

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАСС  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ  
В КАЧЕСТВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА**

**THE SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL  
OF THE PROCESS FORMING LOOSE MASSES  
USING DIGITAL VIDEO CAMERA AS A SMART SENSOR**

*М.Г. БАЛЫХИН, И.М. ДОННИК, И.Г. БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ,  
М.М. БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ, З.В. МАКАРОВСКАЯ, М.В. ЖИРОВ*

*M.G. BALYKHIN, I.M. DONNIK, I.G. BLAGOVESCHENSKY,  
M.M. BLAGOVESCHENSKAYA, Z.V. MAKAROVSKAYA, M.V. ZHIROV*

**(Московский государственный университет пищевых производств)  
(Moscow State University of Food Productions)**

E-mail: babin@mgupp.ru; mmb@mgupp.ru; igbladov@mgupp.ru

*В статье описывается разработанная система автоматического регулирования (САР) процесса формования сыпучих масс на базе использования в качестве интеллектуального датчика цифровой видеокамеры для прогнозирования структурно-механических характеристик готовых изделий. Необходимым условием для принятия управленческих решений являлась выработка корректирующих воздействий на основе использования методов математического моделирования, что предполагает внедрение методов оптимизации и интеллектуальных технологий.*

*The article describes the developed system of automatic control of the process of forming bulk solids based on the use of digital video camera as an intelligent sensor to predict the structural and mechanical characteristics of finished products. A necessary condition for making management decisions was the development of corrective actions based on the use of mathematical modeling methods, which involves the introduction of optimization methods and intelligent technologies.*

**Ключевые слова:** система автоматического регулирования, процесс формования, сыпучие массы, цифровая видеокамера, интеллектуальный датчик.

**Keywords:** the system of automatic regulation of the molding process, granular mass, digital video camcorders, smart sensor.

Превращение дисперсных сыпучих масс в гранулы с заданными структурно-механическими свойствами может осуществляться различными способами. Известны принципиально различные способы связывания сыпучих материалов в агрегаты. Выбор способа и средств для уплотнения дисперсных сред зависит от структурно-механических свойств

исходного материала и требований к показателям качества конечного продукта.

Гранулирование прессованием – наиболее распространенный способ связывания сыпучих материалов, направленный на получение определенной структуры с помощью внешних механических воздействий. Для этой цели применяют формирующие, прокаты-

вающие и выдавливающие установки. Сущность процесса – объемное сжатие и сдвиг прессуемой смеси, в большинстве случаев ее пластификация и структурирование и затем формирование массы в гранулы. В технике применяют прессы периодического действия (штемпельные, рычажные, карусельные, гидравлические и др.) и непрерывного ротационного принципа (кольцевые, вальцовые).

Гранулирование выдавливанием может осуществляться двумя способами: влажным и сухим. При влажном гранулировании прессуемую массу с помощью дисперсионной среды вначале переводят в пастообразное пластифицированное состояние, а затем подвергают формованию и кристаллизации. Наибольшее распространение получил способ сухого гранулирования. После контроля по примесям рассыпная сыпучая масса подается в прессующую установку, где обрабатывается паром и посредством выдавливания смеси через отверстия матрицы формируется в гранулы, которые после охлаждения в специальной колонке и просеивания поступают в склад готовой продукции. Преимущества: наличие высокопроизводительного прессующего оборудования при относительно небольших расходах электроэнергии; кроме того, обработка паром способствует достижению требуемых санитарно-гигиенических показателей качества готовых изделий. Производство гранулированных изделий на предприятии ведется с использованием требуемых технологических операций и линий по приему и размещению сырья в хранилищах. Процесс выполняется по утвержденной технологической схеме завода. Количество технологических линий устанавливается в соответствии с требованиями на производство отдельных видов гранулированных изделий.

Актуальной задачей производства гранулированных изделий является получение готовой продукции заданного качества. Важнейшей операцией производства гранулированных изделий является процесс формования. В процессе формования определяют структурно-механические свойства гранулированных изделий, обуславливающие ход

технологического процесса и качество готовой продукции [1].

Решение этой проблемы тесно связано с широкой автоматизацией технологических процессов, внедрением новых интеллектуальных технологий, появлением необходимых средств контроля для реализации автоматизированных систем управления, проведением организационно-технических мероприятий, способствующих улучшению качества и увеличению ассортимента выпускаемых гранулированных продуктов [2]. Наши исследования были направлены на разработку автоматизированной информационно-измерительной системы для мониторинга структурно-механических свойств гранулированных изделий после формования.

Важную часть в области искусственного интеллекта занимают системы компьютерного зрения (СКЗ), основанные на использовании ЦВК [3...5]. На данном этапе развития СКЗ по праву могут считаться одними из самых передовых и перспективных. Существует масса методов для решения различных строго определенных задач компьютерного зрения, где методы часто зависят от конкретных задач и редко могут быть обобщены для широкого круга применения. Системы компьютерного зрения (СКЗ) – это применение компьютерного зрения для промышленности и производства. Компьютерное зрение имеет преимущества перед зрением человека. В связи с этим актуальным является развитие этого интеллектуального направления науки [6], [7]. При этом уже сейчас очевидно, что от успешного решения ряда сложных и неоднозначных задач компьютерного зрения зависит автоматизация множества процессов и операций самых различных отраслей промышленности, которые до этого управлялись и контролировались только человеком [8], [9]. Системы СКЗ позволяют решать множество задач, которые условно можно разделить на четыре группы (рис. 1 – основные задачи компьютерного зрения): распознавание положения, измерение, идентификация и инспекция.



Рис. 1

- Распознавание положения. Цель компьютерного зрения в данном применении – определение пространственного местоположения или статического положения объекта и передача информации о положении и ориентации объекта в систему управления или контроллер.

- Измерение. В приложениях данного типа основная задача цифровой видеокамеры заключается в измерении различных физических параметров объекта.

- Инспекция. В приложениях, связанных с инспекцией, цель компьютерного зрения – подтвердить определенные свойства, например, наличие или отсутствие этикетки на бутылке, болтов для проведения операции сборки, наличия в полном объеме шоколадных конфет в коробке или наличие различных дефектов в изделии.

- Идентификация. В задачах идентификации основное назначение видеокамеры – считывание различных кодов (штрих-кодов, 2D-кодов и т. п.) с целью их распознавания средствами камеры или системным контроллером, а также определение различных буквенно-цифровых обозначений. Кроме того, к задачам данной группы можно отнести системы, выполняющие задачи безопасности, такие как идентификация личности и техники, детекторы движения.

В СКЗ для решения перечисленных задач используются различные технологии и методы обработки изображения.

Хотя большинство СКЗ полагается на "черно-белые" камеры, использование цветных камер становится все более распространенным явлением. Кроме того, все чаще СКЗ используют цифровые камеры прямого подключения, а не камеры с отдельным захватчиком кадров, что сокращает расходы и упрощает систему. В большинстве практических

применений СКЗ компьютеры предварительно запрограммированы для решения отдельных задач, но методы, основанные на знаниях, становятся все более общими. В настоящее время СКЗ востребованы и используются в области контроля качества и инспекции качества различных изделий машиностроения, а также в горной, строительной и текстильной отраслях промышленности. Так, создание новых методов оценки качества текстильных материалов, в том числе и нетканых полотен, основанных на обработке изображений этих материалов, получило широкое распространение в результате бурного развития информационных технологий, ориентированных на обработку цифровых изображений [10]. Графическим методам обработки цифровых изображений текстильных изделий на полотне посвящена работа [11]. Совершенствование волоконно-оптических датчиков физических величин позволяет использовать их для приема изображений. Подобные датчики можно использовать для создания информационно-измерительных сетей для решения задач, где необходимо получение комплексных сведений об исследуемом объекте [12]. Преимущества волоконно-оптических датчиков: низкая стоимость, малые размеры, устойчивость к агрессивным средам окружающей среды, дистанционность использования, возможность агрегировать отдельные датчики в сложные измерительные системы.

Обзор и анализ полученной информации показали, что данное направление является актуальным, поэтому необходимо более широкое использование цифровой видеосъемки в САР различных технологических процессов [2].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработаны теоретические основы обработки информации, поступающей от видеокамеры в САР [3], [4];

- проведен анализ возможности использования цифровой видеокамеры на примере формирования жгутов из различных сыпучих масс;

- проведен анализ использования ЦБК в качестве интеллектуального датчика для систем контроля, управления и регулирования;

- разработана параметрическая модель процесса формования жгутов из различных сыпучих масс;

- определены динамические характеристики процесса формования;

- разработана математическая модель движения жгута сыпучей массы после выхода из матричного отверстия [5];

- разработана математическая модель САР с использованием эталонного видеокadra в качестве задатчика в программной среде MATLAB ;

- в качестве параметра процесса формования жгутов предложено использовать величину удельной площади, определяемой при математической обработке видеокadra;

- разработаны алгоритмы программ для определения по изображениям видеокadров изменения структурно-механических свойств пищевых масс [6];

- разработаны критерии сравнения визуальных параметров, получаемых после обработки изображения видеокadra. Кроме точности определения визуального параметра, времени, необходимого для его расчета и времени запаздывания реакции на входное возмущение, предложен критерий визуальной устойчивости, отражающий чувствительность измеряемого параметра к случайным механическим сдвигам видеокамеры [7];

- произведена цифровая видеосъемка различных режимов работы формующей машины и после математической обработки видеозаписи определены передаточные функции при использовании в качестве регулируемых параметров таких выходных параметров, как изменение расстояния до точки касания жгута к транспортной ленте и изменение удельной площади;

- подтверждена эффективность использования величины удельной площади как при анализе производственного процесса формования, так и в качестве регулируемого параметра в САР процесса формования жгута из сыпучей массы. Именно удельная площадь оказалась наиболее чувствительным параметром, отражающим динамику процесса формования и обладающим минимальным запаздыванием;

- построены и проанализированы структурная и функциональная схемы системы

регулирования процесса формования жгутов с использованием цифровой видеокамеры;

- на основании решения уравнений динамики получена математическая модель движения жгута после выхода из матричного отверстия, в которой, помимо вязкости, учтено свойство ползучести, характерное для дисперсных сыпучих масс;

- показаны преобразования структурных схем, позволяющие совместить экспериментальные и теоретические передаточные функции в единую систему для моделирования САР процесса формования жгута;

- разработана в Simulink математическая модель САР процесса формования жгута, позволяющая исследовать переходные процессы, происходящие в системе регулирования, использующей цифровую видеокамеру в качестве интеллектуального датчика;

- разработан алгоритм принятия решений для формирования регулирующего воздействия при использовании цифровой видеокамеры в качестве интеллектуального датчика;

- разработана САР технологических процессов формования сыпучих материалов с использованием ЦБК в качестве интеллектуального датчика.

Сформулированы предложения для обеспечения широкого использования ЦБК в качестве интеллектуального датчика: возможность установки ЦБК необходимо предусматривать на стадии проектирования технологического оборудования; для получения изображений внутри герметичных объемов технологического оборудования необходима разработка миниатюрных устройств, включающих ЦБК и светодиоды для подсветки наблюдаемого объекта; для расширения области использования ЦБК необходимо проведение дальнейших прикладных научных исследований по изучению связи режимов обработки полученного полуфабриката с изменением его визуальных характеристик (цвет, форма и текстура поверхности); для использования ЦБК в качестве интеллектуального датчика необходимо решение проблемы метрологического обеспечения и сертификации измерительных комплексов "ЦБК – программное обеспечение".

Для получения из видеокadra информации о величине управляющего сигнала, подаваемого на исполнительное устройство, необходимо определить последовательность функционалов, преобразующих матрицу изображения видеокadra:

$$u(t) = \bar{\Phi}_n < \dots \left\{ \bar{\Phi}_3 \left[ \bar{\Phi}_2 \left( \bar{\Phi}_1 \left[ M_{ijn}(t) \right] \right) \right] \right\} >, \quad (1)$$

где  $\Phi$  – векторный функционал, обеспечивающий одностороннее отображение множества (матрицы)  $M_a$  в другое множество (матрицу)  $M_b$  действительных чисел. Векторность функционала говорит о невозможности обратного однозначного отображения. Для решения задачи сведения трехмерной матрицы изображения к численному значению определяемого параметра необходимо найти последовательность  $\Phi_1 \dots \Phi_n$  отображений.

Как и в любой САР, где применяются датчики уровня отслеживаемого параметра, так и в случае использования цифровой видеокамеры, в качестве интеллектуального датчика целесообразно использовать эталонный видеокادر в качестве задатчика. К эталонному и текущему видеокадрам должны применяться для обработки одни и те же последовательности функционалов, после чего производится вычитание полученных изображений для определения управляющего воздействия.

Разработана методика подготовки к цифровой видеосъемке и методика проведения экспериментальной видеосъемки процесса формования сыпучих масс в жгуты в производственных условиях. На основе этих методики и компьютерной программы, разработанных для оценки стабильности скорости записи цифровой видеокамеры с помощью монитора персонального компьютера, показано, что скорость видеосъемки (интервал времени между соседними кадрами) колеблется от кадра к кадру со средним периодом 0,2 с.

Разработана методика математической обработки видеofilмов, снимаемых в процессе проведения эксперимента, а также алгоритмы обработки экспериментальных видеокadров с использованием в качестве функ-

ционалов, преобразующих матрицы изображений видеокadров, функций математических пакетов "Image Processing Toolbox (IPT)" и "Digital Image Processing Using MATLAB (DIPUM)" в среде программного комплекса MATLAB. При этом проиллюстрированы изменения, происходящие с изображением исходного видеокadra после применения соответствующих функций.

В качестве параметра процесса формования предложена величина удельной площади, равная  $S_{уд} = S/(x_2 - x_1)$ . На основе анализа процесса формования жгута под произвольным углом разработана параметрическая модель процесса формования жгутов (рис. 2). В общем случае входными параметрами являются: скорость выхода жгута из матричного отверстия  $v_m$ ; реологические свойства сыпучей массы (PCM); температура формуемой массы  $T_\phi$  и скорость транспортной ленты  $v_{тл}$ . Эти параметры можно регулировать за счет изменения: скорости нагнетания сыпучей массы, введения других рецептурных компонентов в эту массу, температуры термостатирования камеры.

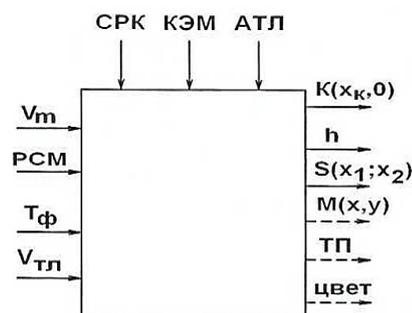


Рис. 2

Выявлено, что с учетом конструкции рабочего экструдера и условий проведения экспериментальной видеосъемки упрощается параметрическая схема, в которой изменяется состав входных и выходных параметров, а также влияющих случайных воздействий.

Обработаны и проанализированы экспериментальные данные переходных процессов, возникающих после резкого увеличения или снижения скорости нагнетания сыпучей массы. После обработки экспериментальной цифровой видеосъемки переходного процесса были определены передаточные функции:

$$W_k(s) = \frac{-10,8959 \exp(-0,4082s)}{s + 1,8147} \quad \text{и} \quad W_0(s) = \frac{-0,6259 \exp(-0,2501s)}{s + 0,6657}, \quad (2)$$

связывающие между собой, соответственно, изменение расстояния до точки касания и изменение удельной площади в зависимости от изменения скорости нагнетания комбикормовой массы (рис. 3). Из выражений

(2) видно, что время запаздывания меньше для удельной площади, поэтому этот параметр быстрее реагирует на изменение динамики процесса формования.



Рис. 3

Построена и проанализирована структурная схема системы регулирования процесса формования жгутов с использованием цифровой видекамеры. На ее основе построена и проанализирована функциональная схема системы автоматического регулирования с использованием цифровой видекамеры в

контуре управления. Показано, что эту систему управления с цифровой видекамерой можно отнести к классу известных дискретных систем управления с ЭВМ, теоретические основы которых уже используются в проектировании систем управления технологическими процессами.

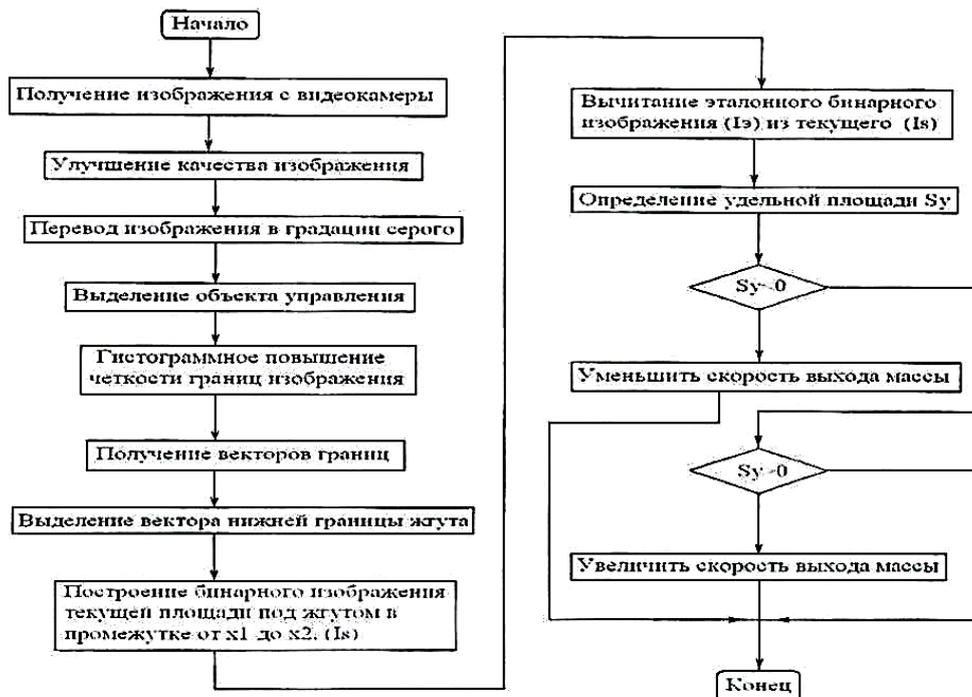


Рис. 4

На рис. 4 представлена разработанная блок-схема алгоритма управления, на основе которого интеллектуальная система принимает решение об изменении регулирующих воздействий.

Полученная в Simulink математическая модель САР процесса формования жгута (рис. 5) позволяет исследовать переходные процес-

сы, происходящие в системах регулирования процесса формования жгута, использующих цифровую видеокамеру в качестве интеллектуального датчика.

Использование ЦВК в различных отраслях промышленности имеет широкие перспективы и повышает уровень автоматизации и безопасности производства.

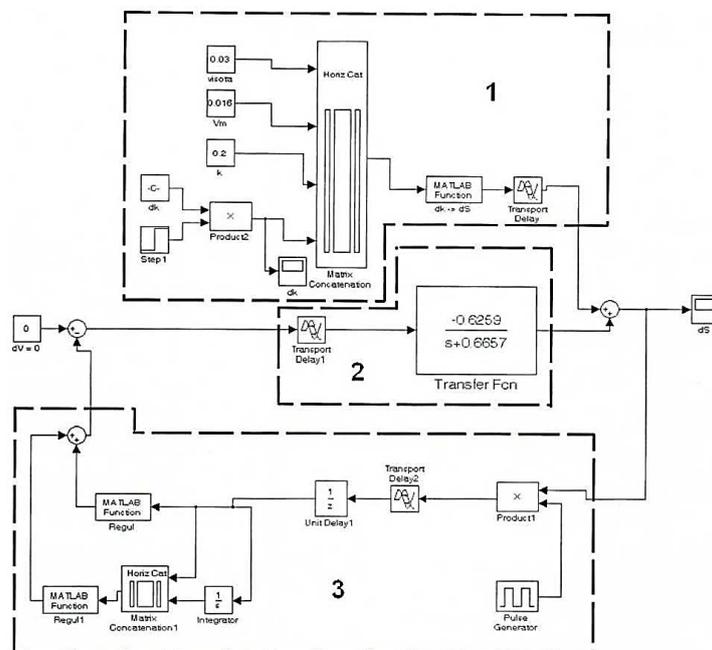


Рис. 5

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии. – М.: Высшая школа, 2005.
2. Благовещенская М.М., Петров И.К. Комплексная оценка качества пищевых продуктов // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1984, № 4. С.83...85.
3. Благовещенская М.М., Иванов Я.В. Вычитание изображений в программе MATLAB // Сб. докл. IV Междунар. конф.-выставки: Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства для их реализации. – Часть 2. – М.: МГУПП, 2006. С.130...132.
4. Иванов Я.В., Благовещенская М.М. Использование цифровых видеокамер в системах автоматического управления технологическими процессами пищевых производств // Сб. мат. V юбилейной школы-конференции с международным участием: Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства для их реализации. – М.: МГУПП, 2007. С.347...349.
5. Благовещенская М.М., Иванов Я.В. Математическое моделирование движения жгута пищевой массы после горизонтального прессования // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008, № 6. С. 164...166.

6. Благовещенская М.М., Иванов Я.В. Использование интеллектуального датчика в системе автоматического управления технологическими процессами. // Сб. докл. X Междунар. научн.-практ. конф.: Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве. – Часть 2. – М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2008. С. 448...451.
7. Благовещенский И.Г., Благовещенская М.М., Носенко С.М. Автоматизация контроля показателей качества и выявления брака продукции с использованием системы компьютерного зрения // Кондитерское производство. – 2016, №3.
8. Данилова М.А., Благовещенская М.М., Благовещенский И.Г. Автоматизированная система учета сыпучих пищевых продуктов // Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. – 2012, №6.
9. Благовещенская М.М., Семина Н.А., Благовещенский И.Г. Использование цифровой видеокамеры в качестве интеллектуального датчика системы автоматического регулирования процесса формования гранулированных комбикормов // Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2014, №2.

10. Благовещенская М.М., Давыдова Г.Р., Семина Н.А., Благовещенский И.Г. Использование интеллектуальных технологий для контроля качества творога // Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. – 2014, №2.

11. Шкапов П.М., Благовещенский И.Г. Решение задач оптимального управления на основе гибридных методов глобальной оптимизации // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2015, №4.

12. Благовещенский И.Г. Экспертная интеллектуальная система мониторинга процесса формования помадных конфет с использованием системы технического зрения // Пищевая промышленность. – 2015, №6.

#### REFERENCES

1. Blagoveshchenskaya M.M., Zlobin L.A. Sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami i informatsionnye tekhnologii. – M.: Vysshaya shkola, 2005.

2. Blagoveshchenskaya M.M., Petrov I.K. Kompleksnaya otsenka kachestva pishchevykh produktov // Izv. vuzov. Pishchevaya tekhnologiya. – 1984, № 4. S.83...85.

3. Blagoveshchenskaya M.M., Ivanov Ya.V. Vychitanie izobrazheniy v programme MATLAB // Sb. dokl. IV Mezhdunar. konf.-vystavki: Vysokoeffektivnye pishchevye tekhnologii, metody i sredstva dlya ikh realizatsii. – Chast' 2. – M.: MGUPP, 2006. S.130...132.

4. Ivanov Ya.V., Blagoveshchenskaya M.M. Ispol'zovanie tsifrovyykh videokamer v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami pishchevykh proizvodstv // Sb. mat. V yubileynoy shkoly-konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: Vysokoeffektivnye pishchevye tekhnologii, metody i sredstva dlya ikh realizatsii. – M.: MGUPP, 2007. S. 347...349.

5. Blagoveshchenskaya M.M., Ivanov Ya.V. Matematicheskoe modelirovaniye dvizheniya zhguta pishchevoy massy posle gorizontalnogo pressovaniya // Zhurnal nauchnykh publikatsiy aspirantov i doktorantov. – 2008, № 6. S. 164...166.

6. Blagoveshchenskaya M.M., Ivanov Ya.V. Ispol'zovanie intellektual'nogo datchika v sisteme avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami. // Sb. dokl. X Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf.: Avtomatizatsiya i informatsionnoye obespechenie proizvodstvennykh protsessov v sel'skom khozyaystve. – Chast' 2. – M.: GNU VIM Rossel'khozakademii, 2008. S. 448...451.

7. Blagoveshchenskiy I.G., Blagoveshchenskaya M.M., Nosenko S.M. Avtomatizatsiya kontrolya pokazateley kachestva i vyyavleniya braka produktii s ispol'zovaniem sistemy komp'yuternogo zreniya // Konditerskoe proizvodstvo. – 2016, №3.

8. Danilova M.A., Blagoveshchenskaya M.M., Blagoveshchenskiy I.G. Avtomatizirovannaya sistema ucheta sypuchikh pishchevykh produktov // Khraneniye i pererabotka sel'skokhozyaystvennogo syr'ya. – 2012, №6.

9. Blagoveshchenskaya M.M., Semina N.A., Blagoveshchenskiy I.G. Ispol'zovanie tsifrovoy videokamery v kachestve intellektual'nogo datchika sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya protsessa formovaniya granulirovannykh kombikormov // Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta inzhenernykh tekhnologiy. – 2014, №2.

10. Blagoveshchenskaya M.M., Davydova G.R., Semina N.A., Blagoveshchenskiy I.G. Ispol'zovanie intellektual'nykh tekhnologiy dlya kontrolya kachestva tvoroga // Vestnik Voronezhskogo gos. un-ta inzhenernykh tekhnologiy. – 2014, №2.

11. Shkapov P.M., Blagoveshchenskiy I.G. Resheniye zadach optimal'nogo upravleniya na osnove gibridnykh metodov global'noy optimizatsii // Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya. – 2015, №4.

12. Blagoveshchenskiy I.G. Ekspertnaya intellektual'naya sistema monitoringa protsessa formovaniya pomadnykh konfet s ispol'zovaniem sistemy tekhnicheskogo zreniya // Pishchevaya promyshlennost'. – 2015, №6.

Рекомендована кафедрой автоматизированных систем управления биотехнологическими процессами. Поступила 12.04.19.