

DOI: 10.25637/TVAN2018.04.14.

УДК 631.53.0

Потрахов Н. Н.<sup>1</sup>, Белецкий С. Л.<sup>2</sup>, Архипов М. В.<sup>3,4</sup>

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗЕРНА НА ОСНОВЕ ПЕРЕДВИЖНОЙ РЕНТГЕНОДИАГНОСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРДУ-02

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)»;

<sup>2</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва»;

<sup>3</sup>ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»;

<sup>4</sup>ФГБНУ «Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения»

**Реферат.** Цель исследований – создание технологии оперативной оценки качества товарных партий зерна, а также высокоинформативной сепарации контрольных проб семян. В результате десятилетних исследований, проведенных авторскими коллективами специалистов СПбГЭТУ «ЛЭТИ», НИИ проблем хранения Росрезерва (г. Москва) и Агрофизического научно-исследовательского института (г. Санкт-Петербург) разработана методика получения резких и контрастных, увеличенных от нескольких раз до нескольких сот раз рентгеновских изображений отдельной зерновки с помощью современного аппаратно-программного комплекса. Проведена оценка качества партий зерна пшеницы и ржи с помощью разработанного комплекса. Выделены наиболее значимые дефекты зерна, влияющие на хозяйственную пригодность всей партии: сильная трещиноватость эндосперма, а также дефектность и механические травмы эндосперма, разные стадии внутреннего прорастания, энзимомикозное истощение, поврежденность клопом вредная черепашка, заселенность насекомыми, невыполненность зерновки. Представлены результаты апробации технологии оперативной оценки качества товарных партий зерна на одном из государственных элеваторов г. Санкт-Петербурга. Результаты апробации показали, что по совокупности характеристик и решаемых задач комплекс не имеет зарубежных аналогов и может быть рекомендован к внедрению на зерноперерабатывающих предприятиях и комбинатах Росрезерва для оперативного высокоинформативного контроля качества производственных партий зерна с целью отбора лучших партий на длительное ответственное хранение.

**Ключевые слова:** микрофокусная рентгенография, контроль качества зерна, скрытые дефекты, аппаратно-программный комплекс для рентгеновского контроля.

### Введение

Как показывает современный отечественный и зарубежный опыт, скрытые дефекты зерна не идентифицируются классическими, в основном визуальными методами оценки. Для их выявления целесообразно применять специализированную интроскопическую аппаратуру, в том числе рентгенографические установки с последующим компьютерным анализом получаемых изображений отдельных зерновок.

Преимущества этого метода:

– объективность контроля, поскольку фальсифицировать рентгенограмму весьма сложно, особенно при условии использования технологии электронной цифровой подписи;

- полученные оцифрованные рентгенограммы могут храниться длительное время, что крайне необходимо при решении арбитражных вопросов;
- возможность организации текущего контроля за качеством зерна при кратковременном или длительном хранении;
- возможность проведения сепарации контрольных проб зерна по рентгенографическим признакам скрытой дефектности.

Коллектив научно-исследовательского института проблем хранения Росрезерва (НИИ ПХ) совместно со специалистами Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) в течение ряда лет проводит исследования в области рентгеновского анализа партий зерна различных сельскохозяйственных культур.

**Цель исследований** – создание технологии оперативной оценки качества товарных партий зерна, а также высокоинформативной сепарации контрольных проб семян.

Эти дефекты особенно важно учитывать при закладке зерна, полученного в различных зерносеющих районах Российской Федерации, на длительное хранение, поскольку их наличие может снизить качество зерна и в значительной степени увеличить его потери [1, 2]. Помимо снижения хозяйственной пригодности, скрытые дефекты зерна могут оказывать негативное влияние и на фитосанитарную обстановку в этом стратегически важном секторе сельского хозяйства.

В зарубежной литературе сведения о целенаправленных исследованиях структурной целостности агрономических объектов, влияющих на их хозяйственную пригодность и обусловленных конкретными условиями выращивания растений, режимами уборки и послеуборочной обработки зерна практически отсутствуют.

Действующие в настоящее время стандарты: международный ИСО 1162-75 [3] и отечественные ГОСТ 28420-89 [4], ГОСТ 28666.4-90 [5] регламентируют рентгеновский контроль скрытых дефектов зерна. Однако методика контроля по этим нормативным документам основана на так называемой пленочной рентгенографии с последующим визуальным анализом получаемого изображения. Для ее реализации в начале 80-х гг. прошлого века в Советском Союзе сотрудниками ЛОЭП «Светлана» совместно со специалистами Агрофизического научно-исследовательского института разработан специализированный рентгеновский аппарат «Электроника-25». В состав аппарата входили: источник рентгеновского излучения, включая пульт управления и моноблок с микрофокусной рентгеновской трубкой, а также малогабаритная камера для рентгенографических работ (рисунок 1).

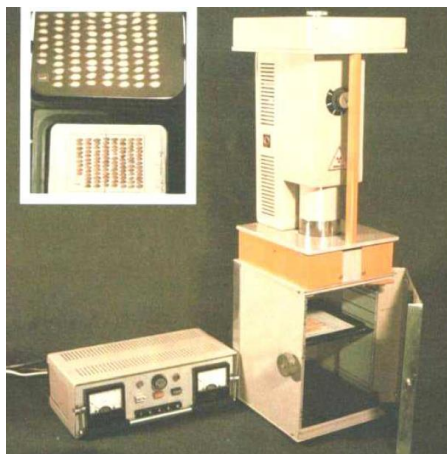


Рисунок 1 – Рентгеновский аппарат «Электроника 25»

При проведении исследований регистрацию рентгеновских изображений семян и зерна осуществляли на рентгеновскую пленку высокого разрешения. Малые размеры фокусного пятна рентгеновской трубки позволяли получать изображение высокого качества. Методика диагностирования зерновых культур предполагала получение и анализ увеличенного изображения нескольких десятков зерновок. Коэффициент увеличения изображения составлял два-три раза. Однако особенности пленочной технологии визуализации не позволяли воспользоваться всем объемом диагностической информации, заключенной в рентгеновском изображении. И, самое главное, обеспечить автоматизированный экспресс-контроль скрытых дефектов зерна.

### Материалы и методы исследований

Для решения задачи оперативного контроля внутреннего состояния каждой зерновки во всей товарной партии с целью дальнейшего отделения дефектных от годных по основным значимым признакам, наиболее пригодна методика цифровой микрофокусной рентгенографии [6, 7]. Методика позволяет:

- во-первых, благодаря возможности получения резких и контрастных, увеличенных в несколько раз изображений отдельных зерновок, обнаружить наиболее значимые признаки дефектов внутреннего состояния, имеющих хозяйственное значение;
- во-вторых, благодаря современным цифровым детекторам рентгеновского излучения, зарегистрировать изображение каждой зерновки во всей товарной партии;
- в-третьих, благодаря специализированному программному обеспечению, автоматизировать процесс выявления дефектных зерновок и отделения их от годных.

### Результаты и их обсуждение

Впервые в РФ 26-27 декабря 2017 г. в производственных условиях элеватора ОАО «Резервхлеб» (г. Санкт-Петербург) успешно прошли испытания аппаратно-программного комплекса, предназначенного для рентгенодиагностики зерна и семян различных сельскохозяйственных культур. Цель испытаний – оценка степени готовности технических средств рентгеновского контроля товарного зерна пшеницы и ржи, а также соответствующего программного обеспечения к внедрению на ФГКУ комбинатах Росрезерва. Испытания проводили по разработанной в ФГБУ «НИИ ПХ Росрезерва» методике автоматизированной оценки внутренних дефектов зерна на передвижной рентгенодиагностической установке ПРДУ-02 (ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», Технопарк СПб.ГЭТУ) [8]. Методика аттестована, свидетельство об аттестации №241.0283/RA.RU.311866/2017.

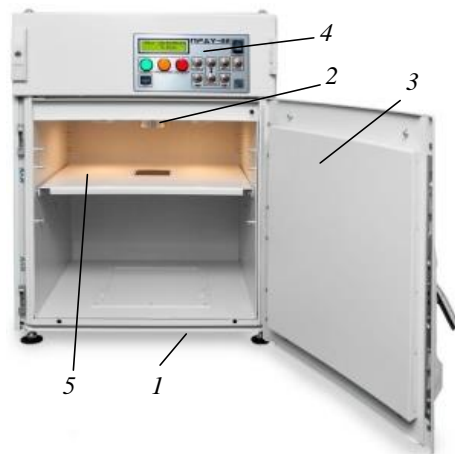


Рисунок 2 – Внешний вид установки ПРДУ-02

Основу установки ПРДУ-02 составляет рентгенозащитная камера (1). Внутри рентгенозащитной камеры располагается моноблок (2) источника рентгеновского излучения. Дверь (3) рентгенозащитной камеры снабжена блокировкой, отключающей высокое напряжение на рентгеновской трубке источника излучения при открывании. Управление источником излучения осуществляется с помощью микропроцессорного устройства. Органы управления (кнопки и ЖК-дисплей) вынесены на переднюю панель (4) камеры. Выбор режимов съемки: напряжения, тока и времени экспозиции производится нажатием на соответствующую кнопку. Информация об установленных режимах, готовности к работе, начале и окончании съемки, а также о возможных неисправностях источника излучения выводится на ЖК-дисплей. Предусмотрена возможность управления источником излучения от внешнего компьютера (ПК). Внутри рентгенозащитной камеры также располагается столик (5) для размещения объектов съемки и цифрового приемника рентгеновского изображения.

Установка ПРДУ-02 позволяет одновременно контролировать от нескольких единиц до нескольких сотен зерновок в пробе с максимальным увеличением изображения до десяти крат. С этой целью в комплект поставки установки входит компьютерная программа «Агротест-Зерно», которая автоматически обрабатывает рентгеновские изображения отдельных зерновок в контролируемой пробе и формирует протокол с указанием геометрических характеристик зерновки (длина, ширина, площадь), фракционный состав и количество зерновок, имеющих скрытые дефекты. При этом показатели трещиноватости, энзимомикозного истощения, щуплости и т.д. ранжируются по степени их проявления [9, 10].

Анализ рынка специализированного рентгеновского оборудования показал, что зарубежным аналогом установки ПРДУ-02 является установка Faxitron MX-20 (США) [11]. Однако, по информации ISTA (International Seed Testing Association – Международная ассоциация по контролю за качеством семян), эта установка не имеет программного обеспечения для автоматизированного определения типа дефекта и его количественного содержания в пробе семян (рисунок 3). При этом стоимость установки Faxitron MX-20 в 1,5 раза выше стоимости установки ПРДУ-02.



**Рисунок 3 – Внешний вид установки Faxitron MX-20**

Следует также отметить, что разработчики отечественной установки ПРДУ-02 предусмотрели широкие возможности ее модернизации с целью дальнейшего улучшения потребительских качеств:

- использование цифровых приемников изображения разных типов;

– использование двух и более источников рентгеновского излучения для диагностики, а также облучения зерна с целью радиационной дезинсекции или обеззараживания;

– уменьшение габаритов и веса.

Как было показано ранее [1, 2, 11], метод цифровой микрофокусной рентгенографии весьма эффективен при оценке оптимальности сроков уборки зерна в различных экологических условиях, а также режимов его подработки. Это позволяет разработать рекомендации по минимизации показателя скрытого прорастания в партиях зерна разного целевого назначения, а также по снижению различного типа скрытых дефектов зерновки, имеющих хозяйственное значение.

Проведенные исследования показали, что при оценке качества партий зерна с учетом скрытых структурных нарушений зерновки, необходимо вносить в соответствующие технические регламенты и стандарты дополнительные изменения в виде признаков, характеризующих целостность внутренних структур зерновки, а именно:

– сильную трещиноватость эндосперма (зародыша), свидетельствующую о механическом травмировании зерна при уборке или сушке; данный признак косвенно отражает повышенную белковость зерна;

– внутреннее прорастание, особенно ранние его стадии, которые другими методами практически не выявляются; данный признак отражает, в известной мере, частичное истощение зародыша и эндосперма;

– энзимомикозное истощение, которое отражает гидролитическое воздействие ферментов грибов и собственных ферментов зерновки на ее поверхностные слои;

– поврежденность клопом вредная черепашка; данный признак отражает гидролитическое действие её ферментов на внутренние и поверхностные слои зерновки;

– поврежденность (заселенность) насекомыми-вредителями запаса; данный признак отражает потерю вещества эндосперма, изменение его качества и характеризует дополнительное наличие токсинов – продуктов жизнедеятельности насекомых;

– дефектность зародыша, проявляющаяся в различной степени затененности его рентгеновских проекций; данный признак отражает поврежденность зародыша грибами и возможность его ускоренного старения, обусловленного, в частности неоптимальными режимами сушки зерновой массы;

– механические травмы зародыша; данный признак отражает воздействие рабочих органов уборочных машин на зародыш зерновки (выбитость зародыша и его механическое разделение);

– невыполненность зерновки; данный признак отражает нарушение технологий выращивания зерна, а также режимов его хранения (в особенности, длительного).

Разработанные методы визуализации и оценки внутренних структурных нарушений зерновки свидетельствуют о перспективности метода цифровой микрофокусной рентгенографии для решения не только научных, но и хозяйственных вопросов при экспресс-оценке эффективности различных технологий уборки, послеуборочной подработки и хранения зерна.

Такой подход позволяет:

– определять принадлежности зерна к различным по качеству классам или к неклассным – некондиционным партиям с учетом скрытых дефектов;

– принимать оптимальные решения по смешиванию партий зерна одинаковых по классности или не снижающих существенно классность вновь формируемой партии;

– определять режимы хранения партий разной классности, а также первоочередность использования тех или иных партий для нештатной замены.

#### Выводы

В результате многолетних исследований разработана отечественная технология оперативной оценки качества товарных партий зерна и контрольных проб семян. Разработан отечественный аппаратно-программный комплекс для автоматизированного анализа увеличенных рентгеновских изображений как отдельной зерновки, так и пробы семян.

С помощью комплекса выделены основные внутренние (скрытые) дефекты зерна, влияющие на его хозяйственную пригодность. Результаты апробации технологии показали, что:

– по совокупности характеристик и решаемых задач комплекс не имеет зарубежных аналогов;

– комплекс может быть рекомендован к внедрению на зерноперерабатывающих предприятиях и комбинатах Росрезерва для оперативного высокоинформативного контроля качества производственных партий зерна и отбора лучших партий на длительное ответственное хранение.

#### Литература

1. Рогова А. Н., Гурьева К. Б., Иванова Е. В., Архипов М. В. Оценка скрытых дефектов зерна пшеницы при длительном хранении рентгенографическим методом // Сборник докладов 1 межведомственной научно-практической конференции «Товароведение, экспертиза и технология продовольственных товаров». М.: Издательский комплекс МГУПП, 2008. 306 с.

2. Архипов М. В., Прияткин Н. С., Потрахов Н. Н., Белецкий С. Л. Интроскопические методы оценки качества семян и зерна в селекции, семеноводстве и зернопроизводстве // Сборник научных статей международной конференции «Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. Вып. IV». М., 2015. С. 24–29.

3. ГОСТ 28420-89. Карантин растений. Методы энтомологической экспертизы продуктов запаса. М.: изд-во стандартов, 2016. 10 с.

4. ГОСТ 28666.4-90 Зерновые и бобовые. Определение скрытой зараженности насекомыми. Часть 4. Ускоренные методы. М.: изд-во стандартов, 1991. 26 с.

5. Пат. на изобрет. 2352922. Российская Федерация, МПК G01N 23/083, A01C 1/02. Способ получения рентгенографического изображения семян растений / Архипов М. В., Грязнов А. Ю., Потрахов Н. Н.; заявитель и патентообладатель СПб.ГЭТУ «ЛЭТИ». № 2007126109; заявл. 09.07.09; опубл. 20.04.09.

6. Архипов М. В., Потрахов Н. Н. Микрофокусная рентгенография растений. СПб.: «Технолит», 2008. 194 с.

7. Рентгенография семян овощных культур // Под. ред. Мусаева Ф. Б. СПб.: СПб.ГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 207 с.

8. Желудков А. Г., Потрахов Н. Н., Белецкий С. Л. Комплексное решение задач автоматизации рентгенографического метода анализа качества семян и зерна злаковых культур // Хлебопродукты. 2016. № 05. С. 58–61.

9. Свид. об. офиц. рег. прог. для ЭВМ. 2010610289 РФ. Программа автоматического распознавания образов семян зерновых культур и анализа качества зерна по рентгенографии, полученным на рентгенодиагностической установке ПРДУ-02 / Потрахов Е.Н., Желудков А.Г.; заявл. 2.09.09; опубл. 10. 11.09.

10. Архипов М. В., Алексеева Д. И., Батыгин Н. Ф., Великанов Л. П., Гусакова Л. П., Дерунов И. В., Желудков А. Г., Николенко В. Ф., Никитина Л. И., Савин В. Н., Пономаренко Е. Н., Якушев В. П. Методика рентгенографии в земледелии и растениеводстве. М.: РАСХН, 2001. 93 с.

## References

1. Rogova A. N., Guryeva K. B., Ivanova E. V., Arkhipov M. V. Evaluation of hidden defects in wheat grain during long-term storage by X-ray diffraction // Collection of reports of 1 interdepartmental scientific-practical conference "Commodity research, examination and technology of food products". Moscow: Publishing complex of MGUPP, 2008. 306 p.
2. Arkhipov M. V., Priyatkin N. S., Potrakhov N. N., Beletsky S. L. Introsopic methods of evaluation of quality of seeds and grain in selection, seed and grain production // Collection of scientific articles of the international conference "Innovative technologies of production and storage of material values for state needs. Iss. IV". Moscow, 2015. P. 24–29.
3. GOST 28420-89. Plant quarantine. Methods of entomology estimation of storage products. Moscow: Publishing house of standards, 2016. 10 p.
4. GOST 28420-89. Cereals and pulses. Determination of hidden insect infestation. Part 4. Rapid methods. Moscow: publishing house of standards, 2016. 10 p.
5. Patent 2352922 RF, IPC G01N 23/083, A01C 1/02. Method for obtaining X-ray images of plant seeds / Arkhipov M. V., Gryaznov A. Yu., Potrakhov N. N.; applicant and patentee Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU "LETI". No. 2007126109; appl. 09.07.09; publ. 20.04.09.
6. Arkhipov M. V., Potrakhov N. N. Microfocus radiography of plants. Saint-Petersburg: Tekhnolit, 2008. 194 p.
7. Radiography of vegetable seeds // Ed. by Musayev F. B. Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU "LETI", 2016. 207 p.
8. Zheludkov A. G., Potrakhov N. N., Beletsky S. L. Complex solution of the problems of automation of the X-ray method for analyzing the quality of seeds and grain cereals // Khleboprodukty. 2016. No. 05. P. 58–61.
9. Certificate of official registration of computer programs. 2010610289 RF. The program of automatic recognition of grain seed images and analysis of grain quality by X-ray diffraction obtained on the X-ray diagnostic device PRDU-02 / Potrakhov E. N., Zheludkov A. G.; appl. 2.09.09; publ. 10.11.09.
10. Arkhipov M. V., Alekseeva D. I., Batygin N. F., Velikanow L. P., Gysakova L. P., Derunov I. V., Jeludkov A. G., Nikolenko V. F., Nikitina L. I., Savin V. N., Ponomarenko E. N., Yakushev V. P. Method of radiography in agriculture and plant growing. Moscow: Russian Academy of Agricultural Sciences, 2001. 93 p.

UDC 631.53.0

Potrakhov N. N., Beletskiy S. L., Arkhipov M. V.

### **HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR GRAIN QUALITY CONTROL BASED ON THE MOBILE X-RAY DIAGNOSTIC UNIT PRDU-02**

**Summary.** *The purpose of the conducted studies was to create a technology for rapid assessment of the quality of commodity lots of grain, as well as highly informative separation of control samples of seeds. Research for more than 10 years had been carried out by a team of specialists from Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU "LETI", Research Institute of Rosrezerv Storage Preservation (Moscow) and Agrophysical Research Institute (NII AFI) (St. Petersburg) and as a result a technique for obtaining crisp, clean and contrast X-ray images of a separate grain enlarged from several times to several dozen times using modern hardware and software complex was developed. The quality of batches of wheat and rye grains using the developed complex was substantially evaluated. The most significant grain defects affecting the economic suitability of the whole lot were identified. They were strong endosperm fissuring, defectiveness and mechanical injuries of the endosperm, different stages of internal germination, enzyme mycosis depletion, damage by *Eurygaster integriceps*, pests (insects) infestation, grain implumpness. The results of the approbation of technology for rapid assessment of the quality of commodity lots of grain at one of the state elevators of Saint-Petersburg were presented. They showed that the complex has no foreign analogues. This hardware and software complex can be recommended for implementation at grain processing enterprises and Rosrezerv plants for the efficient high-level control of the quality of production batches of grain in order to select the best ones for long-term storage.*

**Keywords:** *microfocus radiography, grain quality control, hidden defects, hardware and software complex for X-ray control.*

Потрахов Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных приборов и устройств ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)»; 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5; e-mail: kzhamova@gmail.com.

Белецкий Сергей Леонидович, кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего лабораторией технологии длительного хранения продовольственных товаров и хлебопродуктов ФГБУ «Научно-исследовательский институт проблем хранения Росрезерва»; 111033, Россия, г. Москва, ул. Волочаевская, 40 к. 1; e-mail: grain-miller@yandex.ru.

Архипов Михаил Вадимович, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»; 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14; e-mail: rpin@mail.ru; заместитель директора, ФГБНУ «Северо-Западный Центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения», 196608, Россия, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, шоссе Подбельского, 7; e-mail: szcentr@bk.ru.

Potrakhov Nikolay Nikolaevich, Dr. Sc. (Tech.), head of the Department of electronic devices and system of Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU “LETI”; 5, Professora Popova str., Saint-Petersburg, 197376, Russia; e-mail: kzhamova@gmail.com.

Beletskiy Sergey Leonidovich, Cand. Sc. (Tech.), deputy head of the Laboratory of technology of long-term storage of food products and bread, FSBI “NIIPH Rosrezerv”; 40 k. 1, Volochaevskaya str., Moscow, 111033, Russia; e-mail: grain-miller@yandex.ru.

Arkhipov Mikhail Vadimovich, Dr. Sc. (Biol.), professor, chief researcher of the FSBSI “Agrophysical Research Institute”; 14, Grazhdanskiy ave., Saint-Petersburg, 195220, Russia; deputy director of the FSBSI “Northwestern Center for interdisciplinary research of the problems of food supply”; 7, Podbel’skogo road, Saint-Petersburg, Pushkin, 196608, Russia; e-mail: szcentr@bk.ru.

*Дата поступления в редакцию – 01.09.2018.*

*Дата принятия к печати – 03.10.2018.*