

Процессы и аппараты пищевых производств**Processes and devices for food production**DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-3-19-23>

Оригинальная статья / Research article

УДК 539.219: 639.3.043

Open Access

Available online at vestnik-vsuet.ru**Математическое моделирование процесса диффузии жидких добавок внутрь экструдированных гранул комбикорма для рыб ценных пород**Александр Н. Остриков¹ ostrikov27yandex.ru  0000-0002-2335-0017Игорь С. Богомолов² igor-bog@yandex.ruПавел В. Филиппов² filiptsov9393@mail.ru¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия² АО «НПП «ВНИИ комбикормовой промышленности», пр-т Труда, 91, г. Воронеж, 394026, Россия

Аннотация. Рассмотрена математическая модель процесса диффузии жидких компонентов внутрь экструдированных гранул комбикорма для ценных пород рыб в условиях вакуумного напыления. Это позволит увеличить содержание жира до 40% и повысить усвояемость и питательные свойства комбикорма. Предложено для описания процесса диффузии жидкости в пористых гранулах использовать дифференциальное уравнение молекулярной диффузии с граничными условиями третьего рода. Для математического описания было использовано решение уравнения нестационарной молекулярной диффузии для тел, имеющих геометрическую форму неограниченного цилиндра (такими телами можно считать экструдированные гранулы). Проведенные исследования при значениях критерия Био свыше 100, показали, что концентрация жидких добавок внутри экструдированных гранул становится равной концентрации жидких добавок на их поверхности. Данное решение при постоянстве концентрации жидких добавок на поверхности экструдированных гранул имеет вид быстро сходящегося ряда. Учитывая, что при числах Фурье больше 0.3 ряд быстро сходится, то можно отбросить все члены ряда, кроме первого. Таким образом, полученное решение уравнения нестационарной молекулярной диффузии при постоянстве концентрации жидких добавок на поверхности гранул имело вид быстро сходящегося ряда. Логарифмируя данное уравнение и решая его относительно критерия Фурье, получили выражение для определения продолжительности процесса диффузии. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных показало, что среднеквадратичное отклонение не превышало 14.3%. Применение вакуумного напыления жидких добавок на поверхность гранул позволило увеличить коэффициент диффузии с 4.78×10^{-4} до 6.112×10^{-4} м²/с по сравнению с традиционной технологией дражирования в барабанном аппарате.

Ключевые слова: математическая модель, диффузия, жидкости, вакуумное напыление, экструдированные гранулы**Mathematical modeling of the diffusion process of liquid additives into extruded pellets of feed stuff for prime fish species**Alexander N. Ostrikov¹ ostrikov27yandex.ru  0000-0002-2335-0017Igor S. Bogomolov² igor-bog@yandex.ruPavel V. Filiptsov² filiptsov9393@mail.ru¹ Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia² Scientific-production center VNII of feed industry, Truda Av., 91 Voronezh, 394026, Russia

Abstract. A mathematical model of the diffusion process of liquid components into extruded pellets of feed stuff for prime fish species under vacuum spraying is considered. This will increase the fat content up to 40% and improve the digestibility and nutritive properties of the feed stuff. It is suggested to use the differential equation of molecular diffusion with boundary conditions of the third kind to describe the process of diffusion of liquid in porous pellets. For a mathematical description, the solution of the equation of unsteady molecular diffusion for bodies with the geometric shape of an unbounded cylinder (extruded pellets can be considered such bodies) was used. The studies carried out with values of the Bio criterion over 100 showed that the concentration of liquid additives inside the extruded pellets becomes equal to the concentration of liquid additives on their surface. Given a constant concentration of liquid additives on the surface of extruded pellets, this solution takes place in the form of a rapidly converging series. Considering that for Fourier numbers greater than 0.3 the series converges quickly, then all the members of the series can be discarded except the first one. Thus, the obtained solution of the equation of unsteady molecular diffusion at a constant concentration of liquid additives on the surface of pellets had the form of a rapidly converging series. Taking the logarithm of the obtained equation and solving its Fourier criterion, we attained the expression for determining the duration of the diffusion process. Comparison of the calculated curves and experimental data showed that the root mean square deviation did not exceed 14.3%. The use of vacuum spraying of liquid additives on the surface of pellets made it possible to increase the diffusion coefficient from 4.78×10^{-4} to 6.112×10^{-4} m²/c in comparison with the traditional technology of pelleting in a drum apparatus.

Keywords: mathematical model, diffusion, liquid, vacuum spraying, extruded pellets

Для цитирования

Остриков А.Н., Богомолов И.С., Филиппов П.В. Математическое моделирование процесса диффузии жидких добавок внутрь экструдированных гранул комбикорма для рыб ценных пород // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 3. С. 19-23. doi:10.20914/2310-1202-2020-3-19-23

For citation

Ostrikov A.N., Bogomolov I.S., Filiptsov P.V. Mathematical modeling of the diffusion process of liquid additives into extruded pellets of feed stuff for prime fish species. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 19–23. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-3-19-23

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Низкая питательность и несбалансированный состав, высокая крошимость и низкая водостойкость гранул отечественных комбикормов отрицательно влияют на продуктивность рыбы [5, 8]. Одним из перспективных направлений повышения качества комбикормов для аквакультуры является замена животного белка и жира на растительные компоненты [10]. АО «НПЦ «ВНИИКП» в результате выполненных исследований разработана перспективная технология комбикормов, в которых осуществлена замена дорогостоящих белковых компонентов животного происхождения (рыбная мука, мясокостная мука, кровяная мука, субпродукты и т. п.) на растительные высокобелковые компоненты (соевый, подсолнечный или рапсовый шрот, люпин, горох, соя и т. п.), подвергнутые экструзионной обработке, и вакуумное нанесение с последующей диффузией жидких компонентов (растительное масло, рыбий жир и т. п. внутрь экструдированных гранул.) [6, 7]. Это позволило снизить количество рыбной муки в рецепте с 40 до 21% без снижения продуктивных свойств экструдированных кормов.

Применение вакуумного напыления жировых компонентов на экструдированные комбикорма для ценных пород рыб привело к возможности повышения содержания жира до 40%, стабилизации питательных качеств комбикорма; снижению дробления комбикормов на 10%; улучшению физических качеств готового комбикорма (влажность 10–12%); повышению уровня проникновения жидких компонентов на 25–30%; сохранению сухой поверхности экструдата; снижению патогенной микрофлоры до 0 [9].

Разработаны система вакуумного напыления, с помощью которых возможен ввод жидких компонентов до 42% без ущерба для характеристик текучести готового продукта. Вакуумное напыление делает возможным обеспечение гораздо большей точности ввода компонентов, а также обеспечивает гораздо лучший показатель коэффициента вариации в сравнении с процессом непрерывного типа.

Процесс вакуумной пропитки можно регулировать, исходя из того, какому виду и возрасту рыб предназначается корм, чтобы они в разные периоды жизни получали больше витаминов и энзимов для улучшения состояния здоровья.

Размеры пористых экструдированных гранул комбикормов следующие: диаметр от 1.2 мм до 4.0 мм, длина гранул от 12–15 мм до 30–40 мм. Диффузия жировитаминной добавки внутрь гранул происходит при ламинарном режиме движения.

Жилин А.А. и Федоров А.В. [1] исследуя динамику изменения влаги в сечениях $x = 10, 20, 90$ мм в бруске из пористого материала длиной 100 мм, использовали для описания исследуемого процесса уравнение нестационарной диффузии

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(W) \frac{\partial W}{\partial x} \right),$$

где $D(W)$ – коэффициент диффузии; W – влажность; t – время; x – пространственная координата.

Решение данной задачи проводилось численно методом пристрелки в два этапа.

В результате было получено распределение влажности в рассматриваемых сечениях в зависимости от времени. В каждом сечении на профиле влажности можно выделить три участка. Начало первого участка, на котором значение влажности равно нулю, соответствует моменту начала эксперимента, конец – моменту достижения волной влажности рассматриваемого сечения. На втором участке происходит постепенное увеличение влажности до значения W_k . Третий участок, как и первый, характеризуется постоянным значением влажности, равным W_k .

Мейрманов А.М. и др. [2] рассмотрели две модели диффузии в пороупругой среде, состоящие из системы уравнений Стокса, которые описывают движение несжимаемой вязкой жидкости в поровом пространстве и системы уравнений Ламе, описывающих колебания несжимаемого твердого скелета. Рассматриваемая система дополняется конвективным уравнением диффузии для примеси в жидкости. Получены новые корректные математические модели, моделирующие процесс диффузии в пороупругой среде посредством усреднения и метода двух-масштабной сходимости Нгуэсенса.

В работе [3, 4] предложено кинетическое уравнение типа Колмогорова–Феллера с дополнительной координатой, описывающее как диффузионный, так и субдиффузионный массоперенос. Поскольку это уравнение является дифференциальным по времени и допускает параметрическую зависимость ядра $W \sim$ от t , оно может быть полезно при моделировании нестационарных процессов, в том числе сопровождающихся сменой режимов переноса.

Материалы и методы

Решение дифференциального уравнения молекулярной диффузии жидких добавок в экструдированных гранулах описывается уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D_T \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

с граничными условиями третьего рода (при условии поглощающей (адсорбционной) поверхности т. е. когда $c_{г.пов} = 0$) :

$$-D_{\tau} \left(\frac{\partial c}{\partial n} \right)_n = \beta (c_{\tau} - c_{\tau, \text{пов}}) = \beta c_{\tau} \quad (2)$$

и начальными условиями

$$c(x, y, z, 0) = c_0 \quad (3)$$

Примем, что в процессе диффузии жидких добавок внутрь экструдированных гранул температура гранул и их теплофизические характеристики не изменяются, тогда для математического описания такой задачи используем решение нестационарной молекулярной диффузии в телах определенной геометрической формы (неограниченный цилиндр). В допущении постоянства концентрации жидких добавок, т. е. $c_{\tau, \text{пов}} = \text{const}$, решение имеет для неограниченного цилиндра (таким телом можно считать экструдированные гранулы) следующий вид

$$\theta = \frac{c_{X=1} - c}{c_{X=1}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} \times \left(\cos(\mu_n X) \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}) \right), \quad (4)$$

где в соотношениях (1)–(4): c – концентрация жидких добавок в экструдированных гранулах; $c_{\tau, \text{п}} = c_{X=1}$ – концентрация жидких добавок в экструдированных гранулах на их поверхности, равновесная с концентрацией жидких добавок в аэрозоле (диспергируемой среде) на поверхности гранулы; $(\partial c_{\tau} / \partial n)_n$ – градиент концентрации жидких добавок в непосредственной близости от поверхности гранул; D_{τ} – коэффициент молекулярной диффузии жидких добавок в экструдированных гранулах, м/с; c_0 – начальная концентрация жидких добавок в экструдированных гранулах ($c_0 = 0$); β – коэффициент массоотдачи, м/с; $\theta = (c_{X=1} - c) / c_{X=1}$ – безразмерная концентрация жидких добавок в экструдированных гранулах; $X = x / \delta$ – безразмерная координата; μ_n – представляет собой корни характеристического уравнения $\text{ctg} \mu_n = \mu_n / \text{Bi}$; $\text{Bi} = \beta \delta / D_{\tau}$ – число Био; $\text{Fo} = D_{\tau} \tau / \delta^2$ – критерий Фурье или безразмерное время; $\delta = 2r$ – половина толщины гранулы, м.

Результаты и обсуждение

Проведенные исследования при значениях критерия $\text{Bi} \geq 100$, показали что концентрация жидких добавок на поверхности экструдированных гранул становится равной равновесной концентрации аэрозоля жидких добавок, т. е. равной константе ($c_{\tau, \text{п}} = c_{X=1} = \text{const}$).

Полученные значения критерия Био ($\text{Bi} \rightarrow \infty$) показывают высокую интенсивность осаждения частиц жидких добавок на поверхность

экструдированных гранул. Тогда граничные условия III рода трансформируются в граничные условия I рода и процесс диффузии жидких добавок в экструдированные гранулы определяется только физическими размерами гранулы.

Тогда для рассматриваемого случая уравнение (4) с учетом того, что концентрация жидких добавок на оси цилиндра (экструдированных гранул) ($X = 0$), принимает вид:

$$\theta_{x=0} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)} \cos \left[\frac{(2n-1)}{2} \pi X \right] \exp \left[- \left(\frac{2n-1}{2} \right)^2 \pi^2 \text{Fo} \right]. \quad (5)$$

Так как $c_{\tau, \text{п}} = c_{X=1} = \text{const}$, то при $X = 1$ $\theta = 0$.

Учитывая, что при $\text{Fo} \geq 0,3$ ряд (5) быстро сходится, поэтому, отбрасывая все члены ряда, кроме первого, получаем следующее уравнение:

$$\theta_{x=0} = \frac{4}{\pi} \exp \left[- \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \text{Fo} \right]. \quad (6)$$

Логарифмируя выражение (6) и решая его относительно критерия Фурье, получим:

$$\text{Fo} = \frac{4}{\pi^2} \ln \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{\theta_{x=0}} \right). \quad (7)$$

Уравнение (7) можно записать:

$$\tau = \left(\frac{2\delta}{\pi} \right)^2 \frac{1}{D_{\tau}} \ln \left(\frac{1}{\theta_{x=0}} \cdot \frac{4}{\pi} \right), \quad (8)$$

или

$$D_{\tau} = \left(\frac{2\delta}{\pi} \right)^2 \frac{1}{\tau} \ln \left(\frac{1}{\theta_{x=0}} \cdot \frac{4}{\pi} \right). \quad (9)$$

С помощью формулы (9) определяем численные значения коэффициентов диффузии D_{τ} , используя для этого время и концентрацию жидких добавок на поверхности экструдированных гранул $c_{\tau, \text{п}}^*$ и $c_{X=1}$ в центре цилиндра (гранулы) ($x = \delta$) $c_{X=0} = c$.

Для вычисления критерия Био необходимо определить коэффициент массоотдачи β .

Для данного эксперимента (при $d_g = 1,2 \cdot 10^{-7}$ м, $D_{\tau} = 3,3 \cdot 10^{-7}$ м/с, $t_q^+ = 2,66 \cdot 10^{-4}$, $\text{Sc} = 75$, $\text{Re} = 850$, $\lambda' = 0,47$, $U_0 = 0,022$ м/с, $\beta = 1,139 \cdot 10^{-4}$ м² / с, $\text{Bi} = 194 > 100$), значение коэффициента массоотдачи равно $\beta = 1,089 \cdot 10^{-4}$ м² / с.

Для процесса диффузии жидких добавок внутрь экструдированных гранул по традиционной технологии в дражировочном барабанном аппарате были получены значения коэффициента диффузии жидких добавок $D_{\tau} = 4,78 \cdot 10^{-4}$ м² / с, а с применением вакуумной обработки увеличилось до $D_{\tau} = 6,112 \cdot 10^{-4}$ м² / с.

Затем, используя решение (9), определим профиль распределения расчетных значений концентраций жидких добавок по радиусу экструдированных гранул (рисунок 1).

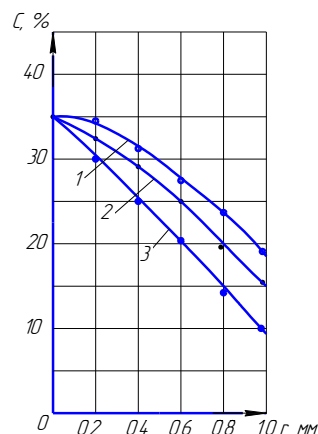


Рисунок 1. График изменения концентрации жидких добавок от глубины проникновения внутрь экструдированных гранул при различных значениях величины разрежения в рабочей камере вакуумного напылителя P , МПа: 1 – 0.02; 2 – 0.03; 3 – 0.04

Figure 1. Graph of liquid additives concentration changes versus the depth of penetration into the extruded pellets at different values of the vacuum in the working chamber of the vacuum sprayer P , MPa: 1 – 0.02; 2 – 0.03; 3 – 0.04

Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных показывает хорошую сходимость: среднеквадратичное отклонение не превышало 14.3%.

Таким образом, использование вакуумного напыления жидких добавок и их последующая диффузия внутрь экструдированных гранул позволяет не только увеличить на 30–35% коэффициент диффузии, но и добиться более равномерного распределения жидких добавок внутри гранул (рисунок 1).

Заключение

Для математического описания процесса диффузии жидких добавок внутрь капиллярно-пористых экструдированных гранул использовано решение уравнения нестационарной молекулярной для тел, которое при постоянстве концентрации жидких добавок на поверхности гранул имеет вид быстросходящегося ряда. Было получено выражение для определения продолжительности процесса диффузии. Сравнение расчетных кривых и экспериментальных данных показало, что среднеквадратичное отклонение не превышало 14.3%.

Литература

- 1 Жилин А.А., Федоров А.В. Физико-математическое моделирование процессов капиллярной пропитки пористых материалов // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 1. С. 42–51.
- 2 Мейрманов А.М., Зимин Р.Н., Гальцева О.В., Гальцев О.А. Математические модели диффузии в пороупругих средах // Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. 2012. № 17(136). С. 77–90.
- 3 Королев Л.В., Бытев Д.О. Моделирование субдиффузионного процесса массопереноса // МНТФ Первые Косыгинские чтения. 2017. Т. 7. С. 1826–1828.
- 4 Королев Л.В., Бытев Д.О. Случайный перенос в пористой сорбирующей среде // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 6. С. 86–89.
- 5 Shrinivasa D. J., Mathur S. M. Compound feed production for livestock // Current science. 2020. V. 118. № 4. P. 553.
- 6 Iegorov B. et al. Condition and prospects of development of compound feed production for salmonidae // Grain Products and Mixed Fodder's. 2020. V. 20. № 1. P. 31–35.
- 7 Афанасьев В.А. Руководство по технологии комбикормов, белково-витаминно-минеральных концентратов и премиксов. В 2-х т. Воронеж: Элистр, 2008. 490 с.
- 8 Peng W.X., Marchal J.L.M., Van der Poel A.F.B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing // Animal Feed Science and Technology. 2018. V. 237. P. 129–153.
- 9 Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Василенко В.Н., Фролова Л.Н. и др. Оценка эффективности технологии получения зерновых хлопьев для производства комбикормов для молодняка крупного рогатого скота // Кормопроизводство. 2017. № 6. С. 33–38.
- 10 Селезнева Н.В., Ижболдина С.Н. Использование престартерных и стартерных комбикормов при выращивании молодняка крупного рогатого скота // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2016. № 9. С. 17–24.
- 11 Lohri C.R. et al. Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low-and middle-income settings // Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2017. V. 16. № 1. P. 81–130.
- 12 Oskui S.M. Resonating mass sensors for detecting microgram scale objects in fluids. Riverside, 2016.
- 13 Закурдаева А.В., Резанова Е.В. Численное моделирование процесса формирования жидкого сферического микробаллона, содержащего пузырек газа. 2017.
- 14 Гаджизаде С.М., Зейналова С.Х., Агаева Т.Ф. Математическое моделирование процесса получения жидких продуктов из газов каталитического крекинга на цеолитсодержащем катализаторе, модифицированном металлами vi и viii групп // Кинетика и катализ. 2017. Т. 58. № 4. С. 438–446.
- 15 Копылов М.В., Татаренков Е.А., Ткачев О.А., Горбатова А.В. Оптимизация процесса отжима растительного масла методом математического моделирования // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 1. С. 28–33. doi: 10.20914/2310-1202-2017-1-28-33

References

- 1 Zhilin A.A., Fedorov A.V. Physico-mathematical modeling of capillary impregnation of porous materials. Applied Mechanics and Technical Physics. 2009. vol. 50. no. 1. pp. 42–51. (in Russian).
- 2 Meirmanov A.M., Zimin R.N., Galtseva O.V., Galtsev O.A. Mathematical models of diffusion in poroelastic media. Scientific Bulletin. Series: Mathematics. Physics. 2012. no. 17 (136). pp. 77–90. (in Russian).
- 3 Korolev L.V., Bytev D.O. Modeling of the subdiffusion process of mass transfer. MNTF First Kosygin readings. 2017. vol. 7. pp. 1826–1828. (in Russian).
- 4 Korolev L.V., Bytev D.O. Accidental transfer in a porous sorbing medium. Universities Bulletin. Chemistry and chemical technology. 2013. vol. 56. no. 6. pp. 86–89. (in Russian).
- 5 Shrinivasa D. J., Mathur S. M. Compound feed production for livestock. Current science. 2020. vol. 118. no. 4. pp. 553.
- 6 Iegorov B. et al. Condition and prospects of development of compound feed production for Salmonidae. Grain Products and Mixed Fodder's. 2020. vol. 20. no. 1. pp. 31-35.
- 7 Afanasyev V.A. Guidelines for the technology of feed stuff, protein-vitamin-mineral concentrates and premixes. In 2 v. Voronezh, Elist, 2008. 490 p. (in Russian).
- 8 Peng W.X., Marchal J.L.M., Van der Poel A.F.B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing. Animal Feed Science and Technology. 2018. vol. 237. pp. 129-153.
- 9 Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Vasilenko V.N., Frolova L.N. et al. Evaluation of the grain flakes technology efficiency for the production of feed stuff for young cattle. Feed production. 2017. no. 6. pp. 33-38. (in Russian).
- 10 Selezneva N.V., Izhboldina S.N. The use of pre-starter and starter feed stuff for growing young cattle. Feeding agricultural animals and fodder production. 2016. no. 9. pp. 17-24. (in Russian).
- 11 Lohri C.R. et al. Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low-and middle-income settings. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 2017. vol. 16. no. 1. pp. 81-130.
- 12 Oskui S.M. Resonating mass sensors for detecting microgram scale objects in fluids. Riverside, 2016.
- 13 Zakurdaeva A.V., Rezanova E.V. Numerical simulation of the formation process of a liquid spherical microballoon containing a gas bubble. 2017. (in Russian).
- 14 Hajzade S.M., Zeynalova S.Kh., Agaeva T.F. Mathematical modeling of the process of obtaining liquid products from gases of catalytic cracking on a zeolite-containing catalyst modified with metals of groups vi and viii. Kinetics and Catalysis. 2017. vol. 58. no. 4. pp. 438-446. (in Russian).
- 15 Kopylov M.V., Tatarenkov E.A., Tkachev O.A., Gorbatova A.V. Optimization of oil extraction process by the method of mathematical modeling. Proceedings of VSUET. 2017. vol. 79. no. 1. pp. 28-33. doi: 10.20914/2310-1202-2017-1-28-33. (in Russian).

Сведения об авторах

Александр Н. Остриков д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Игорь С. Богомолов к.т.н., первый заместитель генерального директора, Научно-производственный центр «ВНИИ комбикормовой промышленности», пр-т Труда, 91, г. Воронеж, 394026, Россия, igor-bog@yandex.ru

Павел В. Филиппов старший инженер, сектор специальных технологий и оборудования производства комбикормов. БВД и премиксов, Научно-производственный центр «ВНИИ комбикормовой промышленности», пр-т Труда, 91, г. Воронеж, 394026, Россия, filiptsov9393@mail.ru

Вклад авторов

Александр Н. Остриков выполнил расчеты

Игорь С. Богомолов написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат


Павел В. Филиппов выполнил эксперимент

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Alexander N. Ostrikov Dr. Sci. (Engin.), head of department, technology of fats, processes and apparatuses of chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-2335-0017>

Igor S. Bogomolov Cand. Sci. (Engin.), first deputy general director, Scientific-production center VNII of feed industry, Truda Av., 91 Voronezh, 394026, Russia, igor-bog@yandex.ru

Pavel V. Filiptsov senior engineer, sector of special technologies and equipment for the production of animal feed, protein and vitamin supplements and premixes, Scientific-production center VNII of feed industry, Truda Av., 91 Voronezh, 394026, Russia, filiptsov9393@mail.ru

Contribution

Alexander N. Ostrikov performed computations

Igor S. Bogomolov wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Pavel V. Filiptsov conducted an experiment

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 09/07/2020	После редакции 20/07/2020	Принята в печать 29/07/2020
Received 09/07/2020	Accepted in revised 20/07/2020	Accepted 29/07/2020