

Информационные технологии, моделирование и управление

УДК 65.01.85.664

Профессор М.М. Благовещенская, доцент Н.А. Семина
(Московский государственный университет пищевых производств, г. Москва)
кафедра информационных технологий и автоматизированных систем
тел.+7 (499) 750-01-11

E-mail: mmb@mgupp.ru

профессор И.Г. Благовещенский

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва)
кафедра теоретической механики. тел.+7 (916) 964-72-81

E-mail: drbl@bk.ru

генеральный директор С.Д. Савостин

(ОАО «Мелькомбинат в Сокольниках», г. Москва)

тел.+7 (903) 528-57-44

E-mail: savostins@yandex.ru

Professor M.M. Blagoveshchenskaya, associate Professor N.A. Semina
(Moscow State University of Food Production, Moscow) Department of information
technologies and automated systems

phone +7 (499) 750-01-11

E-mail: mmb@mgupp.ru

professor I.G. Blagoveshchensky

(Baumann Moscow state technical university, Moscow) Department of theoretical mechanics
phone (916) 964-72-81

E-mail drbl@bk.ru

general director S.D. Savostin

(JSC "Melkombinat in Sokolniki", Moscow)

phone +7 (499) 750-01-11

E-mail: mmb@mgupp.ru

Использование цифровой видеокамеры в качестве интеллектуального датчика системы автоматического регулирования процесса формования гранулированных комбикормов

Using a digital video camera as the smart sensor of the system for automatic process control of granular fodder molding

Реферат. Важнейшей операцией производства гранулированных комбикормов является процесс формования. В процессе формования определяются структурно-механические свойства гранулированных комбикормов, обуславливающие ход технологического процесса и качество готовых изделий. В статье проведен анализ возможности использования цифровой видеокамеры (ЦВК) в качестве интеллектуального датчика для систем контроля, управления и регулирования процессом формования гранулированных комбикормов. Представлена разработанная параметрическая модель процесса формования жгутов из гранулированной комбикормовой массы. Определены динамические характеристики процесса формования. Разработана математическая модель движения жгута гранулированной комбикормовой массы после выхода из матричного отверстия. Показана разработанная математическая модель системы автоматического регулирования (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 комбикормовых масс. Произведена цифровая видеосъемка различных режимов работы формирующей машины и после математической обработки видеозаписи определены передаточные функции при использовании в качестве регулируемых параметров изменение удельной площади. Построены и проанализированы структурная и функциональная схемы системы регулирования процесса формования пищевых жгутов с использованием цифровой видеокамеры. На основании решения уравнений динамики жидкости получена математическая модель движения жгута после выхода из матричного отверстия, в которой, помимо вязкости, учтено свойство ползучести, характерное для комбикормовых масс. 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. Описана разработанная система автоматического регулирования (САР) процесса формования гранулированных комбикормов на базе использования в качестве интеллектуального датчика цифровой видеокамеры.

© Благовещенская М.М., Семина Н.А.,
Благовещенский И.Г., Савостин С.Д., 2014

Summary. The most important operation of granular mixed fodder production is molding process. Properties of granular mixed fodder are defined during this process. They determine the process of production and final product quality. The possibility of digital video camera usage as intellectual sensor for control system in process of production is analyzed in the article. The developed parametric model of the process of bundles molding from granular fodder mass is presented in the paper. Dynamic characteristics of the molding process were determined. A mathematical model of motion of bundle of granular fodder mass after matrix holes was developed. The developed mathematical model of the automatic control system (ACS) with the use of etalon video frame as the set point in the MATLAB software environment was shown. As a parameter of the bundles molding process it is proposed to use the value of the specific area defined in the mathematical treatment of the video frame. The algorithms of the programs to determine the changes in structural and mechanical properties of the feed mass in video frames images were developed. Digital video shooting of various modes of the molding machine was carried out and after the mathematical processing of video the transfer functions for use as a change of adjustable parameters of the specific area were determined. Structural and functional diagrams of the system of regulation of the food bundles molding process with the use of digital camcorders were built and analyzed. Based on the solution of the equations of fluid dynamics mathematical model of bundle motion after leaving the hole matrix was obtained. In addition to its viscosity, creep property was considered that is characteristic of the feed mass. The mathematical model ACS of the bundles molding process allowing to investigate transient processes which occur in the control system that uses a digital video camera as the smart sensor was developed in Simulink. Decision algorithm for generating regulatory impact when using a digital video camera as the smart sensor was developed. The developed automatic control systems (ACS) of the process of granular fodder molding based on the use of digital video camera as an intelligent sensor was described.

Ключевые слова: автоматические системы управления, математическое моделирование, цифровая видеосъемка, интеллектуальный датчик, процесс формирования комбикормовых масс.

Keywords: automatic control systems, mathematical modeling, digital video, intelligent sensor, feed masses molding process.

Гранулированные комбикорма изготавливают для всех видов животных, птиц и рыб. Размеры гранул зависят от вида и возраста животных, способов кормления. Для взрослых птиц (кур, уток, гусей, индеек) диаметр гранул составляет 4,7...9,7 мм; взрослого крупного рогатого скота – 4,7... 19,0; взрослых овец – 4,7... 12,7 мм; лошадей – 4,7... 19,0 мм; рыб – 4,7 мм и т. д. При гранулировании можно применять связующие вещества с одновременным пропариванием или без пропаривания. В качестве таких веществ используют соленый гидрол, мелассу, кукурузный экстракт и другие, а также воду.

Преобразование дисперсных материалов 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, прокатывающие 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 прессуе-

мую 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 рассыпной комбикорм 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. Преимуществом является наличие высокопроизводительного прессующего оборудования при относительно небольших расходах электроэнергии, кроме того, обработка паром способствует достижению требуемых санитарно-гигиенических показателей качества комбикормов. Производство комбикормов 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 комбикормов.

Актуальной задачей производства гранулированных комбикормов является получение готовых изделий заданного качества. Важнейшей операцией производства гранулированных комбикормов является процесс формования. В процессе формования определяются структурно-механические свойства гранулированных комбикормов, обуславливающие ход технологического процесса и качество готовых изделий [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 пищевых продуктов [2].

Наши исследования были направлены на разработку автоматизированной информационно-измерительной системы для мониторинга структурно-механических свойств гранулированных комбикормов после формования.

Эффективное использование цифровой видеотехники в системах автоматизации производства, прежде всего, наблюдается на наиболее развитых производствах с общей высокой культурой и технологией. Существующие методы цифровой обработки изображений ориентированы на удовлетворение интересов человека (распознавание текста и других образов, фильтрация и улучшение изображения с точки зрения человеческого зрения и т.д.). Важной областью применения цифровых изображений, регистрируемых цифровой видеокамерой (ЦВК) в видимом диапазоне, является автоматический контроль выпускаемой продукции. Например, в электронной промышленности – контроль наличия всех компонентов в движущихся на конвейере печатных платах сложных электронных устройств. Компьютерный визуальный контроль отсутствия пустых мест в движущейся упаковке таблеток используется в фармацевтической промышленности. В пищевой промышленности начинает использоваться компьютерная видеосъемка для: выявления недостаточно заполненных бутылок на производственной линии; комплектности конечной упаковки изделий или наличия брака в виде отдельных подгоревших кукурузных хлопьев, проходящих контроль по цвету; оценки структурно-механических свойств шоколадных масс. Данное направление является актуальным, поэтому необходимо более широкое использование цифровой видеосъемки в САР различных технологических процессов пищевых производств [3, 4].

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработаны теоретические основы обработки информации, поступающей от видеокамеры в САР [5];

- проведен анализ возможности использования цифровой видеосъемки в пищевой промышленности на примере формования жгутов из пищевой массы;

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

- разработана параметрическая модель процесса формования жгутов из пищевой массы;

- определены динамические характеристики процесса формования;

- разработана математическая модель движения жгута пищевой массы после выхода из матричного отверстия [6];

- 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 [7, 8];

- 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 [9];

- 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 пищевого жгута. 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 пищевых жгутов с использованием цифровой видеокамеры;

- на основании решения уравнений динамики жидкости получена математическая модель движения жгута после выхода из матричного отверстия, в которой, помимо вязко-

сти, учтено свойство ползучести, характерное для комбикормовых 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, использующая 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 пищевых производств с использованием ЦВК в качестве интеллектуального датчика.

Сформулированы предложения для обеспечения широкого использования ЦВК в качестве интеллектуального датчика:

- возможность установки ЦВК необходимо предусматривать на стадии проектирования технологического оборудования;

- для получения изображений внутри герметичных объёмов технологического оборудования необходима разработка миниатюрных устройств, включающих ЦВК и светодиоды для подсветки наблюдаемого объекта;

- для расширения области использования ЦВК необходимо проведение прикладных научных исследований по изучению связи режимов обработки пищевого полуфабриката с изменением его визуальных характеристик (цвет, размер, форма и текстура поверхности);

- для использования ЦВК в качестве интеллектуального датчика необходимо решение проблемы метрологического обеспечения и сертификации измерительных комплексов "ЦВК – программное обеспечение".

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

$$u(t) = \tilde{\Phi}_n < \dots \{ \tilde{\Phi}_3 [\tilde{\Phi}_2 (\tilde{\Phi}_1 [M_{ijm}(t)])] \} >, \quad (1)$$

где Φ – векторный функционал, обеспечивающий одностороннее отображение множества (матрицы) M_a в другое множество (матрицу) M_b действительных чисел. Векторность функ-

ционала 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 комбикормовых жгутов в производственных условиях. С помощью этих методик 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 функционалов, 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 $S_{y\phi} = S/(x_2 - x_1)$. На основе анализа процесса формования жгута под произвольным углом разработана параметрическая модель процесса формования жгутов (рисунок 1). В общем случае входными параметрами являются: скорость выхода жгута из матричного отверстия (v_m); реологические свойства комбикормовой массы (PCM); температура формируемой массы (T_ϕ) и скорость транспортёрной ленты (v_{ml}). Эти параметры можно регулиро-

вать за счёт изменения: скорости нагнетания комбикормовой массы, введения других рецептурных компонентов в эту массу, температуры термостатирования камеры (рисунок 2).

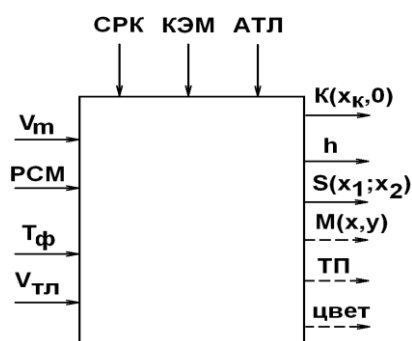


Рисунок 1. Параметрическая схема для формования жгута из матричного отверстия

В зависимости от изменения этих параметров будут изменяться такие выходные параметры как расстояние до точки касания ($K(x_k, 0)$); высота жгута (h); удельная площадь ($S(x_1, x_2)$); координаты максимального уровня жгута ($M(x, y)$); текстура ($ТП$) и цвет поверхности жгута. При этом случайным образом могут немного изменяться физико-химические свойства любого рецептурного компонента (СРК) и адгезионные свойства поверхности транспортной ленты (АТЛ), возникать краевые эффекты на выходе формирующего отвер-

стия матрицы (КЭМ), влияющие на выходные параметры процесса формования.

Выявлено, что с учётом конструкции рабочего экструдера и условий проведения экспериментальной видеосъёмки 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 комбикормовой массы. После обработки экспериментальной цифровой видеосъёмки переходного процесса, были определены передаточные функции:

$$W_K(s) = \frac{-10,8959 \cdot \exp(-0,4082 \cdot s)}{s + 1,8147} \quad \text{и}$$

$$W_O(s) = \frac{-0,6259 \cdot \exp(-0,2501 \cdot s)}{s + 0,6657}, \quad (2)$$

связывающие между собой, соответственно, изменение расстояния до точки касания и изменение удельной площади в зависимости от изменения скорости нагнетания комбикормовой массы. Из выражений (2) видно, что время запаздывания меньше для удельной площади, поэтому этот параметр быстрее реагирует на изменение динамики процесса формования.



Рисунок 2. Изменение удельной площади при увеличении скорости нагнетания комбикормовой массы

Построена и проанализирована структурная схема системы регулирования процесса формования комбикормовых жгутов с использованием цифровой видеокамеры. На её основе построена и проанализирована функциональная схема системы автоматического регулирования с использованием цифровой видеокамеры в контуре управления. Показано, что эту систему управления с цифровой видеокамерой можно отнести к классу из-

вестных дискретных систем управления с ЭВМ, теоретические основы которых уже используются в проектировании систем управления технологическими процессами.

На рисунке 3 представлена разработанная блок-схема алгоритма управления, на основе которого интеллектуальная система принимает решение об изменении регулирующих воздействий.



Рисунок 3. Блок-схема алгоритма управления, на основе которого интеллектуальная система принимает решение об изменении регулирующих воздействий

Разработана в Simulink модель САР процесса формования комбикормового жгута (рисунок 4), позволяющая исследовать переходные процессы, происходящие в системах регулирования процесса формования жгута, использующих цифровую видеокамеру в качестве интеллектуального датчика.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Бутковский В.А., Мерко А.И. Мельников Е.М. Технологии зерноперерабатывающих производств: учебник. М.: Интерграф сервис, 1999. 472 с.
- 2 Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 2005. 768 с.
- 3 Благовещенская М.М., Петров И.К. Комплексная оценка качества пищевых продуктов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 1984. № 4. С. 83-85.
- 4 Троицкий А.К., Благовещенский И.Г. Возможность использования обработки изображений для контроля качества кондитерской продукции // Материалы Международной научно-практической конференции «Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины». М.: Изд. комплекс МГУПП, 2012. С. 160-165.

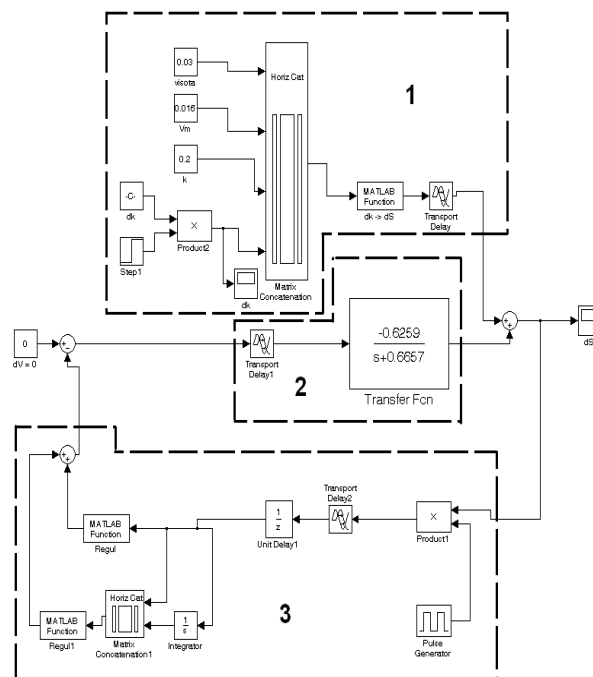


Рисунок 4. Математическая модель САР на основе измерения удельной площади.

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

- 5 Троицкий А.К., Благовещенский И.Г. Теоретические основы использования системы технического зрения в системе автоматического управления технологическим процессом // Материалы Международной научно-практической конференции «Планирование и обеспечение подготовки и переподготовки кадров для отраслей пищевой промышленности и медицины». М.: Изд. комплекс МГУПП, 2012. С. 165-172.
- 6 Благовещенская М.М., Иванов Я.В. Вычитание изображений в программе MATLAB // Сб. докладов IV международной конференции-выставки "Высокоэффективные пищевые технологии, методы и средства для их реализации". Часть 2. М.: МГУПП, 2006. С. 130-132.
- 7 Иванов Я.В., Благовещенская М.М. Использование цифровых видеокамер в системах автоматического управления технологическими процессами пищевых производств // Сб. материалов V юбилейной школы-конференции с международным участием "Высокоэффективные

пищевые технологии, методы и средства для их реализации". М.: МГУПП, 2007. С. 347-349.

8 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.

9 Благовещенская М.М., Иванов Я.В. Использование интеллектуального датчика в системе автоматического управления технологическими процессами // Сб. докладов X международной научно-практической конференции "Автоматизация и информационное обеспечение производственных процессов в сельском хозяйстве". Часть 2. М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2008. С. 448-451.

REFERENCES

1 Butkovskii V.A., Merko A.I., Melnikov E.M. Tekhnologii zernopererabatyvaiushchikh proizvodstv [Grain processing technology industries]. Moscow, Intergraf servis, 1999. 472 p. (In Russ.).

2 Blagoveshchenskaia M.M., Zlobin L.A. Informatsionnye tekhnologii system upravleniia tekhnologicheskimi protsessami [Information technologies for process control systems]. Moscow, Vysshaia shkola, 2005. 768 p. (In Russ.).

3 Blagoveshchenskaia M.M., Petrov I.K. Comprehensive assessment of the quality of food. *Izvestiia vysshykh uchebnykh zavedenii. Pishchevaia tekhnologiya*. [Proceedings of the higher educational institutions. Food technology], 1984, no. 4, pp. 83-85. (In Russ.).

4 Troitskii A.K., Blagoveshchenskii I.G. Ability to use image processing for quality control confectionery. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Planirovanie i obespechenie podgotovki i perepodgotovki kadrov dlia otraslei pishchevoi promyshlennosti i meditsiny"* [International scientific and practical conference "Planning and provision of training and retraining for the food industry and medicine"]. Moscow, 2012. pp. 160-165. (In Russ.).

5 Troitskii A.K., Blagoveshchenskii I.G. Theoretical basics of using a vision system in the system of the automatic process control. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Planirovanie i obespechenie podgotovki i perepodgotovki kadrov dlia otraslei pishchevoi promyshlennosti i meditsiny"* [International scientific and practical conference "Planning and provision of training and retraining for the food industry and medicine"]. Moscow, 2012. pp. 165-172. (In Russ.).

6 Blagoveshchenskaia M.M., Ivanov Ia.V. Subtraction images in MATLAB. *Sbornik dokladov IV mezhdunarodnoi konferentsii-vystavki "Vysokoeffektivnye pishchevyte tekhnologii, metody i sredstva dlia ikh realizatsii"* Chast' 2 [Proceedings IV International Conference and Exhibition "High food technology, methods and tools for their implementation" Part 2]. Moscow, 2006, pp. 130-132. (In Russ.).

7 Ivanov Ia.V., Blagoveshchenskaia M.M. The use of digital cameras in automatic process control of food production. *Sbornik materialov V iubileinoi shkoly-konferentsii "Vysokoeffektivnye pishchevyte tekhnologii, metody i sredstva dlia ikh realizatsii"* [Collected materials V Jubilee school conference with international participation "High food technology, methods and tools for their implementation"], Moscow, 2007, pp.347-349. (In Russ.).

8 Blagoveshchenskaia M.M., Ivanov Ia.V. Mathematical modeling of motion harness food mass after horizontal compression. *Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov*. [Journal of scientific publications graduate and doctoral students], 2008, no. 6, pp. 164-166. (In Russ.).

9 Blagoveshchenskaia M.M., Ivanov Ia.V. Using a smart sensor system for automatic process control. *Sbornik dokladov X mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Avtomatizatsiia i informatsionnoe obespechenie proizvodstvennykh protsessov v sel'skom khoziaistve"* Chast' 2 [Collection of reports X International Scientific-Practical Conference "Automation and information support of production processes in agriculture" Part 2]. Moscow, 2008, pp. 448-451. (In Russ.).