для нужд аквакультуры в Российской Федерации / Артемов Р. В., Бурлаченко И. В., Бочкарев А. И., Баскакова Ю. А. // Тр. ВНИРО. 2019. Т. 176. С. 152–159.
2. Barnes E.C., Wilson D.I., Johns M.L. Velocity profiling inside a ram extruder using magnetic resonance (MR) techniques // Chem. Eng. Sci. 2006. Vol. 61, N. 5. P. 1357–1367.
3. Виноградов С. П., Крючков И. В. Исследование факторов процесса отжима сока в шнековых прессах // Изв. вузов. Пищевая технология. 1990. № 6(199). С 58–59.
4. ГОСТ 2116-2000. Мука кормовая из рыбы, морских млекопитающих, ракообразных и беспозвоночных. Технические условия. М. : ФГУП «Стандартинформ», 2003. 15 с.
5. Гукасян А. В., Косачев В. С., Кошевой Е. П. Математическая модель двумерного слоистого напорного течения в канале шнека // Изв. вузов. Пищевая технология. 2018. № 2–3. С. 75–77.
6. Ермолаева, Д. Р. Разработка и обоснование конструктивных и режимных параметров шнекового пресса для отжима масла из семян подсолнечника : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ермолаева Джамия Рашидовна. Кинель, 2018. 20 с.
7. Карташов Л. П., Полищук В. Ю., Зубкова Т. М. Моделирование процесса экструдирования в одношнековых прессующих механизмах // Техника в сельском хозяйстве. 1998. № 6. С. 12–14.
8. Корякина М. А. Повышение эффективности работы одношнекового экструдера на основе структурнопараметрического синтеза для прессования семян рапса : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2011. 19 с.
9. Курочкин А. А., Зимняков В. М. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов перерабатывающих производств : учебник. М. : Колосс, 2006. 320 с.
10. Мальцева, Т. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров шнекового пресса для переработки биомассы насекомых в биологически ценные добавки к кормам : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.20.01 / Мальцева Татьяна Александровна. Ростов н/Д, 2021. 20 с.
11. Петров И. А., Славинов Е. В. Моделирование шнек-прессового отжима как совокупности процессов течения вязкой несжимаемой смеси и фильтрации жидкости сквозь пористую среду // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 3. С. 277–285.
12. Ткаченко Т. И., Гришков М. А., Яценко М. Р. О проблемах переработки рыбных отходов при производстве рыбной кормовой муки и возможные пути их решения // Научные труды Дальрыбвтуза. 2023. Т. 65, № 3. С. 34–40.

Информация об авторе

Т. И. Ткаченко – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», SPIN-код: 5932-9472, AuthorID: 214372.

Information about the author

T. I. Tkachenko – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, SPIN-code: 5932-9472, AuthorID: 214372.

Статья поступила в редакцию 24.01.2025; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 17.03.2025.

The article was submitted 24.01.2025; approved after reviewing 21.02.2025; accepted for publication 17.03.2025.