

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.363.28:636.085.62:639.3.043.2

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-47-53>

Оптимизация энергоемкости процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе

С.В. Брагинец¹, В.И. Пахомов², О.Н. Бахчевников^{3✉}, А.С. Алферов⁴, К.А. Деев⁵^{1,2,3,4,5} Аграрный научный центр «Донской»; г. Зерноград, Россия^{1,2} Донской государственный технический университет; г. Ростов-на-Дону, Россия¹ sbraginet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>² vnizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>³ oleg-b@list.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>⁴ alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>⁵ prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

Аннотация. Влажное гранулирование растительного сырья с целью приготовления гранулированного корма малого диаметра для рыб и их мальков целесообразно проводить в корзинном грануляторе. Экспериментальные исследования проведены с целью установления рациональных значений факторов влажного гранулирования, обеспечивающих его низкую удельную энергоемкость. В корзинном грануляторе корм из растительного сырья для мальков рыб гранулировали, получая гранулы диаметром 2 мм и длиной 4 мм. В результате предварительных исследований установлены три наиболее значимых фактора, влияющих на процесс влажного гранулирования растительного сырья и удельную энергоемкость гранулирования: влажность сырья, модуль помола сырья и частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора. В качестве критерия оптимизации процесса влажного гранулирования растительного сырья была принята удельная энергоемкость процесса. Эксперимент проводили при следующих значениях факторов: влажность корма – 30, 35 и 40%; модуль его помола – 0,82, 1,24 и 1,66 мм; частота вращения рабочих органов гранулятора – 40, 50 и 60 мин⁻¹. Полученное уравнение регрессии адекватно описывает процесс влажного гранулирования корма. Установленные оптимальные значения удельной энергоемкости влажного гранулирования кормов, равные 1,9...2,3 кВт·ч/т, достигаются при следующих рациональных значениях факторов: влажность сырья – 40...42%; модуль его помола – 1,6...1,7 мм; частота вращения рабочих органов гранулятора – 60...62 мин⁻¹. При соблюдении указанных значений получают водостойкие гранулы и обеспечивается минимальная удельная энергоемкость гранулирования.

Ключевые слова: влажное гранулирование, корзинный гранулятор, гранулы, растительное сырье, корм для рыб, влажность сырья, модуль помола сырья, частота вращения рабочих органов гранулятора, удельная энергоемкость гранулирования

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр "Донской"».

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Для цитирования: Брагинец С.В., Пахомов В.И., Бахчевников О.Н., Алферов А.С., Деев А.С. Оптимизация энергоемкости процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 47-53. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-47-53>

ORIGINAL ARTICLE

Optimizing the energy intensity of wet granulation of feed in a basket granulator

S.V. Braginet¹, V.I. Pakhomov², O.N. Bakhchevnikov^{3✉}, A.S. Alferov⁴, K.A. Deev⁵^{1,2,3,4,5} Agricultural Research Centre "Donskoy"; Zernograd, Russia^{1,2} Don State Technical University; Rostov-on-Don, Russia¹ sbraginet@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>² vnizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>³ oleg-b@list.ru ✉; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>⁴ alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>⁵ prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

Abstract. Wet granulation of plant-based raw materials is necessary to prepare granulated feed of small diameter for fish and their fry. A basket granulator is a feasible solution for this process. The authors performed experimental

studies to establish rational values of factors of wet granulation, providing its low specific energy intensity. Fish fry feed from plant material was pelleted in a basket granulator to get pellets with a diameter of 2 mm and a length of 4 mm. Three most significant factors affecting the process of wet granulation of plant-based raw materials and specific energy intensity of granulation were established after preliminary studies: moisture content of raw materials, grinding modulus of raw materials and rotation speed of the granulator's operating parts. Specific energy intensity of granulation was accepted as a criterion for optimizing the wet granulation process of plant-based raw materials. The experiment was conducted at the following values of factors: a feed moisture content of 30, 35, and 40%; its grinding modulus 0.82, 1.24, and 1.66 mm; a rotation speed of granulator operating parts of 40, 50 and 60 min⁻¹. The obtained regression equation adequately describes the process of wet granulation. The established optimal values of specific energy intensity of wet granulation of feeds, equal to 1.9 to 2.3 kW·h·t⁻¹, are achieved at the following rational values of factors: a raw material moisture content of 40 to 42%; a grinding modulus of 1.6 to 1.7 mm; a rotation speed of the granulators operating parts of 60 to 62 min⁻¹. Obtaining waterproof granules at the minimum specific energy intensity of granulation is possible on condition that the specified values of factors are observed.

Keywords: wet granulation, basket granulator, granules, plant-based raw material, fish feed, feed moisture, feed grinding modulus, rotation speed of the granulator's operating elements, specific energy intensity of granulation

Funding. The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Agrarian Science Center "Donskoy".

Acknowledgements. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

For citation: Braginets S.V., Pakhomov V.I., Bakhchevnikov O.N., Alferov A.S., Deev A.S. Optimizing the energy intensity of wet granulation of feed in a basket granulator. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):47-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-47-53>

Введение

При производстве кормов для аквакультуры проблематичным является приготовление для мальков рыб гранулированного корма с диаметром гранул менее 2 мм [1]. Причиной этого является то, что широко используемые в промышленности пресс-грануляторы с вертикальной кольцевой матрицей не могут изготавливать такие гранулы из растительного сырья с приемлемой энергоемкостью [2].

Гранулы корма для пресноводных рыб изготавливают способом влажного гранулирования при влажности сырья 30...40% [3]. Этот способ позволяет получать водостойкие гранулы, но требует повышенных затрат энергии при использовании грануляторов с вращающейся кольцевой матрицей [4]. Энергоемкость процесса гранулирования значительно увеличивается при уменьшении диаметра фильера, и производство гранул корма диаметром менее 2 мм становится нерентабельным [5].

Решить проблему производства гранул корма диаметром 1...2 мм можно с помощью корзинного гранулятора [6, 7]. Стенка корзины гранулятора служит неподвижной кольцевой матрицей. Внутри корзины вращаются в противоположных направлениях два вида рабочих органов. Рассекатели перемешивают влажное сырье, разбивая агломераты, а размещенные ниже лопасти выдавливают его через фильеры кольцевой матрицы, формируя в горизонтальной плоскости гранулы.

Ранее корзинный гранулятор не применяли для приготовления кормов из растительного сырья, и процесс его работы почти не изучен. В частности, неизвестно влияние различных факторов на энергоемкость гранулирования и их значимость. В связи с этим необходимо провести экспериментальные исследования процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе по уменьшению его энергоемкости.

Цель исследований: выявить факторы, влияющие на удельную энергоемкость процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, и определить их рациональные значения для оптимизации энергопотребления.

Материалы и методы

Эксперимент выполнили на корзинном грануляторе, разработанном и изготовленном в Аграрном научном центре «Донской» по патенту RU218265 (рис. 1). Диаметр и длина канала фильеры корзинного гранулятора составили 2 мм.

В результате предварительных исследований выделили три наиболее значимых фактора, влияющих на процесс влажного гранулирования растительного сырья: W – влажность сырья, %; M – модуль помола сырья, мм; f – частота вращения рабочих органов корзинного гранулятора, мин⁻¹. В результате экспериментов было установлено, что температура сырья не оказывает существенного влияния на энергоемкость процесса гранулирования.

Для математического описания процесса гранулирования был принят нелинейный полином второго порядка.

При планировании эксперимента применен некомпозиционный трехуровневый план Бокса-Бенкена второго порядка для трех факторов [8, 9]. В результате предварительных экспериментов были выбраны уровни варьирования факторов (табл.).

В качестве критерия оптимизации процесса влажного гранулирования растительного сырья была принята удельная энергоёмкость гранулирования E . Целью оптимизации являлось достижение минимальных значений этого критерия.

Статистическую обработку экспериментальных данных выполнили в программе Statistica 12.0. Значимость коэффициентов уравнения регрессии определяли по критерию Стьюдента. Адекватность полученного уравнения проверяли критерием Фишера [10].

Рациональные значения сочетания факторов, при которых достигается оптимальная (минимальная) удельная энергоёмкость процесса гранулирования, были определены методом «наискорейшего спуска» (Бокса-Уилсона), посредством которого были найдены области экстремума поверхностей отклика уравнения регрессии [11].

Энергоёмкость процесса гранулирования определяли при помощи регистратора параметров электрических сигналов РП-ЭС 1 БМ, который измерял действующие значения фазных токов и линейного напряжения в трехфазной сети при работе гранулятора и передавал их на компьютер. По известным формулам вычисляли потребляемую корзи́нным гранулятором электрическую мощность и, разделив ее на массу гранулированного корма, получали удельную энергоёмкость процесса гранулирования.

В соответствии с планом эксперимента растительное сырье измельчали в молотковой дробилке до получения продуктов с модулем помола 0,82; 1,24; 1,66 мм.

Сырье смешивали в горизонтальном смесителе, получая корм для мальков карпа, в соотношении: 60% – зерно пшеницы; 30% – бобы сои; 10% – белково-минеральные добавки.

При смешивании сырье увлажняли горячей водой (температура – 70°C) для лучшего связывания частиц сырья между собой, желатинизации крахмала и увеличения плотности гранул [12]. Из полученного рассыпного корма влажностью 30, 35 и 40% с помощью корзи́нного гранулятора формировали гранулы

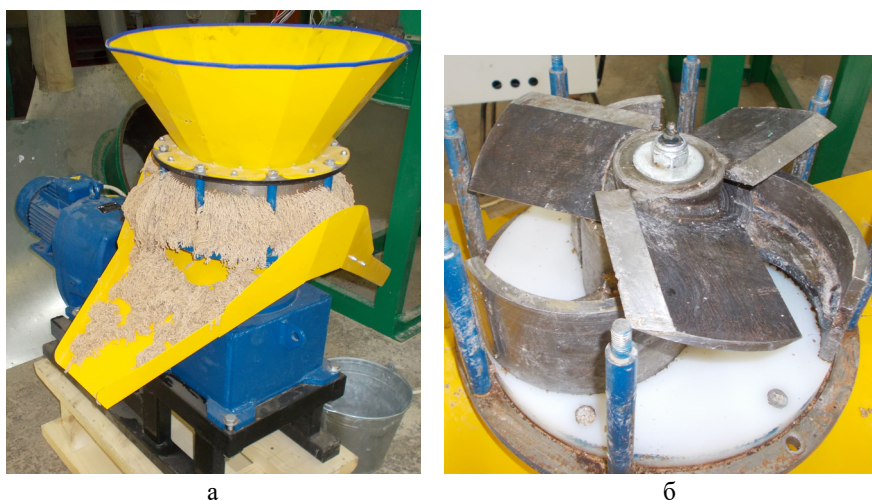


Рис. 1. Корзи́нный гранулятор: а – общий вид; б – рабочие органы

Fig. 1. Basket granulator: a – general view, b – operating elements

Факторы и уровни их варьирования

Таблица

Factors and their variation levels

Table

Фактор, единицы измерения <i>Factor name, units of measurement</i>	Уровень фактора / <i>Factor level</i>		
	–1	0	+1
Влажность сырья, % / <i>Raw material moisture, %</i>	30	35	40
Модуль помола сырья, мм / <i>Raw material grinding modulus, mm</i>	0,82	1,24	1,66
Частота вращения рабочих органов гранулятора, мин ^{–1} <i>Rotation speed of granulator's operating elements, min^{–1}</i>	40	50	60

диаметром 2 мм. Частота вращения рабочих органов корзиночного гранулятора, изменяемая посредством трехфазного частотного преобразователя, составляла 40, 50 и 60 мин⁻¹.

Выходящие из фильер матрицы стренги корма отрезали при помощи установленного снаружи корзины гранулятора режущего механизма (патент RU218265, который на рисунке 1 не показан), формируя гранулы длиной 4 мм.

Результаты и их обсуждение

После статистической обработки результатов экспериментов было получено уравнение регрессии в закодированном виде, описывающее процесс влажного гранулирования корма, и определен коэффициент корреляции R :

$$y = 1,98 + 0,19x_1 + 0,65x_2 - 0,88x_3 + 0,08x_1x_2 + 0,16x_1x_3 + 0,55x_2x_3 + 0,34x_1^2 + 0,48x_2^2 + 0,36x_3^2,$$

$$R = 0,9602,$$

где y – удельная энергоёмкость гранулирования, кВт·ч/т; x_1 – влажность сырья, %; x_2 – модуль помола сырья, мм; x_3 – частота вращения рабочих органов гранулятора, мин⁻¹.

Уравнение регрессии адекватно описывает процесс влажного гранулирования корма, так как величина критерия Фишера, равная 2,64, меньше табличного значения, равного 2,66.

Заменив кодированные значения факторов натуральными, получили математическую

зависимость критерия оптимизации от варьируемых факторов:

$$E = 2,68 + 0,34W + 0,89M - 1,09f + 0,33WM + 0,49Wf + 0,92Mf + 0,54W^2 + 0,71M^2 + 0,91f^2.$$

Данное уравнение регрессии методом канонического преобразования свели к уравнениям с двумя факторами, построив на их основе поверхности отклика и их частные двумерные сечения. При этом значение третьего фактора оставалось на постоянном уровне.

Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельной энергоёмкости гранулирования от влажности сырья и модуля его помола, представлено на рисунке 2. Из графика следует, что наилучший результат, при котором удельная энергоёмкость гранулирования составляет 2,3 кВт·ч/т, достигается при значениях модуля помола сырья 1,6...1,7 мм и его влажности 40...42%. Увеличение значений модуля помола сырья и его влажности до указанных значений снижает удельную энергоёмкость гранулирования.

Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельной энергоёмкости гранулирования от влажности сырья и частоты вращения рабочих органов гранулятора, показано на рисунке 3.

Из графика рисунка 3 следует, что оптимальные значения удельной энергоёмкости процесса гранулирования лежат за пределами области экспериментальных исследований. Данные рисунка 3 показывают, что увеличение влажности сырья и частоты

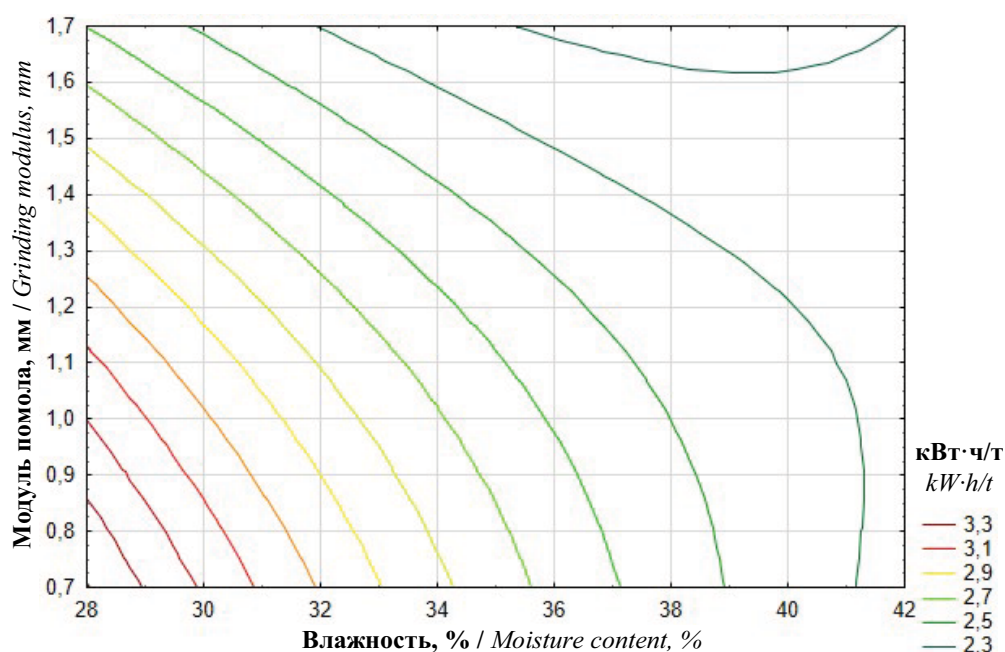


Рис. 2. Влияние влажности сырья и модуля его помола на удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования (частота вращения рабочих органов $f = 50$ мин⁻¹)

Fig. 2. Effect of raw material moisture content and its grinding modulus on the specific energy intensity of wet granulation (rotation speed $f = 50$ min⁻¹)

вращения рабочих органов гранулятора снижает удельную энергоёмкость. При этом частота вращения рабочих органов является более значимым фактором, чем влажность сырья.

Из имеющихся экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для достижения минимальной удельной энергоёмкости 1,9...2,1 кВт·ч/т

необходимо обеспечить влажность сырья 40...42% и частоту вращения рабочих органов 60...62 мин⁻¹.

Двумерное сечение поверхности отклика, характеризующее зависимость удельной энергоёмкости гранулирования от модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов гранулятора, показано на рисунке 4.

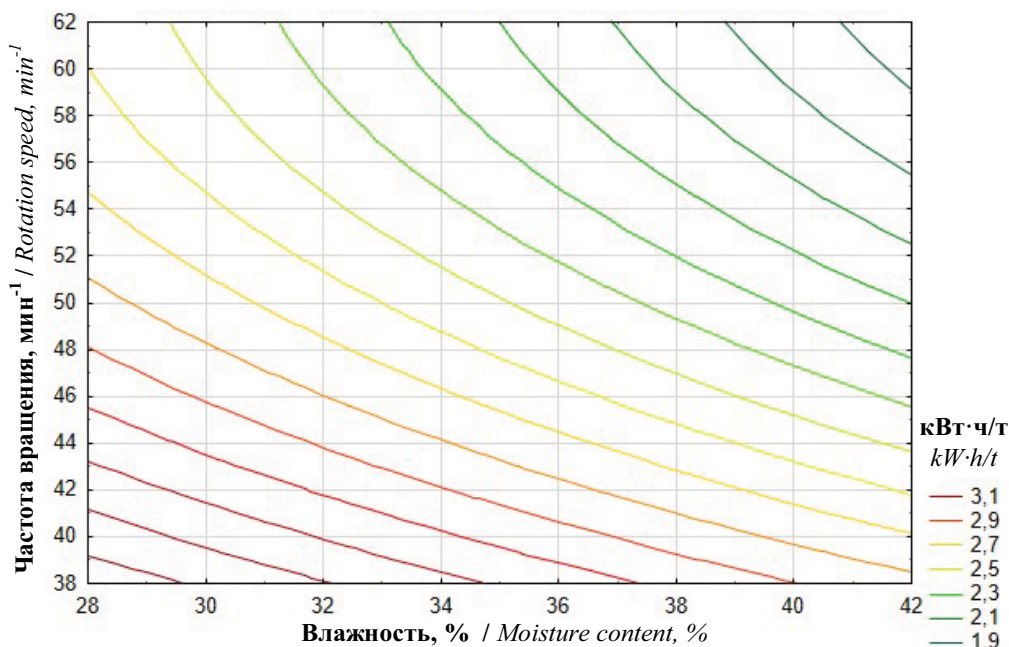


Рис. 3. Влияние влажности сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования (модуль помола $M = 1,24$ мм)

Fig. 3. Effect of raw material moisture content and rotation speed of the basket granulator on the specific energy intensity of wet granulation (grinding modulus $M = 1.24$ mm)

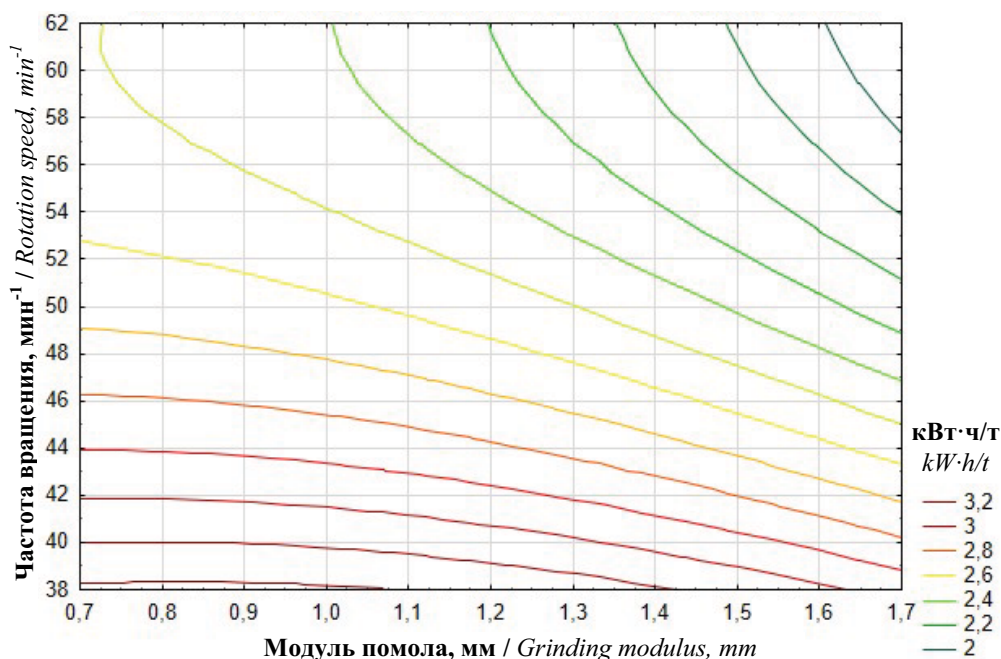


Рис. 4. Влияние модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора на удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования (влажность сырья $W = 35\%$)

Fig. 4. Effect of raw material grinding modulus and rotation speed of the granulator on the specific energy intensity of wet granulation (raw material moisture $W = 35\%$)

Из графика рисунка 4 следует, что и в данном случае оптимальные значения удельной энергоёмкости процесса гранулирования лежат за пределами области экспериментальных исследований. Увеличение модуля помола сырья и частоты вращения рабочих органов снижает удельную энергоёмкость гранулирования влажного корма. При этом частота вращения экструзионных лопастей гранулятора является более значимым фактором, чем модуль помола сырья. Можно сделать вывод о том, что для достижения минимальной удельной энергоёмкости процесса $2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$ необходимо обеспечить модуль помола сырья $1,6 \dots 1,7 \text{ мм}$ и частоту вращения рабочих органов $58 \dots 62 \text{ мин}^{-1}$.

Таким образом, для снижения удельной энергоёмкости процесса влажного гранулирования необходимо увеличивать влажность сырья, модуль его помола, а также частоту вращения рабочих органов корзинного гранулятора. Однако увеличивать значения этих параметров можно лишь до определенных пределов.

Методом «наискорейшего спуска» (Бокса-Уилсона) нашли оптимальные (минимальные) значения удельной энергоёмкости процесса влажного гранулирования.

Анализ полученных графических зависимостей позволил выявить область рациональных значений параметров процесса влажного гранулирования кормов: влажность сырья – $40 \dots 42\%$; модуль помола сырья – $1,6 \dots 1,7 \text{ мм}$; частота вращения рабочих органов гранулятора – $60 \dots 62 \text{ мин}^{-1}$. При указанных значениях достигаются оптимальные наименьшие значения удельной энергоёмкости процесса, равные $1,9 \dots 2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

Объяснение закономерностей, установленных для процесса влажного гранулирования корма в корзинном грануляторе, может быть аналогичным известным закономерностям процесса гранулирования в пресс-грануляторе. Так, увеличение влажности сырья до рациональных значений способствует снижению удельной энергоёмкости гранулирования

вследствие уменьшения трения материала о стенки канала фильеры гранулятора [13].

В проведенных нами опытах наблюдалось снижение удельной энергоёмкости гранулирования при увеличении модуля помола с $0,7$ до $1,7 \text{ мм}$. Это объясняется выбранным диапазоном варьирования данного фактора, в который не входили слишком малые (менее $0,7 \text{ мм}$) и слишком большие (более $1,7 \text{ мм}$) значения, при которых наблюдается обратная тенденция повышения энергоёмкости [5].

Уменьшение удельной энергоёмкости процесса гранулирования при увеличении частоты вращения рабочих органов гранулятора объясняется сокращением времени, необходимого для гранулирования определенного количества сырья, вследствие увеличения скорости его продавливания через фильеры и образования гранул.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований были определены рациональные значения параметров процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе, позволяющие получать качественный гранулированный корм для рыб и обеспечивающие оптимальную низкую удельную энергоёмкость процесса.

Выводы

1. Для влажного гранулирования растительного сырья с целью приготовления гранулированного корма малого диаметра гранул для рыб и их мальков более всего подходит корзинный гранулятор.

2. На удельную энергоёмкость процесса влажного гранулирования растительного сырья в корзинном грануляторе преимущественно влияют три фактора: влажность сырья, модуль его помола, частота вращения рабочих органов гранулятора.

3. Оптимальные значения удельной энергоёмкости влажного гранулирования кормов, равные $1,9 \dots 2,3 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$, достигаются при влажности сырья $40 \dots 42\%$, модуле помола $1,6 \dots 1,7 \text{ мм}$ и частоте вращения рабочих органов гранулятора $60 \dots 62 \text{ мин}^{-1}$.

Список источников / References

1. Куликов А.В., Литвинчук А.А., Куликова О.М. и др. Исследование возможности и определение параметров получения микрогранул рыбных комбикормов для выращивания мальков // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2019. Т. 12, № 2. С. 43-51. EDN: XDDUJT

Kulikova A.V., Litvinchuk A.A., Kulikova O.M. et al. Investigation of opportunities and determination of parameters of production of microgranules of fish fodder for fry. *Food Industry: Science and Technologies*. 2019;12(2):43-51. (In Russ.) <https://foodindustry.belar.by/jour/article/view/402>

2. Blagov D.A., Gizatov A.Y., Smakuyev D.R. et al. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. *IOP Conference*

Series: Earth and Environmental Science. 2020;613:012018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018>

3. Kumaraguru Vasagam K.P., Ambasankar K., Dayal J.S. An overview of aquafeed formulation and processing. *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. 2015:227-240. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21

4. Nielsen S.K., Mando M., Rosenorn A.B. Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. *Powder Technology*. 2020;364:971-985. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051>

5. Dujmović M., Šafran B., Jug M. et al. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija*. 2022;73(1):99-106. <https://doi.org/10.5552/drind.2022.2139>

6. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S. 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>

7. Fekete R., Peciar P., Juriga M. 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>

8. Durakovic B. Design of experiments application, concepts, examples: State of the art. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2017;5(3):421-439.

9. Анисимов Н.П. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствии с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена // Вестник магистратуры. 2017. № 2-2. С. 32-36. (In Russ.) EDN: ZBMSQR

Anisimov N.P. On the use of experiment planning technique according to Box-Benken three-level plans. *Vestnik Magistratury*. 2017;2-2:32-36. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ **Брагинец Сергей Валерьевич**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник; SPIN-код: 4849-0287, AuthorID: 687835; sbraginets@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

² **Пахомов Виктор Иванович**, д-р техн. наук, директор, член-корреспондент РАН; SPIN-код: 5815-4913, AuthorID: 405383; vniizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

³ **Бахчевников Олег Николаевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; SPIN-код: 3350-9055, AuthorID: 640052; oleg-b@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>

⁴ **Алферов Александр Сергеевич**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; SPIN-код: 7803-6092, AuthorID: 698970; alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>

⁵ **Деев Константин Александрович**, инженер; SPIN-код: 9005-9443, AuthorID: 1195842; prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

^{1,2,3,4,5} Аграрный научный центр «Донской»; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Научный городок, 3

^{1,2} Донской государственный технический университет; 344003, Российская Федерация, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Вклад авторов

С.В. Брагинец – общее руководство экспериментальными исследованиями, проведение критического анализа результатов и формулирование выводов;

В.И. Пахомов – научное руководство, формулирование основной концепции исследований;

О.Н. Бахчевников – анализ данных литературы, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста;

А.С. Алферов – выполнение экспериментов и обработка их результатов;

К.А. Деев – выполнение экспериментов и обработка их результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 14.11.2024; поступила после рецензирования и доработки 22.02.2025; принята к публикации 24.02.2025

10. Szpisjak-Gulyás N., Al-Tayawi A.N., Horváth Z.H. et al. Methods for experimental design, central composite design and the Box–Behnken design, to optimise operational parameters: A review. *Acta Alimentaria*. 2023;52(4):521-537. <https://doi.org/10.1556/066.2023.00235>

11. Kleijnen J.P. Response surface methodology for constrained simulation optimization: An overview. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2008;16(1):50-64. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.10.001>

12. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C. et al. Influence of input and control parameters on the process of pelleting powdered biomass. *Energies*. 2021;14:4104. <https://doi.org/10.3390/en14144104>

13. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G. et al. 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>

Author Information

Sergey V. Braginets¹, DSc (Eng), Lead Research Engineer; sbraginets@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

Viktor I. Pakhomov², DSc (Eng), Corresponding Member of the RAS, Director; vniizk30@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

Oleg N. Bakhchevnikov³, CSc (Eng), Senior Research Engineer; oleg-b@list.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>

Aleksandr S. Alferov⁴, PhD (Eng), Senior Researcher; alfa-8303@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5210-781X>

Konstantin A. Deev⁵, Engineer; prosto.deev@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

^{1,2,3,4,5} Agricultural Research Centre "Donskoy"; 3, Nauchny Gorodok Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russia

^{1,2} Don State Technical University; Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344003, Russia

Author Contribution

S.V. Braginets – project administration, formal analysis, conclusions; V.I. Pakhomov – research supervision, conceptualization; O.N. Bakhchevnikov – literature review, writing – original version draft, review and editing;

A.S. Alferov – investigation, data curation, analysis;

K.A. Deev – investigation, data curation, analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 14.11.2024; Revised 22.02.2025; Accepted 24.02.2025