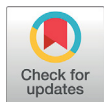


**ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ /
TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.393-413>EDN: <https://elibrary.ru/ojtypk>

УДК 636.085.5

*Оригинальная статья / Original article***Рациональные значения параметров процесса
влажного гранулирования корма для рыб
в корзинном грануляторе****С. В. Брагинец^{1,2}, В. И. Пахомов^{1,2}, О. Н. Бахчевников¹✉,
А. С. Алферов¹, К. А. Деев¹**¹ *Аграрный научный центр «Донской»,**г. Зерноград, Российская Федерация*² *Донской государственный технический университет,**г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*✉ oleg-b@list.ru*Аннотация*

Введение. Для влажного гранулирования растительного сырья и получения гранул корма малого диаметра (0,5–2 мм) для рыб и их мальков может быть использован корзинный гранулятор, не используемый ранее для приготовления кормов в аквакультуре. Процесс работы корзинного гранулятора недостаточно изучен, а его рациональные параметры еще не получили должного научного обоснования.

Цель исследования. Повышение водостойкости гранул корма для рыб путем определения рациональных параметров процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе.

Материалы и методы. В корзинном грануляторе гранулировали рассыпной комбикорм для мальков карпа, приготовленный из растительного сырья, получая гранулы диаметром 2 мм. Критерием оптимизации процесса влажного гранулирования служило время полного распада гранул корма в воде. В ходе опытов варьировали значения четырех факторов: влажность, температура сырья, модуль помола сырья, частота вращения рабочих органов гранулятора. Обработав результаты экспериментов, получили уравнение регрессии и построили поверхности отклика и их двумерные сечения, по которым выполнили анализ.

Результаты исследования. Установили, что увеличение значений всех факторов до определенного предела повышает устойчивость гранул корма к действию воды. Влияние температуры сырья на время распада гранул корма менее существенно, чем трех остальных факторов. Оптимальная величина времени распада гранул корма в воде, равная 92–96 мин, достигается при следующих рациональных диапазонах факторов процесса влажного гранулирования: влажность сырья 40...42 %; модуль помола сырья 1,4...1,8 мм (средний помол); частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора 47...51 мин⁻¹; температура сырья 42...56 °С.

Обсуждение и заключение. Установлены рациональные значения факторов процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, позволяющие производить гранулированный корм для рыб и их мальков, соответствующий

© Брагинец С. В., Пахомов В. И., Бахчевников О. Н., Алферов А. С., Деев К. А., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

зоотехническим требованиям по водостойкости. Установленные для процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе зависимости изменения водостойкости гранул от влажности и температуры сырья, модуля его помола и частоты вращения рабочих органов соответствуют аналогичным зависимостям, ранее установленным для процесса сухого гранулирования в пресс-грануляторах с вертикальной кольцевой матрицей.

Ключевые слова: корм для рыб, влажное гранулирование, гранулы, растительное сырье, влажное сырье, корзинный гранулятор, время распада гранул

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Брагинец С.В., Пахомов В.И., Бахчевников О.Н., Алферов А.С., Деев К.А. Рациональные значения параметров процесса влажного гранулирования корма для рыб в корзинном грануляторе. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(3):393–413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.393-413>

Rational Values of Fish Feed Wet Pelleting Process in the Basket Pelleter

S. V. Braginet^{a,b}, V. I. Pakhomov^{a,b}, O. N. Bakhchevnikov^a ✉, A. S. Alferov^a, K. A. Deev^a

^a Agricultural Research Center “Donskoy”, Zernograd, Russian Federation

^b Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ oleg-b@list.ru

Abstract

Introduction. The basket pelleter can be used for wet pelleting of plant raw material and producing of small diameter (0.5–2 mm) feed pellets for fish and fish fry. Basket pelleters have not previously been used in aquaculture for preparing feed. The operation process of basket pelleters has not been sufficiently studied and its rational parameters have not the sufficient scientific basis.

Aim of the Study. The study is aimed at increasing of water resistance of fish feed pellets by determining the rational parameters of the process of wet pelleting of plant raw materials in the basket pelleter.

Materials and Methods. In the basket pelleter, there was pelleted crumbled feed from plant raw material for carp fry. The diameter of pellets was 2 mm. The time of complete disintegration of the feed pellets in water was a criterion for optimizing the wet pelleting process. The values of four parameters were varied during the experiments: raw material moisture, raw material temperature, raw material fineness modulus, and rotation speed of the pelleter movable operating devices. After processing the experimental results, there was obtained the regression equation and there were drawn response surfaces and their two-dimensional sections. The analysis of response surfaces was performed.

Results. It has been found that increasing in the values of all factors up to a definite limit increases the water resistance of feed pellets. The effect of raw material temperature on the disintegration time of pellets is less significant than the other three parameters. The optimum value of the disintegration time of pellets in water, equal to 92–96 min, is achieved at the rational ranges of parameters of feed wet pelleting process: raw material moisture 40...42%; fineness modulus of raw material 1.4...1.8 mm (middle grinding); rotation frequency of movable operating elements of basket pelleter 47...51 min⁻¹; raw material temperature 42...56°C.

Discussion and Conclusions. There have been found rational parameters of the process of wet pelleting of plant raw materials in a basket pelleter that make it possible to produce pelleted feed for fish and fish fry meeting zootechnical requirements for water resistance.

For the process of wet pelleting in the basket pelleter, there have been found the dependences of changing water resistance of pellets on raw material moisture and temperature, and its grinding modulus and rotation speed of movable operating elements. They correspond to similar dependences, which were previously found for the process of dry pelleting in pellet-presses with a vertical ring die.

Keywords: fish feed, wet pelleting, pellets, plant raw material, wet raw material, basket pelleter, pellet disintegration time

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Braginetz S.V., Pakhomov V.I., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S., Deev K.A. Rational Values of Fish Feed Wet Pelleting Process in the Basket Pelleter. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(3):393–413. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202503.393-413>

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации в настоящее время существует потребность в увеличении производства гранулированных кормов для прудовых рыб семейства карповых и их мальков¹. Основным сырьем для производства этих кормов служат зерно пшеницы и ячменя, шроты и другие виды растительного сырья [1; 2]. Для производства гранулированных комбикормов для пресноводных рыб подходит влажное гранулирование, обеспечивающее лучшее связывание частиц сырья и получение более прочных и водостойких гранул [3]. Гранулы корма для рыб должны длительное время не распадаться в воде [4], чего можно добиться только в результате влажного гранулирования [5]. Связывание частиц сырья в гранулах при сухом гранулировании можно улучшить с помощью добавления связующих веществ, но это усложняет и удорожает процесс производства кормов.

На комбикормовых заводах для приготовления комбикормов способами сухого и влажного гранулирования применяют одно и то же оборудование – пресс-гранулятор с вертикальной кольцевой матрицей [6; 7]. Но его недостатком является сложность получения гранул малого диаметра (менее 2 мм) с приемлемой энергоемкостью, вследствие чего отечественная промышленность почти не производит гранулированные комбикорма для мальков пресноводных рыб диаметром 0,5–2 мм [8], хотя в них имеется значительная потребность.

Для влажного гранулирования растительного сырья влажностью 25...40 % и производства гранул корма небольшого диаметра (0,5...2 мм) для мальков рыб может быть использовано сравнительно новое техническое средство – корзинный гранулятор, называемый также корзинным экструдером (*basket granulator or basket extruder*) [9; 10]. Особенность его конструкции состоит в том, что в неподвижной цилиндрической перфорированной корзине, являющейся аналогом вертикальной кольцевой матрицы, по принципу «вал в валу» расположены рассекатели (ножи), а под ними – экструзионные лопасти, вращающиеся в противоположном направлении [11]. Рассекатели измельчают и перемешивают влажное сырье, а экструзионные лопасти уплотняют его и продавливают через фильеры цилиндрической корзины, в результате чего формируются гранулы.

¹ Анализ рынка продукции аквакультуры и кормов // Комбикорма. 2024. № 2. С. 32–33. URL: <https://clck.ru/3NegEy> (дата обращения: 21.09.2024).

Грануляторы корзинного типа получают все большее распространение в фармацевтической промышленности [12; 13], но для приготовления кормов в аквакультуре их ранее не применяли. При этом процесс их работы еще недостаточно изучен, а его рациональные параметры еще не получили должного научного обоснования. Можно предположить, что функциональные зависимости между различными параметрами процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе и водостойкостью гранул должны быть аналогичны ранее установленным закономерностям гранулирования в пресс-грануляторе с кольцевой матрицей, но это необходимо подтвердить экспериментально.

Вышеизложенное обусловило необходимость выполнения экспериментальных исследований процесса влажного гранулирования растительного сырья, в том числе зернового, в корзинном грануляторе.

Целью исследования стало повышение водостойкости гранул корма для рыб путем определения рациональных параметров процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Имеется небольшое количество научных публикаций, посвященных исследованию процесса гранулирования влажных материалов в корзинном грануляторе (экструдере), что можно объяснить малой распространенностью этой машины.

Корзинный гранулятор (экструдер) был создан в конце 80-х – начале 90-х гг. XX в. Вначале он использовался как лабораторное оборудование в фармацевтической промышленности. К тому же времени относятся первые научные исследования по этой тематике.

К. Верваерт и другие [9] установили, что измерение мощности, потребляемой электродвигателем корзинного экструдера, является подходящим методом для мониторинга процесса экструзии (гранулирования) влажного сырья. Проведенное им сравнение качества гранул, полученных после экструзии с использованием корзин (матриц) с различным соотношением длины и радиуса фильера L/R , показало, что корзины с более высоким отношением L/R обеспечивают лучшее качество гранул.

Л. Баерт [14] сравнил два метода исследования процесса гранулирования влажного сырья в корзинном грануляторе: измерение давления гранулирования в фильерах матрицы и определение потребляемой мощности электродвигателя гранулятора. Он пришел к выводу, что их результаты идентичны, и обе системы одинаково полезны для мониторинга и изучения процесса экструзии в корзинном грануляторе (экструдере). Но измерение потребляемой мощности является более простым и менее дорогостоящим способом контроля и изучения процесса гранулирования.

После этого последовал длительный перерыв в изучении процессов в корзинном грануляторе. С 2015 г. корзинные экструдеры начали активно разрабатывать и производить в Китае для фармацевтической промышленности. Это вызвало новый интерес к их изучению.

М. Чжан [15] исследовал процесс гранулирования микроцеллюлозы влажностью 45 % в корзинном экструдере с диаметром фильера матрицы 1 и 2 мм.

Была установлена математическая зависимость между временем образования гранулы и скоростью вращения прессующего рабочего органа корзинного гранулятора.

С. Р. Жуковский [10] сравнил производительность грануляции влажного сырья при использовании корзинного и купольного (*dome*) гранулятора. Он пришел к выводу, что корзинный гранулятор наилучшим образом подходит для гранулирования влажного сырья в гранулы диаметром 0,5–1,5 мм в фармацевтической промышленности.

В Российской Федерации с 2022 г. разработка и исследования корзинного гранулятора ведутся в Аграрном научном центре «Донской» [16], причем впервые исследуется процесс приготовления в нем гранулированного корма для рыб из растительного сырья [17].

В новейшем исследовании Р. Фекете [11] изучено влияние конструкции лопастей корзинного гранулятора на процесс экструзии влажного сырья. Ученый установил, что изменяя геометрию лопастей, можно изменять давление гранулирования, благодаря чему возможно добиться получения гранул со стабильными характеристиками и минимизировать вариабельность параметров процесса.

Также представляют интерес результаты исследования А. В. Куликова [8], который изучил процесс получения микрогранул рыбных комбикормов на лабораторном стенде. Им были установлены зависимости давления гранулирования, производительности процесса, предела прочности гранул от температуры и влажности сырья при разных диаметрах фильер матрицы (0,7–1,5 мм). Недостатком этой работы является то, что сырье продавливали через фильеры плоской матрицы посредством пресса, в результате чего характеристики процесса могут заметно отличаться от закономерностей реального процесса формирования гранул в фильерах кольцевой матрицы под действием вращающихся лопастей гранулятора.

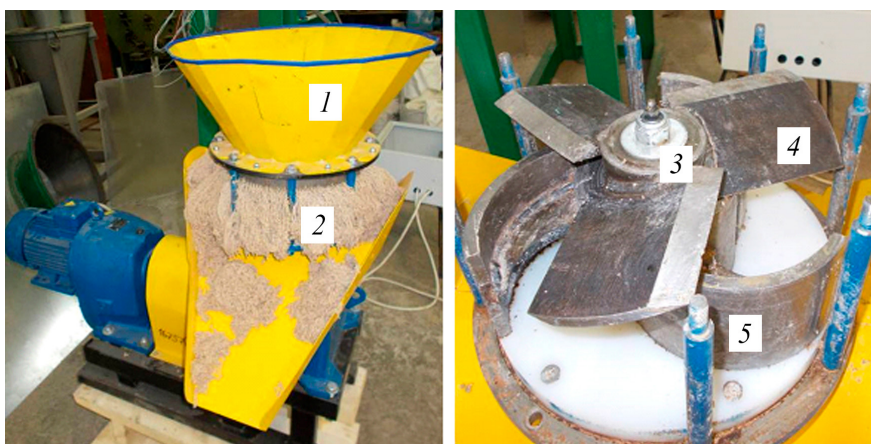
Таким образом, процесс гранулирования влажного растительного сырья в гранулы диаметром 0,5–2 мм в корзинном грануляторе недостаточно изучен, а его основные закономерности не установлены экспериментально, что препятствует широкому использованию таких грануляторов в комбикормовой промышленности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Эксперименты выполняли на корзинном грануляторе, разработанном и изготовленном в Аграрном научном центре «Донской» [16], внешний вид которого показан на рисунке 1.

Параметры конструктивных элементов корзинного гранулятора: диаметр цилиндрической корзины – 400 мм, длина цилиндрического канала фильеры – 2 мм, диаметр канала фильеры – 2 мм, отношение длины канала фильеры к его диаметру $L/D = 1$, доля площади активной зоны корзины (матрицы) гранулятора в ее общей площади – 38 %.



Р и с. 1. Корзинный гранулятор конструкции
Аграрного научного центра «Донской» и его рабочие органы:
1 – загрузочный бункер; 2 – перфорированная корзина; 3 – приводной вал;
4 – рассекатели (ножи); 5 – экструзионные лопасти (адаптировано из [17])

F i g. 1. Basket pelleter and its movable operating elements
designed by Agricultural Research Centre Donskoy:
1 – feed hopper; 2 – perforated basket; 3 – drive shaft; 4 – splitters (knives);
5 – extrusion blades (adapted from [17])

Источник: фотографии сделаны К. А. Деевым в ходе испытаний корзинного гранулятора (18.09.2022 г.).

Source: photos are taken by K. A. Deev during testing of the basket pelleter on 18 September 2022.

Процедура исследования

Растительное сырье для приготовления корма предварительно измельчали в молотковой дробилке с диаметром отверстий решета 2, 3 и 4 мм, получая измельченное сырье с модулем помола 0,82, 1,24 и 1,66 мм.

Гранулировали приготовленный в горизонтальном смесителе рассыпной комбикорм для мальков карпа (*Cyprinus Carpio L.*), по содержанию питательных веществ [18], в том числе жиров (9 %), соответствующий требованиям ГОСТ 10385-2014². Комбикорм имеет в своем составе зерно пшеницы ранней восковой спелости (60 %), сою (30 %), белково-витаминные минеральные концентраты (10 %).

Рассыпной комбикорм перед гранулированием увлажняли в смесителе, добавляя в него нагретую до 20, 45 и 70 °С воду, перемешивая его до достижения соответствующей температуры и влажности 30, 35 и 40 %. Увлажненный корм перед гранулированием выдерживали в течение 20 мин, чтобы обеспечить проникновение воды внутрь его частиц. В результате происходит желатинизации крахмала, что увеличивает вязкость сырья, необходимую для повышения прочности и водостойкости гранул [19; 20].

Частоту вращения экструзионных лопастей корзинного гранулятора изменяли с помощью трехфазного частотного преобразователя. Была задана частота вращения

² ГОСТ 10385-2014. Комбикорма для рыб. Общие технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113022> (дата обращения: 20.03.2025).

рабочих органов гранулятора величиной 40, 50 и 60 мин⁻¹. Производительность гранулятора при этом составила 231, 274 и 291 кг/ч соответственно.

Методы исследования

Исследовали процесс продавливания сырья экструзионными лопастями корзинного гранулятора через фильеры корзины, в результате чего происходило формирование гранул корма диаметром 2 мм. Полученные гранулы подвергали сушке в калориферной сушилке до достижения влажности 13,5 %, затем охлаждали до температуры 20 °С. После этого высушенные гранулы массой 10 г помещали в стеклянную емкость, в нижней части которой была расположена проволочная сетка с размером ячейки 0,5 мм. Гранулы заливали водой температурой 20 °С в объеме 2/3 от общего объема емкости и помещали в термостат, где поддерживали постоянную температуру, контролируя ее при помощи контактного термометра. Измеряли время, за которое гранулы в воде полностью распадаются на мелкие частицы, образуя однородную суспензию, то есть продолжительность полного распада гранул в воде. Процесс распада фиксировали визуально, измеряя время секундомером. Процесс распада гранул корма в воде считали законченным тогда, когда все их частицы, отделившиеся от общей массы, проходили через сетку.

Пробы сырья и корма для анализа отбирали согласно ГОСТ Р ИСО 6497-2011³. Влажность рассыпного корма и готовых гранул определяли по ГОСТ Р 54951-2012⁴. Модуль помола сырья определяли по ГОСТ 8770-58⁵ и ГОСТ 13496.8-72⁶.

Критерии оптимизации

В качестве критерия оптимизации процесса влажного гранулирования растительного сырья у было принято время распада гранул корма для мальков рыб в воде, мин. Целью оптимизации являлось максимально возможное увеличение значения этого критерия.

Из большого числа различных факторов, влияющих на процесс влажного гранулирования растительного сырья и качество получаемых гранул в ходе предварительных исследований выделили четыре наиболее значимых: x_1 – влажность сырья, %; x_2 – температура сырья, °С; x_3 – модуль помола сырья, мм; x_4 – частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора, мин⁻¹.

Планирование эксперимента

Общий характер протекания процесса влажного гранулирования при варьировании факторов был определен предварительными поисковыми экспериментами, в результате которых установлено, что в области, близкой к экстремуму, математическая модель отклика не является линейной, поэтому для ее адекватного описания необходимо использовать нелинейные полиномы второго порядка.

Для планирования эксперимента и создания математической модели процесса влажного гранулирования был использован некомпозиционный трехуровневый

³ ГОСТ Р ИСО 6497-2011. Корма для животных. Отбор проб [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088849> (дата обращения: 20.03.2025).

⁴ ГОСТ Р 54951-2012. Корма для животных. Определение содержания влаги [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095041> (дата обращения: 20.03.2025).

⁵ ГОСТ 8770-58. Комбикорм. Методы определения качества [Электронный ресурс]. URL: <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/39A9.html> (дата обращения: 20.03.2025).

⁶ ГОСТ 13496.8-72. Комбикорма. Методы определения крупности размола и содержания неразмолотых семян культурных и дикорастущих растений [Электронный ресурс]. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294837/4294837758.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).

план Бокса-Бенкена второго порядка для четырех факторов [21; 22]. На основе предварительных поисковых экспериментов были выбраны уровни варьирования факторов, соответствующие стационарной области функции отклика (табл.).

Т а б л и ц а

T a b l e

Факторы и уровни их варьирования
Factors and their variation levels

№	Наименование фактора / Factor name	Уровень фактора / Factor level		
		–1	0	+1
1	Влажность сырья, % / Raw material moisture, %	30	35	40
2	Температура сырья, °C / Raw material temperature, °C	20	45	70
3	Модуль помола сырья, мм / Raw material grinding modulus, mm	0,82	1,24	1,66
4	Частота вращения рабочих органов гранулятора, мин ^{–1} / Rotation speed of pelleter movable operating elements, min ^{–1}	40	50	60

Опыты в рамках многофакторного эксперимента были выполнены в трехкратной повторности. Значимость коэффициентов уравнения регрессии определили по критерию Стьюдента. Для проверки адекватности полученного уравнения регрессии использовали критерий Фишера⁷. Статистическую обработку результатов эксперимента выполнили в программе Statistica 12.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты статистической обработки

В процессе статистической обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии в закодированном виде, описывающее процесс влажного гранулирования при варьировании факторов, и определен множественный коэффициент корреляции:

$$y = 36,09 - 3,01x_1 - 2,75x_2 - 2,81x_3 - 1,48x_4 + 5,45x_1x_2 + 2,03x_1x_3 + 0,28x_1x_4 - 0,12x_2x_3 + 0,52x_2x_4 + 0,12x_3x_4 + 9,85x_1^2 - 2,56x_2^2 - 2,82x_3^2 - 0,6x_4^2. \quad (1)$$

Множественный коэффициент корреляции $R = 0,9538$.

Таким образом, была построена математическая модель процесса влажного гранулирования растительного сырья, позволяющая рассчитать значения коэффициентов регрессии при принятых уровнях варьирования факторов.

Значение критерия Фишера для уравнения регрессии времени распада гранул составило 2,51, что меньше табличного значения этого критерия, равного 2,66. Следовательно, регрессионная модель адекватно описывает процесс влажного гранулирования.

При переходе от кодированных значений факторов к натуральным получили математическую зависимость критерия оптимизации от варьируемых факторов с учетом значимости коэффициентов по критерию Стьюдента:

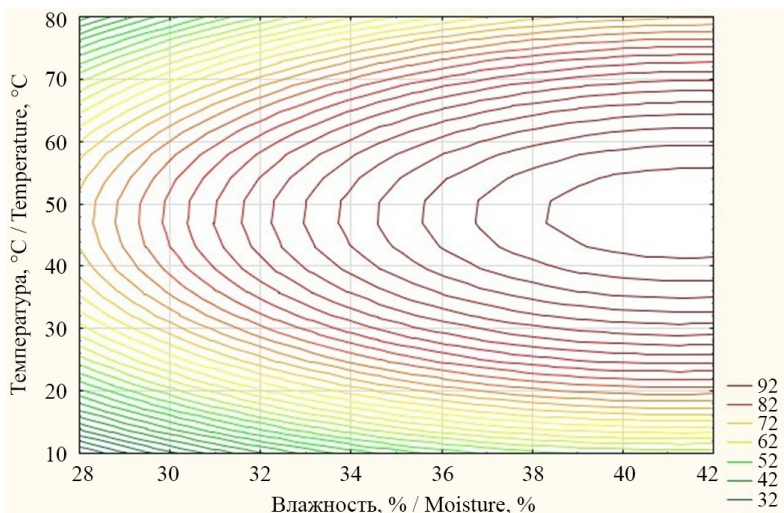
⁷ Antony J. Design of Experiments for Engineers and Scientists. Amsterdam : Elsevier, 2023. 275 p. URL: <https://clck.ru/3NegUw> (дата обращения: 23.10.2024).

$$y = 108,35 - 10,43x_1 - 8,23x_2 - 11,09x_3 - 4,99x_4 + 2,88x_1x_2 + 0,88x_1x_3 + 2,34x_1x_4 - 0,96x_2x_3 + 1,90x_2x_4 + 1,39x_3x_4 + 2,05x_1^2 - 1,26x_2^2 - 1,22x_3^2 - 1,89x_4^2 \quad (2)$$

Графические зависимости

Для определения рациональных значений варьируемых факторов были построены поверхности отклика согласно уравнению (2). Для этого исходное уравнение регрессии путем канонического преобразования свели к уравнениям с двумя факторами, оставив остальные факторы на постоянных уровнях. Согласно полученным уравнениям были построены двумерные сечения поверхности отклика.

На рисунке 2 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма от температуры и влажности сырья. Из графика на рисунке 2 видно, что влажность сырья существенно влияет на водостойкость гранул, в то время как влияние температуры сырья менее существенно. График показывает, что повышение влажности сырья до 42 % и его температуры до 56 °C приводит к увеличению времени распада гранул в воде. Наилучший результат, при котором время распада гранул составляет 92 мин, достигается при влажности сырья 38–42 % и температуре 41–56 °C. При увеличении значений факторов выше этого диапазона происходит снижение времени распада гранул.



Р и с. 2. Влияние влажности и температуры сырья на время распада гранул корма

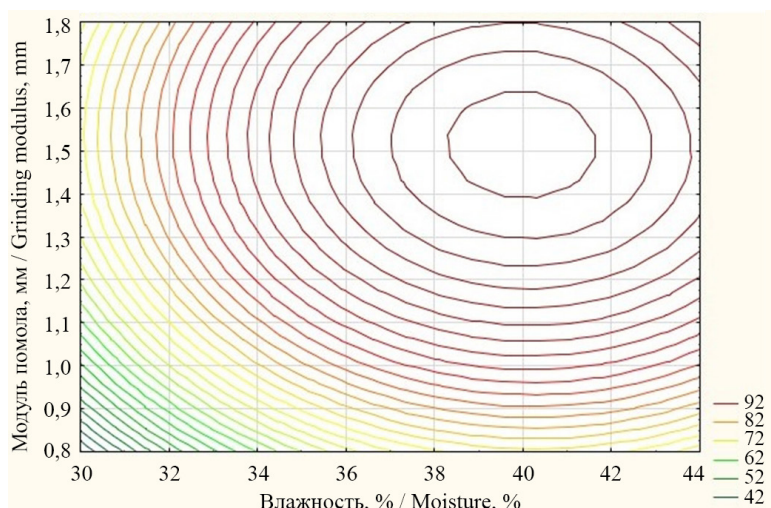
Fig. 2. Effect of raw material moisture and temperature on the disintegration time of feed pellets

Источник: графики для рисунков 2–7 построены авторами с помощью программы Statistica 12.0.

Source: graphs 2–7 are created by the authors using the Statistica 12.0 software.

На рисунке 3 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма от модуля помола сырья и его влажности. Из графика на рисунке 3 следует, что наилучший результат процесса

гранулирования, при котором время распада гранул корма составляет 92 мин, достигается при влажности сырья 38,2–41,6 % и модуле помола 1,39–1,64 мм. Время распада гранул увеличивается при повышении значений факторов до 41,6 % и 1,64 мм, после чего уменьшается. Результаты эксперимента показывают, что величина модуля помола сырья играет существенную роль в получении водостойких гранул корма.

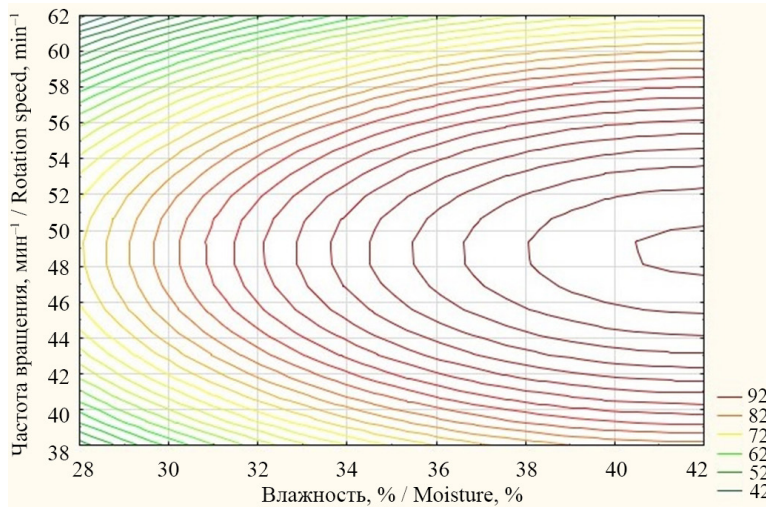


Р и с. 3. Влияние влажности сырья и его модуля помола на время распада гранул корма

F i g. 3. Influence of raw material moisture and its grinding modulus on the disintegration time of feed pellets

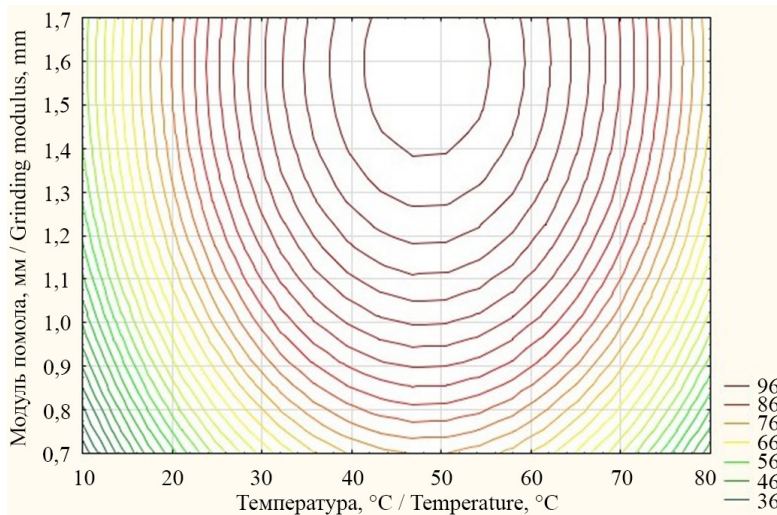
На рисунке 4 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость устойчивости гранул корма в водной среде от влажности сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Из графика на рисунке 4 видно, что наилучший результат процесса, при котором время распада гранул составляет 92 мин, достигается при влажности сырья 40,4–42 % и частоте вращения рабочих органов корзинного гранулятора 47,5–50,2 мин⁻¹. При повышении влажности сырья до 42 % и частоты вращения рабочих органов до 50,2 мин⁻¹ происходит увеличение времени распада гранул, которое при дальнейшем увеличении их значений сменяется снижением водостойкости гранул корма.

На рисунке 5 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма в воде от температуры сырья и модуля его помола. Из графика на рисунке 5 видно, что наилучший результат процесса, при котором время распада гранул составляет 96 мин, достигается при температуре сырья от 41,8 до 54,6 °С и модуле помола 1,39–1,8 мм. При увеличении температуры сырья до величины 54,6 °С и модуля помола до 1,8 мм происходит повышение времени распада гранул, которое при дальнейшем увеличении их значений сменяется снижением водостойкости гранул корма.



Р и с. 4. Влияние влажности сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на время распада гранул корма

Fig. 4. Influence of raw material moisture and rotation speed of movable operating elements of a basket pelletter on the disintegration time of feed pellets

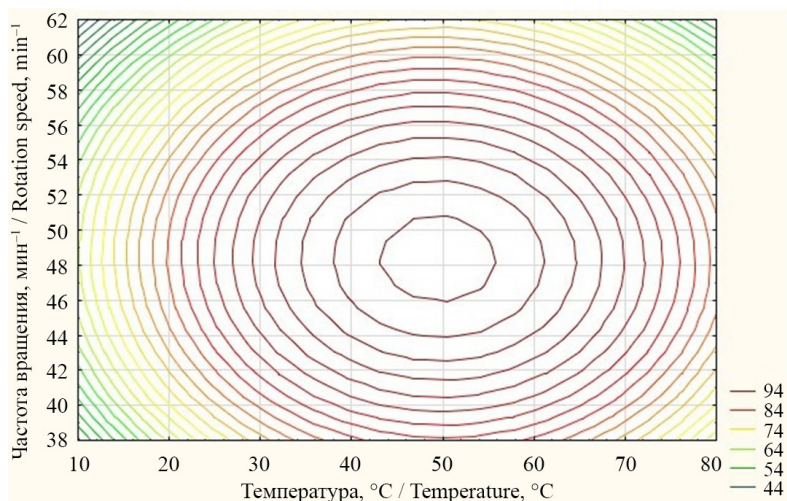


Р и с. 5. Влияние температуры сырья и модуля его помола на время распада гранул корма

Fig. 5. Effect of raw material temperature and grinding modulus on disintegration time of feed pellets

На рисунке 6 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма в воде от температуры сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Из графика на рисунке 6 следует, что наилучший результат гранулирования, при котором время распада гранул составляет 94 мин, достигается при температуре сырья от 43,1 до 55,8 °C и частоте вращения рабочих органов от 46 до 51 мин⁻¹. При повышении температуры сырья до 55,8 °C и увеличении частоты вращения рабочих органов

гранулятора до 51 мин^{-1} происходит повышение длительности периода распада гранул в воде, которое при дальнейшем увеличении значений этих факторов сменяется уменьшением водостойкости гранул корма.



Р и с. 6. Влияние температуры сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на время распада гранул корма

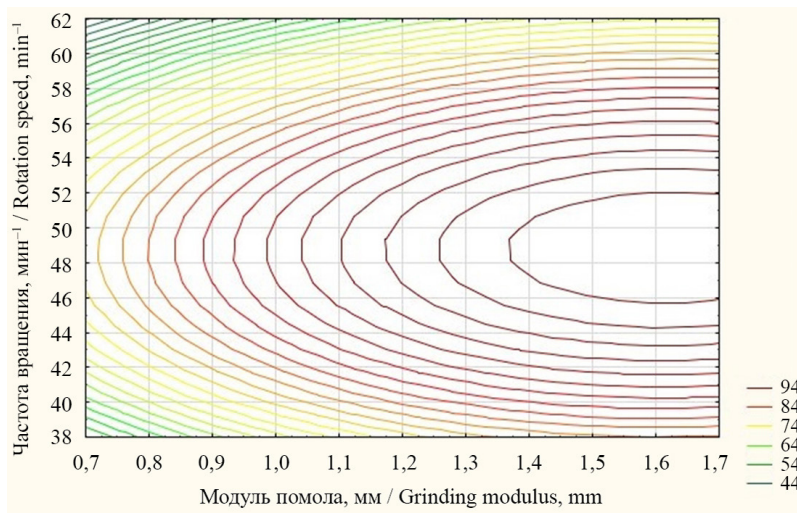
F i g. 6. Influence of raw material temperature and rotational speed of the movable operating elements of a basket pelleting machine on the disintegration time of feed pellets

На рисунке 7 показано двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость времени распада гранул корма в воде от модуля помола и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Из графика на рисунке 7 следует, что наилучший результат гранулирования, при котором время распада гранул максимально и составляет 94 мин, достигается при значениях модуля помола 1,36–1,80 мм и частоты вращения рабочих органов гранулятора 45,8–52,0 мин^{-1} . При увеличении значений модуля помола до 1,8 мм и частоты вращения рабочих органов до 52 мин^{-1} происходит повышение длительности распада гранул, которое при дальнейшем увеличении значений этих факторов сменяется снижением водостойкости гранул корма.

Анализ результатов эксперимента

Таким образом, на время распада гранул корма в воде в наибольшей степени влияют влажность сырья, его модуль помола и частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Увеличение значений этих факторов до определенного уровня повышает устойчивость гранул корма к действию воды. Установлено, что увеличение влажности сырья более 42 %, модуля помола более 1,8 мм и частоты вращения рабочих органов гранулятора более 52 мин^{-1} приводит к уменьшению времени полного распада гранул в воде, то есть ухудшает их качество.

Влияние температуры сырья на время распада гранул корма менее существенно, чем трех остальных факторов. Тем не менее, увеличение температуры сырья до 56 °C улучшает качество получаемых гранул корма для рыб, повышая их водостойкость.



Р и с. 7. Влияние модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на время распада гранул корма

F i g. 7. Influence of raw material grinding modulus and rotation speed of basket pelleting operating elements on disintegration time of feed pellets

На основании результатов экспериментов был сделан вывод, что оптимальная величина времени распада гранул корма в воде, равная 92–96 мин, достигается при следующих диапазонах значений факторов процесса влажного гранулирования: влажность сырья – 40...42 %; температура сырья – 42...56 °С, модуль помола сырья 1,4...1,8 мм (средний помол); частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора – 47...51 мин⁻¹.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов экспериментов был сделан вывод о том, что установленные для процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе зависимости изменения времени распада гранул в воде (водостойкости) от влажности и температуры сырья, модуля его помола и частоты вращения прессующих рабочих органов гранулятора соответствуют аналогичным зависимостям, ранее установленным для процесса гранулирования в грануляторах с вертикальной кольцевой матрицей.

Объяснение установленным закономерностям изменения параметра оптимизации процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе (в данном случае времени распада гранул в воде) при варьировании входных факторов может быть дано, исходя из ранее установленных закономерностей для процесса гранулирования в пресс-грануляторе.

Так, увеличение водостойкости гранул при повышении влажности растительного сырья объясняется лучшим связыванием частиц гранул, содержащих больше воды [19], вследствие ее агглютинирующей способности [23]. Но вода при чрезмерном увлажнении сырья снижает трение в канале фильеры в процессе

гранулирования, что отрицательно влияет на водостойкость гранул [24]. Гранулы, изготовленные из недостаточно влажного сырья, также являются непрочными и быстро распадаются в воде.

Установленные рациональные значения модуля помола растительного сырья 1,4–1,8 мм (средний помол) также примерно соответствуют рациональным значениям этого показателя, установленным для процесса гранулирования в пресс-грануляторе с вертикальной матрицей [25], как и тот факт, что мелкий помол сырья (модуль помола менее 1 мм) и крупный помол (модуль более 2 мм) ухудшают водостойкость гранул [19; 26]. Дело в том, что именно при среднем помоле (модуль помола 1–2 мм) в растительном сырье увеличивается межмолекулярная адгезия, что повышает плотность и водостойкость гранул [26].

Уменьшение размера частиц растительного сырья вплоть до величины 1 мм повышает их капиллярность, способствуя более равномерному проникновению воды при увлажнении [27]. Это утверждение соответствует полученным нами экспериментальным данным, свидетельствующим о том, что совместное уменьшение модуля помола и увеличение влажности сырья обеспечивает улучшение водостойкости гранул корма.

Температура растительного сырья влияет на связывание частиц в гранулах, нагрев способствует их лучшему склеиванию [26; 28], в том числе в результате желатинизации крахмала, повышению плотности и водостойкости гранул [29; 30], что было подтверждено в наших опытах. Однако чрезмерное увеличение температуры сырья приводит к его обезвоживанию, что ухудшает качество гранул.

Влияние частоты вращения рабочих органов гранулятора на параметры процесса гранулирования и качество гранул ранее было почти не исследовано. Нами установлено, что при увеличении частоты вращения рабочих органов выше рациональных значений гранулы корма становятся менее плотными и водостойкими. Это можно объяснить тем, что в результате вызванного увеличением частоты вращения рабочего органа значительного повышения давления гранулирования происходит и значительное повышение температуры сырья, что снижает его влажность, делая гранулы менее прочными [31; 32]. Уменьшение частоты вращения рабочих органов ниже рациональных значений приводит к формированию усилия экструзионной лопасти (давления гранулирования), недостаточного для продавливания сырья через фильеры и формирования полноценных гранул.

Увеличение частоты вращения рабочих органов гранулятора от минимальных до рациональных значений приводит к повышению скорости сжатия сырья в области между матрицей и экструзионной лопастью и в фильере. Увеличение степени сжатия сырья в фильере приводит к его уплотнению и получению более плотных и водостойких гранул корма, что соответствует экспериментальным данным для пресс-грануляторов с кольцевой матрицей⁸ [33]. Но чрезмерное увеличение частоты вращения рабочих органов формирует значительное усилие в области между

⁸ Šafran B., Radmanović K., Jug M., Lučić Beljo R., Lojen T., Risović S. Influence of Pressing Temperature and Additive on Mechanical Properties of Wood Pellets // Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development (5–8 June 2018). Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Croatia. 2018. Vol. 3. P. 141–148. URL: <https://www.sumins.hr/wp-content/uploads/2019/07/green3-proceedings.pdf> (дата обращения: 23.11.2025).

матрицей и экструзионной лопастью и в канале фильеры, что приводит к повышению температуры гранулируемого сырья, а вследствие этого к интенсивному испарению воды. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению связности между частицами сырья и получению недостаточно прочных и водостойких гранул, что соответствует данным [34] для гранулятора с вертикальной кольцевой матрицей.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных исследований были установлены рациональные значения факторов процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, позволяющие производить гранулированный корм для рыб и их мальков, соответствующий зоотехническим требованиям к качеству кормов по водостойкости. Оптимальная величина времени распада гранул корма в воде, равная 92–96 мин, достигается при следующих диапазонах значений параметров процесса влажного гранулирования: влажность сырья – 40...42 %; температура сырья – 42...56 °C; модуль помола сырья 1,4–1,8 мм (средний помол); частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора – 47...51 мин⁻¹.

В результате анализа экспериментальных данных был восполнен существующий пробел в научных знаниях о взаимодействии между значимыми факторами процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе и их влиянии на результаты процесса, а именно на водостойкость гранул корма для рыб.

Поскольку было установлено, что закономерности процесса гранулирования в корзинном грануляторе и пресс-грануляторе с вертикальной кольцевой матрицей схожи, то перспективным направлением исследований является разработка и верификация комплексной физико-математической модели процесса гранулирования растительного сырья. Такая модель должна описывать взаимосвязи между тепло- и массопереносом, реологическими свойствами сырья при изменяющихся температуре и влажности, а также гидродинамикой его течения в каналах фильеры под действием рабочих органов, учитывать нелинейные взаимодействия технологических параметров и позволять предсказывать оптимальные режимы гранулирования при заданных требованиях к качеству конечного продукта. Создание такой математической модели станет мощным инструментом для инженерного проектирования и оптимизации оборудования для гранулирования кормов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ferenczi D., Bodnar K. The Role of Cereals in Carp Feeding (Short Review). *Research Journal of Agricultural Science*. 2024;56(1):77–83. URL: <https://elck.ru/3NcXAn> (дата обращения: 21.11.2024).
2. Kuebutornye F.K.A., Roy K., Folorunso E.A., Mraz J. Plant-Based Feed Additives in *Cyprinus Carpio* Aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 2024;16(1):309–336. <https://doi.org/10.1111/raq.12840>
3. Gao S., Jin J., Liu H., Han D., Zhu X., Yang Yu., et al. Effects of Pelleted and Extruded Feed of Different Ingredients Particle Sizes on Feed Quality and Growth Performance of Gibel Carp (*Carassius Gibelio* Var. CAS V). *Aquaculture*. 2019;511:734236. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734236>
4. Харченко Е.Н., Ульрих Е.В., Колокольцова Е.А. Эффективность использования полнорационного гранулированного комбикорма для садкового карпа. *Достижения науки и техники АПК*. 2019;33(3):55–57. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10314>

5. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An Overview of Aquafeed Formulation and Processing. In: *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. Springer, New Delhi. 2015. p. 227–240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21
6. Regupathi E.R., Suriya A., Geethapriya R.S. On Studying Different Types of Pelletizing System for Fish Feed. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2019;7(2):187–192. URL: <https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-4-857.pdf> (дата обращения: 21.11.2024).
7. Blagov D.A., Gizatov A.Ya., Smakuyev D.R., Kosilov V.I., Pogodaev V.A., Tamaev S.A. Overview of Feed Granulation Technology and Technical Means for its Implementation. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management* (22 October 2020). Veliky Novgorod. 2020;613:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018>
8. Куликов А.В., Литвинчук А.А., Куликова О.М., Данилюк А.С., Безущёнок А.А. Исследование возможности и определение параметров получения микрогранул рыбных комбикормов для выращивания мальков. *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2019;12(2):43–51. URL: <https://foodindustry.belar.by/jour/article/view/402> (дата обращения: 21.11.2024).
9. Vervaeke C., Baert L., Risha P.A., Remon J.-P. The Influence of the Extrusion Screen on Pellet Quality Using an Instrumented Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics*. 1994;107(1):29–39. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(94\)90299-2](https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90299-2)
10. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S., Taylor J., Frishcosy M., Hercamp J., et al. Performance Comparison of Dome and Basket Extrusion Granulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020;160:190–198. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.037>
11. Fekete R., Peciar P., Juriga M., Gužela Š., Peciarová M., Horváth D., et al. Pressure and Liquid Distribution under the Blade of a Basket Extruder of Continuous Wet Granulation of Model Material. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024;8(3):127. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030127>
12. Singh M., Shirazian S., Ranade V., Walker G.M., Kumar A. Challenges and Opportunities in Modelling Wet Granulation in Pharmaceutical Industry – a Critical Review. *Powder Technology*. 2022;403:117380. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117380>
13. Chen P., Ansari M.J., Bokov D., Suksatan W., Rahman M.L., Sarjadi M.S. A Review on Key Aspects of Wet Granulation Process for Continuous Pharmaceutical Manufacturing of Solid Dosage Oral Formulations. *Arabian Journal of Chemistry*. 2022;15(2):103598. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103598>
14. Baert L., Down G.R.B. A Comparison of Two Methods of Instrumenting a Small-Scale Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics*. 1994;107(3):219–222. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(94\)90437-5](https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90437-5)
15. Zhang M., Li Y. Spheronisation of a Basket Screen-Extruded Paste Using Screens of Different Hole Diameters. *Powder Technology*. 2016;299:199–209. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.038>
16. Пахомов В.И., Брагинцев С.В., Бахчевников О.Н., Деев К.А. Роторный гранулятор для влажных материалов. Патент 218265 Российская Федерация. 18 мая 2023. URL: <https://istina.msu.ru/patents/564514548/> (дата обращения: 23.09.2024).
17. Пахомов В.И., Брагинцев С.В., Алферов А.С., Бахчевников О.Н., Деев К.А. Корзинный гранулятор для приготовления кормов в аквакультуре. *Техника и оборудование для села*. 2022;(12):32–34. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-32-34>
18. Hlaváč D., Másíľko J., Anton-Pardo M., Hartman P., Regenda J., Vejsada P., et al. Compound Feeds and Cereals as Potential Tools for Improved Carp *Cyprinus Carpio* Production. *Aquaculture Environment Interactions*. 2016;8:647–657. <https://doi.org/10.3354/aei00206>
19. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that Affect Pellet Quality: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015:717–722. <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>
20. Peeters M., Barrera Jiménez A.A., Matsunami K., Ghijs M., dos Santos Schultz E., Roudgar M., et al. Analysis of the Effect of Formulation Properties and Process Parameters on Granule Formation

- in Twin-Screw Wet Granulation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2024;650:123671. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123671>
21. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2017;5(3):421–439. URL: <file:///C:/Users/User/Downloads/DOE-GUD.pdf> (дата обращения: 21.09.2024).
 22. Roy R., Hinduja S., Teti R. Recent Advances in Engineering Design Optimisation: Challenges and Future Trends. *CIRP Annals*. 2008;57(2):697–715. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.007>
 23. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G., Dinca M.N., Zabava B.S. Influence of Biomass Moisture Content on Pellet Properties – Review. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:1876–1883. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>
 24. Abdollahi M.R., Ravindran V., Wester T.J., Ravindran G., Thomas D.V. Effect of Improved Pellet Quality from the Addition of a Pellet Binder and/or Moisture to a Wheat-Based Diet Conditioned at Two Different Temperatures on Performance, Apparent Metabolisable Energy and Ileal Digestibility of Starch and Nitrogen in Broilers. *Animal Feed Science and Technology*. 2012;175(3–4):150–157. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.001>
 25. Stelte W., Holm J.K., Sanadi A.R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B. A Study of Bonding and Failure Mechanisms in Fuel Pellets from Different Biomass Resources. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35(2):910–918. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>
 26. Dujmović M., Šafran B., Jug M., Radmanović K., Antonović A. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija*. 2022;73(1):99–106. <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2139>
 27. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C., Tudor P., Cardei P., Matache M., et al. Influence of Input and Control Parameters on the Process of Pelletizing Powdered Biomass. *Energies*. 2021;14:4104. <https://doi.org/10.3390/en14144104>
 28. Segerstrom M., Larsson S.H. Clarifying Sub-Processes in Continuous Ring Die Pelletizing Through Die Temperature Control. *Fuel Processing Technology*. 2014;123:122–126. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.008>
 29. Netto M.T., Massuquetto A., Krabbe E.L., Surek D., Oliveira S.G., Maiorka A. Effect of Conditioning Temperature on Pellet Quality, Diet Digestibility, and Broiler Performance. *Journal of Applied Poultry Research*. 2019;28(4):963–973. <https://doi.org/10.3382/japr/pfz056>
 30. Dos Santos R.O.F., Bassi L.S., Schramm V.G., da Rocha C., Dahlke F., Krabbe E.L., et al. Effect of Conditioning Temperature and Retention Time on Pellet Quality, Ileal Digestibility, and Growth Performance of Broiler Chickens. *Livestock Science*. 2020;240:104110. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104110>
 31. Nielsen S.K., Mando M., Rosenorn A.B. Review of Die Design and Process Parameters in the Biomass Pelletizing Process. *Powder Technology*. 2020;364:971–985. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051>
 32. Agar D.A., Rudolfsson M., Kalén G., Campargue M., Perez D.D.S., Larsson S.H. A Systematic Study of Ring-Die Pellet Production from Forest and Agricultural Biomass. *Fuel Processing Technology*. 2018;180:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.006>
 33. Thomas M., van der Poel A.F.B. Fundamental Factors in Feed Manufacturing: Towards a Unifying Conditioning/Pelleting Framework. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;268:114612. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114612>
 34. Whittaker C., Shield I. Factors Affecting Wood, Energy Grass and Straw Pellet Durability – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;71:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>

Об авторах:

Брагинец Сергей Валерьевич, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), профессор кафедры технологий и оборудования переработки продукции агропромышленного комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону,

пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, Researcher ID: Y-6307-2019, Scopus ID: 57202639521, SPIN-код: 4849-0287, sbraginet@mail.ru

Пахомов Виктор Иванович, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), заведующий кафедрой технологий и оборудования переработки продукции агропромышленного комплекса Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, Researcher ID: Y-7085-2019, Scopus ID: 55659146100, SPIN-код: 5815-4913, vniizk30@mail.ru

Бахчевников Олег Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Scopus ID: 57202648620, SPIN-код: 3350-9055, oleg-b@list.ru

Алферов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>, SPIN-код: 7803-6092, alfa-8303@yandex.ru

Деев Константин Александрович, инженер отдела переработки продукции растениеводства Аграрного научного центра «Донской» (347740, Российская Федерация, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>, SPIN-код: 9005-9443, prosto.deev@yandex.ru

Вклад авторов:

С. В. Брагинец – создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

В. И. Пахомов – формулирование идеи исследования, целей и задач.

О. Н. Бахчевников – создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. С. Алферов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств.

К. А. Деев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор доказательств.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 06.12.2024; поступила после рецензирования 10.03.2025;
принята к публикации 19.03.2025*

REFERENCES

1. Ferenczi D., Bodnar K. The Role of Cereals in Carp Feeding (Short Review). *Research Journal of Agricultural Science*. 2024;56(1):77–83. Available at: <https://clck.ru/3NcXAn> (accessed 21.11.2024).
2. Kuebutornye F.K.A., Roy K., Folorunso E.A., Mraz J. Plant-Based Feed Additives in *Cyprinus Carpio* Aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 2024;16(1):309–336. <https://doi.org/10.1111/raq.12840>
3. Gao S., Jin J., Liu H., Han D., Zhu X., Yang Yu., et al. Effects of Pelleted and Extruded Feed of Different Ingredients Particle Sizes on Feed Quality and Growth Performance of Gibel Carp (*Carassius Gibelio* Var. CAS V). *Aquaculture*. 2019;511:734236. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734236>

4. Kharchenko E.N., Ulrikh E.V., Kolokoltsova E.A. Performance Efficiency of Complete Granulated Mixed Feed for Cage Carp. *Achievements of Science and Technology of AICis*. 2019;33(3):55–57. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10314>
5. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An Overview of Aquafeed Formulation and Processing. In: *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. Springer, New Delhi. 2015. p. 227–240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21
6. Regupathi E.R., Suriya A., Geethapriya R.S. On Studying Different Types of Pelletizing System for Fish Feed. *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 2019;7(2):187–192. Available at: <https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-4-857.pdf> (accessed 21.11.2024).
7. Blagov D.A., Gizatov A.Ya., Smakuyev D.R., Kosilov V.I., Pogodaev V.A., Tamaev S.A. Overview of Feed Granulation Technology and Technical Means for its Implementation. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. The International Scientific and Practical Conference Biotechnology in the Agro-Industrial Complex and Sustainable Environmental Management (22 October 2020)*. Veliky Novgorod. 2020;613:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018>
8. Kulikou A.V., Litvinchuk A.A., Kulikova O.M., Danilyuk A.S., Bezushchonok A.A. Investigation of Opportunities and Determination of Parameters of Production of Microgranules of Fish Fodder for Fry. *Food Industry: Science and Technology*. 2019;12(2):43-51. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://foodindustry.belal.by/jour/article/view/402> (accessed 21.11.2024).
9. Vervaet C., Baert L., Risha P.A., Remon J.-P. The Influence of the Extrusion Screen on Pellet Quality Using an Instrumented Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics*. 1994;107(1):29–39. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(94\)90299-2](https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90299-2)
10. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S., Taylor J., Frishcosy M., Hercamp J., et al. Performance Comparison of Dome and Basket Extrusion Granulation. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020;160:190–198. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.04.037>
11. Fekete R., Peciar P., Juriga M., Gužela Š., Peciarová M., Horváth D., et al. Pressure and Liquid Distribution under the Blade of a Basket Extruder of Continuous Wet Granulation of Model Material. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2024;8(3):127. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030127>
12. Singh M., Shirazian S., Ranade V., Walker G.M., Kumar A. Challenges and Opportunities in Modelling Wet Granulation in Pharmaceutical Industry – a Critical Review. *Powder Technology*. 2022;403:117380. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117380>
13. Chen P., Ansari M.J., Bokov D., Suksatan W., Rahman M.L., Sarjadi M.S. A Review on Key Aspects of Wet Granulation Process for Continuous Pharmaceutical Manufacturing of Solid Dosage Oral Formulations. *Arabian Journal of Chemistry*. 2022;15(2):103598. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103598>
14. Baert L., Down G.R.B. A Comparison of Two Methods of Instrumenting a Small-Scale Basket Extruder. *International Journal of Pharmaceutics*. 1994;107(3):219–222. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(94\)90437-5](https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90437-5)
15. Zhang M., Li Y. Spheronisation of a Basket Screen-Extruded Paste Using Screens of Different Hole Diameters. *Powder Technology*. 2016;299:199–209. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.038>
16. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. [Rotary Granulator for Wet Materials]. Patent 218265 Russian Federation. 2023 May 18. (In Russ.) Available at: <https://istina.msu.ru/patents/564514548/> (accessed 23.09.2024).
17. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Alferov A.S., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. Basket Pellet Mill for Aquaculture Feed Preparation. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;(12):32–34. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-32-34>
18. Hlaváč D., Másilko J., Anton-Pardo M., Hartman P., Regenda J., Vejsada P., et al. Compound Feeds and Cereals as Potential Tools for Improved Carp *Cyprinus Carpio* Production. *Aquaculture Environment Interactions*. 2016;8:647–657. <https://doi.org/10.3354/aei00206>

19. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that Affect Pellet Quality: A Review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015;717–722. <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>
20. Peeters M., Barrera Jiménez A.A., Matsunami K., Ghijs M., dos Santos Schultz E., Roudgar M., et al. Analysis of the Effect of Formulation Properties and Process Parameters on Granule Formation in Twin-Screw Wet Granulation. *International Journal of Pharmaceutics*. 2024;650:123671. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.123671>
21. Durakovic B. Design of Experiments Application, Concepts, Examples: State of the Art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2017;5(3):421–439. Available at: <file:///C:/Users/User/Downloads/DOE-GUD.pdf> (accessed 21.09.2024).
22. Roy R., Hinduja S., Teti R. Recent Advances in Engineering Design Optimisation: Challenges and Future Trends. *CIRP Annals*. 2008;57(2):697–715. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.007>
23. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G., Dinca M.N., Zabava B.S. Influence of Biomass Moisture Content on Pellet Properties – Review. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:1876–1883. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>
24. Abdollahi M.R., Ravindran V., Wester T.J., Ravindran G., Thomas D.V. Effect of Improved Pellet Quality from the Addition of a Pellet Binder and/or Moisture to a Wheat-Based Diet Conditioned at Two Different Temperatures on Performance, Apparent Metabolisable Energy and Ileal Digestibility of Starch and Nitrogen in Broilers. *Animal Feed Science and Technology*. 2012;175(3–4):150–157. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.001>
25. Stelte W., Holm J.K., Sanadi A.R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B. A Study of Bonding and Failure Mechanisms in Fuel Pellets from Different Biomass Resources. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35(2):910–918. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>
26. Dujmović M., Šafran B., Jug M., Radmanović K., Antonović A. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija*. 2022;73(1):99–106. <https://doi.org/10.5552/drind.2022.2139>
27. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C., Tudor P., Cardei P., Matache M., et al. Influence of Input and Control Parameters on the Process of Pelletizing Powdered Biomass. *Energies*. 2021;14:4104. <https://doi.org/10.3390/en14144104>
28. Segerstrom M., Larsson S.H. Clarifying Sub-Processes in Continuous Ring Die Pelletizing Through Die Temperature Control. *Fuel Processing Technology*. 2014;123:122–126. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.008>
29. Netto M.T., Massuquetto A., Krabbe E.L., Surek D., Oliveira S.G., Maiorka A. Effect of Conditioning Temperature on Pellet Quality, Diet Digestibility, and Broiler Performance. *Journal of Applied Poultry Research*. 2019;28(4):963–973. <https://doi.org/10.3382/japr/pfz056>
30. Dos Santos R.O.F., Bassi L.S., Schramm V.G., da Rocha C., Dahlke F., Krabbe E.L., et al. Effect of Conditioning Temperature and Retention Time on Pellet Quality, Ileal Digestibility, and Growth Performance of Broiler Chickens. *Livestock Science*. 2020;240:104110. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104110>
31. Nielsen S.K., Mando M., Rosenorn A.B. Review of Die Design and Process Parameters in the Biomass Pelletizing Process. *Powder Technology*. 2020;364:971–985. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051>
32. Agar D.A., Rudolfsson M., Kalén G., Campargue M., Perez D.D.S., Larsson S.H. A Systematic Study of Ring-Die Pellet Production from Forest and Agricultural Biomass. *Fuel Processing Technology*. 2018;180:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.006>
33. Thomas M., van der Poel A.F.B. Fundamental Factors in Feed Manufacturing: Towards a Unifying Conditioning/Pelleting Framework. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;268:114612. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114612>
34. Whittaker C., Shield I. Factors Affecting Wood, Energy Grass and Straw Pellet Durability – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;71:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>

About the authors:

Sergey V. Braginets, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Professor of the Department of Technologies and Equipment for Processing Products of the Agro-Industrial Complex, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>, Researcher ID: Y-6307-2019, Scopus ID: 57202639521, SPIN-code: 4849-0287, sbraginets@mail.ru

Viktor I. Pakhomov, Dr.Sci. (Eng.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), Head of the Department of Technologies and Equipment for Processing Products of the Agro-Industrial Complex, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344003, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>, Researcher ID: Y-7085-2019, Scopus ID: 55659146100, SPIN-code: 5815-4913, vniizk30@mail.ru

Oleg N. Bakhchevnikov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Scientific Worker of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, Scopus ID: 57202648620, SPIN-code: 3350-9055, oleg-b@list.ru

Aleksandr S. Alferov, Cand.Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>, SPIN-code: 7803-6092, alfa-8303@yandex.ru

Konstantin A. Deev, Engineer of the Department Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Center “Donskoy” (3 Nauchny Gorodok St., Zernograd 347740, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>, SPIN-code: 9005-9443, prosto.deev@yandex.ru

Authors contribution:

S. V. Braginets – preparing the article manuscript: critical analysis of the manuscript, comments and corrections made by the members of the research group during the pre-publication and post-publication stages.

V. I. Pakhomov – formulating the study idea, aims and objectives.

O. N. Bakhchevnikov – preparing the manuscript, specifically writing the initial manuscript version (including its translation into the English language).

A. S. Alferov – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence.

K. A. Deev – conducting the study, specifically performing the experiments and collecting data/evidence.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 06.12.2024; revised 10.03.2025; accepted 19.03.2025