





Анализ эффективности применения низкочастотных механических колебаний при экстрагировании белкового изолята из рапсового шрота




Денис М. Мусиенко ¹	arrayden@gmail.com	 0009-0000-4351-7040
Павел П. Иванов ¹	ipp7@ya.ru	 0000-0002-8086-3273
Анатолий М. Попов ¹	popov4116@ya.ru	 0000-0003-0728-7211
Андрей Г. Семенов ¹	agsem55@ya.ru	 0000-0002-3136-3942

¹ Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д. 6, г. Кемерово, 650000, Россия

Аннотация. Общемировой рост численности населения и увеличение антропогенной нагрузки на природные ресурсы обуславливают необходимость перехода к альтернативным видам продовольственного обеспечения. В этом аспекте растительное сырье могло бы закрыть потребность человека в пропорционально повышающемся дефиците пищевого белка. В статье представлен способ получения белкового изолята из частично обезжиренного рапсового шрота, основанный на экстрагировании раствором хлористого натрия в условиях низкочастотных механических колебаний. Целью исследования является анализ эффективности применения низкочастотных механических колебаний, выявление оптимальных значений их частоты и амплитуды, обеспечивающих эффективное извлечение белка из растительного сырья с сохранением его нативной структуры. Проведен анализ энергоэффективности, а также получение динамических характеристик процесса массопередачи. Метод включает в себя использование вибрационной перфорированной насадки, которая совершает возвратно-поступательные движения с частотой в диапазоне (10-20 Гц) и амплитудой (3–10 мм), что позволяет в обрабатываемом объеме сформировать турбулентный гидродинамический режим, значительно ускоряющий процесс массопередачи. По завершении этапа экстрагирования производилось осаждение белка в изоэлектрической точке при помощи раствора янтарной кислоты. Экспериментальные данные, полученные в лабораторных условиях, показывают возможность достижения степени извлечения растительного белка до 90,25% относительно исходного содержания в обрабатываемом сырье при сокращении времени экстрагирования до 15 минут. Метод характеризуется экологичностью, отсутствием токсичных реагентов. Результаты исследования, установленные экспериментальным путем в трехкратном повторении, показали, что оптимальными параметрами для извлечения белковых компонентов, является частота 15 Гц и амплитуда 5 мм. Также была проведена оценка биохимических показателей, результаты которой подтверждают перспективность применения вибрационной технологии в пищевой и биотехнологической промышленности для производства функциональных белковых продуктов.

Ключевые слова: растительный белок, пищевая промышленность, функциональные свойства, биохимические показатели, низкочастотные колебания, вибрационное экстрагирование, янтарная кислота, степень извлечения белка, массообменный процесс.

Analysis of the effectiveness of low-frequency mechanical vibrations in the extraction of protein isolate from rapeseed meal

Denis M. Musienko ¹	arrayden@gmail.com	 0009-0000-4351-7040
Pavel P. Ivanov ¹	ipp7@ya.ru	 0000-0002-8086-3273
Anatoliy M. Popov ¹	popov4116@ya.ru	 0000-0003-0728-7211
Andrey G. Semenov ¹	agsem55@ya.ru	 0000-0002-3136-3942

¹ Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia

Abstract. Global population growth and an increase in anthropogenic pressure on natural resources necessitate the transition to alternative types of food supply. In this aspect, vegetable raw materials could cover the human need for a proportionally increasing dietary protein deficiency. The article presents a method for obtaining protein isolate from partially skimmed rapeseed meal based on extraction with a solution of sodium chloride under conditions of low-frequency mechanical vibrations. The aim of the study is to analyze the effectiveness of low-frequency mechanical vibrations, to identify optimal values of their frequency and amplitude, ensuring effective protein extraction from plant raw materials while preserving its native structure. An analysis of energy efficiency has been carried out, as well as obtaining dynamic characteristics of the mass transfer process. The method involves the use of a vibrating perforated nozzle that performs reciprocating movements with a frequency in the range (10-20 Hz) and an amplitude (3-10 mm), which allows a turbulent hydrodynamic regime to be formed in the processed volume, significantly accelerating the mass transfer process. At the end of the extraction stage, the protein was deposited at an isoelectric point using a solution of succinic acid. Experimental data obtained in laboratory conditions show the possibility of achieving the degree of extraction of vegetable protein up to 90.25% relative to the initial content in the processed raw materials while reducing the extraction time to 15 minutes. The method is characterized by environmental friendliness and the absence of toxic reagents. The results of the study, experimentally repeated three times, showed that the optimal parameters for extracting protein components are a frequency of 15 Hz and an amplitude of 5 mm. An assessment of biochemical parameters was also carried out, the results of which confirm the prospects of using vibration technology in the food and biotechnological industries for the production of functional protein products.

Keywords: vegetable protein, food industry, functional properties, biochemical indicators, low-frequency vibrations, vibration extraction, succinic acid, protein extraction rate, mass exchange process.

Для цитирования

Мусиенко Д.М., Иванов П.П., Попов А.М., Семенов А.Г. Анализ эффективности применения низкочастотных механических колебаний при экстрагировании белкового изолята из рапсового шрота // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 193–202. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-193-202

For citation

Musienko D.M., Ivanov P.P., Popov A.M., Semenov A.G. Analysis of the effectiveness of low-frequency mechanical vibrations in the extraction of protein isolate from rapeseed meal. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 193–202. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-193-202

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

Введение

В условиях постоянной трансформации продовольственных систем, обусловленной ростом мирового населения, все чаще поднимается вопрос о необходимости развития производства, способного снизить растущий дефицит белка. Для решения такой задачи используется технология получения белковых изолятов из растительного сырья с возможностью его применения в качестве альтернативного источника животного белка. Переход на растительный белок обусловлен схожестью его структуры с белками животного происхождения, наличием большинства незаменимых аминокислот, высокой биологической ценностью, легкой усвояемостью, низким содержанием холестерина по сравнению с животным белком, а также обусловлен возможностью моделирования аминокислотного состава, за счет включения в смесь белковых изолятов различных растительных культур [1]. Растущий спрос на продукты для организации здорового питания способствует более углубленному изучению влияния растительного белка на организм человека. Многочисленные исследования показывают, что употребление растительного белка в пищу способствует улучшению функции сердца, а также снижению риска развития хронических заболеваний [2]. Рапсовый шрот, как побочный продукт масложировой промышленности, в основном используемый как белковая кормовая добавка, в своей структуре содержит до 48% белка, что делает его перспективным сырьем для промышленного производства пищевых белковых изолятов. Белок рапса характеризуется сбалансированным аминокислотным составом, высокой биологической ценностью и отсутствием глютена. В России производство рапса активно развивается в регионах Центрального Черноземья и Сибири, что обеспечивает доступность и низкую стоимость сырья, а также решает вопросы утилизации отходов масложировой промышленности, создавая предпосылки для развития безотходных технологий [3,4].

Несмотря на высокий потенциал, промышленное получение белкового изолята из шрота рапса сопряжено с рядом технологических ограничений. Традиционный метод получения изолята включает в себя водно-щелочное или водно-солевое экстрагирование, фильтрацию, осаждение и сушку [5]. Время проведения процесса для такого метода является существенно большим и может достигать 8–15 часов непрерывного массопереноса, при этом степень извлечения составляет не более 60–70%. Это обусловлено значительным внешним диффузионным сопротивлением и ограниченной скоростью массопереноса в пограничном слое [6].

При этом использование агрессивных щелочных реагентов существенно влияет на экологическую составляющую и безопасность полученного продукта.

Для ускорения процесса экстрагирования применяются различные физико-химические методы, такие как предварительная ферментативная, механическая, ультразвуковая и другие виды обработки сырья, которые часто характеризуются высокой энергоемкостью, многостадийностью, использованием токсичных реагентов, значительной потерей промывных вод и риском денатурации белка [5, 7, 8]. В то же время анализ существующих технологий показал, что ввиду сложности и многостадийности процесса такие способы не всегда позволяют получать белковый изолят с необходимыми показателями качества. Кроме того, они требуют наличия сложного технологического оборудования, систем контроля и регулирования основных технологических параметров, применения большого количества промывных вод, что формирует проблемы их последующей утилизации или регенерации, сопровождающиеся большими энергетическими и экономическими затратами на производство, а также часто предполагают использование токсичных и экологически небезопасных растворителей [9–12].

Рассматриваемый способ интенсификации процесса экстрагирования растительного белка предполагает использование 10%-го раствора хлористого натрия (10% NaCl) в комбинации с низкочастотными механическими колебаниями, которые за счет формирования гидродинамических областей знакопеременного давления, способствуют снижению внешнего диффузионного сопротивления и ускорению массообменных процессов [13]. Последующее осаждение белка в изоэлектрической точке (pH 4,45–4,65) осуществляется с помощью 10% раствора янтарной кислоты [14]. Полученный осадок фильтруется, промывается водой и направляется на сушку. Достоинством метода является применение неагрессивных реагентов как для извлечения, так и для осаждения белка. При этом применение янтарной кислоты в качестве фенол-связывающего реагента позволяет образовывать легко-растворимые устойчивые комплексы между фенольными соединениями, которые, впоследствии, легко удаляются водой на стадии промывания, что позволяет значительно сократить объем промывных вод. Также метод характеризуется безопасным для здоровья и экологии проведением процесса экстрагирования, понижением содержания фенольных соединений, что положительно сказывается на органолепти-

ческих показателях, значительной интенсификации процесса экстрагирования и сохранении функциональных свойств изолята.

Цель работы – разработка и экспериментальная апробация технологии получения высококачественного белкового изолята из частично обезжиренного рапсового шрота, за счет наложения на систему низкочастотных механических колебаний, с последующей обработкой экстракта раствором янтарной кислоты, что позволит обеспечить повышение выхода экстрактивных веществ при сохранении функциональных свойств белкового изолята.

Материалы и методы

В эксперименте использовали частично обезжиренный рапсовый шрот, промышленного производства с содержанием белка 45,83% на сухое вещество (ГОСТ 13496.4–2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. М., 2019. П. 8), предварительно очищенный от примесей и измельченный до эквивалентного диаметра частиц 0,5–1 мм. В качестве экстрагента был использован 10% раствор хлорида натрия (NaCl), подаваемый в аппарат в соотношении 1:10. Температура проведения процесса экстрагирования 50–60°С.

Технология реализуется в лабораторном аппарате периодического действия с объемом рабочей камеры 3 литра и диаметром 140 мм (23). На расстоянии 80 мм от дна аппарата установлена вибрационная перфорированная насадка диаметром 134 мм и отверстиями Ø3 мм с долей живого сечения (отношением площади отверстий к общей площади вибрационной насадки) 15%. Насадка совершает гармонические колебания, которые генерируют гидродинамические волны в системе, а их регулирование происходит за счет контролируемых параметров частоты (10–20 Гц) и амплитуды (3–10 мм). Для обеспечения достоверности полученных результатов, каждый эксперимент проводился в трехкратном повторении, последующую обработку вели по осредненным значениям.

Частично обезжиренный рапсовый шрот, измельченный до частиц с эквивалентным размером 0,5–1 мм, навеской 0,15 кг, добавляли в рабочую емкость, в которую предварительно наливали 1,5 дм³ 10% раствора поваренной соли, тем самым обеспечивая соотношение фаз 1:10 в системе «твердое тело – жидкость». После включения привода вибрационной насадки производился отбор проб экстракта каждые 5 минут без остановки процесса. Пробы проходили многоступенчатую фильтрацию и в полученном экстракте определялась концентрация извлеченного белка. Степень извлечения белкового изолята рассчитывали, как отношение извлеченного белка к исходному содержанию белка в шроте.

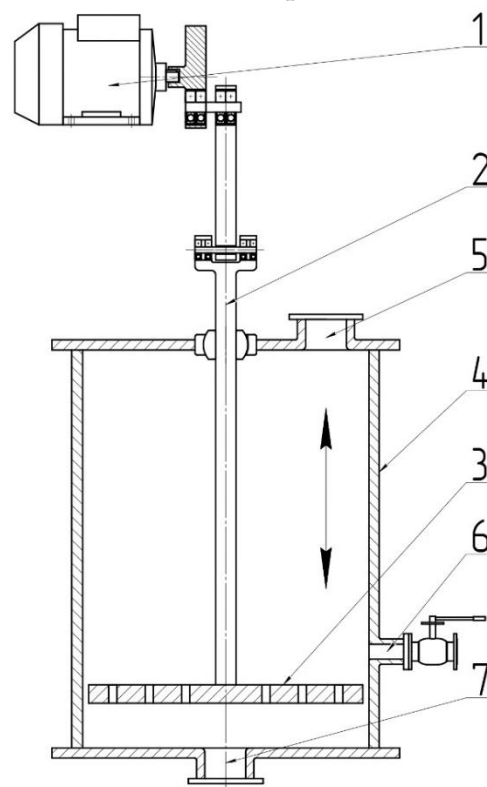


Рисунок 1. Вибрационный аппарат периодического действия, для интенсификации процесса экстрагирования растительного белка, где: 1 – асинхронный электродвигатель; 2 – шток; 3 – перфорированная тарелка; 4 – рабочая камера аппарата; 5, 7 – патрубки ввода / вывода фаз; 6 – патрубок для отбора проб.

Figure 1. A vibrational apparatus for batch operation to intensify the process of extracting plant protein, where: 1 – asynchronous motor; 2 – rod; 3 – perforated plate; 4 – working chamber of the apparatus; 5, 7 – input/output nozzles for phases; 6 – sampling nozzle.

Для определения концентрации полученного белка в растворе использовался метод предварительного кислотного осаждения до изoeлектрической точки pH 4,45–4,65 и многоступенчатой промывкой дистиллированной водой, с последующим термическим воздействием на экстракт, для полной дегидратации имеющейся жидкости при 65–75 °С в течение 12 часов, после чего производилось измельчение полученного продукта с последующим взвешиванием на весах с погрешностью 0,01 г.

Полученные кинетические кривые извлечения характеризуют протекание процесса при разных режимах обработки системы «твердое тело – жидкость», определяемых значениями частоты (f) и амплитуды (A) колебаний: A (3, 5, 7, 10 мм), f (10, 15, 20 Гц).

Коагуляция белкового изолята из солевого экстрагента проводилась 10% раствором янтарной кислоты с экспериментально подобранным соотношением 1:20, такое соотношение

обеспечивает подкисление среды до изоэлектрической точки (рН = 4,45–4,65). Коагуляция сопровождалась постоянным перемешиванием в течение 25 минут и поддержанием температуры раствора 50–60 °С. Осаждение белка производилось при помощи гравитационного метода в течение 5 часов, без перемешивания, с дальнейшей водной промывкой и сушкой в течение 12 часов при температуре 65–75 °С.

Полученные образцы сравнивались с образцами, полученными традиционным методом, где экстрагирование проводилось без наложения низкочастотных механических колебаний, в тех же условиях, но со временем 1 час, 3 часа, 5 часов и 8 часов.

Оценка содержания сырого протеина полученного в ходе проведения экспериментального метода проводилась в соответствии с ГОСТ 13496.4–2019 корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Оценка биохимических показателей полученного изолята проводилась в соответствии с методикой М 04–38–2009 Корма, комбикорма и сырье для их производства. Методика измерений массовой доли аминокислот методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза "Капель".

В процессе проведения эксперимента были получены значения подводимой электрической мощности при помощи ваттметра типа Д 5016 с классом точности 0,2 по ГОСТ 8476–93. Эти значения являются полной затрачиваемой энергией, где учитываются все потери: на трение в подшипниковом узле, в кривошипно-шатунном механизме, потери в меди и на передачу подвижным частям аппарата, кинетической энергии. Для расчета средне-интегральной полезной мощности использована формула:

$$N_{cp} = N_{п} - N_{xx} \quad (1)$$

где N_{cp} – средне-интегральная полезная мощность, Вт; $N_{п}$ – значения полной мощности, полученные с помощью ваттметра, Вт; N_{xx} – мощность электродвигателя, замеренная во время холостого хода, для каждого режима вибрационного аппарата, Вт.

По (1) были рассчитаны общие энергозатраты для каждого эксперимента. Расчет удельных энергозатрат на экспериментальных режимах выполнен по формуле:

$$Q_{уд} = \frac{N_{cp} * t_{c \max}}{m * 1000} \quad (2)$$

где $Q_{уд}$ – удельные затраты энергии на килограмм обрабатываемого сырья кДж/кг; $t_{c \max}$ – время достижения максимальной концентрации белка в экстрагенте, с; N_{cp} – средне-интегральное значение потребляемой мощности электродвигателя при рассматриваемом режиме работы вибрационного аппарата за время $t_{c \max}$, Вт; m – масса сырья загруженного в вибрационный аппарат, кг.

Статистическая обработка производилась в редакторе электронных таблиц MS Excel, с усреднением полученных параметров и стандартных отклонений ($n = 3$).

Результаты

Экспериментально установлено, что наложение низкочастотных механических колебаний на систему «твердое тело – жидкость» позволяет значительно интенсифицировать процесс экстрагирования и при этом, получить значительное повышение степени извлечения экстрагируемых веществ – белкового изолята.

Таблица 1.

Кинетика процесса экстрагирования белка.

Table 1.

Kinetics of the protein extraction process.

Режим Mode [мм / Гц mm/Hz]	Концентрация растительного белка в растворе, г/л Concentration of vegetable protein in the solution, g/l			
	5 мин / 5 min	10 мин / 10 min	15 мин / 15 min	20 мин / 20 min
A = 3 / f = 10	4,11	7,05	9,13	10,16
A = 3 / f = 15	4,28	7,14	9,67	10,56
A = 3 / f = 20	4,99	7,24	9,96	10,84
A = 5 / f = 10	4,37	7,64	11,63	11,42
A = 5 / f = 15	5,54	8,65	12,53	12,36
A = 5 / f = 20	4,93	8,93	10,95	10,74
A = 7 / f = 10	5,00	8,25	10,64	10,57
A = 7 / f = 15	5,23	8,96	11,61	11,59
A = 7 / f = 20	5,32	8,51	11,74	11,56
A = 10 / f = 10	5,4	8,16	11,46	11,32
A = 10 / f = 15	5,53	9,37	12,02	11,89
A = 10 / f = 20	5,42	8,35	11,57	11,49

Полученные кинетические кривые характеризуются значительным ростом концентрации белка в экстракте (12,53 г/л) для режима $A = 5$ мм, $f = 15$ Гц, за 15 минут проведения процесса, при этом кинетические кривые извлечения по «Традиционному методу» также имеют экспоненциальный характер, но за период до 8 часов экстрагирования и с достижением концентрации лишь до 8,10 г/л.

Аналогично и для других режимов работы вибрационной установки, степень извлечения белка составляет от 70 до 90%, как показано на рисунке 3, что говорит о целесообразности использования данного метода интенсификации процесса экстрагирования белка из обезжиренного шрота рапса. При этом необходимо найти рациональные значения частоты и амплитуды колебаний вибрационной насадки с учетом энергозатрат, а также стабильности полученного экстракта. Для этого подставим в (2), значения полезной мощности, полученные в ходе проведения экспериментов.

Экспериментальным путем доказано, что использование амплитуды $A = 3$ мм в частотном диапазоне $f = (10-20)$ Гц имеет наименьшие энергозатраты и его можно охарактеризовать режимом «мягкого» перемешивания. Недостаток энергии делает сложным преодоление диффузионного сопротивления, что сказывается на степени извлечения белка (рисунок 3), тем самым применение такого режима считается нецелесообразным. Режим $A = 5$ мм, $f = 15$ Гц, является самым эффективным, так как

при умеренных энергозатратах, извлечение растительного белка происходит во всем временном интервале проведения эксперимента (таблица 1). Вероятно, это следствие достижения режима «достаточной» турбулентности гидродинамического потока, который в полной мере проникает в поры сырья. Режимы $A = 7$ мм и $A = 10$ мм показывают, что при меньшей степени извлечения наблюдается значительное энергопотребление. Такие режимы характеризуются перерасходом энергии и могут быть отнесены к неэффективным.

Таблица 2.

Удельные энергозатраты на экстрагирования растительного белка в вибрационном аппарате в зависимости от частоты и амплитуды колебаний насадки

Table 2.

Specific energy consumption for extracting plant protein in a vibrational apparatus, depending on the frequency and amplitude of the attachment oscillations

f, Гц f, Hz	Удельные энергозатраты, кДж/кг Specific energy consumption, kJ/kg			
	A = 3 мм mm	A = 5 мм mm	A = 7 мм mm	A = 10 мм mm
10	8	12	17	26
12,5	21	26	35	46
15	40	47	55	72
17,5	56	62	74	86
20	72	82	88	92

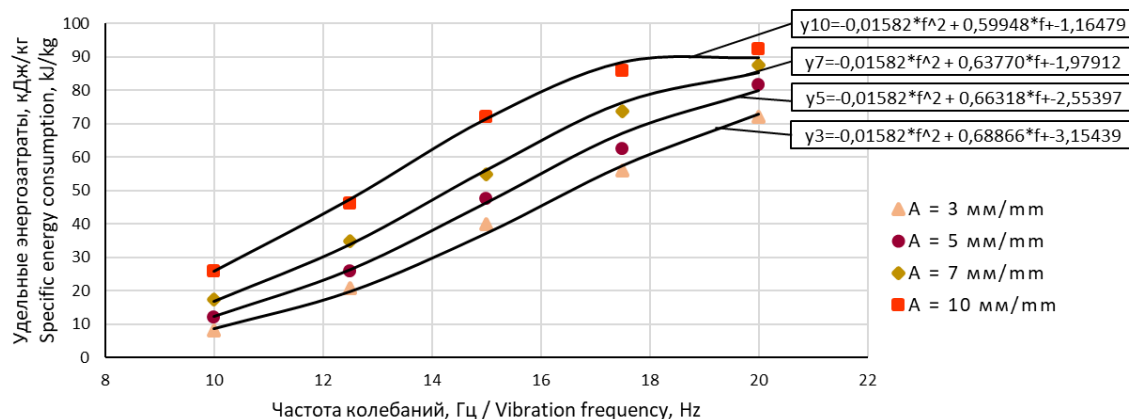


Рисунок 2. Зависимость удельных затрат энергии аппарата от частоты колебаний вибрационной насадки

Figure 2. Dependence of the specific energy consumption of the apparatus on the vibration frequency of the vibrating attachment

Полученные экспериментальные данные затрачиваемой мощности адекватно описываются полиномиальными зависимостями второго порядка, из-за зависимости отклика от двух факторов, при этом каждый экстремум кривой находится в исследуемой области, что позволяет выявить оптимальные параметры частоты при разных значениях амплитуды [15].

Анализ кривых из рисунка 2 показывает, что увеличение подводимой энергии к исследуемой системе ведет к повышению энергоемкости процесса, при относительно одинаковой степени извлечения. При этом связь между энергетическими показателями при экстрагировании растительного белка из шрота рапса, описывается единым уравнением поверхности

откликов $Q_{уд}(f, A)$ полученным в результате многомерного регрессионного анализа удельных энергозатрат частоты колебания и амплитуды вибративной насадки (3).

$$Q_{уд}(f, A) = -4,103 + 0,727f + 0,326A - 0,0158f^2 - 0,0127fA - 0,0032A^2; \quad (3)$$

$$R^2 = 0.997$$

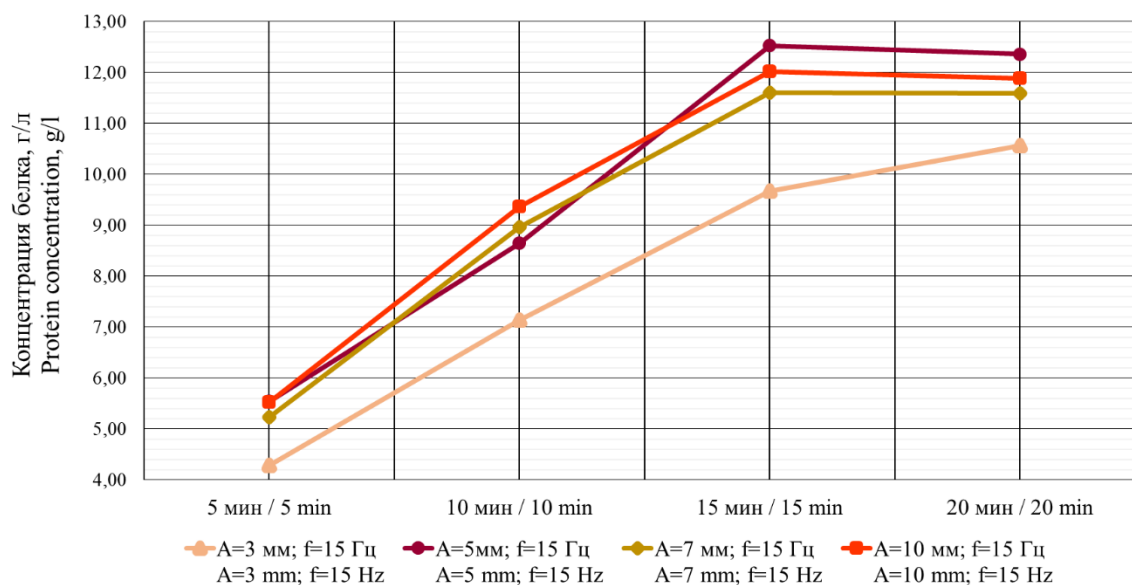


Рисунок 3. Концентрация растительного белка при различных режимах низкочастотных механических колебаний в сравнении с традиционным методом

Figure 3. Concentration of vegetable protein under different modes of low-frequency mechanical vibrations in comparison with the traditional method

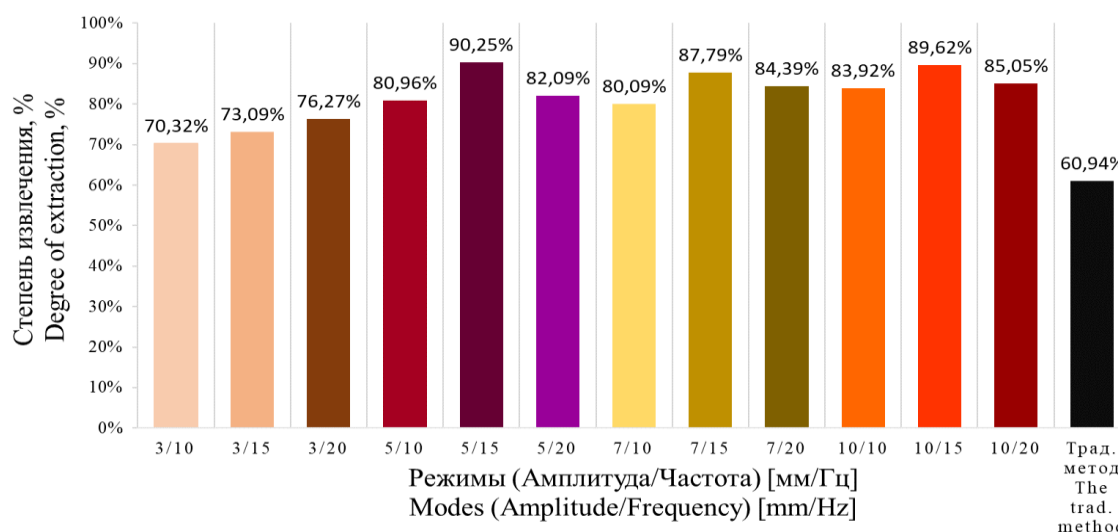


Рисунок 4. Степень извлечения белка при различных режимах работы вибративного аппарата и традиционном методе экстрагирования

Figure 4. Protein extraction rate under different operating modes of the vibration apparatus and the traditional extraction method

Как видно из рисунка 4, наибольшая степень извлечения растительного изолята составляет 90,25% при режиме работы вибративного аппарата с амплитудой 5 мм и частотой 15 Гц. При этом видно, что и другие вибративные режимы позволяют значительно повысить выход белка, а продолжительность проведения процесса уменьшить в 32 раза (вместо 8 часов, 15 минут),

по сравнению с традиционным методом при котором степень извлечения составляет 60,94%.

Обсуждение

Основным фактором замедления процесса экстрагирования при традиционном методе, является внешнее диффузионное сопротивление, действие которого объясняется формированием на поверхности экстрагируемых твердых

частиц коллоидных соединений, препятствующих диффузионному переносу белковых молекул из клеточной структуры твердой частицы в ядро экстракционным потоком [13, 15]. Предлагаемый метод, за счет использования энергии гидродинамических колебаний позволяет не только распределять концентрационные слои белкового изолята по всему рабочему объему экстрагента, но и увеличить основную площадь контакта взаимодействия сырья с раствором экстрагента в системе «твердое тело – жидкость», что повышает скорость проведения процесса и выход белкового изолята.

Как видно из представленных рисунков 3 и 4, степень извлечения для режимов с амплитудой $A = 3$ мм показывает наиболее низкую эффективность экстрагирования – степень извлечения белка составляет 70–76% при всех исследованных частотах (10, 15, 20 Гц). Такое поведение объясняется недостаточной величиной гидродинамического воздействия, величина которого определяется соотношением амплитуды и частоты колебаний тарелки. Так, при малой амплитуде колебаний количество подводимой энергии недостаточно для разрушения коллоидного слоя на поверхности твердых частиц и эффективного обновления пограничного слоя. Несмотря на увеличение частоты от 10 до 20 Гц, прирост степени извлечения для данной амплитуды незначителен, что подтверждает нецелесообразность использования такого режима. Режимы с амплитудой $A = 7$ мм и $A = 10$ мм при тех же параметрах частоты и аналогичном проведении процесса, демонстрируют промежуточное значение степени извлечения белка

(80–90%), что ниже показателей рационального режима ($A = 5$ мм, $f = 15$ Гц). Снижение эффективности обусловлено нарастающим пенообразованием, что в свою очередь способствует снижению площади контакта фаз за счет чего происходит частичное экранирование поверхности частиц микропузырьками воздуха, тем самым снижая скорость массообмена [16]. Кроме того, процесс характеризуется повышенными энергозатратами (таблица 2), при насыщении экстракта кислородом воздуха, а непрерывное влияние гидродинамических колебаний способствует увеличению «паразитной» области, повышая этот негативный эффект. Это явление также объясняет причину уменьшения степени извлечения белка, при превышении времени процесса в 15 минут. Но, явление интенсивного пенообразования указывает на хорошие функциональные свойства белка [17]. Для того чтобы уменьшить вспенивание уже выделенного белкового изолята, применяют антивспенивающие агенты или пеногасители, снижающие поверхностное натяжение образовавшейся пены [16].

Пищевая ценность белкового изолята, полученного по предложенной технологии приведена в таблице 3. В данном случае суточная норма на человека была установлена по показателям эталонного белка. Общепринято, использовать сравнительную оценку полученного продукта на основании эталонного белка, использующегося в рекомендации FAO/WHO (ФАО/ВОЗ Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН и Всемирной организацией здравоохранения) [18].

Аминокислотный состав полученного изолята

Таблица 3.

Amino acid composition of the obtained isolate

Table 3.

Аминокислоты Amino acids	Содержание, г/100г Content, g/100g	Неопределенность Uncertainty	Норма, г/100г Norm, g/100g	Отклонение% Deviation%
Аланин Alanine	4,3	±1,1	-	-
Аргинин Arginine	8,2	±3,3	-	-
Валин Valine	4,9	±1,9	5,0	122
Гистидин Histidine	2,2	±1,1	1,6	137
Глицин Glycine	5,1	±1,7	-	-
Лейцин и изолейцин (суммарно) Leucine and isoleucine (combined)	11	±3,0	9,1	121
Лизин Lysine	3,6	±1,2	4,8	75
Метионин Methionine	1,8	±0,6	2,3	78
Пролин Proline	4,9	±1,3	-	-
Серин Serine	5,1	±1,3	-	-
Треонин Threonine	4,5	±1,8	4,0	180
Фенилаланин и тирозин (суммарно) Phenylalanine and tyrosine (combined)	6,5	±1,2	4,1	158

Данные в таблицы 3 показывают высокое содержание таких незаменимых кислот как валин, гистидин, лейцин и изолейцин (суммарно), треонин, а также фенилаланин и тирозин (суммарно) превышают установленное рекомендательное содержание белка FAO/WHO, что показывает

его высокую пищевую ценность. Качество белка определяется по его наименьшему отклонению от нормы, в данном случае это лизин, содержащийся в полученном продукте в количественном соотношении от нормы 75%, что характерно для растительных белков [18].

Это говорит о том, что употребление человеком экстрагированного растительного изолята рапса должно осуществляться в качестве высокобелковой добавки к основному рациону человека, для восполнения дефицитных аминокислот. Критический диапазон неопределенности (таблицы 3), рассчитывался по среднеквадратическим отклонениям, он показывает оценку достоверности полученных результатов [19].

По сравнению с существующими источниками [9–12], данный способ имеет ряд преимуществ, характеризующихся использованием неагрессивных реагентов для извлечения белка, с сохранением его функциональных свойств, повышение органолептических свойств, за счет применения янтарной кислоты, в качестве осадителя, а также реализация метода без дорогостоящей техники.

Функциональные свойства полученного изолята показывают растворимость белка более 85% с его эмульгирующей способностью 45–50 мл/г, позволяют применять белковый изолят в качестве высокобелковой добавки или использовать как белковый заменитель в напитках [20–22]. Полученные данные функциональных свойств соответствуют требованиям к белковым ингредиентам пищевой промышленности, что подтверждается сопоставимыми показателями рапсового белка [7, 14, 17, 19].

Заключение

В ходе выполненного исследования разработан и экспериментально подтвержден эффективный способ получения белкового изолята из частично обезжиренного рапсового

шрота, основанный на наложении на систему низкочастотных механических колебаний, для интенсификации процесса. Установлено, что для извлечения максимального количества белкового изолята, оптимальными режимными параметрами работы вибрационной установки являются частота 15 Гц и амплитуда 5 мм, при которых степень извлечения белка достигает 90,25%, а длительность процесса экстрагирования до достижения равновесной концентрации сокращается до 15 минут.

Научная апробация эксперимента позволяет наглядно увидеть закономерности массопереноса при влиянии на систему «твердое тело – жидкость» вибрационным воздействием, что показывает актуальность и эффективность данного способа. При этом полученный продукт характеризуется высоким содержанием сырого протеина с хорошими показателями пищевой ценности и функциональными свойствами.

Предложенный способ технологически прост, экологически безопасен, может быть масштабирован, сохраняет нативную структуру белкового изолята и может быть рекомендован для внедрения на предприятиях масложировой и пищевой промышленности. Перспективными направлениями дальнейшего исследования изучения процесса экстрагирования растительного белка являются оптимизация технологии для непрерывного процесса экстрагирования, автоматизация контроля параметров и переключений режимов вибрационной установки, применение технологии с другими видами сырья и т. д.

Литература

- 1 Колпакова В.В., Бызов В.А. Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор // Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 3. С. 324–335. doi: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335
- 2 Нотова С.В., Маршинская О.В., Казакова Т.В. Роль микроэлементов в антиоксидантной системе защиты организма (обзор) // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106. № 1. С. 183–191. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-183
- 3 Красноштанова А.А., Шульц Л.В. Получение и оценка функциональных свойств белковых изолятов и гидролизатов из растительного сырья // Химия растительного сырья. 2022. № 4. С. 299–309. doi: 10.14258/jcrpm.20220410952
- 4 Миневиц И.Э., Ушаповский В.И., Яковлева А.А., Зайцева Л.А. Влияние способа переработки семян рапса на их белковый комплекс // Аграрная наука. 2024. Т. 1. № 10. С. 185–191. doi: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-185-191
- 5 Мусиенко Д.М., Иванов П.П., Попов А.М. Современные технологии получения растительного белка // Пищевые технологии: сб. тез. III Междунар. симпозиума. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2024. С. 187–191.
- 6 Рождественская Л.Н., Чугунова О.В. Технические решения для эффективного использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11. № 4. С. 6–18. doi: 10.14529/food230401
- 7 Ampofo J., Ngadi M. Ultrasound-assisted processing: Science, technology and challenges for the plant-based protein industry // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. V. 84. P. 105955. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105955
- 8 Das R.S., Tiwari B.K., Chemat F. et al. Impact of ultrasound processing on alternative protein systems: Protein extraction, nutritional effects and associated challenges // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. V. 91. P. 106234. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106234
- 9 Алексаночкин Д.И., Фоменко И.А., Алексеева Е.А., Черноха И.М., Машенцева Н.Г. Получение растительного белка из семян и жмыха промышленной конопли: обзор способов переработки для использования в пищевой промышленности // Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 2. С. 188–197. doi: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197
- 10 Пат. 11066440 US. Processes for increasing plant protein yield from biomass / Gordon R., Gorodnitsky I., Voloshin N., Promtov M.A.; заявитель и патентообладатель Cavitation Technologies, Inc. опублик. 20.07.2021.
- 11 Пат. 2709384 С1 Российская Федерация, МПК А23J 3/16, А23J 1/14. Способ получения соевого изолированного белка / Морозов Д.В., Сушков В.В., Радиновский О.; № 2019113459; заявл. 30.04.2019; опублик. 17.12.2019. Бюл. № 35.

- 12 Đermanović B., Vujetić J., Sedlar T. et al. Optimization of protein extraction from rapeseed oil cake by dephenolization process for scale-up application using artificial neural networks // *Foods*. 2025. V. 14. № 10. P. 1762. doi: 10.3390/foods14101762
- 13 Плотникова Л.В., Плотников И.Б., Иванов П.П. и др. Исследование способа интенсификации экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 4. С. 849–858. doi: 10.21603/2074-9414-2021-4-849-858
- 14 Georgiev R., Kalaydzhiev H., Ivanova P. et al. Multifunctionality of rapeseed meal protein isolates prepared by sequential isoelectric precipitation // *Foods*. 2022. V. 11. № 4. P. 541. doi: 10.3390/foods11040541
- 15 Dabbour M., Jiang H., Mintah B.K. et al. Ultrasonic-assisted protein extraction from sunflower meal: Kinetic modeling, functional, and structural traits // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. V. 74. P. 102824. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102824
- 16 Deotale S.M., Dutta S., Moses J.A., Anandharamkrishnan C. Foaming and defoaming—concepts and their significance in food and allied industries: a review // *Discover Chemical Engineering*. 2023. V. 3. № 1. P. 9. doi: 10.1007/s43938-023-00025-6
- 17 Смольникова Я.В., Коломейцев А.В., Стутко О.В. и др. Оценка функционально-технологических свойств белкового изолята рапса сорта Сибирский // *Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки*. 2022. Т. 4. № 8. С. 36–42. doi: 10.53360/2788-7995-2022-4(8)-5
- 18 FAO/WHO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Paper 92. Rome: FAO, 2013.
- 19 Низкий С.Е., Кодирова Г.А., Загуменная Г.В. Аминокислотный состав белка зерна Glycine max (L.) Merr. сортов Амурской селекции // *Вестник КрасГАУ*. 2025. № 8. С. 3–12. doi: 10.36718/1819-4036-2025-8-3-12
- 20 Дегтярев И.А., Фоменко И.А., Мижева А.А. и др. Белковые препараты из отходов переработки рапса: обзор современного состояния и перспектив развития существующих технологий // *Пищевые системы*. 2023. Т. 6. № 2. С. 159–170. doi: 10.21323/2618-9771-2023-6-2-159-170
- 21 Jia W., Rodriguez-Alonso E., Bianeis M. et al. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. V. 68. P. 102636. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102636
- 22 Grossmann L., McClements D.J. Current insights into protein solubility: A review of its importance for alternative proteins // *Food Hydrocolloids*. 2023. V. 137. P. 108416. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108416

References

- 1 Kolpakova V.V., Byzov V.A. Functional characteristics and molecular-structural modification of plant proteins. A review. *Food Systems*. 2024. vol. 7. no. 3. pp. 324–335. doi: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335 (in Russian).
- 2 Notova S.V., Marshinskaya O.V., Kazakova T.V. The role of microelements in the antioxidant defense system of the body (review). *Animal Husbandry and Fodder Production*. 2023. vol. 106. no. 1. pp. 183–191. doi: 10.33284/2658-3135-106-1-183 (in Russian).
- 3 Krasnoshtanova A.A., Shults L.V. Production and evaluation of functional properties of protein isolates and hydrolysates from plant raw materials. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2022. no. 4. pp. 299–309. doi: 10.14258/jcprm.20220410952 (in Russian).
- 4 Minevich I.E., Ushchapovsky V.I., Yakovleva A.A., Zaitseva L.A. Influence of rapeseed processing method on its protein complex. *Agrarian Science*. 2024. vol. 1. no. 10. pp. 185–191. doi: 10.32634/0869-8155-2024-387-10-185-191 (in Russian).
- 5 Musienko D.M., Ivanov P.P., Popov A.M. Modern technologies for producing plant protein. In: *Food Technologies: Collection of abstracts of the III International Symposium*. Kemerovo: Kemerovo State University, 2024. pp. 187–191. (in Russian).
- 6 Rozhdestvenskaya L.N., Chugunova O.V. Technical solutions for the efficient use of food resources in the technology of food systems. *Bulletin of SUSU. Series: Food and Biotechnology*. 2023. vol. 11. no. 4. pp. 6–18. doi: 10.14529/food230401 (in Russian).
- 7 Ampofo J., Ngadi M. Ultrasound-assisted processing: Science, technology and challenges for the plant-based protein industry. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. vol. 84. article 105955. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105955.
- 8 Das R.S., Tiwari B.K., Chemat F. et al. Impact of ultrasound processing on alternative protein systems: Protein extraction, nutritional effects and associated challenges. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. vol. 91. article 106234. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.106234.
- 9 Aleksanochkin D.I., Fomenko I.A., Alekseeva E.A., Chernokha I.M., Mashentseva N.G. Production of vegetable protein from seeds and cake of industrial hemp: a review of processing methods for use in the food industry. *Food Systems*. 2024. vol. 7. no. 2. pp. 188–197. doi: 10.21323/2618-9771-2024-7-2-188-197 (in Russian).
- 10 Patent no. US 11066440. Gordon R., Gorodnitsky I., Voloshin N., Promtov M.A. Processes for increasing plant protein yield from biomass. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 2021.
- 11 Patent no. 2709384 C1, Russian Federation, IPC A23J 3/16, A23J 1/14. Morozov D.V., Sushkov V.V., Radinovsky O. Method for producing soy protein isolate. no. 2019113459; filed 30.04.2019; publ. 17.12.2019. Bull. no. 35. (in Russian).
- 12 Đermanović B., Vujetić J., Sedlar T. et al. Optimization of protein extraction from rapeseed oil cake by dephenolization process for scale-up application using artificial neural networks. *Foods*. 2025. vol. 14. no. 10. article 1762. doi: 10.3390/foods14101762.
- 13 Plotnikova L.V., Plotnikov I.B., Ivanov P.P. et al. Study of the method of intensifying the extraction of frozen fruit and berry raw materials in an apparatus with a vibrating plate. *Technique and Technology of Food Production*. 2021. vol. 51. no. 4. pp. 849–858. doi: 10.21603/2074-9414-2021-4-849-858 (in Russian).
- 14 Georgiev R., Kalaydzhiev H., Ivanova P. et al. Multifunctionality of rapeseed meal protein isolates prepared by sequential isoelectric precipitation. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 4. article 541. doi: 10.3390/foods11040541.

15 Dabbour M., Jiang H., Mintah B.K. et al. Ultrasonic-assisted protein extraction from sunflower meal: Kinetic modeling, functional, and structural traits. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. vol. 74. article 102824. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102824.

16 Deotale S.M., Dutta S., Moses J.A., Anandharamkrishnan C. Foaming and defoaming—concepts and their significance in food and allied industries: a review. *Discover Chemical Engineering*. 2023. vol. 3. no. 1. article 9. doi: 10.1007/s43938-023-00025-6.

17 Smolnikova Ya.V., Kolomeytsev A.V., Stutko O.V. et al. Evaluation of functional and technological properties of rapeseed protein isolate of the Sibirsky variety. *Bulletin of Shakharam University. Technical Sciences Series*. 2022. vol. 4. no. 8. pp. 36–42. doi: 10.53360/2788-7995-2022-4(8)-5 (in Russian).

18 FAO/WHO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Paper 92. Rome, 2013.

19 Nizkiy S.E., Kadirova G.A., Zagumennaya G.V. Amino acid composition of grain protein of Glycine max (L.) Merr. varieties of Amur selection. *Bulletin of KrasGAU*. 2025. no. 8. pp. 3–12. doi: 10.36718/1819-4036-2025-8-3-12 (in Russian).


20 Degtyarev I.A., Fomenko I.A., Mizheva A.A. et al. Protein preparations from rapeseed processing waste: a review of the current state and development prospects of existing technologies. *Food Systems*. 2023. vol. 6. no. 2. pp. 159–170. doi: 10.21323/2618-9771-2023-6-2-159-170 (in Russian).

21 Jia W., Rodriguez-Alonso E., Bianeis M. et al. Assessing functional properties of rapeseed protein concentrate versus isolate for food applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2021. vol. 68. article 102636. doi: 10.1016/j.ifset.2021.102636.


22 Grossmann L., McClements D.J. Current insights into protein solubility: A review of its importance for alternative proteins. *Food Hydrocolloids*. 2023. vol. 137. article 108416. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108416.

Сведения об авторах


Денис М. Мусиенко аспирант, кафедра мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д 6, г. Кемерово, 650000, Россия, arrayden@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0000-4351-7040>


Павел П. Иванов к.т.н., доцент, кафедра мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д 6, г. Кемерово, 650000, Россия, ipp7@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8086-3273>

Анатолий М. Попов д.т.н., профессор, кафедра мехатроники и автоматизации технологических систем, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д 6, г. Кемерово, 650000, Россия, popov4116@ya.ru


 <https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>

Андрей Г. Семенов д.т.н., профессор, кафедра теории и методики преподавания естественнонаучных и математических дисциплин, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, д 6, г. Кемерово, 650000, Россия, agsem55@ya.ru


 <https://orcid.org/0000-0002-3136-3942>

Information about authors


Denis M. Musienko postgraduate Student, department of Mechatronics and Automation of Technological systems, Kemerovo State University, Krasnaya St., 6, Kemerovo, 650000, Russia, arrayden@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0000-4351-7040>


Pavel P. Ivanov Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of Mechatronics and Automation of Technological systems, Kemerovo State University, Krasnaya St., 6, Kemerovo, 650000, Russia, ipp7@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8086-3273>

Anatoliy M. Popov Dr. Sci. (Engin.), professor, department of Mechatronics and Automation of Technological systems, Kemerovo State University, Krasnaya St., 6, Kemerovo, 650000, Russia, popov4116@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-0728-7211>

Andrey G. Semenov Dr. Sci. (Engin.), professor, department of Theory and Methods of Teaching Natural Sciences and Mathematics, Kemerovo State University, Krasnaya St., 6, Kemerovo, 650000, Russia, agsem55@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3136-3942>

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.

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 01/03/2026	После редакции 18/04/2026	Принята в печать 18/05/2026
Received 01/03/2026	Accepted in revised 18/04/2026	Accepted 18/05/2026