






Моделирование мехатронных систем производства инстантированных напитков с добавлением амарантовой муки

А. М. Попов¹, К. Б. Плотников^{1,*}, П. П. Иванов¹, Д. В. Доня¹,
С. Г. Пачкин¹, И. О. Плотникова²



¹ ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

² ГПОУ «Кемеровский коммунально-строительный техникум»
имени В. И. Заузелкова,

650070, Россия, г. Кемерово, ул. Тухачевского, 23А

Дата поступления в редакцию: 21.10.2019

Дата принятия в печать: 29.05.2020

*e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com



© А. М. Попов, К. Б. Плотников, П. П. Иванов, Д. В. Доня, С. Г. Пачкин, И. О. Плотникова, 2020

Аннотация.

Введение. В условиях высокой конкуренции на мировом рынке в области производства инстантированных напитков возникает необходимость введения новых мехатронных систем, основанных на определении режимов процесса, его анализе и подборе рациональных параметров, что существенно повысит уровень производства готовой продукции. Цель работы – разработка мехатронных систем в линии производства инстантированных напитков с добавлением муки амаранта на участке гранулирования.

Объекты и методы исследования. Была выбрана линия производства инстантированных гранулированных напитков с добавлением муки амаранта, а именно участок гранулирования. В процессе гранулирования в барабанных виброгрануляторах наблюдается нестабильный гранулометрический состав. Это связано с неравномерным перемешиванием сухих сыпучих компонентов со связующим раствором. Для решения данной проблемы можно использовать мехатронный модуль для создания которого необходимо знать условия протекания процесса.

Результаты и их обсуждение. В работе были определены удельные энергозатраты на проведение процесса гранулирования в новой конструкции барабанного виброгранулятора, что позволило определить рациональные параметры процесса. С целью поддержания данных параметров и повышения качества готовой продукции необходимо, чтобы при изменении показаний мощности, затрачиваемой двигателем месильного органа, происходила регулировка расхода связующего раствора, что позволит стабилизировать систему. В связи с малым значением этого параметра его прямое регулирование технически невозможно. Для регулирования процесса предложена структурная схема многоконтурной каскадной системы автоматического регулирования качества смеси. При этом регулирование уровня с достаточной точностью возможно с помощью клапана, установленного на трубопроводе подачи связующего раствора в напорную емкость.

Выводы. В результате проведенных исследований появляется возможность создания мехатронного модуля барабанного виброгранулятора, в котором показатели качества получаемой смеси, оцениваемые величиной затрачиваемой мощности двигателем месильного органа, будут определяться уровнем связующего раствора в напорной емкости.






Ключевые слова. Моделирование, мехатроника, амарант, мука, инстант, структурообразование, энергозатраты, грануляция, сегрегация

Для цитирования: Моделирование мехатронных систем производства инстантированных напитков с добавлением амарантовой муки / А. М. Попов, К. Б. Плотников, П. П. Иванов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 2. – С. 273–281. DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-273-281>.

Original article

Available online at <http://fptt.ru/eng>

Instant Drinks with Amaranth Flour: Simulation of Mechatronic Systems of Production

A.M. Popov¹, K.B. Plotnikov^{1,*}, P.P. Ivanov¹, D.V. Donya¹,
S.G. Pachkin¹, I.O. Plotnikova²

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

Received: October 21, 2019
Accepted: May 29, 2020

² V.I. Zauzelkov Kemerovo Municipal Construction College,
23A, Tukhachevskogo Str., Kemerovo, 650070, Russia

*e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com



© A.M. Popov, K.B. Plotnikov, P.P. Ivanov, D.V. Donya, S.G. Pachkin, I.O. Plotnikova, 2020

Abstract.

Introduction. The world market of instant drinks is a highly competitive environment. New mechatronic production systems can help food companies maintain their competitiveness: they determine process modes, analyze them, and choose the optimal parameters, thus increasing the efficiency of the whole food enterprise. Another problem is the low biological and nutrient value of the finished product. New biologically active instant drinks could solve the problem that occurs in conditions of unsocial hours and unbalanced diet. Products of plant origin contain a lot of useful substances. Amaranth flour increases the biological value of the final products. The research objective was to develop mechatronic systems that could be used to produce instant drinks fortified with amaranth flour at the granulation stage.

Study objects and methods. The present research featured a new line of production of instant granular drinks fortified with amaranth flour. The study focused on the granulation section. A drum vibro-granulator with controlled segregated flows was used to make a hardware design of the granulation process. The granulation process often demonstrates an unstable particle size distribution, which is associated with non-uniform mixing of the dry bulk components with the binder solution. A mechatronic module can solve this problem. However, it requires detailed information about the process conditions.

Results and discussion. The research determined the specific energy consumption on the operating and design parameters for the granulation process in the new drum vibro-granulator. The experiment made it possible to obtain the optimal process parameters and improve the quality of the finished product. The flow rate of the binder solution depended on the readings of the power consumed by the kneading body engine, which stabilized the system. The value of this parameter is so small that its direct regulation is technically impossible. The paper introduces a block diagram of a multi-circuit cascade system to control the quality of the mixture automatically. The authors installed a valve on the pipeline that feeds the binder fluid in the pressure tank. The valve made it possible to control the process with sufficient accuracy.

Conclusion. In the new mechatronic module of the drum vibro-granulator, the quality indicators of the resulting mix depend on the amount of power consumed by the kneading body engine and on the level of the binder solution in the pressure vessel.

Keywords. Modeling, mechatronics, amaranth, flour, instant, structure formation, energy consumption, granulation, segregation

For citation: Popov AM, Plotnikov KB, Ivanov PP, Donya DV, Pachkin SG, Plotnikova IO. Instant Drinks with Amaranth Flour: Simulation of Mechatronic Systems of Production. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(2):273–281. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-2-273-281>.

Введение

Обеспеченность населения полезным и здоровым питанием, а также решение проблемы продовольственной безопасности является одной из ключевых задач каждого государства. Здоровое и сбалансированное питание было и остается одной из самых важных задач как в социально-экономическом, так и в медицинском аспектах. Рациональное питание для людей в разных странах отличается как по своему характеру, так и по направленности, зависит от уровня и конкретных условий проживания, национальных традиций и привычек. Это связано с растительным и животным сырьем, которое получают в конкретном регионе на протяжении длительного времени [1, 2].

В современных условиях занятости населения не всегда удается соблюдать правильное и сбалансированное питание, которое восполняло бы полностью потребности организма в витаминах и минералах. Человеческий организм не способен к накоплению полезных веществ, что приводит к необходимости регулярного восполнения организма витаминами и минералами [2]. Огромное количество практически всех необходимых для организма

веществ содержится в продуктах растительного происхождения [2, 3].

Использование амарантовой муки резко повышает биологическую ценность продуктов. В качестве продукта был выбран инстантированный напиток с добавлением муки амаранта. С целью улучшения качества готовой продукции необходимо подобрать рациональные параметры процесса, что позволит решить задачу технологического потока. Однако в процессе структурообразования в барабанном виброгрануляторе может наблюдаться не полное агломерирование или повышенное содержание связующего раствора. Неполное гранулирование приводит к нестабильному дисперсному составу. Следовательно, в процессе транспортировки и реализации инстантированного продукта может наблюдаться процесс сегрегации, что отрицательно сказывается на физико-механических свойствах готового напитка. Решить эту проблему становится возможным при определении рациональных параметров процесса и установкой мехатронных систем для регулирования работы машины и повышения качества готовой продукции [4].

Целью работы была разработка мехатронных систем в линии производства инстантированных

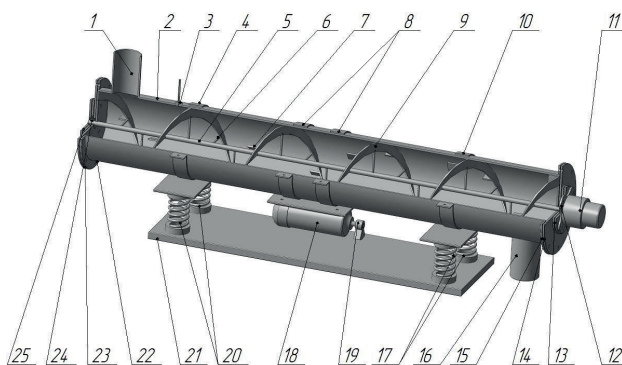


Рисунок 1. Барабанный виброгранулятор: 1 – загрузочный патрубок; 2 – обечайка; 3 – форсунка; 4, 10 – хомут опоры; 5 – вал; 6 – стержень; 7 – лопатка; 8 – хомут опоры вибровозбудителя; 9 – ленточная мешалка; 11 – двигатель привода ленточной мешалки; 12, 24 – подшипник скольжения; 13, 25 – крышка сквозная; 14, 23 – крышка; 15, 22 – фланец; 16 – разгрузочный патрубок; 17, 20 – пружина сжатия; 18 – двигатель вибровозбудителя; 19 – дебаланс; 21 – основание

Figure 1. Drum vibro-granulator: 1 – loading nozzle; 2 – shell; 3 – nozzle; 4, 10 – support clamp; 5 – shaft; 6 – plu; 7 – scapula; 8 – clamp exciter support; 9 – belt mixer; 11 – belt drive motor; 12, 24 – joint bearing; 13, 25 – flow-through lid; 14, 23 – cover; 15, 22 – flange; 16 – discharge pipe; 17, 20 – compression spring; 18 – vibration exciter motor; 19 – eccentric mass; 21 – base

напитков с добавлением муки амаранта на участке гранулирования.

Объекты и методы исследования

В результате анализа литературно-патентного обзора была предложена новая конструкция барабанного виброгранулятора (БВГ), которая подверглась исследованию основных характеристик и сравнительному анализу с существующими моделями грануляторов на предмет конкурентоспособности [5–9]. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1.

Основные геометрические параметры установки следующие: внутренний диаметр обечайки – 0,144 м; длина рабочей части корпуса – 1 м; диаметры входного и выходного патрубков для продукта – 0,050 м. Детали корпуса и рабочего органа (обечайка, фланцы, крышки, ленточная мешалка) с целью визуального наблюдения за ходом процесса структурообразования были изготовлены из plexiglas GS и plexiglas XT. Так как усилие на подшипники скольжения 12 и 24 было не велико, то последние изготавливались из фторопласта-4, обладающего высоким коэффициентом трения и способным работать без смазки при невысоких нагрузках и скоростях.

БВГ работает следующим образом. Исходная смесь сыпучих компонентов подается в обечайку 2, установленную на четырех пружинах сжатия 17 и 20, через загрузочный патрубок 1. В результате

предварительных испытаний был установлен угол наклона корпуса БВГ к горизонтальной плоскости, который составил 3°. Вибровозбудитель дебалансового типа с набором сменных дебалансов 19 жестко соединен с корпусом БВГ с помощью хомутов. Благодаря этому смесь сыпучих компонентов и формирующихся гранул переводится в виброожиженное состояние и перемещается в сторону разгрузочного патрубка 16.

Связующий раствор через форсунку капельного типа 5 подается на поверхность виброожиженного слоя. На рисунке 2 изображен сегмент установки с упрощенным изображением структурообразования в машине. В зоне распыла связующего раствора 1 под действием вибрационного поля происходят соударения частиц исходной сыпучей смеси со связующим раствором и между собой. Это приводит к формированию гранул. В результате агломерирования частиц образуются структуры разных размеров, которые обладают разной потенциальной энергией. В зоне перераспределения частиц по размерам частицы больших размеров поднимаются на поверхность образовавшегося слоя. При их перемещении из центрального слоя к поверхности происходят множественные соударения с другими частицами, что приводит к их росту. Частицы меньшего размера, обладая большей подвижностью, движутся в область, которая соответствует минимуму потенциальной энергии. Другими словами, она подсыпается под сформированные более крупные гранулы [3, 4].

С целью разработки мехатронного модуля необходимо выяснить зависимость энергозатрат на проведение процесса гранулирования от режимных параметров. Полные энергозатраты N на работу БВГ являются совокупностью затрат энергии на привод вибровозбудителя и перемешивающего механизма. При условии подачи связующего раствора с помощью насосов в форсунку затраты на работу двигателя

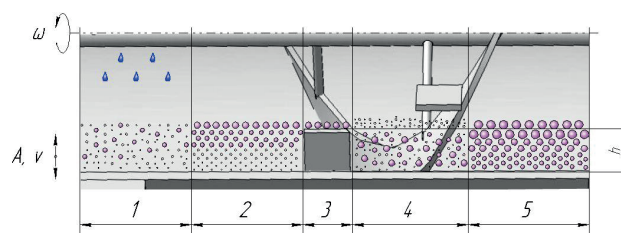


Рисунок 2. Схема сегмента БВГ: 1 – зона распыла связующего раствора; 2 – зона перераспределения частиц по размерам; 3 – зона захвата и подъема несформированных гранул; 4 – зона активного перемещения гранул; 5 – зона перераспределения частиц по размерам

Figure 2. Scheme of the vibro-granulator segment: 1 – spray zone of the binder solution; 2 – redistribution of particles by size; 3 – capture and lifting of unformed granules; 4 – active movement of granules; 5 – redistribution of particles by size

Таблица 1. Условия проведения эксперимента по определению процесса агломерирования

Table 1. Conditions of the agglomeration process experiment

Фактор	Обозначение факторов	Уровни		Центр эксперимента	Шаг варьирования
		нижний	верхний		
Амплитуда колебаний (A), мм	X_1	0,50	3,00	1,75	0,50
Частота колебаний (ν), Гц	X_2	20	50	35	10
Частота вращения мешалки (n), об/мин	X_3	3	12	7,5	1
Угол наклона БВГ (α), °	X_4	2,50	6,00	4,25	0,50
Плотность связующего раствора ($\rho_{ж}$), кг/м ³	X_5	1014	1118	1066	52
Вязкость связующего раствора ($\mu_{ж}$), Па·с	X_6	$1,03 \times 10^{-3}$	$2,91 \times 10^{-3}$	$1,97 \times 10^{-3}$	$0,94 \times 10^{-3}$
Поверхностное натяжение связующего раствора ($\sigma_{ж}$), Н/м	X_7	45,70	59,60	52,65	6,95

насоса на два порядка ниже затрат на работу гранулятора [10–12]. Следовательно, их можно исключить из расчетов определения энергозатрат с минимальной погрешностью.

Затраты энергии на совершение механической работы определялись следующим образом. Устанавливалась необходимая частота ленточной мешалки и привода вибровозбудителя. Измерение частоты вращения валов двигателями 11 и 18 (рис. 1) осуществляли тахометром магнитоиндукционным ТЭ-4В, частота вращения периодически проверялась тахометром часового типа ТЧ-10Р (класс точности 1). Мощность, затрачиваемая электродвигателями, снималась с ваттметра Д5065 (классом точности 0,2 по ГОСТ 8476-78) на холостом ходу N_x (без подачи продукта в машину) и в рабочем режиме N_p (с подачей дисперсной среды и связующего раствора).

Значение затрат энергии на холостом ходу показывает потери в подшипниковых узлах (позиция 12 и 24) на трение ленточной мешалки 9 о внутреннюю поверхность обечайки и на гашение сил инерции в виброопорах. Разность показателей ваттметров на холостом ходу и в рабочем режиме дает затраты энергии на механическую работу установки, которая включает в себя потери энергии на подъем и опрокидывание гранул, переводение дисперсного слоя в виброоживленное состояние, транспортировку гранул к разгрузочному патрубку, перемешивание вновь образованных гранул с дисперсной средой.

В таблице 1 представлены регулируемые параметры проведения процесса гранулирования в барабанном виброгрануляторе.

Результаты и их обсуждение

Сравнительный анализ затрат энергии на проведение процесса гранулирования (подъем и опрокидывание гранул, окатывание гранул, сегрегацию сформированных частиц), которые условно обозначены как «полезные затраты» и механические затраты (потери энергии в подшипниках, соединительных муфтах, на трение мешалки о внутреннюю поверхность корпуса). В

общем виде механические затраты энергии можно представить:

$$N_M = N_{КПД} + N_{П} \quad (1)$$

Из графика (рис. 3) видно, что «полезные затраты» составляют не более 28 % от механических. Причем при увеличении частоты колебаний, амплитуды и частоты вращения мешалки «полезные затраты» снижаются до 22 %. Физико-химические свойства связующего раствора оказывали невысокое влияние на энергозатраты БВГ и составляли 0,3–1 %.

Обработка экспериментальных данных по механическим затратам энергии позволила получить экспериментально-статистическую модель, выходным параметром (Y_3) которой являлись механические затраты энергии N_M .

$$Y_3 = 49,5 + 9,63 \cdot X_1 + 0,25 \cdot X_2 + 8 \cdot X_3 + 0,75 \cdot X_4 - 0,0001 \cdot X_5 - 1,4 \cdot X_6 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,74 \cdot X_1 \cdot X_4 - 1,23 \cdot X_3 \cdot X_5 \quad (2)$$

Коэффициент корреляции равен $R = 0,98$. В результате анализа уравнения (2) можно сделать

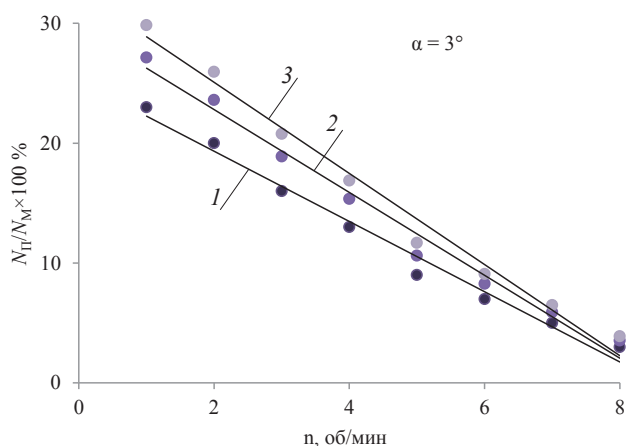


Рисунок 3. Зависимость «полезных энергозатрат» от частоты вращения ленточной мешалки: 1 – $A = 1$ мм, $\nu = 30$ Гц; 2 – $A = 1$ мм, $\nu = 50$ Гц; 3 – $A = 3$ мм, $\nu = 20$ Гц

Figure 3. Effect of the belt mixer speed on the useful energy: 1 – $A = 1$ mm, $\nu = 30$ Hz; 2 – $A = 1$ mm, $\nu = 50$ Hz; 3 – $A = 3$ mm, $\nu = 20$ Hz

Таблица 2. Рациональные параметры процесса

Table 2. Optimal process parameters

Вид крахмала / Параметр	Амплитуда колебаний (A), мм	Частота колебаний (ν), Гц	Частота вращения мешалки (n), об/мин	Угол наклона БВГ (α), °	Плотность связующего раствора (ρ _ж), кг/м ³	Вязкость связующего раствора (μ _ж), Па·с	Поверхностное натяжение связующего раствора (σ _ж), Н/м	Среднемедианный размер	
								Теоретический	Практический
Нативный	1	40	7	3	1063,20	2,254×10 ⁻³	48,47×10 ⁻³	2,06	2,19

вывод, что в наибольшей степени на механические затраты энергии оказывают влияние такие параметры, как частота, амплитуда колебаний и частота вращения мешалки с углом наклона. Повышение вязкости связующего раствора незначительно оказывает влияние на затраты энергии. В результате обработки экспериментальных данных, полученных в ходе эксперимента, можно сделать вывод, что, в сравнении с остальными затратами энергии, доля затрат на механическую работу составляет порядка 28 % от общих энергозатрат на проведение процесса структурообразования. С целью упрощения расчетов при минимальных

погрешностях можно порекомендовать использовать для расчетов полных энергозатрат уравнение (2) с прибавкой коэффициента на пусковой момент (0,25) и механическую работу (0,25). Тогда полные затраты энергии можно определить достаточно точно по выражению:

$$N = 1,5 \cdot N_M \quad (3)$$

С целью поиска рациональных параметров процесса структурообразования в новой конструкции БВГ использовался пакет анализа в системе Microsoft Excel по методике Ньютона. Результаты расчетов сведены в таблицу 2. Из таблицы видно при каких режимных параметрах процесса в исследуемом барабанном виброгрануляторе будет наблюдаться заданный дисперсный состав, который оценивали по среднемедианному значению. С целью проверки адекватности полученных значений были проведены серии экспериментов. Значения варьируемых

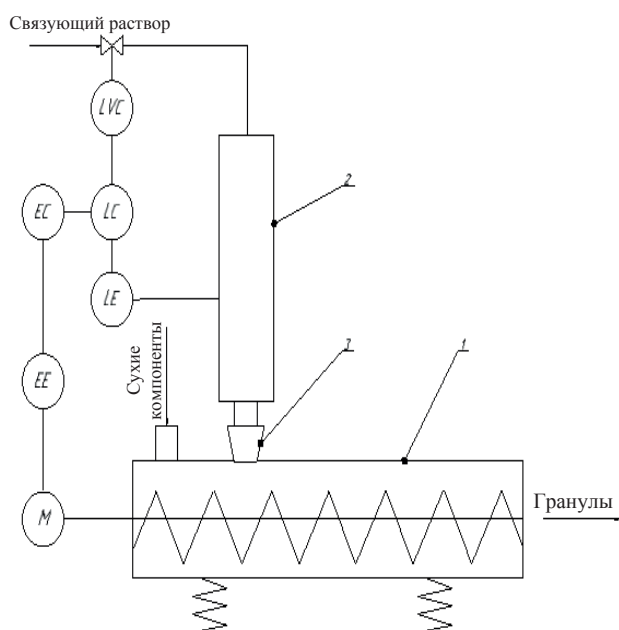


Рисунок 4. Функциональная схема мехатронного модуля БВГ: 1 – корпус БВГ; 2 – напорная емкость; 3 – капельная форсунка; LE – датчик высоты столба жидкости (уровень) связующего раствора; LC – регулятор уровня; LVC – клапан; EE – датчик мощности затрачиваемой двигателем; EC – основной регулятор мехатронного модуля

Figure 4. Flow-chart of the mechatronic module: 1 – body; 2 – pressure vessel; 3 – drip nozzle; LE – liquid column height sensor (level) of the binder solution; LC – level control; LVC – valve; EE – sensor power spent by the engine; EC – main regulator of the mechatronic module

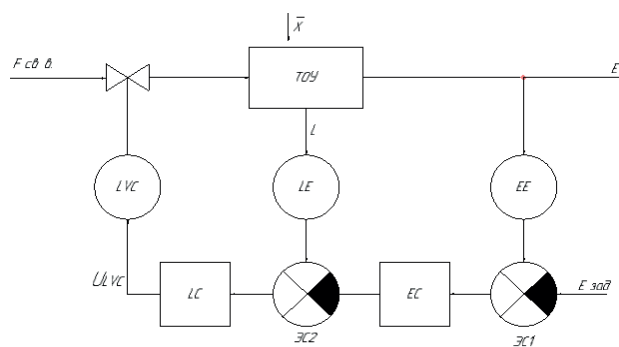


Рисунок 5. Структурная схема многоконтурной каскадной системы автоматического регулирования качества смеси: TOU – технологический объект управления; ЭС1, ЭС2 – элементы сравнения; ULVC – положение регулирующего клапана LVC; E_{зад} – заданное значение мощности затрачиваемой двигателем; X – вектор факторов процесса агломерирования, влияющих на качество смеси (табл. 1)

Figure 5. Structural chart of the multi-circuit cascade system for automatic control of the quality of the mix: TOU – technological control object; ЭС1, ЭС2 – elements of comparison; ULVC – position of the LVC control valve; E_{зад} – set value of the power spent by the engine; X – vector of agglomeration process factors affecting the quality of the mixture (Table 1)

параметров были приняты согласно значениям из таблицы 2.

В связи с малым значением режимных параметров их прямое регулирование технически сложно осуществимо [13–17]. Поэтому предложена функциональная схема, которая показана на рисунке 4. Она включает напорную емкость 2, в которой изменением высоты столба жидкости связующего раствора *LE* можно изменять величину гидростатического давления, а следовательно, и расхода связующего раствора через капельную форсунку 3 с калиброванным диаметром сопла. При этом регулирование уровня с достаточной точностью возможно с помощью клапана *LVC*, установленного на трубопроводе подачи связующей жидкости в напорную емкость. Таким образом, появляется возможность создания мехатронного модуля БВГ, в котором показатели качества получаемой смеси, оцениваемые величиной затрачиваемой мощности *EE* двигателем месильного органа, будут определяться уровнем связующего раствора в напорной емкости.

В данном случае одноконтурная система регулирования уровня может быть расширена до каскадной системы регулирования затрачиваемой мощности двигателем месильного органа с помощью регулятора (*EC*), структурная схема которой показана на рисунке 5 [18–20].

Выводы

Исследование процесса агломерирования в барабанном виброгрануляторе позволило установить зависимость затрат энергии от режимных параметров. Это дало возможность разработать структурную схему многоконтурной каскадной системы автоматического регулирования качества смеси. В конечном

итоге данная система должна повысить качество готового продукта.

В результате проведенных исследований было выявлено, что для создания конкурентоспособного как производства, так и готовой продукции, необходима модернизация производства как с точки зрения самих процессов, так и с точки зрения мехатроники.

Критерии авторства

А. М. Попов – руководство работой (15 %).
К. Б. Плотников – планирование эксперимента (15 %).
П. П. Иванов – разработка методики проведения эксперимента и обработка результатов (20 %).
Д. В. Дonya – подготовка рукописи (20 %).
С. Г. Пачкин – консультативная работа (15 %).
И. О. Плотникова – проведение исследований (15 %).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution

A.M. Popov supervised the project (15%).
K.B. Plotnikov planned the experiment (15%).
P.P. Ivanov developed the experimental technique and processed the results (20%).
D.V. Donya wrote the draft of the manuscript (20%).
S.G. Pachkin was the chief consultant (15%).
I.O. Plotnikova conducted the experiments (15%).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. HPMC granules by wet granulation process: effect of vitamin load on physicochemical, mechanical and release properties / V. De Simone, A. Dalmoro, G. Lamberti [et al.] // *Carbohydrate Polymers*. – 2018. – Vol. 181. – P. 939–947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.056>.
2. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules / L. Guo, H. Tao, B. Cui [et al.] // *Food Chemistry*. – 2019. – Vol. 277. – P. 504–514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.014>.
3. Popov, A. M. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials / A. M. Popov, K. B. Plotnikov, D. V. Donya // *Foods and Raw Materials*. – 2017. – Vol. 5, № 1. – P. 137–143. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
4. Черемухин, П. С. Образовательная робототехника как фактор развития сетевого взаимодействия в системе уровневой инженерной подготовки / П. С. Черемухин, А. А. Шумейко // *Интеграция образования*. – 2018. – Т. 22, № 3 (92). – С. 535–550. DOI: <https://doi.org/10.15507/1991-9468.092.022.201803.535-550>.
5. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization / V. De Simone, D. Caccavo, G. Lamberti [et al.] // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 340. – P. 411–419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.053>.
6. Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья / Е. А. Фарберова, Е. А. Тиньгаева, А. Д. Чучалина [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология*. – 2018. – Т. 61, № 3. – С. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.6060/tcct.20186103.5612>.
7. Influence of spray nozzle aperture during high shear wet granulation on granule properties and its compression attributes / N. Veronica, H. P. Goh, C. Y. X. Kang [et al.] // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2018. – Vol. 553, № 1–2. – P. 474–482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.10.067>.

8. Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate / Q. Yuan, H. Gong, H. Xi [et al.] // *Journal of Environmental Sciences*. – 2019. – Vol. 84. – P. 144–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.006>.
9. Пат. 2693772С2 Российская Федерация, МПК В01J2/18. Барабанный виброгранулятор / Попов А. М., Плотникова И. О., Плотников К. Б., [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет». – № 2017145262; заявл. 21.12.2017; опубл. 04.07.2019; Бюл. № 19. – 7 с.
10. Цветков, В. Я. Управление с применением кибер-физических систем / В. Я. Цветков // *Перспективы науки и образования*. – 2017. – Т. 27, № 3. – С. 55–60.
11. Разработка динамической модели привода шаровой мельницы с учетом демпфирующих свойств его элементов / В. В. Поветкин, М. Е. Исаметова, И. Н. Исаева [и др.] // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2018. – № 5. – С. 184–192. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-5-0-184-192>.
12. Фуртат, И. Б. Алгоритм компенсации помех измерения и возмущений / И. Б. Фуртат // *Информационно-управляющие системы*. – 2017. – Т. 90, № 5. – С. 21–29. DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.21>.
13. Мархадаев, Б. Е. Бифуркация точности мехатронных манипуляционных систем при захватывании на ходу / Б. Е. Мархадаев, С. О. Никифоров, Е. Б. Бочектуева // *Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика*. – 2018. – № 2. – С. 85–94. DOI: <https://doi.org/10.18101/2304-5728-2018-2-85-94>.
14. Синтез системы автоматической коррекции осевых смещений вращающегося ротора мехатронного модуля / И. С. Дымов, Д. А. Котин, В. Н. Аносов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. – 2017. – Т. 60, № 6. – С. 552–559. DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-6-552-559>.
15. Кашаев, Р. С. Минимизация ошибок эксперимента в методе ПМР и возможности получения спектра времен релаксации / Р. С. Кашаев, А. Ю. Свинин, О. В. Козелков // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2018. – Т. 20, № 11–12. – С. 152–160. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-152-160>.
16. Математические модели для калибровки центра инструмента промышленных роботов / О. Н. Крахмалев, Д. И. Петрешин, Г. Н. Крахмалев [и др.] // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2017. – Т. 54, № 1. – С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.12737/24891>.
17. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации / А. К. Тугенгольд, Р. Н. Волошин, А. Р. Юсупов [и др.] // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 74–80. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80>.
18. Теория и практика использования робототехники в образовательном процессе / Е. Е. Руслякова, О. В. Пустовойтова, Ю. П. Киселёва [и др.] // *Высшее образование в России*. – 2019. – Т. 28, № 6. – С. 158–167. DOI: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-6-158-167>.
19. Еременко, Ю. И. О применении нейросетевого настройщика параметров пи-регулятора на тепловых объектах горно-металлургической отрасли в режиме отработки возмущений / Ю. И. Еременко, А. И. Глушенко, А. В. Фомин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2017. – № 12. – С. 122–133. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-0-122-133>.
20. Елисеев, С. В. Динамическое гашение колебаний при введении дополнительных связей и внешних воздействий / С. В. Елисеев, А. С. Миронов, К. Ч. Вьонг // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44>.


References

1. De Simone V, Dalmoro A, Lamberti G, Caccavo D, d'Amore M, Barba AA. HPMC granules by wet granulation process: effect of vitamin load on physicochemical, mechanical and release properties. *Carbohydrate Polymers*. 2018;181:939–947. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.11.056>.
2. Guo L, Tao H, Cui B, Janaswamy S. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules. *Food Chemistry*. 2019;277:504–514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.014>.
3. Popov AM, Plotnikov KB, Donya DV. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials. *Foods and Raw Materials*. 2017;5(1):137–143. DOI: <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143>.
4. Cheremukhin PS, Shumeyko AA. Educational robotics as a factor in the development of network interaction in the system of engineering training. *Integration of Education*. 2018;22(3)(92):535–550. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15507/1991-9468.092.022.201803.535-550>.
5. De Simone V, Caccavo D, Lamberti G, d'Amore M, Barba AA. Wet-granulation process: phenomenological analysis and process parameters optimization. *Powder Technology*. 2018;340:411–419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.053>.
6. Farberova EA, Tingaeva EA, Chuchalina AD, Kobeleva AR, Maximov AS. Obtaining granulated active carbon from wastes of vegetable raw materials. *Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*. 2018;61(3):51–57. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.6060/tcct.20186103.5612>.
7. Veronica N, Goh HP, Kang CYX, Liew CV, Heng PWS. Influence of spray nozzle aperture during high shear wet granulation on granule properties and its compression attributes. *International Journal of Pharmaceutics*. 2018;553(1–2):474–482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.10.067>.


8. Yuan Q, Gong H, Xi H, Xu H, Jin Z, Ali N, et al. Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate. *Journal of Environmental Sciences*. 2019;84:144–154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.04.006>.
9. Popov AM, Plotnikova IO, Plotnikov KB, Donya DV, Konyaev AV. Drum vibration granulator. Russia patent RU 2693772C2. 2019.
10. Tsvetkov VYa. Control with the use of cyber-physical systems. *Perspectives of Science and Education*. 2017;27(3):55–60. (In Russ.).
11. Povetkin VV, Isametova ME, Isayeva IN, Bukayeva AZ. Dynamic modeling of ball mill drive with regard to damping properties of its elements. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2018;(5):184–192. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-5-0-184-192>.
12. Furtat IB. Algorithm for compensation of measurement noises and disturbances. *Information and Control Systems*. 2017;90(5):21–29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.21>.
13. Markhadaev BE, Nikiforov SO, Bochektueva EB. Bifurcation of the accuracy of mechatronic manipulation systems in capture while running. *BSU bulletin. Mathematics, Informatics*. 2018;(2):85–94. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18101/2304-5728-2018-2-85-94>.
14. Dymov IS, Kotin DA, Anosov VN, Kucher ES. Synthesis of a system for automatic correction of axial displacement of mechatronic module spinning rotor. *Journal of Instrument Engineering*. 2017;60(6):552–559. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2017-60-6-552-559>.
15. Kashaev PS, Svinin AYU, Kozelkov OV. Minimization of experiment errors in the method of PMR and opportunities for receiving of relaxation times spectra. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2018;20(11–12):152–160. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-152-160>.
16. Krakhmalyov ON, Petreshin DI, Krakhmalyov GN, Pimonov AYU. Simulators for calibration of tool center of industrial robots. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2017;54(1):44–49. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/24891>.
17. Tugengold AK, Voloshin RN, Yusupov AR, Kruglova TN. Production machines maintenance based on digitalization. *Vestnik of Don State Technical University*. 2019;19(1):74–80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80>.
18. Ruslyakova EE, Pustovoitova OV, Kiseleva JuP, Yakovleva LA. Theory and practice of using robotics in educational process. *Higher Education in Russia*. 2019;28(6):158–167. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0869-3617-2019-28-6-158-167>.
19. Eremenko YuI, Glushchenko AI, Fomin AV. Application of neural network customizer for the proportional-integral controller in the mode of response to disturbances at thermal units in the mining and metallurgical industry. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2017;(12):122–133. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-12-0-122-133>.
20. Eliseev SV, Mironov AS, Vuong QT. Dynamic damping under introduction of additional couplings and external actions. *Vestnik of Don State Technical University*. 2019;19(1):38–44. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-1-38-44>.

Сведения об авторах


Попов Анатолий Михайлович

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой машин и аппаратов технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: popov4116@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-2663-6379>

Плотников Константин Борисович


канд. техн. наук, доцент кафедры машин и аппаратов технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4145-0027>

Иванов Павел Петрович


канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: ipp7@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8086-3273>

Information about the authors


Anatoly M. Popov

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Head of the Department of Machines and Devices of Technological Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: popov4116@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-2663-6379>

Konstantin B. Plotnikov

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Machines and Devices of Technological Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4145-0027>

Pavel P. Ivanov

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes and Automated Control Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: ipp7@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8086-3273>

Доня Денис Викторович

канд. техн. наук, доцент кафедры машин и аппаратов технологических систем, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: doniadv@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Пачкин Сергей Геннадьевич

канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и автоматизированных систем управления, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: sergon777@inbox.ru


 <https://orcid.org/0000-0001-9530-3829>

Ирина Олеговна Плотникова

преподаватель, ГПОУ «Кемеровский коммунально-строительный техникум» имени В. И. Заузелкова, 650070, Россия, г. Кемерово, ул. Тухачевского, 23А, тел.: +7 (950) 596-70-91, e-mail: ermilova-io@mail.ru

Denis V. Donya

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Machines and Devices of Technological Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-40, e-mail: doniadv@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5818-0804>

Sergei G. Pachkin

Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes and Automated Control Systems, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-35, e-mail: sergon777@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-9530-3829>

Irina O. Plotnikova

Teacher, V.I. Zauzelkov Kemerovo Municipal Construction College, 23A, Tukhachevskogo Str., Kemerovo, 650070, Russia, phone: +7 (950) 596-70-91, e-mail: ermilova-io@mail.ru