

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СЕПАРАЦИИ
ЗАРАЖЕННОГО ФУЗАРИОЗОМ ЗЕРНА

© 2026 Беляков М. В. ✉, Герасименко С. А., Борзенко С. И., Ефременков И. Ю.

*Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)
✉ bmw20100@mail.ru*

Реферат. Снижение потерь посевного материала из-за патогенов может быть реализовано на этапе послеуборочной очистки с применением оптических методов оценки зараженности зерна. Цель исследования – разработка автоматизированной фотолюминесцентной системы сепарации зернового материала и оценка основных показателей качества ее работы. Объектом исследования является процесс распознавания и сепарации здоровых и зараженных семян по их оптическим люминесцентным свойствам. Научная новизна заключается в переходе от количественных способов сепарирования к качественным методам точечного воздействия, где разделение зернового материала не стремится к усреднению результата, а способно, пусть и с определенной долей погрешности, отделять зерна с заданными показателями. Исследования проводили в 2022–2025 годах в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. В качестве зернового материала взяты семена пшеницы, ячменя и овса. Сепарирующий аппарат основан на определении зараженности зерна оптическим люминесцентным методом в потоке зерновой массы по соотношению потоков фотолюминесценции при возбуждении излучением 362 нм и 424 нм. Согласно критерию энергоэффективности, которым является максимум эффективной отдачи выбраны источники излучения. Блок сепарации зерна включает светонепроницаемую камеру с двумя светодиодами (эффективная отдача излучения 0,95–0,98%) и одним широкоспектральным фотодиодом. Разработанная система включает: бункер с позиционирующим устройством на транспортной ленте, блок оптико-электронной диагностики, исполнительное устройство в виде соленоидов. Алгоритм работы установки сепарации включает: инициализацию и проверку основных систем; получение сигнала люминесценции; анализ полученного отношения сигналов и запуск исполнительных устройств. В качестве исходного материала для сепарации использована выборка зерна размером 1000 здоровых и 1000 зерен пораженных патогенной микрофлорой. Точность распознавания семян с использованием фотолюминесцентной сепарации достигает 72%. При этом доля верно классифицированных семян превышает 75%, а относительная погрешность измерения ключевого параметра (Φ_{362}/Φ_{424}) составляет менее 10% для обеих групп.

Ключевые слова: сепарация, фотолюминесценция, зерно, зараженность, фузариоз.

Для цитирования: Разработка системы фотолюминесцентной сепарации зараженного фузариозом зерна / М.В. Беляков, С.А. Герасименко, С.И. Борзенко, И.Ю. Ефременков // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 2(82). С. 61–70. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-61-70

DEVELOPMENT OF PHOTOLUMINESCENT SEPARATION SYSTEM FOR
FUSARIUM-INFECTED GRAIN

© 2026 Belyakov M.V. ✉, Gerasimenko S.A., Borzenko S.I., Efremenkova I.Yu.

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)
✉ bmw20100@mail.ru*

Abstract. Seed losses due to pathogens can be reduced at the post-harvest cleaning stage using optical methods for assessing grain infestation. The aim of this study is to develop an automated photoluminescence system for separating grain and to evaluate its key performance indicators. The object of the study is the process of recognizing and separating healthy and infected seeds based on their optical luminescence properties. The scientific novelty lies in the transition from quantitative separation methods to qualitative, targeted methods, where grain separation does not aim for averaging results but is capable, albeit with a certain degree of error, to separate grains with specified parameters. The research was conducted from 2022 to 2025 at Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Scientific Center for VIM. Wheat, barley and oat seeds were used as grain material. Separation apparatus is based on the determination of grain contamination using an optical luminescence method in the grain flow based on the ratio of photoluminescence fluxes upon excitation by radiation at 362 nm and 424 nm. The radiation sources were selected according to the energy efficiency criterion, which is maximum effective output. The grain separation unit includes a light-tight chamber with two LEDs (effective radiation output of 0.95–0.98%) and one wide-spectrum photodiode. The developed system includes a hopper with a positioning device on a conveyor belt, an optoelectronic diagnostics unit and an actuator in the form of

solenoids. The separation unit's operating algorithm includes: initialization and testing of the main systems; receiving a luminescence signal; analysis of the received signal ratio; and activation of the actuators. A sample of 1 000 healthy and 1 000 pathogen-infected grains was used as the starting material for separation. Seed recognition accuracy using photoluminescence separation reaches 72%. The proportion of correctly classified seeds exceeds 75% and the relative measurement error of the key parameter (Φ_{362}/Φ_{424}) is less than 10% for both groups.

Key words: separation, photoluminescence, grain, infestation, fusarium.

For citation: Belyakov MV, Gerasimenko SA, Borzenko SI, Efremenko IYu. [Development of photoluminescent separation system for fusarium-infected grain]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 2(82). 61-70 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-2-61-70

Введение. Повышение урожайности зерновых культур сегодня происходит в большей мере за счет внедрения передового научно-технического оборудования, методов и технологий, а не за счет увеличения обрабатываемых площадей. Всего 2% всей производимой пшеницы в России соответствуют 1 и 2 классу [1]. В связи с этим повышения качества семенного материала, а также сокращение потерь на всех этапах производства, является важной задачей продовольственной безопасности. На этапе хранения семенного материала потери могут достигать 20 – 40% из-за патогенов [2, 3]. Эта задача может быть решена на этапе послеуборочной очистки зерна и семян с применением неинвазивных методов оценки зараженности зерна и дальнейшем удалением зараженных зерен из общей зерновой массы [4, 5].

Неинвазивно определять и отделять зерновой материал способом фотосепаратор, однако существует ряд ограничений с использованием данного сепарирующего прибора. К его основным недостаткам можно отнести стоимость [6], она в сравнении с прочим зерноочистительным оборудованием велика, если сравнивать с воздушной или воздушно-решетной машиной производительностью 3-5 т/ч, то цена фотосепаратора при той же производительности, выше 2-7 раз. К недостаткам фотосепаратора можно также отнести то, что основным его рабочим органом является сверхскоростная камера, которая и занимает большую часть стоимости, при этом определить зараженность она способна лишь по внешним признакам, когда симптомы заболевания уже визуальным образом проявились. Распознать на более ранних стадиях без явных признаков заражения он не способен [7]. В связи с этим разработка метода, который способен определять заражение зернового материала патогенной микрофлорой на ранних стадиях без явно выраженных симптомов заражения, является актуальным вопросом.

Предложенные ранее оптические лазерные волоконные сортировщики [8] помимо нескольких лазеров требуют наличия устройства развертки лазерного пучка, сложные системы построения и анализа изображения, содержащие оптоволокно. Общими недостатками подобного рода устройств являются высокая сложность и трудность технической эксплуатации, обусловленные необходимостью юстировки оптических элементов схемы, требованиями по обеспечению высоких частот сканирования. Также, датчики, основанные на

анализе цвета зерна, затруднительно использовать в полевых условиях. Указанные недостатки требуют разработки диагностирующей системы сепарирующего аппарата для обеспечения надежного экспрессного анализа зараженного зерна.

Для решения задачи сортировки зерна наиболее адекватным при построении анализирующего алгоритма представляется использование методов нечеткой логики, так как селекция длин волн и определение величины отношения потоков фотолуминесценции в реальных условиях всегда осуществляется с определенной погрешностью [9].

Цель исследования – разработка автоматизированной фотолуминесцентной системы сепарации зернового материала и оценка основных показателей качества ее работы.

Условия, материалы и методы. Исследования проводили в 2022-2025 годах в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. В качестве зернового материала для разработки системы сепарации взяты семена яровой пшеницы «Иришка № 172», ячменя «Московский 86» и овса «Залп». Степень поражения семян р. *Fusarium* определяли в Федеральном центре оценки безопасности и качества зерна и продуктов их переработки Федеральной службой по ветеринарному и фитосанитарному надзору по ГОСТ 31646-2012 (РФ) «Зерновые культуры. Метод определения содержания фузариозных зерен». Были сепарированы здоровые и зараженные зерна и исследованы их фотолуминесцентные свойства [10]. Экспериментальные измерения проводили при комнатной температуре 20-22°C и влажности 40-50% в светоизолированной камере из ABS пластика, обеспечивающей минимальную остаточную освещенность менее 0,01 лк.

При разработке системы сепарации зараженных фузариозом зерен были использованы методы проектирования, включающие принцип системности, принцип развития, учитывающий возможность модернизации и совершенствования, принцип совместимости для обеспечения взаимодействия прибора с системами зерноочистки в процессе функционирования, принцип энергетической эффективности для достижения рационального использования энергии оптического излучения для возбуждения и регистрации люминесцентного излучения.

Для источников излучения энергоэффективность определяется по эффективной отдаче излучения.

$$k_{э.в.} = \frac{\Phi_{эф}}{\Phi_{полн}} = \frac{\sum_0^{\infty} \varphi(\lambda)_{сд} \cdot S(\lambda) \Delta \lambda}{\sum_0^{\infty} \varphi(\lambda)_{сд} \Delta \lambda}. \quad (1)$$

где $\Phi_{эф}$ – эффективный поток, $\Phi_{полн}$ – полный поток возбуждающего излучения, $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность зерна, $\varphi(\lambda)_{сд}$ – спектр излучения светодиода.

Методы проектирования определяются необходимостью создания такой системы, которая способна функционировать при постоянном совершенствовании технологического процесса фотосепарации. Модульный принцип разработки устройства позволяет при необходимости создавать его модификации для решения иных задач по сортировке, например, для других видов зерна или для сепарации от загрязнений.

Для практической реализации метода определения заражения отдельного зерна необходима реализация следующих действий:

1. Одиночный образец позиционируется в светозащитной емкости.
2. Происходит возбуждение фотолюминесценции в течение 20 мкс двумя источниками излучения с максимумами примерно 362 нм и 424 нм.
3. Фотоприемником регистрируется люминесценция через 0,75-1 мкс после выключения каждого источника излучения.
4. Полученные фотосигналы усиливается на усилителе, оцифровываются и обрабатываются микроконтроллером.

5. По результатам обработки зерно идентифицируется как зараженное, незараженное, либо сомнительное по потокам фотолюминесценции и калибровочным соотношениям.

6. Идентификационная информация об образце зерна подается на выход и с учетом полученных данных определяется дальнейшее действие с ним.

Семена подаются из бункера-накопителя на транспортерную ленту с частотой, заданной микропроцессором. В оптико-электронном модуле световой поток от источников излучения поступает на поверхность зерна, находящегося в светонепроницаемой камере. Люминесцентное излучение зерна поступает на фотоприемник. Электрические сигналы с фотоприемника, после облучения каждым из источников поступают для обработки и управления дальнейшими действиями. На основе анализа отношения потоков Φ_{362}/Φ_{424} микроконтроллер формирует управляющие сигналы для перемещения зерна по ленте. Граница сепарации при отношении потоков $\Phi_{362}/\Phi_{424}=0,580$. Семена с большим отношением будут отнесены к зараженным, а с меньшим – к здоровым.

В качестве источников излучения применяются светодиоды, имеющие требуемый спектральный состав, малую инерционность и дающие возможность переключения за менее, чем 20 мкс. Основные данные современных светодиодов, потенциально возможных при проектировании системы сортировки, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Светодиоды и их основные параметры
Table 1 – LEDs and their main parameters

Название светодиода	Длина волны излучения λ , нм	Прямой ток I , мА	Прямое напряжение U , В	Угол излучения φ , °	Поток излучения Φ_e , Вт
VLMU3510-365-130	362	700	4,0	160	0,95
NICHIA NCSU276A	365	700	4,0	160	0,90
NICHIA NVSU233B	365	1400	3,85	160	1,4
NICHIA NCSU033C	365	700	4,0	160	0,75
CREELED424	424	700	4,0	150	0,80
LHUV-0420-0550	420	1000	3,5	150	1,0
LZ4-00UA00-00U6	400	1000	3,9	120	5,45

Численным критерием выбора светодиода является его эффективная отдача (см. формулу (1)) при возбуждении для $\Delta\lambda = 2$ нм, так как спектр излучения светодиода является более узким, чем спектр чувствительности приемника (зерна пшеницы). Рассмотрим несколько светодиодов для возбуждения семян пшеницы на $\lambda_b=362$ нм, 424 нм.

VLMU3510-365-130 и CREELED424 – являются усовершенствованными светодиодами серии XR, которые в отличие от серии XR обладают сравнительно компактными размерами, а именно 0,35х0,35х0,20 см и лучшими световыми характеристиками, а именно

световой поток при пиковом подаваемом напряжении может превосходить 100 лм. Такой световой поток достигается благодаря встроенной линзе, оптическая ось которой проходит через центральную часть корпуса, что позволяет без существенных оптических потерь встраивать данные источники излучения в другие оптические узлы устройств. А благодаря тому, что данные светодиоды имеют форм-фактор SMD – в них предусмотрен теплоотвод, который позволяет осуществлять монтаж вместе с системами охлаждения, такими как радиатор или вентилятор.

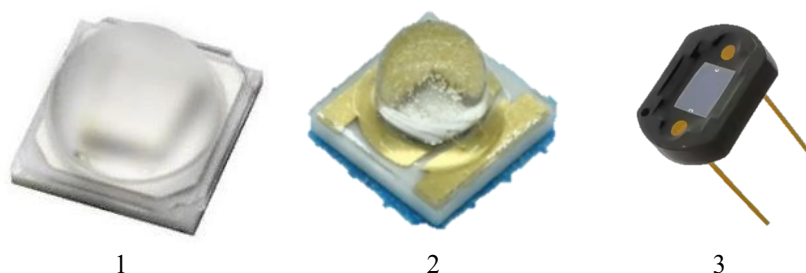


Рис.1 – Источники и приемник излучения:
1 – светодиод CREELED 424, 2 – светодиод VLMU3510-365-130,
3 – фотодиод Hamamatsu S1133
Fig. 1 – Radiation Sources and Receiver:
1 – CREELED 424 LED, 2 – VLMU3510-365-130 LED,
3 – Hamamatsu S1133 Photodiode

Разработана блок-схема алгоритма работы устройства фотолюминесцентной сепарации семян зерновых культур, зараженных фузариозом (рис. 2).

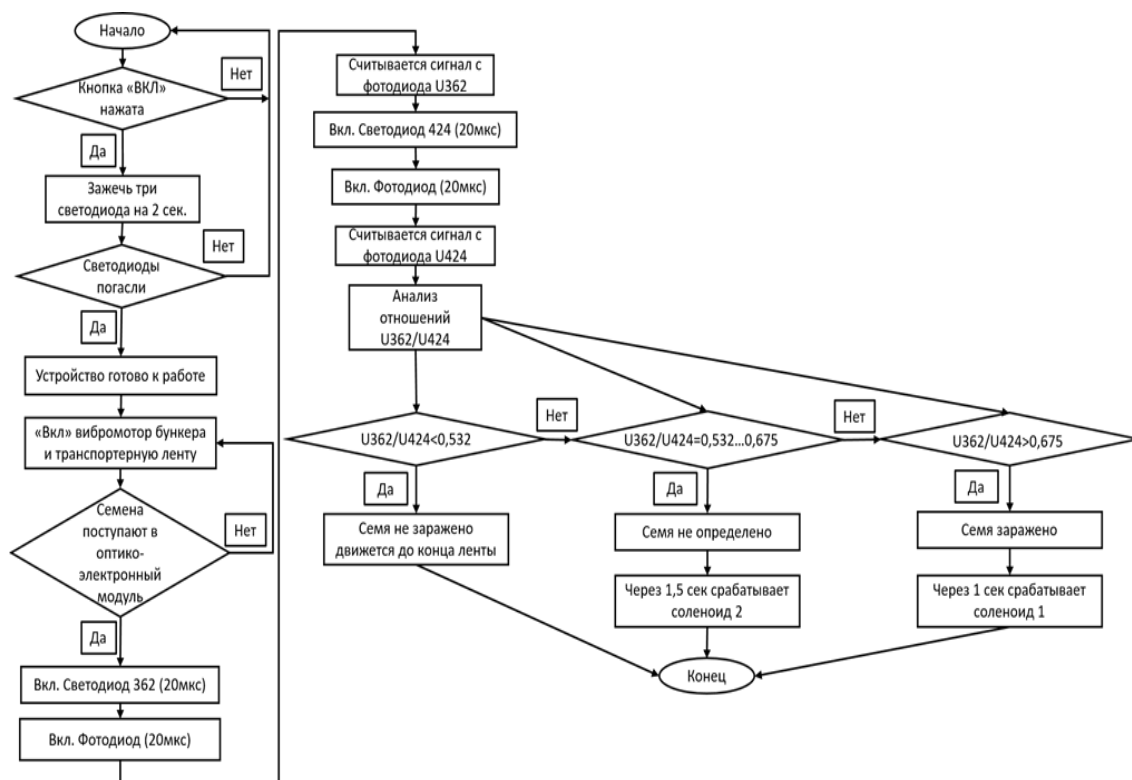


Рис. 2 – Блок-схема алгоритма работы устройства сортировки роботизированной системы оптической экспресс диагностики семян зерновых культур

Fig. 2 – Block diagram of the operation algorithm of the sorting device of the robotic optical express diagnostic system for grain seeds

Данный алгоритм включает три этапа: инициализация и проверка основных систем; получение сигнала люминесценции; анализ полученного отношения сигналов и запуск исполнительных устройств (соленоидов).

Разработанный прототип установки для экспериментов включает транспортную ленту с регулируемой скоростью движения, светозащитную камеру с входом и выходом для единичного движения зерна, светодиоды и фотодиод с системой электрического питания, а также сигнальные

индикаторы.

Результаты и обсуждение. Ранее было установлено [11, 12], что наиболее информативными диапазонами спектра фотолюминесценции для зерна пшеницы являются 390-540 нм (при возбуждении 362 нм) и 450-600 нм (при возбуждении 424 нм).

Для возбуждения люминесценции необходимо осуществить подбор источников излучения (светодиодов). Результаты расчетов эффективной отдачи светодиодов по формуле (1) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета эффективной отдачи излучения светодиодов
Table 2 – Results of calculating the effective radiation output of the LEDs

Источник излучения	$k_{э.в.}$
VLMU3510-365-130	0,98
NICHIA NCSU276A	0,97
NICHIA NVSU233B	0,97
NICHIA NCSU033C	0,97
CREELED424	0,95
LHUV-0420-0550	0,94
LZ4-00UA00-00U6	0,73

Для возбуждения люминесценции на $\lambda = 362$ нм наиболее подходящим является светодиод VLMU3510-365-130, поскольку обладает максимальным $k_{э.в.}$, который равен 0,98, угол излучения $\varphi = 160^\circ$, а поток излучения $\Phi_e = 0,95$ Вт.

Светодиод CREELED424 является наиболее оптимальным для рабочей длины 424 нм из-за высокой эффективной отдачи, широкому углу излучения и относительно большому потоку равному $\Phi_e = 0,8$ Вт.

Выбранные светодиоды имеют не только высокую эффективную отдачу излучения, но также высокий прямой ток $I = 700 - 1000$ мА и прямое напряжение $U = 3,5 - 4,0$ В, следовательно, при излучении будет выделяться большое количество тепла, которое необходимо рассеивать. С возникшей проблемой справятся специальные подложки для

светодиодов, сделанные из теплопроводящих материалов.

Для приема фотолюминесцентного излучения выбраны фотодиоды ввиду высокого быстродействия и малых габаритных размеров. При этом следует выбирать фотодиод с таким спектром чувствительности, чтобы он перекрывал обе полосы фотолюминесценции (390-540 нм и 450-600 нм), причем спектральная чувствительность в этих полосах не сильно отличалась друг от друга. Другим немаловажным критерием выбора является максимальная интегральная чувствительность, потому что люминесцентный сигнал очень мал.

В качестве приемника излучения выбран фотодиод S1133 фирмы Hamamatsu. Его внешний вид представлен на рисунке 1, спектральная чувствительность – на рисунке 3, а основные параметры – в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры фотодиода S1133
Table 3 – Parameters of the S1133 photodiode

Параметр	Значение
Площадь чувствительной поверхности, мм	2,4×2,8
Диапазон температур, °C	-10°C - +60
Спектральный диапазон, нм	320-730
Фоточувствительность, А/Вт	0,3
Темновой ток, пА	10
Время нарастания сигнала, мкс	2,5

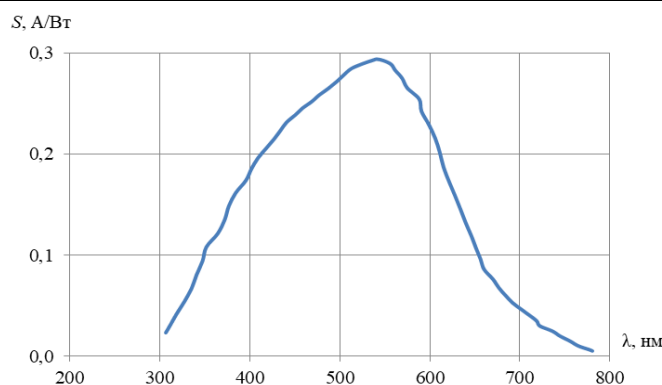


Рис. 3 – Спектральная характеристика чувствительности фотодиода S1133
Fig. 3 – Spectral sensitivity characteristic of the S1133 photodiode

Из рисунка 3 следует, что при регистрации люминесценции в диапазоне 390-540 нм фотодиод обладает чувствительностью S от 0,17 А/Вт до 0,28 А/Вт, а в диапазоне люминесценции 450-600 нм S составляет от 0,21 А/Вт до 0,23 А/Вт, что составляет около 60 – 66% от максимальной чувствительности фотодиода в 0,3 А/Вт, что делает выбор

данного фотодиода оптимальным для решения поставленной задачи. Также использование одного фотодиода существенно уменьшает стоимость системы фотолюминесцентной сепарации при увеличении пропускной способности установки.

В качестве микроконтроллера выбран АТmega328Р. АТmega328Р-микроконтроллер

семейства AVR имеет 8-битный процессор и позволяет выполнять большинство команд за один такт. Каждый из 14 цифровых выводов использует функции pinMode, digitalWrite, и digitalRead. Выводы работают при напряжении 5 В. Каждый вывод имеет нагрузочный резистор (стандартно отключен) 20-50 кОм и может пропускать до 40 мА. В связи с этим для питания светодиодов, а им требуется от 700 – 1000 мА, а также фотодиодов, необходим дополнительный преобразователь, способный увеличить ток и напряжение до требуемых значений.

Поскольку по своей природе люминесценция является сравнительно слабым излучением, то для ее регистрации необходим усилитель, который будет обладать большим коэффициентом усиления и при этом низкими шумовыми составляющими. С такой задачей может справиться операционный усилитель. Данный электронный компонент бывает как с однополярным, так и с двухполярным питанием, имеет дифференциальный вход. Разрабатываемая система фотолюминесцентной сепарации имеет однополярное питание, следовательно, был выбран операционный усилитель AD820ANZ. Данный ОУ обладает низким дрейфом смещения с температурой, а именно 2 мкВ/°С, следовательно, резкие температурные колебания не повлияют на качество выходного сигнала. Также AD820ANZ обладает высокой линейностью и точностью, ширина полосы пропускания 1,8 МГц. Поскольку люминесценция является быстро протекающим процессом, то операционный усилитель должен обладать высокой скоростью нарастания сигнала. AD820ANZ имеет скорость нарастания 3 В/мкс, при токе потребления 800 мкА, что достаточно для регистрации люминесценции, передачи аналогового – цифрового сигнала в микроконтроллер.

Напряжение питания операционного усилителя имеет довольно широкий диапазон, а именно 3 – 36 В, что делает данный операционный усилитель универсальным встраиваемым компонентом в различных электрических схемах, благодаря тому, что не нужно применять дополнительные преобразователи напряжений. При недостаточном напряжении питания, AD820ANZ не сможет выйти на рабочую точку, при превышении напряжения питания произойдет нагрев и последующее разрушение электронного компонента. Благодаря вышеперечисленным характеристикам AD820ANZ является эффективным, эргономичным и относительно не дорогим решением.

Для управления включением и выключением источников излучения, у которых напряжение питания составляет от 3-4 В, а также ток от 700-1000 мА, необходимо использовать высокоомощные аналоговые переключатели, способные пропустить через себя данные значения U_n и I_n .

В качестве аналогового переключателя выберем одноканальный силовой ключ RDC1-S1 N power MOSFET. Понижающий DC-DC преобразователь – это преобразователь, способный получить стабилизированное напряжение постоянного тока на выходе меньше, чем напряжение постоянного тока, поданное на его вход. Поскольку выбранный микроконтроллер ATmega328P не способен единолично пропустить через себя ток для светодиодов в размере 700-1000 мА, необходимы преобразователи, способные поддерживать постоянное напряжение и ток на выходе. С данной задачей справится понижающий DC-DC преобразователь LM2596.

Конструктивная схема оптоэлектронного блока сепарации зерна пшеницы представлена на рисунке 4.

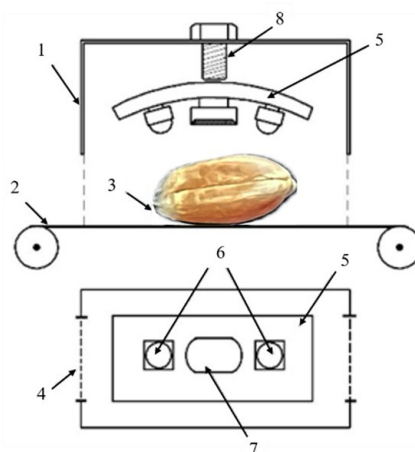


Рис. 4 – Конструктивная схема оптоэлектронного блока сепарации зерна пшеницы:
1 – светонепроницаемая камера, 2 – транспортерная лента, 3 – исследуемый образец зерна,
4 – входное отверстие камеры, 5 – подложка, 6 – светодиоды, 7 – фотодиод,
8 – винт для перемещения подложки

Fig. 4 – Structural diagram of the optoelectronic grain separation unit for wheat:

1 – Light-tight chamber, 2 – Conveyor belt, 3 – Test grain sample,
4 – Chamber inlet, 5 – Substrate, 6 – LEDs, 7 – Photodiode, 8 – Screw for substrate movement



Рис. 5 – Общий вид устройства фотолуминесцентной сепарации семян зерновых культур, зараженных фузариозом: 1 – бункер-накопитель, 2 – транспортерная лента, 3 – оптоэлектронный блок, 4 – потенциометр (вкл./выкл. и частота подачи) индикация (зеленый-здоровое зерно, красный-некондиционное, желтый-неопределённое), 5 – соленоиды, 6 – зерно

Fig. 5 – General View of the Photoluminescent Separation Device for Cereal Seeds Infected with Fusarium: 1 – Storage Hopper, 2 – Conveyor Belt, 3 – Optoelectronic Unit, 4 – Potentiometer (On/Off and Feed Rate); Indication (Green – Healthy Grain, Red – Non-Conforming Grain, Yellow – Uncertain), 5 – Solenoids, 6 – Grain

Внешний вид устройства фотолуминесцентной сепарации зараженного фузариозом зерна представлен на рисунке 5.

Технологический процесс работы установки: семенная масса зерна засыпается в бункер-накопитель 1 и под действием вибрации, которая регулируется потенциометром 4, поступает на подающую ленту 2, лента перемещает зерно со скоростью 0,05 м/с к оптоэлектронному модулю 3. В оптоэлектронном модуле световой поток от источников излучения поступает на поверхность зерна, находящегося в светонепроницаемой камере. Люминесцентное излучение зерна поступает на фотоприемник. Электрические сигналы с фотоприемника, после облучения каждым из источников поступают для обработки и

управления микропроцессором. Семена с отношением $U_{362}/U_{424} < 0,532$ будут отнесены к не зараженным, $U_{362}/U_{424} = 0,532 \dots 0,675$ относятся к неопределенным, а с $U_{362}/U_{424} > 0,675$ – к здоровым. Затем зерно движется дальше по подающей ленте 2 к устройству сортировки 5. Если зерно здоровое, то мигает зеленый светодиод и оно движется до конца ленты, если зерно не определено, то загорается желтый светодиод и срабатывает первый соленоид 5 по ходу движения ленты, если зерно заражено, то загорается красный светодиод и срабатывает второй соленоид.

На рисунке 6 представлены результаты измерения 1000 здоровых и 1000 зараженных семян на разрабатываемой установке фотолуминесцентной сепарации.

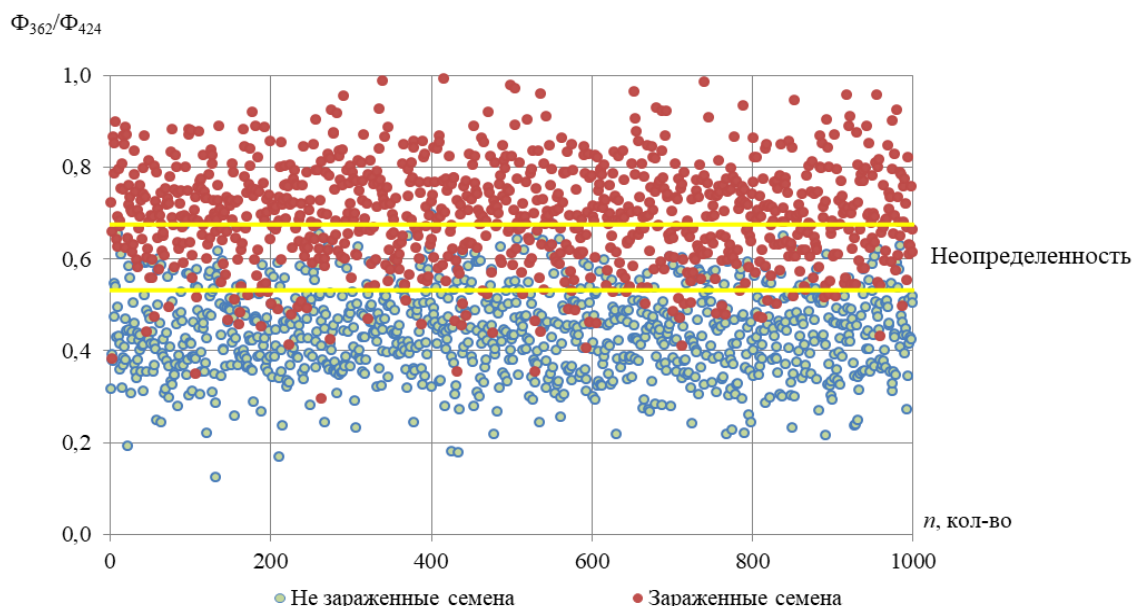


Рис. 6 – Результат измерения отношений сигнала Φ_{362}/Φ_{424} для не зараженных и зараженных семян

Fig. 6 – The result of measuring the Φ_{362}/Φ_{424} signal ratio for uninfected and infected seeds

Из рисунка 6 следует, что некоторые точки из выборки семян здоровых и зараженных находятся в области неопределенности, также наблюдается некоторое количество семян, которые отнесены ошибочно к той или иной

группе. Однако, большее количество потока семян распознано верно.

В таблице 4 представлены результаты работы разрабатываемой системы фотолюминесцентной сепарации.

Таблица 4 – Результаты работы системы фотолюминесцентной сепарации
Table 4 – Results of the photoluminescent separation system operation

Параметры	Не зараженные семена	Зараженные семена
Φ_{362}/Φ_{424}	$0,437 \pm 0,04$	$0,698 \pm 0,06$
n , КОЛ-ВО	1000	1000
$n_{\text{неопред.}}$ КОЛ-ВО	155	338
$n_{\text{промах}}$ КОЛ - ВО	2	68
Производительность 1 канала, зерен/с	3	
Точность распознавания, %	72	

Относительная погрешность Φ_{362}/Φ_{424} для не зараженных и зараженных семян составляет менее 10%. При фотолюминесцентной сепарации свыше 75 % семян отнесены к своей группе верно. Точность распознавания составляет 72%. Попадание части здоровых семян в зону неопределенности может быть связано с естественной вариабельностью люминесцентных свойств, степенью распространности фузариозного поражения по поверхности, дефектами самой поверхности или поверхностными загрязнениями. Высокое количество неопределенных и ошибочно классифицированных зараженных семян (338 и 68 соответственно) требует дальнейшего уточнения пороговых значений и алгоритма обработки сигналов. Мобильность, универсальность, модульность, функциональность, надежность и сравнительно низкая стоимость являются ключевыми преимуществами разрабатываемого сепарирующего устройства. Данное устройство может быть масштабировано путем увеличения количества каналов измерения, что в свою очередькратно повысит его производительность. Регистрация потоков фотолюминесценции с точки зрения реализации устройств в 6-10 раз дешевле [6], в отличие от систем, основанных на распознавании изображений (машинного зрения), которое требует высокоточных и дорогих камер.

Выводы:

1. Разработанная система неразрушающего контроля зараженности зерна включает светонепроницаемую камеру с двумя светодиодами и широкоспектральным фотодиодом. Для возбуждения люминесценции выбран светодиод VLMU3510-365-130 ($\lambda = 362$ нм, эффективная отдача $k_{\text{э.в.}} = 0,98$, угол излучения $\varphi = 160^\circ$, поток $\Phi_e = 0,95$ Вт), а в качестве приемника – фотодиод S1133 (Hamamatsu), чувствительность которого в рабочих диапазонах составляет 60–66% от максимальной, что обеспечивает оптимальную регистрацию сигнала.

2. Доля семян, верно отнесенных к своей группе методом фотолюминесцентной сепарации, превышает 75%. Общая точность распознавания достигает 72%, производительность одного канала установки составляет не менее 3 зерен/с. Дальнейшие направления совершенствования заключаются в увеличении числа каналов, а также применению нейросетевых методов для увеличения точности распознавания зараженного зерна.

3. Относительная погрешность определения ключевого параметра Φ_{362}/Φ_{424} не превышает 10% как для здоровых, так и для зараженных образцов. Таким образом, разработанная автоматизированная фотолюминесцентная система сепарации зернового материала имеет удовлетворительные показатели качества работы.

Литература

1. Производство пшеницы в России / В. М. Зимняков, А. А. Курочкин, С. В. Богомазов и др. // Нива Поволжья. 2020. № 1(54). С. 15-21. doi: 10.36461/NP.2020.54.1.003
2. Boyko A., Moskovsky M. N., Vorobev S. The Basics of Using Spectral Technologies for Diagnostics and Control of Seed Stock during Storage // Networked Control Systems for Connected and Automated Vehicles. 2022. P. 1635-1643. doi: 10.1007/978-3-031-11058-0_166
3. Zudyte B., Luksiene Z. Visible light-activated ZnO nanoparticles for microbial control of wheat crop // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2021. Vol. 219(112206). doi: 10.1016/j.jphotobiol.2021.112206.
4. Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Зюлин А. Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. № 1. С. 2-9.
5. Разработка рабочего органа вертикального пневмоканала для очистки шрота подсолнечника / В. Г. Хамуев, И. А. Пехальский, С. А. Герасименко и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 5(77). С. 402-411. doi: 10.32786/2071-9485-2024-05-45.
6. Стукалова А. В., Ямпилев С. С., Балданов В. Б. Обзор современных фотосепараторов // Вестник ВСГУТУ. 2024. № 1(92). С. 62-71. doi: 10.53980/24131997_2024_1_62.
7. Толмачев В. Д., Лебедев Д. В. Актуальность применения фотосепараторов в технологическом процессе // Символ науки. 2019. № 6. С. 234-238.

8. Пат. 2521215 Российская Федерация. МПК В07С 5/34. Оптоволоконный лазерный сортировщик. / Шульгин В. А. [и др.]; патентообладатель: Чуйко Г. В. – № 2012156324/03; заявл. 24.12.2014; опубл. 27.06.14. ; Бюл. № 18 – 4 с.

9. Соколов С. В., Новиков А. И. Новые оптоэлектронные системы экспресс-анализа семян в лесохозяйственном производстве // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 9. № 2. С. 5–13. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1.

10. Method of Optical Diagnostics of Grain Seeds Infected with Fusarium / M. V. Belyakov, M.N. Moskovskiy, M.A. Litvinov, et al. // Applied Sciences (Switzerland). 2022. Vol. 12(10). doi: 10.3390/app12104824.

11. Design of Device for Optical Luminescent Diagnostic of the Seeds Infected by Fusarium / M.N. Moskovskiy, M.V. Belyakov, A.S. Dorokhov, et al. // Agriculture. 2023, 13(3). doi: 10.3390/agriculture13030619.

12. Современные физические методы и технологии в сельском хозяйстве / С. В. Гудков, Р.М. Саримов, М.Е. Асташев и др. // Успехи физических наук. 2024. Т. 194. № 2. С. 208–226. doi: 10.3367/UfNr.2023.09.039577.

References

1. Zimnyakov VM, Kurochkin AA, Bogomazov SV. [Wheat production in Russia]. Niva Povolzhya. 2020; 1 (54). 15–21 p. doi: 10.36461/NP.2020.54.1.003

2. Boyko A., Moskovsky MN, Vorobev S. The basics of using spectral technologies for diagnostics and control of seed stock during storage. Networked control systems for connected and automated vehicles. 2022; 1635–1643 p. doi: 10.1007/978-3-031-11058-0_166

3. Zudyte B, Luksiene Z. Visible light-activated ZnO nanoparticles for microbial control of wheat crop. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. 2021; Vol.219(112206). doi: 10.1016/j.jphotobiol.2021.112206.

4. Lachuga YuF, Izmaylov AYu, Zyulin AN. [Development and implementation of highly efficient, resource- and energy-saving technologies and technical means for post-harvest grain processing and seed preparation]. Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2009; 1. 2–9 p.

5. Khamuev VG, Pekhalskiy IA, Gerasimenko SA. [Development of working element of vertical pneumatic pipe for cleaning sunflower meal]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2024; 5(77). 402–411 p. doi: 10.32786/2071-9485-2024-05-45.

6. Stukalova AV, Yampilov SS, Baldanov VB. [Review of modern color sorters]. Vestnik VSGUTU. 2024; 1 (92). 62–71 p. doi: 10.53980/24131997_2024_1_62.

7. Tolmachev VD, Lebedev DV. [Relevance of using color sorters in the technological process]. Simvol nauki. 2019; 6. 234–238 p.

8. Shulgin VA. Optovolokonnyy lazernyy sortirovshchik. [Fiber-optic laser sorter]. Patent 2521215 Rossiiskaya Federatsiya. MПК В07С 5/34. Patent holder Chuyko G.V. № 2012156324/03; declared 24.12.2014; published 27.06.14; Bulletin 18. 4 p.

9. Sokolov SV, Novikov AI. [New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production]. Lesotekhnicheskii zhurnal. 2019; Vol.9. 2. 5–13 p. doi: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/1.

10. Belyakov MV, Moskovskiy MN, Litvinov MA. Method of optical diagnostics of grain seeds infected with Fusarium. Applied Sciences (Switzerland). 2022; Vol.12(10). doi: 10.3390/app12104824.

11. Moskovskiy MN, Belyakov MV, Dorokhov AS. Design of device for optical luminescent diagnostic of the seeds infected by Fusarium. Agriculture. 2023; 13(3). doi: 10.3390/agriculture13030619.

12. Gudkov SV, Sarimov RM, Astashev ME. [Modern physical methods and technologies in agriculture]. Uspekhi fizicheskikh nauk. 2024; Vol.194. 2. 208–226 p. doi: 10.3367/UfNr.2023.09.039577.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Беляков Михаил Владимирович – главный научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), e-mail: bmw20100@mail.ru, ORCID 0000-0002-4371-8042

Герасименко Станислав Александрович – старший научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), e-mail: stanislav.mkm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4152-6570

Борзенко Сергей Игоревич – старший научный сотрудник лаборатории технологий и машин для послеуборочной обработки зерна Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), e-mail: serzhbk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2040-7022

Ефременков Игорь Юрьевич – младший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий и технических средств кормления в животноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), e-mail: matiusharius@mail.ru, ORCID 0000-0003-2302-9773

Вклад авторов:

М.В. Беляков – разработка научной концепции, формальный анализ, подготовка статьи к публикации, руководство исследованиями;

С.А. Герасименко – методология, валидация, ресурсы;

С.И. Борзенко – валидация, ресурсы, подготовка исходного варианта рукописи;

И.Ю. Ефременков – программное обеспечение, проведение измерений, визуализация, подготовка исходного варианта рукописи.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 22.04.2025; одобрена после рецензирования 14.03.2026; принята к публикации 25.06.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Authors:

Belyakov Mikhail Vladimirovich – chief researcher of Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: bmw20100@mail.ru, ORCID 0000-0002-4371-8042

Gerasimenko Stanislav Aleksandrovich – senior researcher of Laboratory of Technologies and Machines for Post-Harvest Grain Handling Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: stanislav.mkm@gmail.com, ORCID 0000-0003-4152-6570

Borzenko Sergey Igorevich – senior researcher of Laboratory of Technologies and Machines for Post-Harvest Grain Handling Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: serzhbk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2040-7022

Efremenkov Igor Yurevich – junior researcher of Laboratory of Innovative Technologies and Technical Means of Feeding in Animal Husbandry Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1st Institutsky Proezd, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: matiusharius@mail.ru, ORCID 0000-0003-2302-9773

Contribution of the authors:

M.V. Belyakov – Development of the scientific concept, Formal analysis, Preparation of the article for publication, Supervision of the research;

S.A. Gerasimenko – Methodology, Validation, Resources;

S.I. Borzenko – Validation, Resources, Preparation of the initial draft of the manuscript;

I.Yu. Efremenkov – Software, Conducting measurements, Visualization, Preparation of the initial draft of the manuscript.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 22.04.2025; revised 14.03.2026; accepted 25.06.2026.

