

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.929: 636.085.55:639.3.043

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-27-32>

## Исследование процесса гранулирования корма для рыб в корзинном грануляторе

*С.В. Брагинец<sup>1</sup>, О.Н. Бахчевников<sup>2✉</sup>, К.А. Деев<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Аграрный научный центр «Донской»; г. Зерноград, Россия<sup>1</sup> [sbraginet@mail.ru](mailto:sbraginet@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692><sup>2</sup> [oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627><sup>3</sup> [prosto.deev@yandex.ru](mailto:prosto.deev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

**Аннотация.** Приготовление гранулированных кормов для аквакультуры из влажного сырья целесообразно выполнять в корзинном грануляторе. Процесс работы корзинного гранулятора плохо изучен, а рациональные параметры его работы не получили научного обоснования. Разработан корзинный гранулятор, обеспечивающий гранулирование влажного сырья и позволяющий получать корм для рыб и их мальков в виде гранул диаметром 0,5...2 мм и влажностью 25...40%. Выполнили экспериментальные исследования для установления рациональных параметров гранулирования, обеспечивающих высокую производительность. Исследования процесса гранулирования влажного сырья проводили при частоте вращения трех экструзионных лопастей гранулятора: 37,8; 45,8; 50,3 об/мин и производительности, соответственно, 231, 274 и 291 кг/ч. Экспериментально установлено, что процесс формирования гранул в корзинном грануляторе является циклическим и состоит из периодов формирования гранулы, обратного движения материала и релаксации. Увеличение частоты вращения рабочих органов гранулятора приводит к снижению продолжительности цикла воздействия рабочего органа на материал за счет уменьшения периода релаксации, в то время как продолжительность периодов формирования гранулы и обратного движения материала остается постоянной. При увеличении частоты вращения длительность периода релаксации и всего цикла воздействия рабочего органа снижается почти линейно, но при повышении частоты более 47 об/мин их продолжительность снижается незначительно. Производительность корзинного гранулятора может быть повышена за счет увеличения как количества рабочих органов, так и частоты их вращения, но эти способы имеют ограничения в связи с увеличением энергоемкости процесса и особенностью конструкции гранулятора. В дальнейших исследованиях для обоснования рациональной продолжительности периодов рабочего цикла корзинного гранулятора необходимо изучить влияние реологических свойств сырья и его влажности на процесс гранулирования.

**Ключевые слова:** аквакультура, корм для рыб, процесс гранулирования корма, корзинный гранулятор, гранулирование влажного сырья, гранулы, рабочий цикл, параметры процесса гранулирования

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (тема № 0505-2022-0007).

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

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-27-32>

## ORIGINAL PAPER

## Study of fish feed pelleting process in a basket granulator

*S.V. Braginet<sup>1</sup>, O.N. Bakhchevnikov<sup>2✉</sup>, K.A. Deev<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Agricultural Research Center "Donskoy"; Zernograd, Russia<sup>1</sup> [sbraginet@mail.ru](mailto:sbraginet@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692><sup>2</sup> [oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru)<sup>✉</sup>; <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627><sup>3</sup> [prosto.deev@yandex.ru](mailto:prosto.deev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

**Abstract.** The production of pelleted aquaculture feeds from wet raw materials should reasonably be carried out in a basket granulator. The operation process of the basket granulator is not well studied. Rational parameters

of its operation have no scientific grounds. A basket granulator is designed for pelleting of wet raw materials and producing feed for fish and their fry in the form of pellets with a diameter of 0.5 of 2 mm and a moisture content of 25 to 40%. Experimental studies were carried out to determine rational parameters of pelleting that provide high productivity. The pelleting process of wet raw material was studied at the rotation frequency of three extrusion blades of the granulator 37.8, 45.8, and 50.3 rpm and efficiency, respectively, 231, 274, and 291 kg·h<sup>-1</sup>. It has been established that the process of pellet formation in the basket granulator is cyclic and consists of pellet formation, reverse movement of material, and relaxation. Increasing the speed of the granulator's working parts will lead to a decrease in the cycle duration of the impact of the parts on the material due to a decrease in the relaxation period, while the duration of the periods of pellet formation and reverse movement of the material remain constant. The duration of the relaxation period and the whole cycle of impact of the parts decrease almost linearly when increasing the rotational speed, but their duration decreases insignificantly when the frequency exceeds 47 rpm. The efficiency of the basket granulator can be increased both by increasing the number of working parts and increasing their rotary speed, but these methods have limitations associated with increasing the energy intensity of the process and the granulator design. The influence of rheological properties of raw materials and their moisture content on the pelleting process should be studied in the course of further research to justify the rational duration of periods in the working cycle of the basket granulator.

**Keywords:** aquaculture, fish feed, feed pelleting process, basket granulator, wet pelleting, pellets, working cycle, pelleting process parameters

**Funding.** The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Agricultural Research Center “Donskoy” (Assignment No. 0505-2022-0007).

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

**For citation:** Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. Study of fish feed pelleting process in a basket granulator. *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(2):27-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-27-32>

## Введение

В России предприятия аквакультуры формируют спрос на гранулированные корма для прудовых рыб семейства карповых и их мальков. Перспективной технологией в данном случае является влажное гранулирование, обеспечивающее лучшее связывание частиц сырья и получение более прочных и водостойких гранул, чем при сухом гранулировании [1].

Для осуществления гранулирования кормового сырья для аквакультуры влажностью 25...40% и получения гранул малого диаметра (0,5...2 мм) было предложено новое техническое решение – корзинный гранулятор (basket granulator) [2, 3]. Его особенностью является соосное размещение в перфорированной корзине рассекателей, перемешивающих и измельчающих сырье, и расположенных под ними экструзионных лопастей, уплотняющих материал и продавливающих его через фильтры корзины [4].

Корзинные грануляторы, распространённые за рубежом, не применяются в нашей стране. В Аграрном научном центре «Донской» разработан отечественный корзинный гранулятор [4]. В отличие от традиционных грануляторов с плоской и кольцевой матрицей процесс работы корзинного гранулятора плохо изучен, и его рациональные параметры работы еще не получили научного обоснования [5]. Это обусловило необходимость проведения экспериментальных

исследований процесса гранулирования влажного сырья в корзинном грануляторе.

**Цель исследований:** экспериментальное определение параметров процесса гранулирования влажного корма для рыб в корзинном грануляторе для последующего установления рациональных параметров производства, обеспечивающих высокую производительность работы гранулятора.

## Материалы и методы

Исследования проводили на корзинном грануляторе конструкции «Аграрный научный центр “Донской”» [4, 6], внешний вид которого представлен на рисунке 1.



**Рис. 1. Корзинный гранулятор конструкции «Аграрный научный центр “Донской”» и его рабочие органы**

**Fig. 1. Basket granulator of Agricultural Research Center “Donskoy” design and its working parts**

Внутри перфорированной корзины гранулятора по принципу «Вал в валу» соосно размещены его рабочие органы: 3 экструзионные лопасти и 3 рассекателя, вращающиеся в противоположных направлениях.

Форма используемых экструзионных лопастей соответствует зарубежным аналогам гранулятора, проверенным в ходе эксплуатации.

Конструктивные параметры корзинного гранулятора: диаметр корзины – 400 мм; диаметр фильеры – 2 мм; длина канала фильеры – 2 мм; площадь активной зоны корзины (матрицы) гранулятора – 38%.

Гранулированию подвергали подготовленный в смесителе рассыпной корм для карпа по рецепту К 111-1 (зерно пшеницы – 24%, горох – 10%, шрот соевый – 50%, отруби – 6%, БВМК – 10%). Предварительно корм увлажняли горячей водой (70°C) до достижения им влажности 40%.

Исследовали процесс продавливания корма экструзионными лопастями гранулятора через отверстия корзины с формированием гранул диаметром 2 мм [6]. В процессе эксперимента регулирование гранул по длине не производили, предоставив им возможность отделяться под действием собственной массы.

Различные режимы работы гранулятора исследовали при варьировании частоты вращения экструзионных лопастей, что приводило к изменению продолжительности действия лопасти на формируемую гранулу и скорости движения гранулируемого материала через фильеру корзины [7, 8]. Частоту

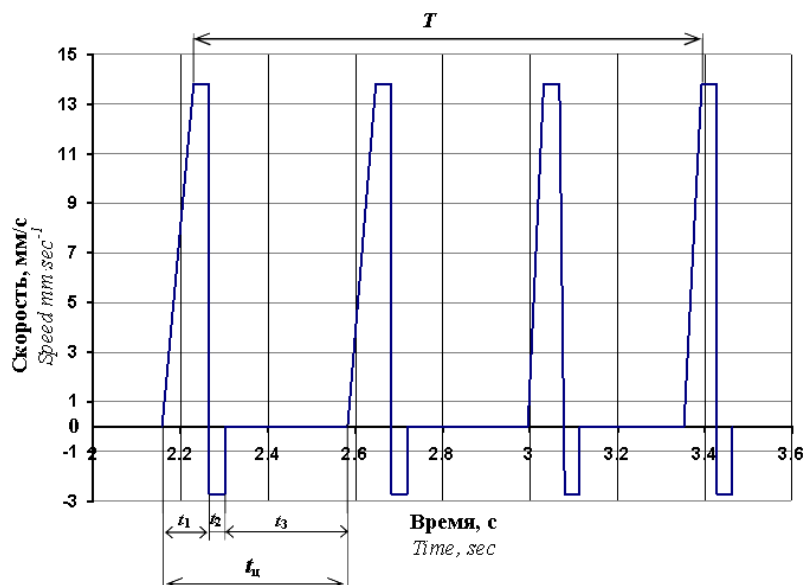
вращения экструзионных лопастей гранулятора изменяли посредством частотного преобразователя, который задавал частоту вращения электродвигателя 40, 50 и 60 Гц, что соответствовало частоте вращения рабочих органов 37,8; 45,8; 50,3 об/мин. При этом была достигнута соответствующая производительность 231, 274 и 291 кг/ч.

В процессе работы корзинного гранулятора при выходе гранул из фильер осуществляли видеосъёмку с высокой частотой кадров. После раскадровки видеозаписи определяли моменты начала и завершения процесса продавливания материала через фильеру. Точность измерения промежутков времени соответствовала  $\pm 0,002$  с. Скорость образования гранулы определяли измерением расстояния, на которое формирующаяся гранула корма выдвигается из отверстия в течение определенного времени [8].

### Результаты и их обсуждение

После проведения экспериментальных исследований получили графики изменения скорости движения гранулируемого материала через фильеру в процессе работы корзинного гранулятора при различной частоте вращения его рабочих органов. В качестве примера на рисунке 2 приведён данный график для частоты вращения 37,8 об/мин.

Процесс формирования гранул в корзинном грануляторе является циклическим (рис. 2), что обусловлено периодическим действием на гранулируемый корм



**Рис. 2. Изменение скорости движения гранулируемого материала через фильеру в процессе работы корзинного гранулятора:**

$T$  – период вращения рабочего органа;  $t_{ц}$  – цикл воздействия рабочего органа на материал;

$t_1$  – формирование гранулы;  $t_2$  – обратное движение материала;  $t_3$  – релаксация

**Fig. 2. Change of speed of granulated material flow through the die during the operation of the basket granulator:**

$T$  – period of rotation of the working part,  $t_{ц}$  – cycle of impact of the working part on the material,  $t_1$  – pellet formation,

$t_2$  – reverse movement of the material,  $t_3$  – relaxation

экструзионных лопастей. В течение периода  $T$  лопасти трижды воздействуют на гранулируемый материал:

$$T = 3t_{ц} \tag{1}$$

Цикл воздействия рабочего органа на материал  $t_{ц}$  включает в себя 3 составляющих:

$$t_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 \tag{2}$$

В промежуток времени  $t_1$  происходит продавливание материала через фильеру корзины наружу, приводящее к образованию цилиндрического «жгута», формирующего гранулу (рис. 3). В течение этого промежутка скорость перемещения корма из отверстия наружу линейно возрастает по мере увеличения воздействия на него экструзионной лопасти. Небольшой участок постоянной скорости (вверху графика рисунка 2) характеризует момент наибольшего давления лопасти на материал.

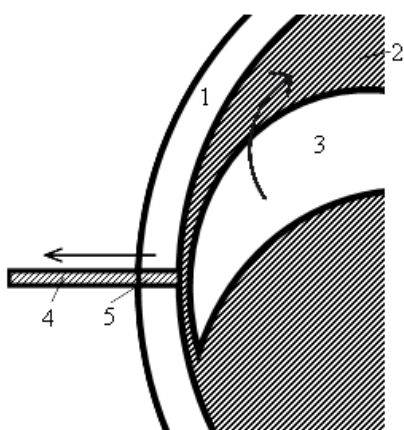


Рис. 3. Схема процесса формирования гранулы в корзинном грануляторе:

- 1 – стенка корзины; 2 – гранулируемый материал;
- 3 – экструзионная лопасть;
- 4 – формирующаяся гранула; 5 – фильера

Fig. 3. Process chart of pellet formation in the basket granulator:

- 1 – basket wall; 2 – pelleted material;
- 3 – extrusion blade; 4 – forming pellet; 5 – die

После прохождения экструзионной лопасти мимо отверстия фильеры в краткий промежуток времени  $t_2$  скорость перемещения материала мгновенно падает, но не до нуля, а до небольшого отрицательного значения, что означает инерционное движение материала в обратном направлении (в корзину), объясняемое его реологическими характеристиками. Такое движение отрицательно сказывается на производительности гранулятора. Затем наблюдается период релаксации  $t_3$ , в течение которого скорость перемещения материала равна нулю. В это время формируемая гранула подсыхает, ее влажность снижается, что положительно влияет на улучшение ее качества.

Анализ полученных данных показывает, что процесс формирования гранул в корзинном грануляторе в общем аналогичен процессу в грануляторе с вертикальной кольцевой матрицей. Период времени  $t_1$  соответствует образованию зон деформации сырья и формированию гранул, когда, согласно принятой сейчас теории, напряжение сжатия в области деформации линейно возрастает от нуля до давления гранулирования, а напряжение в области формирования равно ему [9-11]. Период релаксации  $t_3$  соответствует периоду подачи, когда рабочий орган направляет сырье в зону формирования гранул.

На графике рисунка 2 видим, что значительную часть времени цикла воздействия рабочего органа на материал (примерно 80%) занимает период релаксации, когда не происходит движения материала формируемой гранулы. Этот достаточно негативный момент может быть устранен увеличением количества экструзирующих лопастей в грануляторе.

Эксперименты показали, что при разных значениях частоты вращения рабочих органов гранулятора форма графиков изменения скорости движения гранулируемого материала аналогична, но различны значения продолжительности цикла воздействия рабочего органа на материал и его периодов (табл.).

Таблица

Зависимость продолжительности периодов цикла гранулирования от частоты вращения рабочих органов корзинного гранулятора

Table

Relationship between the duration of granulation cycle periods and the rotary speed of the basket granulator parts

Частота вращения, об/мин <i>Rotary speed, rpm</i>	Период вращения рабочего органа $T$ , с <i>Rotation period of the working part <math>T</math>, sec</i>	Цикл воздействия рабочего органа на материал $t_{ц}$ , с <i>Cycle of impact of the working part on the material <math>t_{ц}</math>, sec</i>	Период формирования гранулы $t_1$ , с <i>Period of pellet formation <math>t_1</math>, sec</i>	Период обратного движения материала $t_2$ , с <i>Period of reverse movement of material <math>t_2</math>, sec</i>	Период релаксации $t_3$ , с <i>Relaxation period <math>t_3</math>, sec</i>
37,8	1,587	0,529	0,070	0,035	0,424
45,8	1,310	0,426	0,071	0,036	0,319
50,3	1,194	0,412	0,072	0,035	0,305



Погрешность, из-за которой равенство  $T = 3t_{\text{ц}}$  выполняется недостаточно точно, вызвана отклонением в равномерном размещении экструдированных лопастей в корзине, допущенным при изготовлении корзины гранулятора.

Анализ данных таблицы показывает, что процесс циклического изменения скорости движения гранулируемого материала, графически показанный на рисунке 2, демонстрирует те же закономерности и при других значениях частоты вращения рабочих органов корзины гранулятора. Установлено, что увеличение частоты вращения рабочих органов приводит к уменьшению продолжительности цикла воздействия рабочего органа на материал  $t_{\text{ц}}$  (рис. 4).

Отметим, что длительность рабочего цикла  $t_{\text{ц}}$  сокращается за счёт уменьшения периода релаксации, в то время как продолжительность периодов формирования гранулы  $t_1$  и обратного движения материала  $t_2$  остается практически постоянной. Это позволяет сделать вывод о том, что производительность корзины гранулятора может быть повышена за счёт увеличения как количества рабочих органов, так и частоты их вращения. Но и тот, и другой способы увеличения производительности гранулятора имеют ограничения. Как следует из рисунка 4, при увеличении частоты вращения лопастей период релаксации и весь цикл воздействия рабочего органа снижаются почти линейно, но при повышении частоты более 47 об/мин их продолжительность снижается уже незначительно. Увеличение же числа рабочих органов требует установки более мощного электродвигателя, что приведет к значительному увеличению энергоёмкости процесса

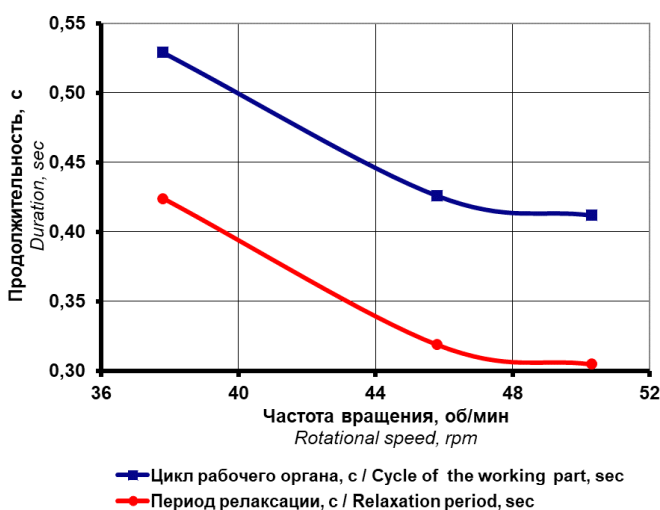


Рис. 4. Зависимость продолжительности периодов гранулирования от частоты вращения рабочего органа корзины гранулятора

Fig. 4. Relationship between the duration of granulation periods and the rotary speed of the basket granulator's parts

гранулирования, как и при повышении частоты вращения. Кроме того, сама конструкция корзины гранулятора, предусматривающая соосную установку в корзине двух видов рабочих органов по принципу «Вал в валу», препятствует увеличению их количества.

Не следует уменьшать продолжительность цикла воздействия рабочих органов на формирующуюся гранулу ниже некоторого предела, так как она изготавливается из влажного сырья, и необходимо снижение за время периода релаксации  $t_3$  влажности ещё не отделившейся гранулы в достаточной мере, чтобы не допустить ее деформации и слипания ее концов либо соседних гранул.

На процесс формирования гранулы, помимо рабочих органов гранулятора, оказывают влияние реологические свойства сырья, определяющие характеристики процесса продавливания материала через фильеру, а также интенсивность испарения влаги из формирующейся гранулы, определяемая свойствами кормового сырья, что требует дополнительного их изучения для обоснования рациональной продолжительности периодов рабочего цикла корзины гранулятора. Отметим, что налипание материала на внутреннюю поверхность корзины существенно не влияет на процесс гранулирования.

Основываясь на полученных экспериментальных данных, в дальнейших исследованиях необходимо установить рациональные параметры процесса гранулирования, обеспечивающие, с одной стороны, высокую производительность, а с другой стороны – хорошее качество получаемых гранул.

## Выводы

1. Периодическое воздействие экструзионных лопастей корзины гранулятора на гранулируемый корм обуславливает цикличность процесса формирования гранул, состоящего из периодов формирования гранулы, обратного движения материала и релаксации.

2. Увеличение частоты вращения экструзионных лопастей гранулятора до 47 об/мин приводит к линейному снижению продолжительности цикла воздействия рабочего органа на материал за счёт уменьшения периода релаксации. При повышении частоты вращения более 47 об/мин их продолжительность снижается незначительно.

3. Повышение производительности корзины гранулятора за счёт увеличения количества рабочих органов и повышения частоты их вращения ограничено конструкцией гранулятора и энергоёмкостью процесса.

4. Для обоснования рациональной продолжительности периодов рабочего цикла корзины гранулятора необходимо изучить влияние реологических свойств сырья и его влажности на процесс гранулирования корма.

## Список источников / References

1. Ageets V.Y., Koshak Z. Modern status and compound feedstuff development prospects for fresh water fishes. *Belarus Fish Industry Problems*. 2016;32:75-85. (In Russ.) EDN: XRFTIH
2. Zukowski S.R., Kodam M., Khurana S., Taylor J., Frishcosy M., Hercamp J., Snedeker J., Williams E. 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>
3. Wang F.Y., Cameron I.T. Review and future directions in the modelling and control of continuous drum granulation. *Powder Technology*. 2002;124(3):238-253. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00020-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00020-7)
4. Роторный гранулятор для влажных материалов: Патент RU218265 U1, B01J 2/20, A23K 40/10 / В.И. Пахомов, С.В. Брагинец, О.Н. Бахчевников, К.А. Деев, № 23107808, заявл. 29.03.2023, опубл. 18.05.2023. EDN: FGDRKY  
Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Deev K.A. Rotary granulator for wet materials: patent RU218265 U1, B01J 2/20, A23K 40/10., application No. 23107808, applied on 29.03.2023, published on 18.05.2023.
5. 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. Т. 12, № 2. С. 43-51. EDN: XDDUJT  
Kulikov A.V., Litvinchuk A.A., Kulikova O.M., Danilyuk A.S., Bezuschenok 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.)
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. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-32-34>  
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.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-12-32-34>
7. Vesjolaja L., Glemmestad B., Lie B. Dynamic model for simulating transient behaviour of rotary drum granulation loop. *Modeling, Identification and Control*. 2020;41(2):65-77. <https://doi.org/10.4173/mic.2020.2.3>
8. Vesjolaja L., Glemmestad B., Lie B. Double-loop control structure for rotary drum granulation loop. *Processes*. 2020;8(11):1423. <https://doi.org/10.3390/pr8111423>
9. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that affect pellet quality: a review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015;9(2):717-722. <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>
10. Shuijuan S., Kai W., Binbin P., Shuanhu W., Yu S. Mechanical model and FEA of ring die of three-roller pellet mill. *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE*. 2010, pp. 76-80. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535988>
11. Holm J.K., Henriksen U.B., Hustad J.E., Sørensen L.H. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production. *Energy and Fuels*. 2006;20(6):2686-2694. <https://doi.org/10.1021/ef0503360>

## Информация об авторах

- Сергей Валерьевич Брагинец**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник; [sbraginets@mail.ru](mailto:sbraginets@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>
- Олег Николаевич Бахчевников**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник; [oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>
- Константин Александрович Деев**<sup>3</sup>, инженер; [prosto.deev@yandex.ru](mailto:prosto.deev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>
- <sup>1,2,3</sup> Аграрный научный центр «Донской»; 347740, Российская Федерация, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 14

## Вклад авторов

- С.В. Брагинец – руководство исследованием  
О.Н. Бахчевников – методология, визуализация результатов исследований  
К.А. Деев – анализ результатов экспериментов, проведение исследования, создание черновика рукописи

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 16.11.2023; после рецензирования и доработки 19.02.2024; принята к публикации 20.02.2024.

## Author Information

- Sergey V. Braginets**<sup>1</sup>, DSc (Eng), Lead Research Engineer; [sbraginets@mail.ru](mailto:sbraginets@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>
- Oleg N. Bakhchevnikov**<sup>2</sup>, PhD (Eng), Senior Research Engineer; [oleg-b@list.ru](mailto:oleg-b@list.ru); <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>
- Konstantin A. Deev**<sup>3</sup>, Engineer; [prosto.deev@yandex.ru](mailto:prosto.deev@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>
- <sup>1,2,3</sup> Agricultural Research Center “Donskoy”; 14, Lenina Str., Zernograd, Rostov Region, 347740, Russian Federation

## Author Contribution

- S.V. Braginets – research supervision  
O.N. Bakhchevnikov – methodology, visualization  
K.A. Deev – analysis of experimental results, study implementation, original draft preparation

## Conflict of interests

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

Received 16.11.2023; Revised 19.02.2024; Accepted 20.02.2024.