





## Математическая модель процесса нанесения слоя хитозана на поверхность гранул псевдокапсулированных рыбных комбикормов





Константин В. Мишинеv	<sup>1</sup> mishinev.k@yandex.ru	 0009-0006-0202-7700
Александр Н. Остриков	<sup>1</sup> ostrikov27@yandex.ru	 0000-0002-2335-0017
Максим В. Копылов	<sup>1</sup> kopylov-maks@yandex.ru	 0000-0003-2678-2613
Александр С. Муравьев	<sup>1</sup> hntrun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Аннотация.** Выполненные исследования по разработке псевдокапсулированных комбикормов с использованием вакуумного напылению жировых компонентов на поверхность экструдированных гранул и последующим нанесением защитной хитозановой оболочки на их поверхность гранул позволили установить наиболее значимые факторы, влияющие на коэффициент удержания масла и величину удельных энергозатрат. Выявлено, что коэффициент удержания масла зависит от величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, диаметра экструдированных гранул и продолжительности основных операций технологического процесса, а на величину удельных затрат оказывают существенное влияние содержание жира в экструдированных гранулах, частота вращения лопастных валов дражировочного аппарата и степень заполнения его рабочей камеры. Для оценки значимости влияния исследуемых факторов в результате математической обработки получены регрессионные уравнения, описывающие зависимость коэффициента удержания масла от величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, диаметра экструдированных гранул и продолжительности основных операций технологического процесса и величины удельных затрат от содержания жира в экструдированных гранулах, частоты вращения лопастных валов дражировочного аппарата и степени заполнения его рабочей камеры. Адекватность регрессионных уравнений подтверждена уровнем значимости коэффициентов уравнения ( $p > 0,05$ ) и значением коэффициентов детерминации ( $R^2 > 0,98$ ). Были построены графические зависимости в виде двухпараметрических зависимостей, которые позволили выполнить углубленный анализ поверхности отклика и визуализацию двухфакторного влияния полученных регрессионных моделей. Полученные регрессионные зависимости были использованы в методике инженерного расчета дражировочного аппарата для производства псевдокапсулированных рыбных комбикормов.

**Ключевые слова:** математическая модель, регрессионные уравнения, псевдокапсулирование, рыбный комбикорм..

## Mathematical model of the process of applying a chitosan layer to the surface of pseudo-encapsulated fish feed pellets

Konstantin V. Mishinev	<sup>1</sup> mishinev.k@yandex.ru	 0009-0006-0202-7700
Alexander N. Ostrikov	<sup>1</sup> ostrikov27@yandex.ru	 0000-0002-2335-0017
Maxim V. Kopylov	<sup>1</sup> kopylov-maks@yandex.ru	 0000-0003-2678-2613
Alexander S. Muraviev	<sup>1</sup> hntrun@mail.ru	 0000-0002-5989-0752

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Abstract.** Research conducted on the development of pseudo-encapsulated compound feed using vacuum deposition of fat components onto the surface of extruded pellets and subsequent application of a protective chitosan coating allowed us to identify the most significant factors influencing oil retention and specific energy consumption. It was found that oil retention depends on the vacuum level in the coating machine's working chamber, the diameter of the extruded pellets, and the duration of the main process steps. Specific energy consumption is significantly affected by the fat content of the extruded pellets, the rotational speed of the coating machine's paddle shafts, and the filling level of the coating machine's working chamber. To assess the significance of the influence of the studied factors, regression equations were obtained because of mathematical processing. These equations describe the dependence of the oil retention coefficient on the vacuum value in the working chamber of the coating machine, the diameter of the extruded granules, and the duration of the main operations of the technological process, as well as the value of specific costs on the fat content in the extruded granules, the rotation frequency of the paddle shafts of the coating machine, and the degree of filling of its working chamber. The adequacy of the regression equations was confirmed by the significance level of the equation coefficients ( $p > 0.05$ ) and the value of the determination coefficients ( $R^2 > 0.99$ ). Graphic dependencies were constructed in the form of two-parameter dependencies, which allowed for an in-depth analysis of the response surface and visualization of the two-factor influence of the obtained regression models. The obtained regression dependencies were used in the engineering calculation methodology for a coating machine for the production of pseudo-encapsulated fish feed.

**Keywords:** mathematical model, regression equations, pseudoencapsulation, fish feed.

Для цитирования

Мишинеv К.В., Остриков А.Н., Копылов М.В., Муравьев А.С. Математическая модель процесса нанесения слоя хитозана на поверхность гранул псевдокапсулированных рыбных комбикормов // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 28–35. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-28-35

For citation

Mishinev K.V., Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Muravyov A.S. Mathematical model of the process of applying a chitosan layer to the surface of pseudo-encapsulated fish feed pellets. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 28–35. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-28-35

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

## Введение

Современная аквакультура сталкивается с комплексом взаимосвязанных проблем при производстве комбикормов для ценных видов рыб. Традиционные гранулированные корма подвержены вымыванию водорастворимых нутриентов (витаминов, аминокислот, минеральных веществ), окислению липидов и микробиологической порче при контакте с водой [14]. Эти потери не только снижают питательную ценность кормов и увеличивают затраты на единицу продукции, но и ухудшают качество воды в рыбоводных емкостях [1]. Особую остроту проблема приобретает при использовании альтернативных растительных компонентов с высоким содержанием жиров, которые активно внедряются в рецептуры для замещения дорогостоящей рыбной муки [8].

Перспективным технологическим решением выступает псевдокапсулирование – нанесение на поверхность гранул защитных инертных оболочек, способных предотвращать потери нутриентов и продлевать сроки хранения кормов. В качестве материала для таких покрытий особый интерес вызывает хитозан – высокомолекулярный аминополисахарид, получаемый дезацетилированием хитина панцирей ракообразных [11]. Данный биополимер обладает уникальным сочетанием свойств: химическая инертность, пленкообразующая способность, биоразлагаемость, нетоксичность, а также выраженные барьерные и антимикробные характеристики [6, 10].

Исследования последних лет подтверждают эффективность применения хитозановых покрытий в кормопроизводстве для аквакультуры [12]. Еще в ранних работах Гамыгина с соавторами было показано, что использование композиций хитозана при производстве гранулированных кормов методом сухого прессования позволяет существенно улучшить их физико-механические характеристики и снизить непродуцируемые потери [4]. Производственные испытания на осетровых рыбах продемонстрировали повышение усвояемости питательных веществ и привесов на 10–12% при снижении конверсии корма на 15%. Василенко В.Н. с соавторами разработали рецептуры псевдокапсулированных комбикормов для радужной форели, адаптированные к условиям Центрального федерального округа [3].

Зарубежные исследования также подтверждают перспективность данного направления. Evmorfia Athanasopoulou, Sophia Mitsoula, Arkadios Dimitroglou, Theofania Tsironi изучали влияние биоразлагаемых хитозановых покрытий на качественные параметры тонущих рыбных кормов; ими установлено, что нанесение 2% раствора хитозана снижает потери витамина С при погружении в морскую воду, причем

диффузионные коэффициенты потерь уменьшаются с  $1,10 \times 10^{-10}$  до  $1,20 \times 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с [9]. Muñoz-Tebar N. с соавторами представили обзор антибактериальных и антиоксидантных свойств хитозановых пленок с добавлением биоактивных соединений [15]. В работе малайзийских исследователей во главе с Norfarah Adiba Binti Tarmizi и с соавторами показано, что двухслойные покрытия на основе желатиновой камеди и хитозана снижают водопоглощение гранул с 146,2% до 92,9% и формируют равномерную адгезивную пленку на поверхности [18].

Однако, несмотря на доказанную эффективность хитозановых покрытий, технология их нанесения на поверхность гранул рыбных комбикормов до настоящего времени разрабатывается преимущественно эмпирически. Процесс формирования оболочки включает сложные взаимосвязанные физико-химические явления: растекание раствора по поверхности гранулы, капиллярную пропитку поверхностного слоя, испарение растворителя, диффузию вещества покрытия и его кристаллизацию при достижении пересыщения [2]. В промышленных аппаратах (барабанных или с псевдооживленным слоем) на эти процессы накладываются гидродинамические факторы – движение гранул, их перемешивание, распределение распыляемого раствора [7].

Для перехода от эмпирического подбора режимов к научно обоснованному проектированию технологии необходимы математические модели, описывающие кинетику формирования покрытия и позволяющие прогнозировать его характеристики в зависимости от параметров процесса. В смежных областях (фармацевтическая промышленность, производство удобрений, функциональных покрытий) накоплен значительный опыт математического моделирования процессов нанесения оболочек на гранулы. Кучинский Н.А. с соавторами разработали модель формирования покрытий на основе теории клеточных автоматов, учитывающую диффузию вещества в растворе, испарение влаги и кристаллизацию; модель позволяет рассчитывать толщину покрытия, распределение влаги и концентраций компонентов [5]. Rui Lan с соавторами [16] представили развернутый обзор методов моделирования равномерности покрытия частиц в газо-твердых системах, включая статистические модели на основе распределения времени пребывания, метод Монте-Карло, CFD-DEM подходы и их многочисленные комбинации. Yinqiang Song, Tuo Zhou, Ruiqi Bai, Man Zhang, Hairui Yang проанализировали применение CFD-DEM для моделирования процессов грануляции и покрытия во влажных псевдооживленных слоях, рассматривая сопряжение газожидкостной гидродинамики с движением дисперсной фазы [17].

В работах, непосредственно связанных с кормами для аквакультуры, Evmorfia Athanassopoulou, Sophia Mitsoula, Arkadios Dimitroglou, Theofania Tsironi применили классический подход на основе второго закона Фика для моделирования кинетики потерь витамина С из покрытых и непокрытых гранул [9]. Однако этот подход описывает лишь финальную стадию – диффузионное высвобождение нутриентов из уже сформированной оболочки, но не сам процесс ее образования.

### Материалы и методы

Для обработки экспериментальных исследований был применен программный комплекс STATISTICA 10.0.1011.

Для получения уравнения регрессии матричные данные были обработаны при помощи программного комплекса MS Excel.

Для оценки внешнего вида, цвета, запаха, а также нормируемым показателям качества, которые в работе использовали ГОСТ Р 51899–2002 «Комбикорма гранулированные. Общие технические условия».

Определение размера гранул проводили штангенциркулем, измеряя диаметр и длину десяти гранул, взятых подряд. По полученным данным вычисляют среднеарифметическое значение диаметра и длины гранул.

### Результаты и обсуждение

Учитывая, что важным аспектом нанесения слоя хитозана на поверхность экструдированных гранул при производстве псевдокапсулированных комбикормов является совокупность двух процессов [13], рассмотрим моделирование процесса напыления на поверхность гранул жидких компонентов и нанесение слоя хитозановой оболочки для ценных пород рыб отдельно.

К числу приоритетных параметров, определяющих эффективность процесса напыления на поверхность гранул жидких компонентов, являются величина разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, размеры (диаметр) экструдированных гранул и продолжительность основных операций технологического процесса нанесения жировых компонентов, которая колебалась в диапазоне 235–440 с (продолжительность заполнения дражировочного аппарата – 30–50 с; продолжительность создания вакуума – 30–60 с; продолжительность распыливания жидкости на экструдированные гранулы – 45–80 с; продолжительность вакуумной компенсации – 100–220 с; продолжительность выгрузки гранул – 30 с) и масса гранул.

Эффективность процесса напыления на поверхность гранул жидких компонентов оценивали по значениям коэффициента удержания жидких компонентов (жира) в экструдированных гранулах, который определялся по формуле

$$\delta = m_1 / m_2, \quad (1)$$

где  $m_1$  – масса жидких компонентов (жира), остающихся в гранулах, после напыления, г;  $m_2$  – суммарная масса жидких компонентов (жира), остающихся в гранулах, после напыления и начальная масса исходных гранул до напыления масла, г.

Если коэффициент удержания жидких компонентов (жира)  $\delta$  изменялся в диапазоне от 0,18 до 0,26, то это свидетельствовало о хорошем удержании жира в капиллярах и порах экструдированных гранул.

Доминирующее влияние на коэффициент удержания жидких компонентов (жира)  $\delta$  оказывала величина разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата.

В процессе выполнения исследований экструдированные гранулы с диаметром от  $0,8 \times 10^{-3}$  до  $12 \times 10^{-3}$  м и влажности 6–8% подвергались вакуумированию при разряжении в дражировочном аппарате в пределах 20,0–40,0 кПа и частоте вращения лопастных валов дражировочного аппарата – 4,19–20,93 с<sup>-1</sup>. При этом коэффициент заполнения экструдатом камеры дражировочного аппарата изменялся в диапазоне 0,20–0,75; продолжительность перемешивания – 120–145 с и содержание жира в экструдированных гранулах – 22–35%.

Частицы хитозана, наносимые на поверхность гранул, должны создавать плотную, относительно герметичную оболочку, минимизирующую доступ кислорода воздуха к поверхности гранул, и поддерживать необходимую водостойкость гранул в течение 30 мин.

Важное значение имел гранулометрический состав (форма и размеры) частиц хитозана, наносимых на поверхность гранул для создания хитозановой оболочки, для определения эффективных режимов процесса.

Количество наносимых на поверхность гранул частиц хитозана во всех опытах составляло от 0,5% до 3,0% к массе гранулы. В ходе исследований по вакуумному напылению жировых компонентов на поверхность гранул установлены наиболее значимые факторы, влияющие на коэффициент удержания масла: величина разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, диаметр экструдированных гранул и продолжительность основных операций технологического процесса нанесения жировых компонентов (таблица 1)

Таблица 1.

Зависимость коэффициента удержания масла от величины разряжения в рабочей камере, диаметра гранул и продолжительности процесса

Table 1.

Dependence of the oil retention coefficient on the vacuum in the working chamber, the diameter of the granules, and the duration of the process

Коэффициент удержания масла Oil retention coefficient	Величина разряжения в рабочей камере, кПа Vacuum value in the working chamber, kPa	Диаметр гранул, м Granule diameter, m	Время, с Time, s
0,15	20	0,00008	205
0,16	20	0,00012	218
0,17	20	0,0004	243
0,18	20	0,0006	268
0,2	20	0,0008	294
0,24	20	0,0012	328
0,16	25	0,00008	220
0,18	25	0,00012	245
0,2	25	0,0004	270
0,24	25	0,0006	296
0,27	25	0,0008	318
0,29	25	0,0012	366
0,19	30	0,00008	245
0,21	30	0,00012	272
0,23	30	0,0004	302
0,28	30	0,0006	330
0,31	30	0,0008	368
0,33	30	0,0012	415
0,22	40	0,00008	285
0,26	40	0,00012	311
0,29	40	0,0004	338
0,31	40	0,0006	367
0,34	40	0,0008	402
0,38	40	0,0012	462

Выявлены также наиболее значимые параметры, влияющие на величину удельных затрат: содержание жира в экструдированных гранулах, частота вращения лопастных валов дражировочного аппарата и степени заполнения его рабочей камеры (таблица 2).

Таблица 2.

Зависимость удельных энергозатрат от содержания жира в гранулах, частоты вращения и степени заполнения рабочей камеры

Table 2.

Dependence of specific energy consumption on the fat content in the pellets, rotational speed, and degree of filling of the working chamber

Удельные энергозатраты, (кВт×ч)/кг Specific energy consumption, (kWh)/kg	Содержание жира, % Fat content, %	Частота вращения, с <sup>-1</sup> Rotation speed, s <sup>-1</sup>	Степень заполнения Filling ratio
0,00461	22	3,14	0,3
0,00421	22	3,14	0,35
0,00417	22	3,14	0,4
0,00416	22	3,14	0,45
0,00411	22	3,14	0,5
0,00408	22	3,14	0,6
0,00504	26	3,663	0,3
0,0049	26	3,663	0,35
0,0048	26	3,663	0,4
0,00476	26	3,663	0,45
0,00473	26	3,663	0,5
0,00468	26	3,663	0,6
0,00581	30	4,187	0,3
0,005628	30	4,187	0,35
0,005567	30	4,187	0,4
0,005457	30	4,187	0,45
0,005427	30	4,187	0,5
0,005394	30	4,187	0,6
0,006878	35	4,71	0,3
0,006552	35	4,71	0,35
0,006346	35	4,71	0,4
0,006241	35	4,71	0,45
0,00621	35	4,71	0,5
0,006005	35	4,71	0,6

Для анализа значимости влияния каждого из вышеуказанных параметров проводили трехфакторный эксперимент, варьируя размеры наносимых частиц хитозана, частоту вращения барабана дражировочного аппарата и продолжительность процесса.

Для определения рациональных значений продолжительности достижения равномерного и полного распределения частиц хитозана изучали зависимость коэффициента удержания масла  $\delta$  от величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата  $P_v$ , диаметра экструдированных гранул  $d_{гр}$  и продолжительности основных операций технологического процесса нанесения жировых компонентов  $\tau$ . В результате математической обработки с помощью программного обеспечения для статистического анализа данных StatSoft STATISTICA 10.0.1011 получено регрессионное уравнение

$$\delta = 0,0282 \cdot 1,465 \cdot 10^{-4} P_v - 316,57 d_{gp} + 0,00086 \tau + 13,257 \cdot P_v d_{gp} + 6,69245 \cdot 10^{-7} P_v \tau + 0,679 d_{gp} \tau - 0,00286 P_v d_{gp} \tau, \quad (2)$$

Адекватность регрессионного уравнения (2) была подтверждена уровнем значимости коэффициентов уравнения ( $p > 0,05$ ) и значением коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,99024$ ).

В результате математической обработки результатов исследования процесса напыления на поверхность гранул жидких компонентов и нанесения слоя хитозановой оболочки для ценных пород рыб с помощью программного обеспечения для статистического анализа данных StatSoft STATISTICA 10.0.1011 получено регрессионное уравнение:

$$\begin{aligned} \Theta = & 0,00877 - 0,000126x_1 - 0,00214x_2 - \\ & - 0,01318x_3 + 8,04225 \cdot 10^{-5} x_1x_2 - \\ & - 0,000132x_1x_3 + 0,00716x_2x_3 - \\ & - 0,0001128x_1x_2x_3, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Theta$  – удельные энергозатраты,  $\Theta$ , кВт×ч/кг;  $x_1$  – содержание жира в гранулах, %;  $x_2$  – частота вращения барабана дражировочного аппарата, с<sup>-1</sup>;  $x_3$  – степень заполнения барабана дражировочного аппарата гранулами, %.

Адекватность регрессионного уравнения (3) была подтверждена уровнем значимости коэффициентов уравнения ( $p > 0,05$ ) и значением коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,990235$ ).

Уравнения (2) и (3) представляют собой полные трехфакторные модели, включающие все парные и тройные взаимодействия переменных.

Для более точной оценки значимости влияния исследуемых факторов (величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, диаметра экструдированных гранул времени технологического процесса) на функцию отклика (коэффициент удержания масла), а также влияния исследуемых факторов (степени заполнения рабочей камеры дражировочного аппарата гранулами, содержания жира в гранулах, частоты вращения барабана дражировочного аппарата) на величину удельных энергозатрат были построены соответствующие графические зависимости – соответственно рисунок 1 и 2 в виде двухпараметрических зависимостей. Они позволили выполнить углубленный анализ поверхности отклика и визуализацию двухфакторного влияния полученных регрессионных моделей (2) и (3).

Регрессионные уравнения, описывающие зависимость коэффициента удержания масла  $\delta$  от продолжительности основных операций технологического процесса нанесения жировых компонентов  $\tau$  (с), величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата  $P_v$  (кПа) и диаметра экструдированных гранул  $d_{гр}$  (м), приведены ниже:

$$\delta = 0,1524 + 0,0012 \cdot \tau + 0,0043 \cdot P_v - 1,3813E6 \cdot \tau^2 + 1,9134E5 \cdot \tau \cdot P_v - 0,0001 \cdot P_v^2, \quad (4)$$

$$\delta = 0,0921 + 0,0142 \cdot P_v + 77,7529 \cdot d_{gp} - 0,0002 \cdot P_v^2 + 2,4004 \cdot P_v \cdot d_{gp} - 27534,7215 \times d_{gp}^2, \quad (5)$$

$$\delta = 0,2077 + 0,0021 \cdot \tau - 134,5075 \cdot d_{gp} - 2,0223E6 \cdot \tau^2 + 0,4979 \cdot \tau \cdot d_{gp} - 46708,3991 \times d_{gp}^2, \quad (6)$$

где  $\delta$  – коэффициент удержания масла;  $P_v$  – величина разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, кПа;  $d_{гр}$  – диаметр экструдированных гранул, м;  $\tau$  – продолжительность основных операций технологического процесса нанесения жировых компонентов, с.

Регрессионные уравнения, описывающие зависимость удельных энергозатрат  $\mathcal{E}$  (кВт×ч/кг) от содержания жира в гранулах  $x_1$ , %; частоты вращения барабана дражировочного аппарата  $x_2$ , с<sup>-1</sup>; степени заполнения барабана дражировочного аппарата гранулами  $x_3$ , %, приведены ниже:

$$\mathcal{E} = 0,002 + 0,0002 x_1 - 0,0052 x_3 + 7,3971E7 \cdot x_1^2 - 9,8304E5 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0071 \cdot x_3^2, \quad (7)$$

$$\mathcal{E} = 0,0038 + 5,7712 E5 \cdot x_2 - 0,005 \cdot x_3 + 0,0002 \cdot x_2^2 - 0,0008 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0071 \cdot x_3^2, \quad (8)$$

$$\mathcal{E} = 0,0006 - 0,0001 \cdot x_2 + 0,0002 \cdot x_1, \quad (9)$$

где  $\mathcal{E}$  – удельные энергозатраты, Э, кВт×ч/кг;  $x_1$  – содержание жира в гранулах, %;  $x_2$  – частота вращения барабана дражировочного аппарата, с<sup>-1</sup>;  $x_3$  – степень заполнения барабана дражировочного аппарата гранулами, %.

Регрессионные уравнения (4–9) адекватно описывают графические зависимости на рисунках 1 и 2, что подтверждается высокими значениями коэффициентов детерминации ( $R^2 = 0,985$ ) при уровне значимости коэффициентов уравнений ( $p > 0,05$ ).

Уравнения (4)–(6) являются их частными случаями (двухфакторными сечениями), полученными путем фиксации одного из факторов на постоянном уровне. Такой подход позволяет упростить интерпретацию модели и построить графические зависимости (рисунок 1, 2), демонстрирующие характер влияния двух исследуемых параметров на функцию отклика при стабилизированном значении третьего фактора.

### Заключение

1. Получены регрессионные уравнения процесса напыления на поверхность гранул порошка хитозана, позволяющие определить характер изменения коэффициента удержания масла от величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата, диаметра экструдированных гранул и продолжительности технологического процесса и величины удельных энергозатрат от содержания жира в гранулах, частоты вращения барабана дражировочного аппарата и степени его заполнения гранулами.

2. Полученные регрессионные уравнения использованы в методике инженерного расчета дражировочного аппарата для производства псевдокапсулированных рыбных комбикормов.

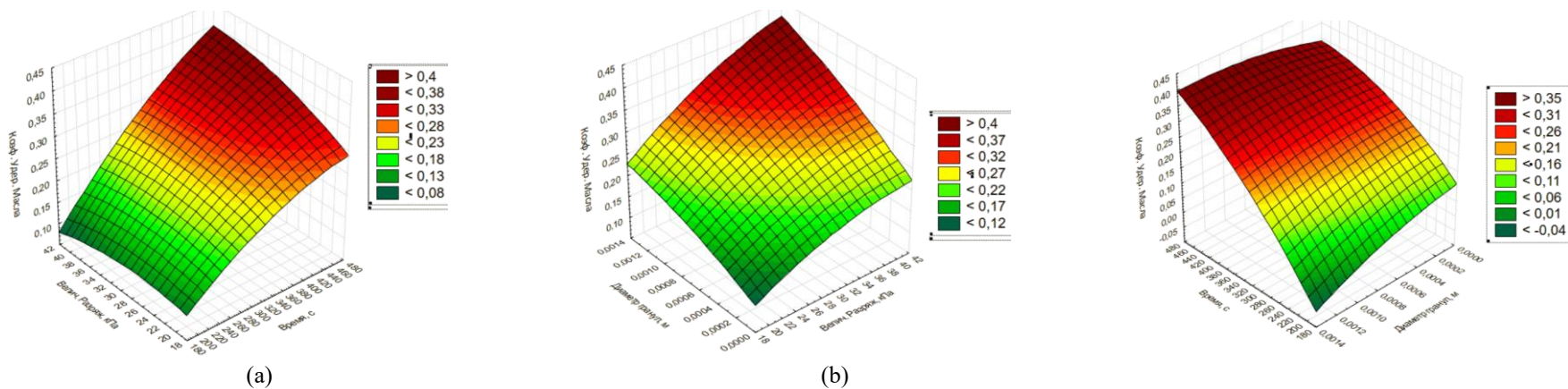


Рисунок 1. Зависимости коэффициента удержания масла от величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата и времени технологического процесса (а), диаметра экструдированных гранул и величины разряжения в рабочей камере дражировочного аппарата (б), времени технологического процесса и диаметра экструдированных гранул (с)

Figure 1. Dependences of the oil retention coefficient on the vacuum level in the working chamber of the coating machine and the time of the technological process (a), the diameter of the extruded granules and the vacuum level in the working chamber of the coating machine (b), the time of the technological process and the diameter of the extruded granules (c)

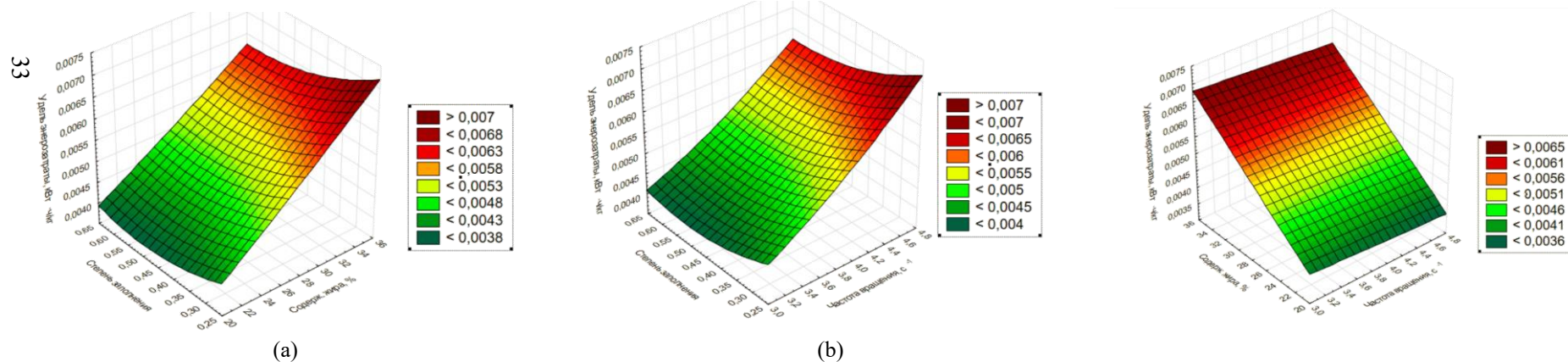


Рисунок 2. Зависимости удельных энергозатрат от степени заполнения рабочей камеры дражировочного аппарата гранулами и содержания жира в гранулах (а); частоты вращения барабана дражировочного аппарата и степени заполнения рабочей камеры дражировочного аппарата гранулами и содержания жира в гранулах (б); содержания жира в гранулах и частоты вращения барабана дражировочного аппарата (с)

Figure 2. Dependences of specific energy consumption on the degree of filling of the working chamber of the coating machine with granules and the fat content in the granules (a); the rotation frequency of the drum of the coating machine and the degree of filling of the working chamber of the coating machine with granules and the fat content in the granules (b); the fat content in the granules and the rotation frequency of the drum of the coating machine (c)

## Литература

- 1 Абросимова К.С., Абросимова Н.А., Васильева Л.М. Проблемы выращивания личинок и мальков осетровых рыб в интенсивной аквакультуре и пути их решения // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 2–9. С. 1882–1886.
- 2 Афанасьев В.А., Остриков А.Н., Богомолов И.С. и др. Разработка технологии высокоусвояемых комбикормов с вакуумным напылением жидких компонентов // *Вестник ВГУИТ*. 2021. Т. 83. № 1. С. 94–101.
- 3 Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Кочкин И.Ю. и др. Разработка продуктивных псевдокапсулированных комбикормов для радужной форели, выращиваемой в Центральном федеральном округе Российской Федерации // *Вестник ВГУИТ*. 2023. Т. 85. № 1. С. 174–179. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-174-179
- 4 Гамыгин Е.А., Ковалев Н.В., Сидоров И.И. и др. Эффективное использование хитозана в комбикормах // *Труды ВНИРО*. М.: ВНИРО, 2016.
- 5 Кучинский Н.А., Васецкий А.М., Кениг Е.Я., Кольцова Э.М. Моделирование процесса формирования покрытия гранул на основе теории клеточных автоматов // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4-5. С. 1069–1073.
- 6 Мишинев К.В., Остриков А.Н., Копылов М.В., Богомолов И.С. Обоснование применения хитина и хитозана для псевдокапсулирования рыбных комбикормов // *Вестник ВГУИТ*. 2025. Т. 87. № 4. С. 63–69. doi: 10.20914/2310-1202-2025-4-63-69
- 7 Пат. 2221437 Российская Федерация, МПК А23К 1/18. Способ производства гранулированных кормов для рыб; заявитель и патентообладатель ВНИРО. № 2002116824/13; заявл. 24.06.2002; опубл. 10.01.2004.
- 8 Пономарев С.В., Грозеску Ю.Н., Бахарева А.А. Корма и кормление рыб в аквакультуре. М.: Моркнига, 2013. 410 с.
- 9 Athanasopoulou E., Mitsoula S., Dimitroglou A., Tsironi T. Chitosan-based biodegradable coatings for securing nutrients in extruded fish feed pellets // *Aquaculture and Fisheries*. 2025. V. 10. № 6. P. 1062–1068. doi: 10.1016/j.aaf.2025.04.001
- 10 Maikaew J., Srisang N., Tambunlertchai S. et al. An innovative chitosan-coated aquatic feed pellets production from coastal waste using top-spray fluidized bed drying // *Scientific Reports*. 2026. V. 16. P. 5166. doi: 10.1038/s41598-026-35937-0
- 11 Bhoopathy S., Inbakandan D., Rajendran R. et al. Curcumin loaded Chitosan nanoparticles fortify shrimp feed pellets with enhanced antioxidant activity // *Materials Science and Engineering: C*. 2021. V. 120. P. 111737. doi: 10.1016/j.msec.2020.111737
- 12 Cho Y.I., No H.K., Meyers S.P. Physicochemical characteristics and functional properties of various commercial chitin and chitosan products // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1998. V. 46. № 10. P. 3839–3843. doi: 10.1021/jf971047f
- 13 Chaabani A., Ben Said M., Abdelmouleh M. et al. Optimization of vacuum coating conditions to improve oil retention in Trout feed // *Aquacultural Engineering*. 2020. V. 91. P. 102127. doi: 10.1016/j.aquaeng.2020.102127
- 14 FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Rome: FAO, 2024. doi: 10.4060/cd0683en
- 15 Muñoz-Tebar N., López-Carballo G., Fernández-Santos M. et al. Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review // *Polymers*. 2023. V. 15. № 2. P. 396. doi: 10.3390/polym15020396
- 16 Lan Y., Wang S., Zhao H. A review of the modelling methods for coating uniformity in gas-solid systems // *Powder Technology*. (Примечание: требуются год, том, номер, страницы, DOI)
- 17 Song J., Liu B., Cheng Y. CFD-DEM modeling of wet granulation and coating processes in fluidized beds: A review // *Chemical Engineering Science*. (Примечание: требуются год, том, номер, страницы, DOI)
- 18 Tarmizi N.A.B., Azid A.B., Amin K.A.M. Dual-Layer Gellan Gum–Chitosan Biopolymer Coatings Enhance Structural Integrity and Nutrient Retention of Fish Feed Pellets // *Malaysian Journal of Chemistry*. 2025. V. 27. № 6.
- 19 Giacomello E., Sava G., Vita F. et al. Chitosan-coated alginate micro-particles delivery of active principles through conventional pelleted food - A study in Tilapia (*Oreochromis niloticus*) // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. V. 165. P. 82–92. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.159
- 20 Sompong U., Tong Siri S., Pumas C. Enhancing color and immunity of ornamental fish (*Carassius auratus*) with edible algal coating on fish feed pellet // *Natural and Life Sciences Communications*. 2026. V. 25. № 2. P. e2026025.

## References

- 1 Abrosimova K.S., Abrosimova N.A., Vasilyeva L.M. Problems of growing larvae and juveniles of sturgeon fish in intensive aquaculture and ways to solve them. *Fundamental Research*. 2015. no. 2–9. pp. 1882–1886. (in Russian).
- 2 Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Bogomolov I.S. et al. Development of technology for highly digestible compound feeds with vacuum spraying of liquid components. *Bulletin of VSUET*. 2021. vol. 83. no. 1. pp. 94–101. (in Russian).
- 3 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Kochkin I.Yu. et al. Development of productive pseudo-encapsulated compound feeds for rainbow trout grown in the Central Federal District of the Russian Federation. *Bulletin of VSUET*. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 174–179. doi: 10.20914/2310-1202-2023-1-174-179 (in Russian).
- 4 Gamygin E.A., Kovalev N.V., Sidorov I.I. et al. Effective use of chitosan in compound feeds. *Proceedings of VNIRO*. Moscow: VNIRO, 2016. (in Russian).
- 5 Kuchinsky N.A., Vasetsky A.M., Kenig E.Ya., Koltsova E.M. Modeling of the granule coating formation process based on cellular automata theory. *Fundamental Research*. 2013. no. 4-5. pp. 1069–1073. (in Russian).
- 6 Mishinev K.V., Ostrikov A.N., Kopylov M.V., Bogomolov I.S. Justification of the use of chitin and chitosan for pseudo-encapsulation of fish feeds. *Bulletin of VSUET*. 2025. vol. 87. no. 4. pp. 63–69. doi: 10.20914/2310-1202-2025-4-63-69 (in Russian).
- 7 Patent no. 2221437, Russian Federation, IPC A23K 1/18. Method for producing granulated fish feed. Applicant and patent holder VNIRO. no. 2002116824/13; filed 24.06.2002; publ. 10.01.2004. (in Russian).

- 8 Ponomarev S.V., Grozesku Yu.N., Bakhareva A.A. Feeds and feeding of fish in aquaculture. Moscow: Morkniga, 2013. 410 p. (in Russian).
- 9 Athanasopoulou E., Mitsoula S., Dimitroglou A., Tsironi T. Chitosan-based biodegradable coatings for securing nutrients in extruded fish feed pellets. *Aquaculture and Fisheries*. 2025. vol. 10. no. 6. pp. 1062–1068. doi: 10.1016/j.aaf.2025.04.001.
- 10 Maikaew J., Srisang N., Tambunlertchai S. et al. An innovative chitosan-coated aquatic feed pellets production from coastal waste using top-spray fluidized bed drying. *Scientific Reports*. 2026. vol. 16. article 5166. doi: 10.1038/s41598-026-35937-0.
- 11 Bhoopathy S., Inbakandan D., Rajendran R. et al. Curcumin loaded Chitosan nanoparticles fortify shrimp feed pellets with enhanced antioxidant activity. *Materials Science and Engineering: C*. 2021. vol. 120. article 111737. doi: 10.1016/j.msec.2020.111737.
- 12 Cho Y.I., No H.K., Meyers S.P. Physicochemical characteristics and functional properties of various commercial chitin and chitosan products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1998. vol. 46. no. 10. pp. 3839–3843. doi: 10.1021/jf971047f.
- 13 Chaabani A., Ben Said M., Abdelmouleh M. et al. Optimization of vacuum coating conditions to improve oil retention in Trout feed. *Aquacultural Engineering*. 2020. vol. 91. article 102127. doi: 10.1016/j.aquaeng.2020.102127.
- 14 FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Rome: FAO, 2024. doi: 10.4060/cd0683en.
- 15 Muñoz-Tebar N., López-Carballo G., Fernández-Santos M. et al. Chitosan edible films and coatings with added bioactive compounds: Antibacterial and antioxidant properties and their application to food products: A review. *Polymers*. 2023. vol. 15. no. 2. article 396. doi: 10.3390/polym15020396.
- 16 Lan Y., Wang S., Zhao H. A review of the modelling methods for coating uniformity in gas-solid systems. *Powder Technology*. [Note: Year, volume, issue, page numbers, and DOI are required].
- 17 Song J., Liu B., Cheng Y. CFD-DEM modeling of wet granulation and coating processes in fluidized beds: A review. *Chemical Engineering Science*. [Note: Year, volume, issue, page numbers, and DOI are required].
- 18 Tarmizi N.A.B., Azid A.B., Amin K.A.M. Dual-Layer Gellan Gum–Chitosan Biopolymer Coatings Enhance Structural Integrity and Nutrient Retention of Fish Feed Pellets. *Malaysian Journal of Chemistry*. 2025. vol. 27. no. 6.
- 19 Giacomello E., Sava G., Vita F. et al. Chitosan-coated alginate micro-particles delivery of active principles through conventional pelleted food - A study in Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. vol. 165. pp. 82–92. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.159.
- 20 Sompong U., Tongsir S., Pumas C. Enhancing color and immunity of ornamental fish (*Carassius auratus*) with edible algal coating on fish feed pellet. *Natural and Life Sciences Communications*. 2026. vol. 25. no. 2. article e2026025.

#### Сведения об авторах

**Константин В. Мишинец** аспирант, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mishinev.k@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0202-7700>

**Александр Н. Остриков** д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, ostrikov27@yandex.ru

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

**Максим В. Копылов** д.т.н., доцент, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kopylov-maks@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

**Александр С. Муравьев** к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, hntrun@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about authors

**Konstantin V. Mishinev** graduate student, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mishinev.k@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0006-0202-7700>

**Alexander N. Ostrikov** Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, ostrikov27@yandex.ru

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

**Maxim V. Kopylov** Dr. Sci. (Engin.), docent, technology of fats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kopylov-maks@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

**Alexander S. Muraviev** Cand. Sci. (Engin.), docent, machines and equipment for food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, hntrun@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5989-0752>

#### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 03/01/2026	После редакции 14/01/2026	Принята в печать 21/01/2026
Received 03/01/2026	Accepted in revised 14/01/2026	Accepted 21/01/2026