

УДК 631.363.28:636.085.62:639.3.043.2

UDC 631.363.28:636.085.62:639.3.043.2

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

4.3.1 Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ КОРЗИННОГО ГРАНУЛЯТОРА ДЛЯ ВЛАЖНОГО ГРАНУЛИРОВАНИЯ КОРМОВ

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE DESIGN OF A BASKET GRANULATOR FOR WET GRANULATION OF FEED

Деев Константин Александрович
аспирант
РИНЦ SPIN-код: 9005-9443
ORCID: 0000-0002-4160-0382
prosto.deev@yandex.ru
ФГБНУ «Аграрный научный центр
«Донской», Зерноград, Россия

Deev Konstantin Alexandrovich
Postgraduate student
RSCI SPIN-code: 9005-9443
ORCID: 0000-0002-4160-0382
prosto.deev@yandex.ru
FSBI Agrarian Scientific Centre
Donskoy, Zernograd, Russia

В работе представлено теоретическое обоснование конструктивной схемы корзинного гранулятора для влажного гранулирования кормов, предназначенных для объектов аквакультуры. Анализ показал, что применение влажного гранулирования обеспечивает более высокую прочность и водостойкость гранул по сравнению с традиционным сухим способом, особенно при производстве гранул кормов малого диаметра для мальков рыб. Особенность конструкции предлагаемого корзинного гранулятора заключается в использовании цилиндрической матрицы с круглыми отверстиями и двух рабочих роторов: рассекателя и экструзионных лопастей, вращающихся в противоположных направлениях. В качестве критерия эффективности процесса был выбран показатель минимального усилия проталкивания сырья через фильеры матрицы при сохранении высокого качества гранул. Путем теоретического анализа обоснованы оптимальные геометрические параметры экструзионных лопастей и конструктивные особенности рабочих органов корзинного гранулятора. Ключевым результатом стало определение оптимальной формы экструзионной лопасти. Установлено, что для обеспечения наилучшего захвата и проталкивания кормовой массы через фильеры матрицы, образующая лопасти должна иметь форму логарифмической спирали. Это обеспечивает постоянный угол защемления материала, предотвращая его проскальзывание. Приведены математические расчеты и итоговые рациональные геометрические параметры лопасти. На основе расчетов была предложена конструкция трехлопастного экструзионного ротора. Результаты исследований показали перспективность применения корзинного гранулятора при производстве качественного гранулированного корма для рыб. Применение разработанной конструкции гранулятора позволяет повысить качество корма и наладить производство импортозамещающего оборудования для комбикормовой промышленности России

The article presents a theoretical justification of the design of a basket granulator for wet granulation of feed intended for aquaculture facilities. The analysis showed that wet granulation provides higher strength and water resistance of granules compared to the traditional dry method, especially in the production of small-diameter feed granules for fish fry. The design feature of the proposed basket granulator is the use of a cylindrical die with round holes and two working rotors: a cutter and extrusion blades rotating in opposite directions. The criterion for process efficiency was chosen as the minimum force required to push the raw material through the die holes while maintaining high pellet quality. Theoretical analysis was used to justify the optimal geometric parameters of the extrusion blades and the design features of the working parts of the basket granulator. The key result was the determination of the optimal shape of the extrusion blade. It was established that in order to ensure the best grip and pushing of the feed mass through the die, the blade should have the shape of a logarithmic spiral. This ensures a constant angle of material clamping, preventing it from slipping. Mathematical calculations and the final rational geometric parameters of the blade are presented. Based on the calculations, a three-blade extrusion rotor design was proposed. The research results showed the promise of using a basket granulator in the production of high-quality granulated fish feed. The use of the developed granulator design makes it possible to improve the quality of feed and establish the production of import-substituting equipment for the Russian feed industry

Ключевые слова: ВЛАЖНОЕ ГРАНУЛИРОВАНИЕ, ГРАНУЛЫ, ПРОЦЕСС ГРАНУЛИРОВАНИЯ, КОРЗИННЫЙ ГРАНУЛЯТОР, КОРМ, ЭКСТРУЗИОННАЯ ЛОПАСТЬ, КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА

Keywords: WET GRANULATION, GRANULES, GRANULATION PROCESS, BASKET GRANULATOR, FEED, EXTRUSION BLADE, DESIGN SCHEME

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-211-042>

Введение. В России в связи с ростом производства продукции аквакультуры увеличился спрос на готовые корма [1]. Для производства гранулированных комбикормов для аквакультуры наиболее подходит влажное гранулирование. Этот процесс обеспечивает лучшее связывание частиц сырья в гранулах и приготовление более водостойких и прочных гранул, чем обычно применяемое на комбикормовых заводах сухое гранулирование [2, 3].

Для влажного гранулирования кормов для рыб с начальной влажностью сырья 25-40 % и производства гранул аквакорма малого диаметра (0,5...2 мм) для мальков рыб может быть использовано новое техническое средство – корзинный гранулятор, также именуемый корзинным экструдером [4, 5, 6].

Особенностью конструкции корзинного гранулятора является то, что в неподвижной цилиндрической корзине с круглыми отверстиями (фильерами), выполняющей роль вертикальной кольцевой матрицы, расположены два вида рабочих органов – сверху рассекатели (ножи), а под ними – экструзионные лопасти, вращающиеся в противоположном направлении по принципу «вал в валу» (рис. 1) [7]. Рассекатели перемешивают и измельчают влажное сырье, под действием гравитации сырьем перемещается в нижнюю часть корзины, где экструзионные лопасти уплотняют его и продавливают через фильеры наружу, в результате чего формируются гранулы корма.



Рисунок 1. Корзинный гранулятор, разработанный «Аграрный научный центр «Донской» и его рабочие органы (патент RU 218265)

Уникальный механизм процесса влажного гранулирования в корзинном грануляторе, основанный на сочетании действия центробежной силы и резания при малом давлении, достаточно низкой температуре и умеренном сдвиге, является подходящим для обработки термочувствительных материалов, таких как сырье для кормов [8, 9]. Этот способ позволяет формировать высококачественные гранулы с узким распределением по размеру.

Рабочие процессы в корзинном грануляторе имеют кардинальное отличие от процессов типичного получения гранулы в кормопроизводстве. При сухом гранулировании концентрированных кормов процесс формообразования можно условно разделить на этапы: напрессовывание материала в фильеру матрицы, релаксацию сырья уже с большей плотностью, выход гранулы из фильеры с принудительным регулируемым обламыванием. Основное влияние на процесс оказывает длина цилиндрической фильеры (толщина матрицы). Она должна быть достаточна для обеспечения длительности протекания процесса уплотнения сырья, но это же и ограничи-

вает скорость движения сырья в фильере [10]. Основным недостатком такого способа гранулирования кормового сырья является невозможность уменьшения диаметра гранулы ниже определенного предела из-за преобладания сил трения в фильере над возможными усилиями нагнетания [11]. Также сформированные таким образом гранулы нагреваются и требуют охлаждения перед упаковкой.

Но большой проблемой для проведения дальнейших экспериментальных исследований и моделирования процесса влажного гранулирования кормов является отсутствие адекватных математических моделей, теоретически описывающих этот процесс [12]. Кроме того, существующая конструктивная схема корзинных грануляторов была разработана эмпирически инженерами предприятий-изготовителей без теоретического обоснования, что вызывает сомнения в ее целесообразности [13, 14].

Все изложенное обусловило необходимость выполнения теоретического обоснования конструктивной схемы корзиночного гранулятора.

Цель исследования – теоретически обосновать рациональную конструктивную схему корзиночного гранулятора для влажного гранулирования кормов.

Методика исследования. В процессе обоснования множественные рабочие органы – экструзионные лопасти и рассекатели рассматривали как единый рабочий орган – экструзионный ротор и рассекающий ротор, соответственно.

Рассматривали и обосновывали геометрию экструзионного колеса и влияние его формы (геометрических параметров) на эффективность процесса влажного гранулирования корма.

В качестве критерия эффективности процесса приняли прохождение корма через фильеру матрицы с наименьшим усилием на проталкивание экструзионной лопастью, приводящее к получению прочных водостойких гранул корма для аквакультуры.

Увлажненный для гранулирования (экструзии) корм (смесь воды и измельченного растительного сырья) рассматривали как суспензию с низким коэффициентом внутреннего трения и достаточно варьируемыми реологическими свойствами из-за широкой вариации рецептур, образующую в процессе обработки конгломераты различных размеров.

Результаты и обсуждение. Процесс влажного гранулирования принципиально отличается от сухого и может быть условно разделен на этапы: подпрессовывания массы к экструзионной матрице, экструзия сырья через отверстия, подсушивание или сушка (естественная, либо принудительная потоком нагретого воздуха) сформированной цилиндрической гранулы, обламывание гранулы (гравитационное, либо принудительное обрезание). При необходимости гранулы могут быть дополнительно досушены. По своей сути процесс ближе к так называемому «окусковыванию» – понятию, применяемому при производстве брикетов из торфа, либо формированию макарон в прессе в пищевой промышленности, где также важна досушка продукта до кондиционной влажности.

При экструзии увлажненной кормовой массы через отверстия матрицы гранулятора фактический диаметр гранулы может быть ограничен лишь модулем помола исходного сырья, что позволяет уменьшить диаметр гранул корма до соответствия зоотехническим требованиям для мальков рыб определенной массы.

Для обоснования рациональной ширины матрицы корзинного гранулятора следует рассмотреть особенности формуемого в процессе гранулирования в некие конгломераты влажного сырья.

Корма для объектов аквакультуры ранних возрастов, в частности растительноядных и всеядных рыб, имеют достаточно вариативную и сложную рецептуру, включающую разные виды растительного и животного сырья. Основным видом сырья – это измельченное, преимущественно на молотковых дробилках, зерновое сырье, состоящее из граненых частиц –

крупы и мучной фракции. При увлажнении мучная фракция становится тестом с соответствующими свойствами, крупяная, намокая по поверхности, достаточно долго остается твердой. Также в составе стартерных кормов для рыб имеется большая доля рыбной, мясокостной, реже крилевой муки, характеризующихся высоким содержанием жиров. Жиры также обязательно вводят в корм дополнительно в жидком виде. Меньшее содержание в корме имеют минеральные и витаминные добавки, с разной степенью растворимости в воде и жире.

Поэтому увлажненный для экструзии корм представляет собой суспензию с низким коэффициентом внутреннего трения и достаточно варьируемыми реологическими свойствами из-за широкой вариации рецептур.

К тому же в процессе обработки свойства образованной на основе муки и воды кормовой смеси меняются. В ней происходит активный процесс трансформации нативного крахмала в водорастворимые углеводы, заключающаяся в его клейстеризации и разжижении. Вязкость суспензии начинает резко возрастать, и она из суспензии с классической внутренней структурой превращается в гелеобразную.

Однако достаточно высокое содержание жиров в корме для мальков рыбы (до 20% в некоторых рецептах) приводит к тому, что вязкость этих смесей также изменяется во времени. При соединении с водой жиры образуют эмульсии, то есть гетерогенные смеси, в которых одна жидкость диспергирована в другой. Их плотность меньше, чем у воды, следовательно, и вязкость ниже.

Белки, имеющиеся в кормах (клейковина и другие растительные и животные белки) также достаточно сложно взаимодействуют с водой в течение времени. Большинство белков обладает гидрофильными свойствами, то есть способностью легко взаимодействовать с молекулами воды. В итоге полная и всесторонняя оценка реологических свойств увлажненного корма может являться достаточно нетривиальной задачей. Более того, учи-

таявая то, что процесс гранулирования является динамическим и такая сложная масса находится под давлением, конструктивные особенности корзинного гранулятора должны учитывать эти особенности.

Рассмотрим первоначальное движение продукта в фильере матрицы в процессе влажного гранулирования. При движении внутри канала фильеры (рис. 2) соприкасающиеся твердые частицы суспензии, имеющие с металлической поверхностью более высокий коэффициент трения, притормаживаются и легко проворачиваются, тем самым увеличивая пористость гранулы. А так как более пористые гранулы быстрее раскисают в водной среде, имеет смысл уменьшить толщину матрицы до величины, обеспечивающей ее жесткость при продавливании массы рабочей лопастью корзинного гранулятора. Из конструктивных соображений была принята сетчатая цилиндрическая матрица толщиной матрица $\rho = 3$ мм, с круглыми отверстиями диаметра 2 мм, размещенными по шестиугольнику с шагом 3,6 мм, «живое» сечение матрицы 25 или 38 %.

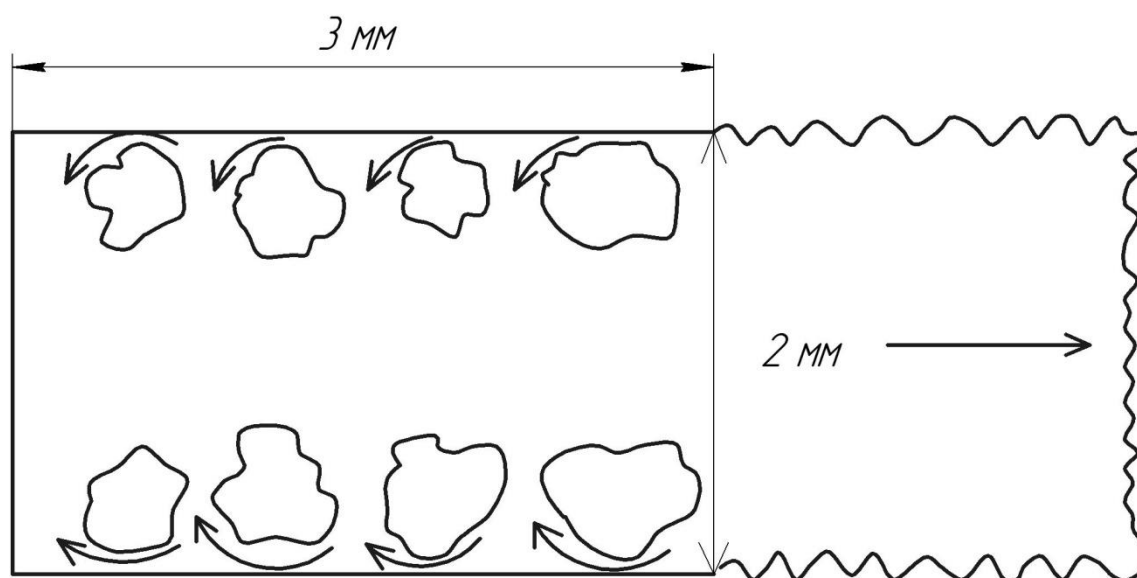


Рисунок 2 – Схема движения суспензии сырья в фильере матрицы корзинного гранулятора

Принцип работы корзинного гранулятора основан на взаимодействии двух рабочих роторов (рис. 3а). Ротор 1 с экструзионными лопастями или экструзионный, непосредственно выполняет операцию проталкивания увлажненной кормовой массы сквозь отверстия (фильеры) матрицы 3. Ротор 2 нагнетательный, снабжен по верхней части подобием ножевой кромки. Он отделяет от подаваемой в бункер вязкой кормовой массы некоторую часть и нагнетает ее к экструзионным лопастям ротора 1, блокируя при этом вспучивание массы в обратном направлении. Работа подобной конструктивной схемы возможна лишь при разнонаправленном вращении роторов.

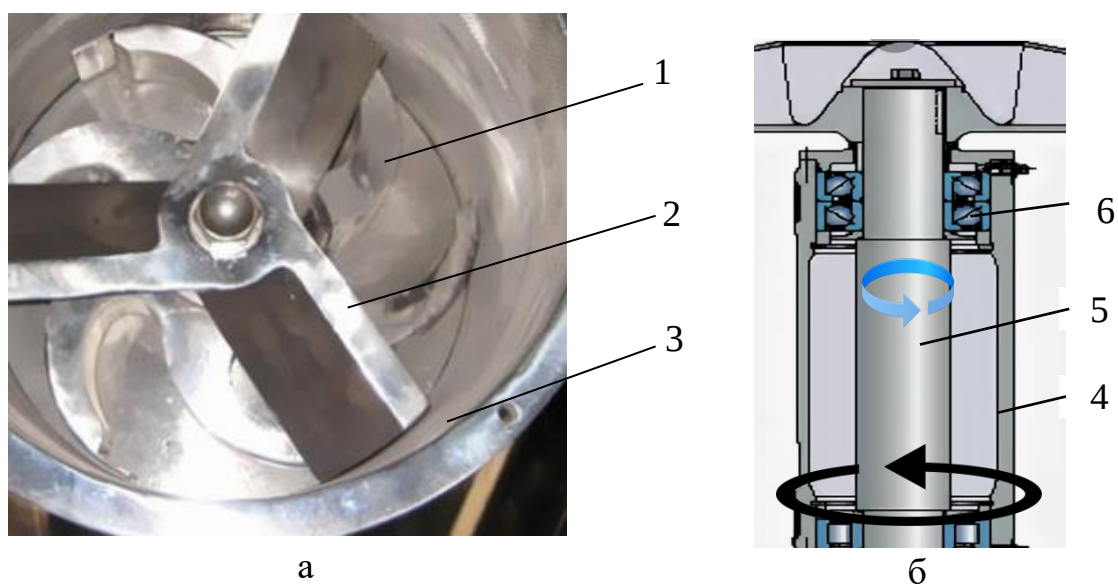


Рисунок 3 – Вид рабочих роторов и схема привода корзинного гранулятора

Обеспечить такое вращение возможно, лишь используя привод рабочих роторов, называющийся «вал в валу» (рисунок 3б). Вал 4 экструзионного ротора обязательно трубчатый, в котором размещен вал 5 нагнетающего ротора и подшипниковый узел 6. Недостатком подобной конструкции является ограничение крутящего момента, передаваемого приводом на роторы, дополнительно усиливающееся необходимостью шлицевого соединения вал-ротор. Поэтому при конструировании рабочей камеры гра-

нулятора по результатам предварительного прочностного расчета ограничили диаметром корзины $\varnothing = 300$ мм – внутренний. Валы, работающие преимущественно на скручивание, рекомендуется изготавливать из стали 40ХНМА, применяемой для торсионов.

Касательно рабочих органов было определено, что нагнетающий ротор 2 является вспомогательным, имеет простое конструктивное исполнение и отдельной оптимизации не требует.

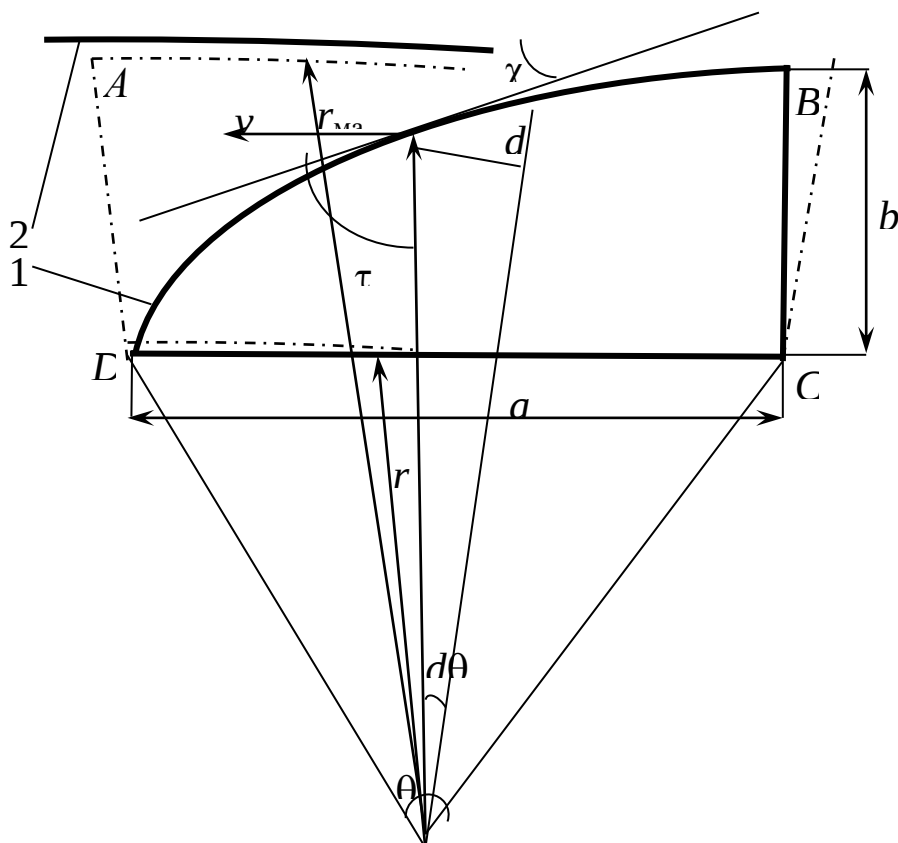
Экструзионный ротор 1 является основным энергопотребляющим рабочим органом корзинного гранулятора и, соответственно, его конструктивное исполнение оказывает определяющее воздействие на весь технологический процесс. Вследствие различных функций, выполняемых лопастью экструзионного ротора, целесообразно рассмотреть отдельно процессы нагнетания массы, ее прохождения через формирующие отверстия (фильеры) и отделения гранулы, с целью определения оптимальных конструктивных параметров.

Так как экструзионная лопасть должна обеспечить прохождение максимального количества корма, продавливаемого сквозь матрицу, за один оборот вала, то главную роль в организации процесса гранулирования играет обеспечение фиксации материала между лопастью и матрицей, и, таким образом, создания условий, не позволяющих массе вращаться вместе с ротором, а именно обеспечить «защемление» сырья с последующим проталкиванием его массы через фильеру.

Добиться наилучшей фиксации массы корма в рабочей камере гранулятора возможно путем обоснования оптимальной формы образующей лопасти в области прилегания к матрице (рис. 4).

Из анализа рис. 4 следует, что в рабочей камере корзинного гранулятора наиболее приемлема форма нагнетающего ножа (рассекателя) с образующей в виде кривой, повторяющей участок логарифмической спирали, или с постоянным углом защемления $\chi = \text{const}$. Увеличение χ по длине ло-

пасти приведет к непроталкиванию массы сквозь матрицу и образованию тела волочения; уменьшение угла χ – к постепенному уменьшению скорости движения сырья в фильере за один цикл прохода и далее к неоправданному увеличению размера лопасти.



1 – образующая лопасти; 2 – образующая матрицы; r – расстояние от центра вращения до некоторой точки на образующей лопасти; r_0 – минимальное расстояние от центра вращения до ближайшей точки на образующей лопасти; χ – угол защемления массы; τ – угол скольжения; η – угол атаки лопасти; v – вектор относительной скорости; a – рабочая длина лопасти (непосредственно проталкивающая); b – высота участка лопасти (непосредственно проталкивающая); θ – текущий угол выталкивающей части лопасти; $ABCD$ – плоскость, освобождаемая от массы при повороте лопасти на угол θ

Рисунок 4 – Конструктивная схема работы экструзионной лопасти

корзинного гранулятора

Так как $\tau = \frac{\pi}{2} - \chi$, то можем записать:

$$dr = \frac{rd\theta}{\operatorname{tg} \tau} \quad (1)$$

Проинтегрировав выражение (1) получим:

$$r = e^{\frac{\Theta}{\operatorname{tg} \tau}} + c \quad (2)$$

где c – постоянная интегрирования.

При начальном $\theta = 0$ $c = r_0$.

Тогда

$$r = r_0 + e^{\frac{\Theta}{\operatorname{tg} \tau}} \quad (3)$$

Отсюда

$$\Theta = \ln(r - r_0) \cdot \operatorname{tg} \tau \quad (4)$$

Из рисунка 3 видим, что $b = r_{\max} - r_0$ и, принимая допущение, что дуга $\cap CD = a$, получим:

$$\frac{a}{2} = r_0 \cdot \operatorname{tg} \frac{\Theta}{2} \quad (5)$$

Подставив выражение (4) в выражение (5), имеем:

$$a = 2r_0 \operatorname{tg} \frac{\ln b \cdot \operatorname{tg} \tau}{2} \quad (6)$$

Задаваясь значениями $\tau = 72^\circ$ (двойной угол трения – влажный комбикорм-сталь) и $b = 0,1$ м, получаем следующие рациональные соотношения геометрических параметров лопасти экструзионного ротора a и r_0 (табл.).

Таблица – Значения рациональных геометрических параметров экструзионной лопасти корзинного экструдера

Минимальное расстояние от центра вращения до образующей лопасти r_0 , м	0,149	0,130	0,112
Рабочая длина лопасти a , м	0,181	0,159	0,137

Учитывая, что любую кривую на некотором участке и с некоторым приближением можно описать окружностью, участок логарифмической

кривой был описан окружностью $R74,5$ со смещением центра против направления движения (рис. 5). Далее форма обратной стороны экструзионной лопасти и переменная толщина были приняты конструктивно, так чтобы не допустить прогиба лопасти в работе.

Максимальное количество экструзионных лопастей гранулятора при такой конструкции и форме не может превышать шести, однако для корзинного гранулятора необходимо определить рациональные режимные характеристики, энергетическую насыщенность рабочего процесса и их соответствие прочностным возможностям приводных валов. Предварительный прочностной расчет показал достаточность трехлопастного экструзионного ротора для работы с матрицами с малым диаметром фильер с некоторым запасом по прочности внутреннего вала на кормах влажностью свыше 25 %.

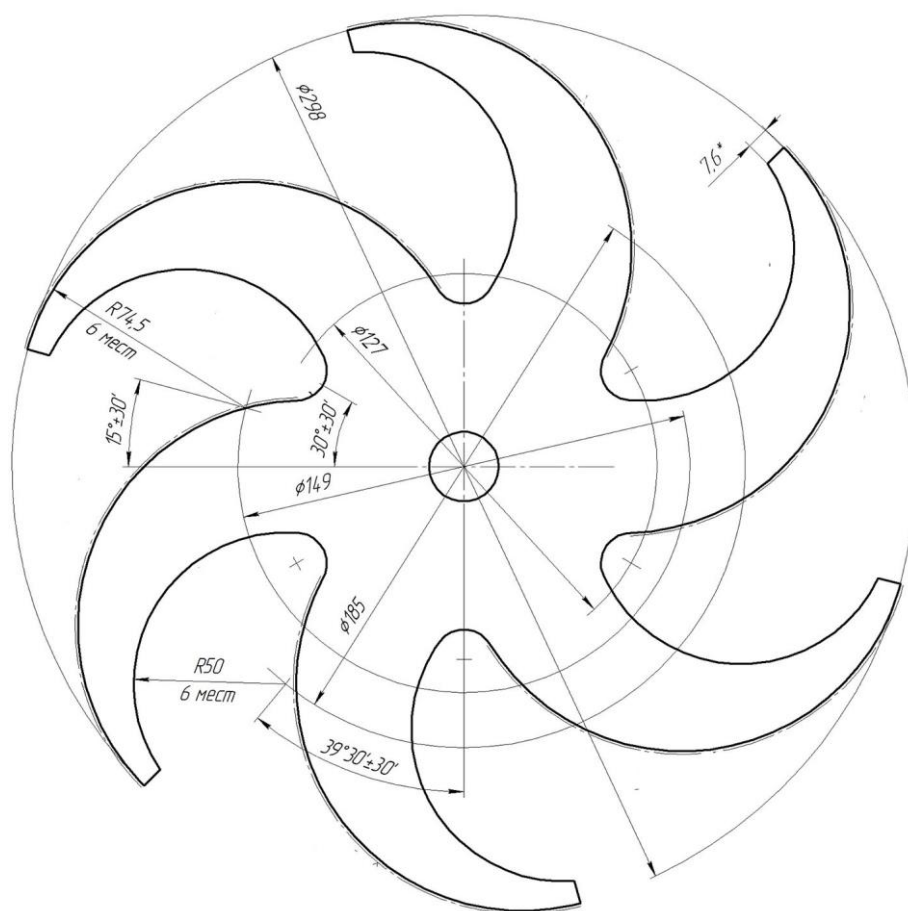


Рисунок 5 – Результат обоснования конструкции (геометрических параметров) экструзионной лопасти рабочего ротора корзинного гранулятора

Выводы. Таким образом, была теоретически обоснована рациональная конструктивная схема корзинного гранулятора для влажного гранулирования кормов.

Использование гранулятора с обоснованной конструктивной схемой позволит производить из влажного, преимущественно растительного сырья, качественные комбикорма для рыб с водостойкими гранулами малого диаметра. Это также позволит производить гранулированный корм для рыб и их мальков, соответствующий зоотехническим требованиям к качеству кормов по водостойкости.

В результате выполненной научной работы отечественная промышленность сможет освоить выпуск импортозамещенных корзинных грануляторов, что и позволит наладить выпуск российских гранулированных кормов для аквакультуры.

Список литературы

1. Анализ рынка продукции аквакультуры и кормов // Комбикорма. 2024. № 2. С. 32-33.
2. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An overview of aquafeed formulation and processing // Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture. 2015. С. 227-240.
3. Blagov D.A., Gizatov A.Y., Smakuyev D.R., и др. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Т. 613, № 1. С. 012018.
4. Fekete R., Peciar P., Juriga M., Gužela Š. и др. 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. Т. 8, № 3. С. 127.
5. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S. Performance comparison of dome and basket extrusion granulation // Chemical Engineering Research and Design. 2020. Т. 160. С. 190-198.
6. Пахомов В.И., Брагинец 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. – С. 32–34.
7. Брагинец С.В., Бахчевников О.Н., Деев К.А. Исследование процесса гранулирования корма для рыб в корзинном грануляторе // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 2. С. 27–32.
8. Куликов А.В., Литвинчук А.А., Куликова О.М., и др. Исследование возможно-

сти и определение параметров получения микрогранул рыбных комбикормов для выращивания мальков // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2019. Т. 12, № 2. С. 43-51.

9. Peeters M., Jiménez A.A.B., Matsunami K., и др. Analysis of the effect of formulation properties and process parameters on granule formation in twin-screw wet granulation // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Т. 650. С. 123671.

10. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that affect pellet quality: a review // Journal of Agricultural Science and Technology. 2015. Т. 9, № 2. С. 717-722.

11. Dujmović M., Šafran B., Jug M., Radmanović K., Antonović A. Biomass Pelletizing Process: A Review // Drvna Industrija. 2022. Т. 73, № 1. С. 99-106.

12. Singh M., Shirazian S., Ranade V. и др. Challenges and opportunities in modelling wet granulation in pharmaceutical industry – a critical review // Powder Technology. 2022. Т. 403. С. 117380.

13. Chen P., Ansari M.J., Bokov D., и др. A review on key aspects of wet granulation process for continuous pharmaceutical manufacturing of solid dosage oral formulations // Arabian Journal of Chemistry. 2022. Т. 15, № 2. С. 103598.

14. Franke M., Riedel T., Meier R., Schmidt C., Kleinebudde P. Comparison of scale-up strategies in twin-screw wet granulation // International Journal of Pharmaceutics. 2023. Т. 641. С. 123052.

References

1. Analiz rynku produkcji akvakul'tury i kormov // Kombikorma. 2024. № 2. S. 32-33.
2. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An overview of aquafeed for-mulation and processing // Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture. 2015. S. 227-240.
3. Blagov D.A., Gizatov A.Y., Smakuyev D.R., i dr. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Т. 613, № 1. S. 012018.
4. Fekete R., Peciar P., Juriga M., Gužela Š. i dr. 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. Т. 8, № 3. S. 127.
5. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S. Performance comparison of dome and basket extrusion granulation // Chemical Engineering Research and Design. 2020. Т. 160. S. 190-198.
6. Pahomov V.I., Braginec S.V., Alferov A.S., Bahchevnikov O.N., Deev K.A. Kor-zinnyj granuljator dlja prigotovlenija kormov v akvakul'ture // Tehnika i oborudovanie dlja sela. – 2022. – № 12. – S. 32–34.
7. Braginec S.V., Bahchevnikov O.N., Deev K.A. Issledovanie processa granuliro-vanija korma dlja ryb v korzinnom granuljatore // Agroinzhenerija. 2024. Т. 26, № 2. S. 27–32.
8. Kulikov A.V., Litvinchuk A.A., Kulikova O.M., i dr. Issledovanie vozmozhno-sti i opredelenie parametrov poluchenija mikrogranul rybnih kombikormov dlja vyra-shhivaniya mal'kov // Pishhevaja promyshlennost': nauka i tehnologii. 2019. Т. 12, № 2. S. 43-51.
9. Peeters M., Jiménez A.A.B., Matsunami K., i dr. Analysis of the effect of formulation properties and process parameters on granule formation in twin-screw wet granulation // International Journal of Pharmaceutics. 2024. Т. 650. S. 123671.
10. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that affect pellet quality: a review // Journal of Agricultural Science and Technology. 2015. Т. 9, № 2. S. 717-

722.

11. Dujmović M., Šafran B., Jug M., Radmanović K., Antonović A. Biomass Pelletizing Process: A Review // *Drvna Industrija*. 2022. T. 73, № 1. S. 99-106.

12. Singh M., Shirazian S., Ranade V. i dr. Challenges and opportunities in modelling wet granulation in pharmaceutical industry – a critical review // *Powder Technology*. 2022. T. 403. S. 117380.

13. Chen P., Ansari M.J., Bokov D., i dr. A review on key aspects of wet granulation process for continuous pharmaceutical manufacturing of solid dosage oral formulations // *Ara-bian Journal of Chemistry*. 2022. T. 15, № 2. S. 103598.

14. Franke M., Riedel T., Meier R., Schmidt C., Kleinebudde P. Comparison of scale-up strategies in twin-screw wet granulation // *International Journal of Pharmaceutics*. 2023. T. 641. S. 123052.