

Информационные системы оценки технологических достоинств пшеницы

Медведев Павел Викторович

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»

Адрес: 460018, город Оренбург, проспект Победы, д. 13

E-mail: pvmmedvedev@mail.ru

Федотов Виталий Анатольевич

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»

Адрес: 460018, город Оренбург, проспект Победы, д. 13

E-mail: vital_asm@mail.ru

Соловых Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»

Адрес: 460018, город Оренбург, проспект Победы, д. 13

E-mail: sergsolo@mail.ru

В практике пищевой промышленности востребованы высокоточные и экспрессные методики определения технологических качеств пшеницы и прогнозирования потребительских свойств продуктов ее переработки. Перспективным является использование для этих целей показателя твердозерности, однако на сегодняшний день его определение сопряжено с низкой точностью, высокими трудозатратами, использованием дорогостоящего инструментария. Целесообразны разработки автоматизированных систем анализа размола зерно на мукомольных предприятиях. Такие системы могут использоваться для определения целевого назначения производимой муки. В статье описана автоматизированная система оценки технологических свойств продуктов переработки зерна в процессе помола. В основе системы лежат методики формирования данных о форме и размерах частиц в потоках размола зерна. Для этого производимые цифровой камерой Sony IMX219 микроснимки частиц размола зерна подвергались обработке микрокомпьютером Raspberry Pi 3 с разработанным программным обеспечением на основе библиотеки алгоритмов компьютерного зрения OpenCV. Для моделирования работы такой системы на производстве была сконструирована лабораторная установка. Поскольку для успешного анализа частиц компьютерным зрением необходимо устранение эффекта слипания частиц, пользовались для этой цели совместным влиянием электростатических полей и вибрации. Оптимальные технические параметры подобраны опытным путем – электрическое напряжение около 24 кВ и частота вибраций анализируемых образцов продуктов размола зерна около 45 Гц. Для получения высокого напряжения использовался генератор коротких импульсов на основе высокочастотных тиристоров ТЧ63. Меняя напряжение питания генератора, можно плавно варьировать напряжение на выходе от 1 до 35 кВ. Один вывод высоковольтного источника питания заземлен, второй вывод подключен к датчику-регистратору частиц размола. Разработан алгоритм оценки твердозерности пшеницы на основе данных о форме и размерах частиц продуктов размола зерна – построено соответствующее регрессионное уравнение. Точность разработанного алгоритма определили путем сравнения с результатами оценки твердозерности референтным методом – по показателю микротвердости – способности зерна сопротивляться деформации (вдавливанию). Микротвердость зерна оценивали на микротвердомере ПМТ-3 с квадратной пирамидкой. Установленные эмпирические зависимости позволяют производить оценку твердозерности зерна с погрешностью не более 3%. Благодаря экспрессности такой оценки, возможны контроль и коррекция технологического процесса на мукомольных предприятиях.

Ключевые слова: технологические свойства; зерно пшеницы; продукты переработки зерна; гранулометрический анализ; компьютерное зрение; твердозерность; информационные системы

Введение

в которых показатели качества характеризуются высокой лабильностью.

Биологические системы, частным случаем которых является зерно пшеницы, представляют собой сложные многокомпонентные структуры, Как известно, основной вклад в формирование качества зерна и продуктов его переработки вносят генотипические и агроэкологические

факторы. Однако, сведения об их совместном влиянии разрозненны, что связано с несовершенством методик их определения, сложностями в интерпретации степени влияния факторов на качество сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

Промышленность нуждается в высокоточном, экспрессном определении технологических качеств пшеницы и прогнозировании ее будущих потребительских свойств. От сформировавшихся на зерноперерабатывающем предприятии качеств муки зависит качество производимой хлебобулочной, кондитерской и макаронной продукции. Высокая точность и экспрессность в оценке качества продуктов переработки зерна достигается отчасти за счет повышения автоматизации (роботизации) производства.

Информационные технологии и интеллектуальные системы затронули подавляющее большинство сфер техники и промышленности. На сегодняшний день оснащение роботизированной техникой различных секторов промышленности произошло в разной степени. Современные предприятия зерноперерабатывающей отрасли достигли высокой степени автоматизации производства.

Совершенствование управления качеством зерно-мучных товаров возможно за счет создания или модернизации систем контроля процесса переработки зерна на предприятиях. Используя информацию о качестве поступающего на переработку сырья, можно эффективнее определять его целевое назначение и устанавливать режимы подготовки и проведения помола.

Мониторинг потоков продуктов размола зерна позволяет в режиме реального времени оценивать качество переработки зерна и повышать потребительские достоинства производимой из него хлебобулочной, крупяной и кондитерской продукции за счет управления технологическими параметрами. Таким образом, в системе мониторинга возникает «интерактивность» - обратная связь (Казеннова, 2009).

Современными информационными технологиями достигаются высокое быстродействие и точность определения размеров и форм частиц в потоках продуктов размола зерна на производстве. Анализируемые пробы измельченного зерна облучают светом видимого диапазона и регистрируют либо в проходящем, либо отраженном свете. Варианты освещения предусматривают

свет видимого диапазона, а также инфракрасного и ультрафиолетового, что обеспечивает дополнительную информацию о пробах размола зерна. Спектральная избирательность дает возможность выделять частицы различных частей зерновки, т.к. они отражают разные длины волн света. Например, эндосперм зерна (и частицы его размола) имеют больший коэффициент отражения в инфракрасном диапазоне в сравнении с частицами зародыша. Частицы зародыша зерна имеют больший коэффициент отражения в сравнении с частицами оболочек зерна (Беркутова, 1997).

Цветовые характеристики частиц зародыша, эндосперма зерна существенно отличаются от характеристик частиц оболочек (отрубей). Использование цветового анализа в ситовом процессе может служить разделению продуктов размола по фракциям (с большим или меньшим содержанием морфологических элементов зерна – зародыша, эндосперма, оболочек). Для проведения цветового анализа широко используются фотосепараторы. Их назначение – обеспечение так называемой фотоочистки – удаление примесей в зерне.

Поскольку зерноочистительные машины не всегда идеально отличают некоторые примеси (из-за схожести физико-механических показателей), в зерноперерабатывающей отрасли широко используется инновационная система определения примесей по оптическим свойствам – фотосепарация или фотоочистка (Калачев, 2006).

В основе фотосепарации – скоростное сканирование общей массы и программная обработка полученного изображения, способствующая установке соответствия зерна необходимым требованиям. Благодаря этому зерновые массы могут быть отсортированы по своему размеру, цвету, форме, содержанию полезных веществ и даже по состоянию поверхности зерновки. Фотосепараторы работают по следующей схеме. Зерновой материал поступает из резервуара на вибрирующий распределитель, на котором происходит равномерное распределение материала в один слой, что помогает устройству сканировать каждую отдельную частицу. Затем зерно поступает в сканируемую область, где каждая зерновка попадает под двустороннее освещение, получающиеся изображения воспринимаются сенсорами фотосепаратора. Эти сведения преобразуются в сигнал. Контроллер проводит сравнение этого сигнала с заранее установленными в системе устройства критериями. В случае несоответствия – подается команда пневмоэжектору и

путем применения воздушной струи примеси или испорченное зерно направляются в резервуар для отходов. Если зерновой материал соответствует требуемому качеству, он отправляется на переработку (Mo, Huang, Chen, 2008).

Благодаря тому, что фотоочистка позволяет просканировать каждую отдельную зерновку, уровень очистительного эффекта при использовании фотосепаратора достигает 99,9%. Современная система обработки зерновых культур – фотосепарация – это отличная возможность сортировки сырья по комплексу качеств, таких как: цвет, форма, размер, состояние поверхности зерновки (Tanabata, Shibaya, Hori, Ebana, Yano, 2012). Очень важной функцией такой зерноочистительной машины является сортировка сразу по нескольким взаимодополняющим критериям. Благодаря этой системе можно разделять анализируемые образцы по сортовым особенностям, что позволяет получать уникальное сырье с высочайшими показателями хлебопекарных и потребительских свойств (Роберт, 2001).

Большое значение имеют характеристики структурно-механических свойств размалываемого зерна. В частности, для зерна пшеницы широко используется показатель твердозерности. Зерно различной твердозерности обладает различными технологическими свойствами. Это проявляется при измельчении зерна и тесно связано со структурой его эндосперма (Беркутова, 1991). Так, например, для мучных кондитерских изделий желательна мука из пшеницы с низкой твердозерностью. Пшеница с высокой твердозерностью обладает хорошими мукомольными свойствами, используется в производстве хлебобулочных изделий (Zhang, Tian, Sun, 2015).

На практике от твердозерности зерна зависит выбор технологических параметров предварительной подготовки пшеницы перед помолом. У пшеницы с высокой твердозерностью эндосперм разрушается при помоле, главным образом, по границам клеток (Pomeranz, 1988). В результате получается крупитчатая мука, хорошо высеиваемая при ее ситовой сортировке. Частицы эндосперма часто имеют правильную форму. У пшеницы с низкой твердозерностью эндосперм разбивается, чаще всего, по содержимому клеток, от этого большое число частиц содержат фрагменты клеток, имеющих неправильную форму (Souza, 2004). Частицы такой муки часто слипаются, создавая известные трудности при просеивании. Неоднородность в микроскопическом строении и химическом составе отдельных

анатомических частей зерна определяет различия их физико-химических свойств. Эти различия необходимо учитывать при подготовке пшеницы к размолу и последующей переработке (Karim, Norziah, Seow, 2000).

В мукомольной промышленности важным признаком качества зерна, отражающим его структуру, является стекловидность зерновки. Однако, практика работы мукомольных заводов и результаты многочисленных экспериментов говорят о ненадежности стекловидности зерна для оценки его технологических качеств (Chung, Ohm, Lookhart, Bruns, 2003). Лабильность показателя стекловидности в связи с различиями почвенно-климатических и агротехнических условий произрастания, типовыми и сортовыми особенностями пшеницы ограничивает его возможности при определении консистенции зерна. В мировой практике наряду со стекловидностью применяют ряд методов, позволяющих дать числовую оценку показателю твердозерности (Buyukozturk, 1998).

Таким образом, прочностные качества зерновки являются одной из важных характеристик мукомольных свойств пшеницы. Особенности структуры зерна обуславливают количественно-качественные результаты помола, расход энергии на измельчение, дисперсность и технологические свойства муки (Суворов, Лабутина, Карягина, Погорелов, 2008). Знания об особенностях структуры зерна пшеницы могут повысить эффективность использования зерновых ресурсов. Большое влияние на структуру зерна оказывают ее вид, сорт, тип, район произрастания, условия выращивания пшеницы и т.д. (Мелешкина, Туляков, Витол, 2017).

Для оценки степени твердозерности зерна используют различные методики. О величине твердозерности можно судить по выходу отдельных фракций частиц по крупности при помоле зерна (Caporaso, Whitworth, Fisk, 2016). Прочностные свойства зерна можно определять по показаниям ваттметра при фиксированной работе измельчителя, рассчитывая образующиеся поверхности по данным ситового анализа зерна и продуктам измельчения. Однако большое значение в этих способах оценки твердозерности играет влажность зерна. С увеличением влажности растет удельный расход энергии на образование новой поверхности у зерна различной консистенции и районов произрастания (Varzakas, 2015).

Консистенцию зерна можно оценивать по результатам просеивания 50 грамм пробы измельченного

зерна на металлотканых ситах с размерами отверстий 245 и 55 мкм. Средний размер частиц фракций рассчитывается как полусумма отверстий проходного и сходового сит (Rundgren, 2003). Характер разрушения зерна пшеницы определяется ее прочностными, или, как частный случай, деформационными свойствами. Известно, что различия прочностных свойств зерна наиболее четко проявляются при его измельчении по показателю расхода электроэнергии на отдельные этапы и технологический процесс помола в целом. На абсолютные значения расхода энергии значительно влияет различие установок, используемых в опытных помолах. Удельный расход энергии на помол выше для сортов пшеницы с высокой твердозерностью.

Одним из способов определения твердозерности является гранулометрический анализ продуктов размала зерна, описывающий геометрические характеристики частиц размала: длину, ширину, периметр, коэффициент вытянутости частицы (отношение длины к ширине) и прочие. Однако проведение такого анализа сопряжено с трудностями применения прямых методов измерения, а также с отсутствием критериев оценки формы частиц (Katyal, 2019). Большой интерес представляет использование для решения подобных проблем искусственного интеллекта – разработки интеллектуальных компьютерных программ, формирование экспертных систем (Huang, Wang, Zhu, Qin, Huang, 2015).

Для мукомольной промышленности имеют большое значение геометрические параметры частиц в муке, поскольку они обнаруживают тесную связь со скоростью течения биохимических и реологических процессов в тестовых заготовках. Управление геометрическими параметрами частичек муки дает возможность повысить качество хлебобулочной продукции (Лабутина, 2004).

Современные информационные технологии нашли свое отражение в разнообразных промышленных устройствах. Разработанное МГТУ имени Баумана измерительное устройство ГИУ-1 на основе биологического микроскопа БИОЛАМ, способно оценивать гранулометрический состав муки: измерять площадь и морфологические характеристики отдельных частиц. Подобный гранулометрический анализ может произвести сконструированный ООО «Наноимпэкс» (Санкт-Петербург) анализатор частиц PartAn 3001 L. В Алтайском государственном техническом университете разработаны методики опреде-

ления стекловидности и засоренности зерна с использованием искусственных нейронных сетей. В практике для выяснения и оценки структуры крахмальных зерен используют микрофотографии образцов в видимом диапазоне электромагнитного спектра.

Основная идея в этих научных разработках – получение изображений частиц (зерна, крупы, муки и т.д.) сканирующими устройствами (цифровыми камерами) и обработка этих изображений современными информационными средствами. Широко используются для обработки изображений частиц алгоритмы компьютерного зрения. Это позволяет получить много полезной информации о размерах и форме частиц продукта и может быть использовано в дальнейшем для оценки качества этого продукта (Nuttall, O'Leary, Panozzo, Walker, Barlow, Fitzgerald, 2017).

Дальнейшее развитие эти идеи получили в так называемом фрактографическом анализе. Фрактографическое исследование включает в себя изучение изломов после разрушения зерновки. Наиболее целесообразно пользоваться для анализа частиц размолотого зерна методами оптической микроскопии (Gonzalez-Dugo, Hernandez, Solis, Zarco-Tejada, 2015). Такой анализ применительно к поверхностям частиц размала служит на мукомольном предприятии для оценки технологических достоинств производимых зернопродуктов. Поскольку размер таких частиц довольно мал для регистрации их невооруженным глазом, целесообразно использовать этот фрактографический анализ вкупе с методиками оптического микроскопирования (Медведев, 2013).

Использование экспертных систем позволит оптимизировать проведение фрактографического анализа размала зерна, а значит упростить определение технологических свойств пшеницы. В частности, это может быть достигнуто за счет разработки способов анализа изображений для распознавания и описания характеристик частиц размала зерна (компьютерное зрение). Компьютерное зрение является наиболее известной формой машинного восприятия. Наибольшее развитие получило с развитием машинного обучения.

Цель нашего исследования – разработка автоматизированной информационной системы оценки качества зерна пшеницы на основе анализа продуктов его размала алгоритмами компьютерного зрения.

Были поставлены следующие задачи: создать лабораторную установку для автоматизированного определения геометрических характеристик продуктов переработки зерна в процессе помола; добиться эффективной работы установки, нивелируя эффекты слипания частиц; разработать методику оценки важнейшего технологического показателя качества зерна – твердозерности пшеницы.

Материалы и методы

Для исследования использовали образцы зерна пшеницы 13-ти сортов – шести сортов твердой пшеницы: Оренбургская 10, Безенчукская 200, Оренбургская 21, Безенчукская янтарь, Харьковская 3, Степь 3 и семи сортов мягкой пшеницы: Саратовская 42, Учитель, Оренбургская 13, Юго-восточная 3, Варяг, Прохоровка, Л-503 из различных районов Оренбургской области, характеризующихся различными природно-климатическими и почвенными условиями произрастания. Исследованные сорта в настоящее время являются лидерами посевов в Оренбургской области, на их долю приходится до 80% площади сельскохозяйственных угодий, отведённых под посев пшеницы. Образцы зерна пшеницы подвергали односортному лабораторному помолу на лабораторной мельнице Nagema. Варьируя зазор между вальцами мельницы, выход муки устанавливали на уровне 70%.

В потоке производили микроснимки частиц измельченного зерна цифровой камерой Sony IMX219 Exmor RS 8MP (CMOS) с восьмимегапиксельным сенсором, поддерживающей видеоизображения формата 1080p, оснащенной для точного позиционирования относительно размоленного материала маломощными коллекторными сервоприводами в синхронном исполнении для большей точности. Обработку микроснимков осуществляли микрокомпьютером Raspberry Pi 3 Model B+ (4-ядерный 64-битный ARM Cortex-A53 с тактовой частотой процессора 1,2 ГГц) под управлением операционной системы Raspbian stretch на базе GNU/Linux 9.1.

Для анализа получаемых микроснимков использовали разработанное программное обеспечение на основе библиотеки Open Source Computer Vision Library (OpenCV) – наборы готовых алгоритмов компьютерного (технического) зрения. OpenCV была выбрана, поскольку для учебных целей она распространяется свободно под лицен-

зией GNU General Public License v3, не имеет привязки к платформам PC (может функционировать на Microsoft Windows, Android, MacOS, Linux и др.), разрабатывается для наиболее известных языков программирования, де-факто является стандартным программным продуктом для реализации технического зрения.

Для получения высокого напряжения использовали электронную схему генератора коротких импульсов на основе высокочастотных тиристоров ТЧ63 с частотой до 70 кГц. Меняя напряжение питания генератора, плавно меняли напряжение на выходе от 1 до 35 кВ. Один вывод высоковольтного источника питания заземлен, второй вывод подключен к датчику-регистратору частиц продуктов размола зерна.

В Канаде, США и Австралии предусмотрено деление сортов мягкой пшеницы на твердозерные и мягкозерные. Особенности этих двух групп сортов пшеницы обусловлены различиями структурно-механических свойств, характеризующихся одним или совокупностью нескольких показателей: расходом энергии на разрушение зерна, микротвердостью зерновок, дисперсностью продуктов измельчения (индексом размера частиц, удельной поверхностью) и прочими.

Твердозерность зерна определяли по показателю микротвердости – способности зерна сопротивляться деформации (вдавливанию). Микротвердость зерна оценивали на микротвердомере ПМТ-3. Методика его работы такова: квадратная пирамидка оставляет след на поверхности зерновки за счет вдавливания фиксированным усилием, размер которого измеряют и по специальным таблицам пересчитывают на число твёрдости. Меняя участок зерновки, на котором осуществляется вдавливание, изучали микроструктуру зерна и определяли микротвердость различных его участков. Интегральное значение микротвердости зерна пшеницы рассчитывали как среднеарифметическое для 50-ти кратных повторов измерений более чем 1000 зерен пшеницы (Maghirang, Lookhart, Bean, Pierce, Xie, Caley, Wilson, Seabourn, Ram, Park, Chung, Dowell, 2006). В наших исследованиях классификация зерна по твердозерности осуществлялась на основании различий в микротвердости зерновок (Таблица 1).

Микротвердость зерновок выражается в единицах, соответствующих усилию на вдавливание к площади получившегося следа ($\text{кг}/\text{мм}^2$). Поскольку величина микротвердости использовалась для

сравнительного анализа структурно-механических свойств зерна, пересчета твердозерности в более традиционные единицы измерения (%) не производили.

Таблица 1

Классы твердозерности зерна пшеницы

Класс твердозерности зерна	Диапазон микротвердости, кг/мм ²
Сверхтвердозерное	выше 20
Высокотвердозерное	от 15 до 20
Среднетвердозерное	от 10 до 15
Низкотвердозерное	ниже 10

Результаты и их обсуждение

Для описания характеристик частиц пользуются такими геометрическими показателями как длина, площадь, периметр, эквивалентный размер, коэффициенты вытянутости, сферичности и многие другие. Современные технологии позволяют для потоков продуктов размола зерна сформировать систему мониторинга этих величин.

На первом этапе проведения анализа частиц продуктов размола зерна пшеницы на изображениях выделяли границы этих частиц – производили обрисовку каждой частицы контуром. Разработано большое количество программных алгоритмов для этого. В некоторых из них определяют первую производную к исходному изображению (градиентное изображение), представляющий собой фильтр, применяемый к каждому пикселю изображения. Такой фильтр представляет собой квадратную матрицу коэффициентов – «маску» для значений яркости пикселя. Размер «маски» подбирается экспериментальным путем. Существуют методики обрисовки контурами частиц на изображениях, названные по имени их разработчиков – Кирша, Уоллеса, Лапласа, Собеля, Робертса и другие (Bradsky, 2008). Технически эти методики регистрации и анализа частиц на изображениях – компьютерного зрения получили реализацию в инструментарии для программистов Open eVision, libCVD, HALCON, AForge.NET Matrox и многих других. Их наиболее популярной альтернативой является OpenCV как программный продукт с открытым кодом (Parker, 2010).

Задача анализа изображений частиц упрощается тем, что исходными данными являются фигуры,

образованные проекциями частиц в одной плоскости (двухмерном пространстве). Однако, для достижения нужного эффекта необходимо решить ряд технических задач. В их число входит – обособленное расположение частиц размола зерна: перед регистрацией частицы необходимо изолировать друг от друга, они не должны агрегироваться (слипаться) между собой, искажая таким образом результаты наблюдений. Подобное «разбиение» частиц может быть достигнуто различными техническими решениями. Опытным путем установлено, что добиться такого эффекта можно, используя совместное воздействие электростатических полей и вибрации. Это позволяет не допустить эффекта слипания.

Эффекты электростатических полей высокой напряженности уже давно используются в пищевой промышленности. Так, в электрокопчении частички дыма заряжаются отрицательно, к положительным же электродам подсоединяются, к примеру, туши мяса. За счет явления притяжения заряженные частички прилипают к поверхности мясной туши и адсорбируются ею, в разы сокращая время копчения. В хлебопечении при тестоприготовлении необходимо производить большие затраты на механическую работу. Задачу можно облегчить, если заряженные частицы муки направлять потоком воздуха в емкость с мелкой противоположно заряженной аэрозолью дрожжевой суспензии. Частички, притягиваясь друг к другу, будут образовывать гомогенную массу, увеличивая эффективность процесса.

В наших исследованиях, для устранения слипания частиц, пробы частиц продуктов размола зерна помещали на прозрачную поверхность. Поверхность представляет собой прозрачную токопроводящую пластину. К пластине подключается один из электродов, несущих высокое напряжение. Второй электрод с противоположным зарядом закрепляется высоко над пластиной. Параллельно с этим пластина приводилась в ритмичное поступательное движение в горизонтальной плоскости вибрационным устройством. Частицы продуктов размола зерна также заряжаются по индукции. Между одноименно заряженными частицами возникает кулоновское (электростатическое) отталкивание. При определенном напряжении на пластине частицы приходили в движение – отсюда равномерность слоя частиц, покрывающего заряженную поверхность. Оптимальное напряжение подбирали опытным путем, оно зависит от диэлектрической

проницаемости воздуха и зерна, главным образом от их влажности.

В разработанной лабораторной установке электрические заряды производили генератором высокого напряжения. В качестве такого генератора использовали не широко используемые для таких целей генератор Маркса или умножитель напряжения Кокрофта-Уолтона, а т.н. трансформатор Тесла, предел напряжения которого достигает 50 кВ, что вполне достаточно для поставленных целей. Схема сконструированной установки показана на Рисунке 1. При электрическом напряжении более 10 кВ обнаруживается коронный разряд в виде голубоватого свечения вокруг деталей и проводов.

В корпусе установки 7 находится цифровая камера Sony IMX219 Exmor 2 с оптической системой 1, которая через заданный интервал времени получает изображения пробы продуктов размола зерна 6 на прозрачной пластине 4, которая приводится в движение вибрационным устройством 5 (вибромотором 3). Пластина представляет собой стеклянную мембрану с прозрачным токопроводящим слоем. К пластине через электрод от генератора подведено высокое напряжение. На удалении от нее расположена противоположно заряженная пластина 4 от того же генератора высокого напряжения для замыкания силовых линий электрических полей. Для измерительного модуля и других узлов механизма необходимую электростатическую защиту реализовали по типу клетки Фарадея. Корпус установки 7 представляет собой пустотелый металлизированный футляр для цифровой камеры и электронных комплектующих. Периодически через заданные интервалы времени небольшими порциями пробы продуктов размола зерна поступают на пластину 4. Получаемые камерой 2 их двумерные изображения обрабатываются с использованием компьютерного зрения для обнаружения частиц. Накопленная информация о размерах и формах частичек размола позволила вывести значимые закономерности с качеством исходного зерна (в частности, твердосерности).

Большое значение имеет регистрация и описание геометрических характеристик каждой отдельной частицы, поскольку эффект слипания частиц вносит большие искажения в их регистрацию методиками компьютерного зрения.

Представляет интерес выбор оптимальных технических параметров установки, влияющих на качество проводимых измерений геометри-

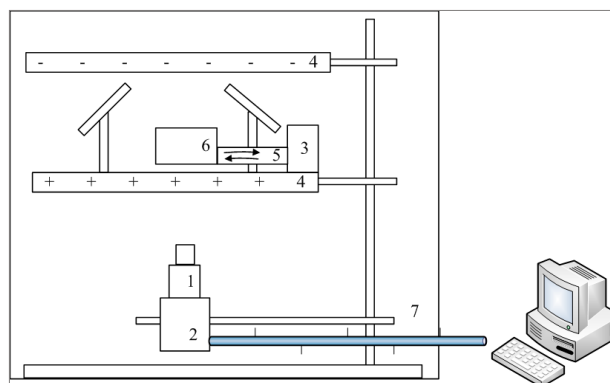


Рисунок 1. Схема установки для анализа продуктов размола зерна методом оптической микроскопии с использованием алгоритмов компьютерного зрения.

ческих параметров продуктов размола зерна. Опытным путем установлено, что из множества факторов наибольшее значение имеют напряжение между пластинами установки и частота вибраций пластины. Смена полярности электрического потенциала какого-либо изменения в эффективности процесса не вызвало.

Об эффективности проведения фрактографического анализа судили по количеству слипшихся частиц (в %) в пробе. В результате проведенных исследований вывели уравнение регрессии для количества «слипшихся» частиц размола зерна, % ($R^2 = 0.62$):

$$EST = -0.09 \cdot U - 0.11 \cdot T + 7.24, \quad (1)$$

где U – напряжение между верхней пластиной и пластиной с размолом зерна, кВ;
 T – частота вибрирования пластины с размолом зерна, Гц.

При достижении определенного напряжения на поверхности пластин, частицы размола под действием электрического поля устремляются вверх к противоположно заряженной пластине. В случае, если это явление носит массовый характер, наблюдается эффект «вулкана». При достаточно большой напряженности поля вокруг пластины возникает голубоватое свечение – коронный разряд. Окружающий воздух становится электропроводным, снимая заряд с наэлектризовавшегося размола зерна на пластине. Поскольку пластина, как всякий изолятор, обладает способностью накапливать и хранить некоторое количество заряда на своей поверхности (электретный эффект), необходимо позаботиться об ее планомерном очищении.

Все изучаемые образцы зерна пшеницы подвергались односортному помолу на лабораторной мельнице Nagema, затем анализировались с помощью описанной лабораторной установки. Производимый таким образом анализ частиц размолотого зерна можно назвать фрактографическим анализом, поскольку, в отличие от гранулометрического анализа, ведется учет не только размеров, но и форм частиц. Термин «фрактография» включает методы описания строения поверхностей сколов, сломов вещества и т.д. В качестве множества таких поверхностей можно рассматривать и размолотое зерно пшеницы. В теории фрактографического анализа проекция частицы часто упрощенно представляется в виде окружности, эллипса, квадрата, однако современные интеллектуальные системы дают возможность описывать форму более совершенными способами.

Разработанные программные средства подвергают компьютерной обработке изображения размолотого зерна. В проведенных исследованиях использовали техническое зрение для обнаружения частиц продуктов размолотого зерна, получения контрастных картинок с фигурами этих частиц и последующих определений их геометрических характеристик.

Двухмерная проекция частицы представляет собой темное пятно на общем светлом фоне. В процессе анализа программно выделяли каждую такую проекцию, обрисовывая ее контуром. На выходе получили массив геометрических параметров контуров частиц – фигур. Основываясь

на проведенных измерениях, установили самые ценные для прогнозирования качества зерна геометрические показатели фигур. Из центров масс фигур программно выделяли необходимое число отрезков к периметру фигуры, вычисляли средние значения отрезков (X , в микрометрах) и значение коэффициента вариации этих отрезков (K).

В результате анализа изучаемых шести сортов твердой и семи сортов мягкой пшеницы выявлены взаимосвязи основных характеристик фрактографического анализа с физико-химическими свойствами зерна пшеницы (Таблица 2). Так, для оценки твердозерности зерна пшеницы с помощью фрактографического анализа (лабораторный помол зерна) на основе многочисленных экспериментальных данных выведена следующая зависимость: твердозерность, оцененная в единицах микротвердости зерна, кг/мм^2 ($R^2 = 0.89$):

$$HD = 0.15 \cdot K + 0.28 \cdot X + 0.90, \quad (2)$$

где X – геометрическая характеристика размера частиц, мкм;

K – геометрическая характеристика формы частиц (по описанному выше алгоритму).

Проводили сравнение результатов фрактографического анализа с традиционными общепринятыми методиками. Оценка показателя твердозерности по микротвердости представляет собой один из немногих прямых

Таблица 2

Фрагмент экспериментальных данных, характеризующих связь геометрических характеристик частиц продуктов размолотого зерна и его микротвердости

Номер пробы	Геометрическая характеристика размера частиц X , мкм	Геометрическая характеристика формы частиц K	Микротвердость зерна, кг/мм^2
1	31,2 ± 0,1	22,4 ± 0,1	12,99 ± 0,20
2	68,2 ± 0,1	28,7 ± 0,1	24,30 ± 0,20
3	42,7 ± 0,1	25,3 ± 0,1	16,65 ± 0,20
4	38,7 ± 0,1	22,7 ± 0,1	15,14 ± 0,20
5	35,1 ± 0,1	24,6 ± 0,1	14,41 ± 0,20
6	45,9 ± 0,1	28,7 ± 0,1	18,05 ± 0,20
7	51,2 ± 0,1	29,2 ± 0,1	19,61 ± 0,20
8	55,9 ± 0,1	31,2 ± 0,1	21,23 ± 0,20
9	58,4 ± 0,1	32,7 ± 0,1	22,15 ± 0,20
10	61,7 ± 0,1	30,5 ± 0,1	22,75 ± 0,20
11	67,5 ± 0,1	32,5 ± 0,1	24,67 ± 0,20
...
39	65,3 ± 0,1	24,2 ± 0,1	22,81 ± 0,20

методов определения твердозерности зерна и потому представляет интерес для использования в качестве референтной (эталонной) методики. Максимальная относительная погрешность предлагаемого фрактографического метода определения твердозерности составила не более 3,0%.

Заключение

Разработана автоматизированная система оценки качества продуктов переработки пшеницы и контроля процесса помола зерна на основе расширенного гранулометрического (фрактографического) анализа продуктов размола. В основе анализа – обработка изображений (микротографий, произведенных цифровой камерой) проб размола зерна методиками компьютерного зрения (на базе программной библиотеки OpenCV). Благодаря разработанному алгоритму анализа, система оперативно производит оценку технологических свойств зерна (показателя твердозерности).

Создана лабораторная установка, реализующая в миниатюре предлагаемую систему оценки качества зерна пшеницы по продуктам его размола. Добиться снижения эффекта слипания частиц продуктов размола зерна до приемлемой величины помогло совместное влияние электростатических полей и вибрации, их оптимальные технические параметры подобраны опытным путем. Для максимальной эффективности работы системы необходимо совместное действие электростатических полей с напряжением около 24 кВ и вибрации около 45 Гц.

Обзор источников литературы выявил высокую значимость показателя твердозерности зерна для оценки его технологических качеств и целевого назначения. Производимая оценка твердозерности характеризуется высокой схожимостью с результатами общепринятых способов (референтной методикой по показателю микротвердости на микротвердомере ПМТ-3). Опытным путем выведено регрессионное уравнение, позволяющее оценивать твердозерность зерна с погрешностью не более 3,0%. Благодаря экспрессности разработанного метода оценки технологических свойств зерна пшеницы возможны контроль и коррекция технологического процесса на мукомольных предприятиях.

Литература

- Беркутова Н.С. Методы оценки и формирования качества зерна. М.: Росагропромиздат, 1991. 206 с.
- Беркутова Н.С., Швецова И.А. Микроструктура пшеницы. М.: Колос, 1977. 122 с.
- Казеннова Н.К., Шнейдер Д.В., Цыганова Т.Б. Формирование качества макаронных изделий. М.: ДеЛи принт, 2009. 100 с.
- Калачев М.В. Малые предприятия для производства хлебобулочных и макаронных изделий. М.: ДеЛи принт, 2008. 288 с.
- Суворов О.А., Лабутина Н.В., Карягина С.В., Погорелов А.Г. Аналитические измерения в хлебопекарном производстве // Пищевая промышленность. 2008. № 3. С. 24-25.
- Лабутина Н.В. Технология производства хлебобулочных изделий из замороженных полуфабрикатов. Смоленск: Универсум, 2004. 236 с.
- Медведев П.В., Федотов В.А. Информационно-измерительные системы управления потребительскими свойствами зерномучных товаров // Баранова Т.И. Современные тенденции в экономике и управлении: новый взгляд: монография. Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2013. С. 35-51.
- Мелешкина Е.П., Туляков Д.Г., Витол И.С. Реологические свойства разных видов муки и композиционных смесей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 4. С. 174-179.
- Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 287 с.
- Buyukozturk O., Hearing B. Crack propagation in concrete composites influenced by interface fracture parameters // International Journal of Solids and Structures. 1998. No. 35. P. 4055-4066.
- Chung O.K., Ohm J.B., Lookhart G.L., Bruns R.F. Quality characteristics of hard winter and spring wheats grown under an overwintering condition // Journal of Cereal Science. 2003. No. 37. P. 91-99.
- Karim A.A., Norziah M.H., Seow C.C. Methods for the study of starch retrogradation // Food Chemistry. 2000. No. 71. P. 9-36.
- Maghirang E.B., Lookhart G.L., Bean S.R., Pierce R.O., Xie F., Caley M.S., Wilson J.D., Seabourn B.W., Ram M.S., Park S.H., Chung O.K., Dowell F.E. Comparison of quality characteristics and breadmaking functionality of hard red winter and hard red spring wheat // Cereal Chemistry. 2006. No. 83. P. 520-528.

- Parker J.R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. Indiana: Wiley Publishing Inc., 2010. 504 p.
- Pomeranz Y. Composition and functionality of wheat flour components // *Wheat chemistry and technology*. 1988. Vol. 2. P. 219-370.
- Rundgren K., Lyckfeldt O., Sjöstedt M. Improving Powders with Freeze Granulation // *Ceramic Industry*. 2003. No. 1. P. 40-44.
- Souza E.J., Martin J.M., Guttieri M.J., O'Brien K., Habernicht D.K., Lanning S.P., Carlson G.R., Talbert L.E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality // *Crop Science*. 2004. No. 44. P. 425-432.
- Zhang H.T., Tian Y., Sun Z.Y. Research on the classification of wheat grain hardness based of the near infrared hyperspectral imaging analysis // *Journal of Henan agricultural sciences*. 2015. No. 44. P. 181-184.
- Mo X.S., Huang W., Chen J.W. Test on the new national standard of wheat hardness index // *Journal of flour*. 2008. No. 6. P. 22-23.
- Caporaso N., Whitworth M., Fisk I. Application of calibrations to hyperspectral images of food grains: example of wheat // *Falling Number Journal of Spectral Imaging*. 2016. No. 1. P. 46-52.
- Varzakas T. Quality and safety aspects of cereals (wheat) and their products // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2016. Vol. 56. No. 15. P. 2495-2510. doi:10.1080/10408398.2013.866070
- Katyal M., Singh N., Chopra N., Kaur A. Hard, medium-hard and extraordinarily soft wheat varieties: Comparison and relationship between various starch properties // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. No. 123. P. 1143-1149.
- Huang M., Wang Q.G., Zhu Q.B., Qin J.W., Huang G. Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies // *Seed Science and Technology*. 2015. No. 43(3). P. 337-366. doi: 10.15258/sst.2015.43.3.16
- Tanabata T., Shibaya T., Hori K., Ebana K., Yano M. Smart Grain: high-throughput phenotyping software for measuring seed shape through image analysis // *Journal of Plant Physiology*. 2012. No. 160(4). P. 1871-1880. doi:10.1104/pp.112.205120
- Gonzalez-Dugo V., Hernandez P., Solis I., Zarco-Tejada P.J. Using high-resolution hyperspectral and thermal airborne imagery to assess physiological condition in the context of wheat phenotyping // *Remote Sensing*. 2015. No. 7(10). P. 13586-13605. doi:10.3390/rs71013586
- Nuttall J.G., O'Leary G.J., Panozzo J.F., Walker C.K., Barlow K.M., Fitzgerald G.J. Models of grain quality in wheat // *Field Crop Research*. 2017. No. 202. P. 136-145. doi:10.1016/j.fcr.2015.12.011

Information Systems for Evaluation of Wheat Technological Advantages

Pavel V. Medvedev

*Orenburg State University
13 Pobedy Avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation
E-mail: pvmedvedev@mail.ru*

Vitaly A. Fedotov

*Orenburg State University
13 Pobedy Avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation
E-mail: vital_asm@mail.ru*

Sergey Yu. Solovykh

*Orenburg State University
13 Pobedy Avenue, Orenburg, 460018, Russian Federation
E-mail: sergsolo@mail.ru*

In the practice of the food industry, high-precision and express methods for determining the technological qualities of wheat and predicting the consumer properties of its processed products are in demand. For these purposes it is promising to use a complex indicator of hardness, but today its definition is associated with low accuracy, high labor costs, the use of expensive tools. It is necessary to develop automated systems of the analysis of milled grain in the grinding lines in the milling industry. Such systems can be used to determine the purpose of the flour produced. The article describes the automated system for assessing the technological properties of grain processing products in the grinding process. The system is based on the methods of forming data of the shape and size of particles in the grain grinding streams. To do it the pictures of grinding grain particles taken by the digital camera Sony IMX219 were processed by Raspberry Pi 3 microcomputer with the software that was developed on the basis of library of computer vision algorithms OpenCV. To implement the operation of such a system in the grinding production lines, a laboratory unit was constructed. Since successful analysis of the particles by computer vision needs eliminating the effect of particle adhesion, the joint effect of electrostatic fields and vibration was used for this purpose. The optimal technical parameters were selected empirically - the electrical voltage of about 24 kV and the vibration frequency of the analyzed samples of flour grinding of about 45 Hz. To obtain high voltages the generator of short pulses based on high-frequency thyristors ТЧ63 was used. Changing the voltage supply of the generator the output voltage can smoothly be changed from 1 to 35 kV. One pin of the high-voltage power supply is grounded, the second pin is connected to the sensor-registrar of grinding particles. The algorithm of estimation of wheat hardness based on the data about shape and size of the particles in the flow of grinding grain is developed - the corresponding regression equation is formed. To assess the accuracy of the algorithm, the results of the hardness evaluation of grain samples were compared with the reference method – in terms of micro hardness – of the ability of grain to resist deformation (indentation). Micro hardness of grain was evaluated with the hardness test machine PMT-3 with a square pyramid. The established empirical dependences make it possible to estimate the hardness of grain with an accuracy of at least 3%. Due to this express assessment of the technological properties of grain processing products, it is possible to control the grinding process and adjust it to improve efficiency.

Keywords: technological properties; wheat grain; products of grain processing; particle size analysis; computer vision; grain hardness; information system

Reference

- Berkutova N.S. Metody otsenki i formirovaniya kachestva zerna [Methods of evaluation and formation of grain quality]. Moscow: Rosagropromizdat, 1991. 206 p.
- Berkutova N.S., Shvetsova I.A. Mikrostruktura pshenitsy [The microstructure of wheat]. Moscow: Kolos, 1977. 122 p.
- Kazennova N.K., Shneyder D.V., Tsyganova T.B. Formirovaniye kachestva makaronnykh izdeliy [Formation of pasta quality]. Moscow: DeLi print, 2009. 100 p.

- Kalachev M.V. Malyye predpriyatiya dlya proizvodstva khlebobulochnykh i makaronnykh izdeliy [Small enterprises for the production of bread and pasta]. Moscow: DeLi print, 2008. 288 p.
- Suvorov O.A., Labutina N.V., Karyagina S.V., Pogorelov A.G. Analiticheskiye izmereniya v khlebopekarnom proizvodstve [Analytical measurements in bakery production]. *Pishchevaya promyshlennost [Food industry]*, 2008, no. 3, pp. 24-25.
- Labutina N.V. Tekhnologiya proizvodstva khlebobulochnykh izdeliy iz zamorozhennykh polufabrikatov [Technology of production of bakery products from frozen semi-finished products]. Smolensk: Universum, 2004. 236 p.
- Medvedev P.V., Fedotov V.A. Informatisionno-izmeritelnyye sistemy upravleniya potrebitelskimi svoystvami zernomuchnykh tovarov [Information and measuring systems of consumer properties management of grain products]. In T.I. Baranova. *Sovremennyye tendentsii v ekonomike i upravlenii: novyy vzglyad: monografiya [Modern trends in Economics and Management: a new view: a monograph]*. Orenburg: «Agentstvo «Pressa», 2013, pp. 35-51.
- Meleshkina E.P., Tulyakov D.G., Vitol I.S. Reologicheskiye svoystva raznykh vidov muki i kompozitsionnykh smesey [Rheological properties of different types of flour and composite mixtures]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of Altai state agrarian university]*, 2017, no. 4, pp. 174-179.
- Kallan R. Osnovnyye kontseptsii neyronnykh setey [Basic concepts of neural networks]. Moscow: Izdatelskiy dom «Vilyams», 2001. 287 p.
- Buyukozturk O., Hearing B. Crack propagation in concrete composites influenced by interface fracture parameters. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, no. 35, pp. 4055-4066.
- Chung O.K., Ohm J.B., Lookhart G.L., Bruns R.F. Quality characteristics of hard winter and spring wheats grown under an overwintering condition. *Journal of Cereal Science*, 2003, no. 37, pp. 91-99.
- Karim A.A., Norziah M.H., Seow C.C. Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*, 2000, no. 71, pp. 9-36.
- Maghirang E.B., Lookhart G.L., Bean S.R., Pierce R.O., Xie F., Caley M.S., Wilson J.D., Seabourn B.W., Ram M.S., Park S.H., Chung O.K., Dowell F.E. Comparison of quality characteristics and breadmaking functionality of hard red winter and hard red spring wheat. *Cereal Chemistry*, 2006, no. 83, pp. 520-528.
- Parker J.R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. Indiana: Wiley Publishing Inc., 2010. 504 p.
- Pomeranz Y. Composition and functionality of wheat flour components. *Wheat chemistry and technology*, vol. 2, 1988, pp. 219-370.
- Rundgren K., Lyckfeldt O., Sjöstedt M. Improving Powders with Freeze Granulation. *Ceramic Industry*, 2003, no. 1, pp. 40-44.
- Souza E.J., Martin J.M., Guttieri M.J., O'Brien K., Habernicht D.K., Lanning S.P., Carlson G.R., Talbert L.E. Influence of genotype, environment, and nitrogen management on spring wheat quality. *Crop Science*, 2004, no. 44, pp. 425-432.
- Zhang H.T., Tian Y., Sun Z.Y. Research on the classification of wheat grain hardness based of the near infrared hyperspectral imaging analysis. *Journal of Henan agricultural sciences*, 2015, no. 44, pp. 181-184.
- Mo X.S., Huang W., Chen J.W. Test on the new national standard of wheat hardness index. *Journal of flour*, 2008, no. 6, pp. 22-23.
- Caporaso N., Whitworth M., Fisk I. Application of calibrations to hyperspectral images of food grains: example of wheat. *Falling Number Journal of Spectral Imaging*, 2016, no. 1, pp. 46-52.
- Varzakas T. Quality and safety aspects of cereals (wheat) and their products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, vol. 56, no. 15, pp. 2495-2510. doi:10.1080/10408398.2013.866070
- Katyal M., Singh N., Chopra N., Kaur A. Hard, medium-hard and extraordinarily soft wheat varieties: Comparison and relationship between various starch properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, no. 123, pp. 1143-1149.
- Huang M., Wang Q.G., Zhu Q.B., Qin J.W., Huang G. Review of seed quality and safety tests using optical sensing technologies. *Seed Science and Technology*, 2015, no. 43(3), pp. 337-366. doi: 10.15258/sst.2015.43.3.16
- Tanabata T., Shibaya T., Hori K., Ebana K., Yano M. Smart Grain: high-throughput phenotyping software for measuring seed shape through image analysis. *Journal of Plant Physiology*, 2012, no. 160(4), pp. 1871-1880. doi:10.1104/pp.112.205120
- Gonzalez-Dugo V., Hernandez P., Solis I., Zarco-Tejada P.J. Using high-resolution hyperspectral and thermal airborne imagery to assess physiological condition in the context of wheat phenotyping. *Remote Sensing*, 2015, no. 7(10), pp. 13586-13605. doi:10.3390/rs71013586
- Nuttall J.G., O'Leary G.J., Panozzo J.F., Walker C.K., Barlow K.M., Fitzgerald G.J. Models of grain quality in wheat. *Field Crop Research*, 2017, no. 202, pp. 136-145. doi:10.1016/j.fcr.2015.12.011