

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-114-123

¹Карелина М.Ю., ^{1,*}Акулов А.А., ¹Подгорный А.В., ¹Логанов Н.В.

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

*E-mail: a.akulov.98@mail.ru

СТОЙКОСТЬ ПЕРИФЕРИЙНЫХ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ К ПРИМЕНЯЕМЫМ АГРОХИМИКАТАМ

Аннотация. В данной статье исследуется физико-химическая деградация поверхностей систем технического зрения (СТЗ), используемых в агропромышленном комплексе (АПК), а также надежность систем компьютерного зрения, работающих в химически агрессивных средах. Поскольку автономная сельскохозяйственная техника становится все более зависимой от оптических данных для навигации и мониторинга урожая, надежность интерфейсов камер при длительном воздействии удобрений, гербицидов и пестицидов становится важнейшей инженерной задачей. В исследовании представлен подробный анализ взаимодействия между химическими составляющими широко используемых агрохимикатов, где особое внимание уделяется активным ингредиентам, органическим растворителям и поверхностно-активным веществам, а также корпусам модулей технического зрения. Экспериментальная основа включает сравнительную оценку стойкости материалов систем технического зрения при контролируемом воздействии различных концентраций реагентов. Основным пунктом данного исследования являются механизмы разрушения материалов. В ходе исследования проведена корреляция продолжительности воздействия и концентрации реагента с количественными показателями оптических характеристик, включая потерю пропускания в видимом и ближнем инфракрасном спектрах и увеличение шероховатости поверхности, а также химический анализ взаимодействия реагентов с материалами систем технического зрения.

Ключевые слова: точное земледелие, машинное зрение, химическая деструкция, оптические полимеры, агрохимикаты, надежность датчиков.

Введение. Исследования в области агропромышленного комплекса (АПК) активно меняются в сторону широкого внедрения автономных роботизированных систем и интеллектуального оборудования, предназначенных для оптимизации урожайности сельскохозяйственных культур и минимизации потребления ресурсов. Системы технического зрения (СТЗ) обладают ключевым значением в технологической трансформации областей таких задач, как автономная навигация, анализ сельскохозяйственных культур, распознавание сорняков и вредителей в режиме реального времени и др. Однако в условиях АПК оптические приборы работают в среде, сильно отличающейся от контролируемой лабораторной. Условия работы интеллектуальных систем технического зрения характеризуются наличием химически активных сред, которые образуются при распылении жидких удобрений, гербицидов, фунгицидных средств и пестицидов. Агрохимические реагенты представляют собой сложные многокомпонентные смеси, содержащие активные биологические агенты, агрессивные органические растворители, поверхностно-активные вещества и регуляторы кислотности, которые предназначены для усиления проникающей способности и, соответственно, эффективности. Современные системы машинного зрения обычно защищены неорганическим силикатным стеклом или оптическими полимерами, такими как поликарбонат (ПК) и полиметилметакрилат (ПММА),

корпус систем изготавливается из анодированного алюминия (Al_2O_3) и нержавеющей стали. Несмотря на свою механическую прочность, эти материалы обладают различной степенью химической стойкости. Длительный контакт с агрохимикатами может вызвать гидролиз, растрескивание под воздействием растворителя или травление поверхности, что приводит к повышенной шероховатости и помутнению, а также к нелинейному изменению оптических характеристик систем. Подобные изменения снижают качество входных данных, тем самым снижая точность вывода сверточных нейронных сетей и, в конечном счете, снижая экономическую эффективность роботизированных систем. Существующие исследования в основном посвящены механическим методам очистки или программным алгоритмам удаления загрязнений, игнорирующим необратимый характер химической эрозии [1]. Следовательно, существует необходимость в исследовании совместимости конструкционных материалов с химической средой агропромышленного комплекса. Целью данного исследования является разработка теоретической основы для прогнозирования долговечности периферийных устройств СТЗ путем классификации химических компонентов и молекулярного взаимодействия составляющих, а также предоставление научно обоснованных рекомендаций по выбору химически стойких материалов для сельскохозяйственной робототехники

Материалы и методы. В исследовании используется аналитическая и теоретическая методология для прогнозирования взаимодействия между сельскохозяйственными реагентами и составляющей систем технического зрения. Данный подход состоит из трех основных этапов: анализ химического состава реагентов, структурная характеристика СТЗ и теоретическое моделирование механизмов разрушения поверхности. Была проведена классификация компонентов широко используемых агрохимических реагентов, которые вступают в реакцию с полимерами и неорганическим стеклом. Агрохимический реагент – это сложный активный раствор, специально разработанный для обеспечения высокой проникающей способности и эффективности. Данные растворы по своей природе обладают коррозионным свойствам по отношению к небиологическим поверхностям [2]. Агрессивные компоненты, классифицированные по их химической роли и структурированные в таблице 1, служат основой для определения первостепенных

разрушителей в агропромышленной среде. Регуляторы pH имеют высокий показатель кислотности (например, фосфорная кислота) и обладают высокой щелочностью (например, гидроксид натрия). Они значительно ускоряют разложение материала в результате гидролиза и химического травления. Неорганические соли, которые часто присутствуют в удобрениях, таких как нитрат аммония, способствуют ионизации, которая может вызывать окислению и способствовать электролизу.

Органические растворители и поверхностно-активные вещества (ПАВ) обладают высокой эффективностью при проникновении в микротрещины элементов СТЗ и способствуют образованию трещин в полимерных материалах, тем самым увеличивая риск разрушения материала поверхности от химического воздействия [3]. А также активные ингредиенты часто образуют устойчивые связи с ионами металлов (например, ионы натрия и кальция ЭДТА) в структуре стекла.

Таблица 1

Перечень химических компонентов растворов

Составляющие реагентов	Вещество/группа реагента	Химическая функция	Химическая формула
pH регуляторы	Лимонная кислота, фосфорная кислота, гидроксид натрия	Кислотно-щелочной обмен	NaOH
Неорганические соли	Нитрат аммония, хлорид калия	Электролиз, окисление	NH ₄ NO ₃
Органические растворители	Ароматические углеводороды, спирты	Разбавление вещества	C ₃ H ₈ O
Поверхностно-активные вещества	Неионные (производные ПЭГ)	Поверхностное натяжение	C ₈ H ₁₇ -C ₆ H ₄ -O-(CH ₂ -CH ₂ -O) ₉₋₁₀ H
Активные вещества	Фосфорорганические соединения, ЭДТА	Действующий реагент	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈

Проанализирован состав неорганического стекла и оптических полимеров в составе линз, металлов (анодированный алюминий, нержавеющая сталь) в конструкции корпуса, УФ-клея на основе акрилата для фиксации оптических элементов, а также силиконового герметика (RTV) на основе полидиметилсилоксана (ПДМС) для уплотнения разъемов и стыков корпуса. Выбор материалов был сделан исходя из того, что именно они в подавляющем большинстве используются в настоящее время в СТЗ агропромышленного комплекса. Неорганическое щелочно-силикатное стекло ценится за его высокую твердость и превосходную устойчивость к царапинам, что делает его идеальным материалом для использования в сложных условиях [4].

Поликарбонат (PC) и полиметилметакрилат (PMMA) являются предпочтительными из-за их высокой ударопрочности, легкого веса и эконо-

мичности [5]. Анодированный алюминий и нержавеющая сталь обладают оптимальным соотношением прочности и веса, хорошей теплопроводностью, устойчивостью к коррозии и являются легкообрабатываемыми материалами.

УФ-клеи имеют высокую прочность сцепления (адгезия) со стеклом, металлом и пластиком, а также после отверждения образуют очень твердый, стойкий к вибрациям и химикатам шов [6]. Силиконовые герметики сохраняют эластичность в широком диапазоне температур, обладают хорошей устойчивостью к влаге и не вызывают коррозии металлов.

Для каждого материала в ходе анализа учитывались его фундаментальная химическая структура и состав, чтобы определить исходные показатели химической реактивности. Результаты анализа материалов, наиболее часто используемых в конструкции СТЗ, обобщены в таблице 2.

Таблица 2

Перечень материалов в конструкции СТЗ

Материал	Функция	Структура	Химическая формула
Неорганическое стекло	Защита оптических и внутренних компонентов системы	Аморфная сетка из SiO ₂	(SiO ₂) _x · (Na ₂ O) _y
Поликарбонат (ПК)		Карбонатная цепочка	[C ₁₆ H ₁₄ O ₃] _n
Полиметилметакрилат (ПММА)		Побочные группы метилового эфира	[C ₅ H ₈ O ₂] _n
Анодированный алюминий	Укрепление корпуса	Алюминиевая основа с добавлением слоя оксида	Al ₂ O ₃
Нержавеющая сталь		Кристаллическая решетка Fe-Cr-Ni	Cr+8%Ni
УФ-клей (акрилаты)	Фиксация оптических элементов (объектив, защитное стекло)	Полимер с поперечными химическими связями (сшитый полимер)	C ₃ H ₈ O ₂
Силиконовый герметик	Уплотнение разъемов и стыков корпуса	Сетка ПДМС	O] _n -

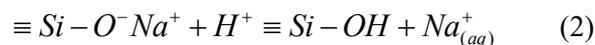
Анализ физико-химических взаимодействий между агрохимическими реагентами и материалами систем машинного зрения выявляет два различных способа разрушения: поверхностное травление, вызванное ионным обменом в неорганических стеклах, и деполимеризация в сочетании с растрескиванием под действием растворителя в органических полимерах [7]. Применение кинетических моделей, разработанных в рамках методики, демонстрирует, что скорость этих процессов разложения зависит от концентрации активных химических веществ и температуры окружающей среды.

В случае щелочно-силикатного стекла основным является разрушение кремнеземной сетки регуляторами pH. В свою очередь силикатная сетка устойчива к воздействию кислотных сред (за исключением плавиковой кислоты). Наличие щелочных компонентов (pH > 9), которые часто содержатся в моющих растворах или специальных смесях удобрений с составом гидроксидов (например, NaOH), приводит к прямому повреждению поверхности [8]. Путь реакции начинается с нуклеофильной атаки гидроксильного иона (OH⁻) на атом кремния, что приводит к растворению сетки и образованию растворимых силикатов. Для описания этого процесса можно использовать следующее стехиометрическое уравнение:



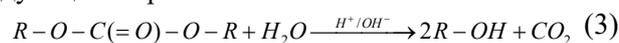
Одновременно в кислой среде, характерной для многих жидких удобрений (например, содержащих фосфорную кислоту), наблюдается сдвиг в механизме разложения в сторону ионообменного процесса. Процесс замещения включает в себя замену ионов щелочных металлов (Na⁺, Ca²⁺), находящихся во внутренних пространствах

стеклянной сетки, на протоны (H⁺). Данные протоны образуются из кислой среды. Также в процессе выщелачивания образуется пористый поверхностный слой, богатый кремнеземом. Хотя этот процесс не нарушает целостность объема, он значительно изменяет показатель преломления поверхностного слоя

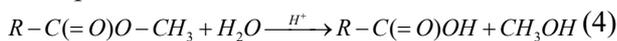


Истощение ионов приводит к образованию гидратированного слоя с более низким показателем преломления, чем у обычного стекла, что приводит к появлению тонкопленочных интерференционных эффектов и повышенной восприимчивости поверхности к механическому истиранию [9]. Механизмы деградации оптических полимеров более сложны из-за присутствия реакционноспособных функциональных групп в полимерной основе.

Поликарбонат (ПК) обладает высокой ударопрочностью, однако он значительно уязвим при воздействии щелочных реагентов, что подчеркивает важность его применения. Карбонатная связь (-O-C(=O)-O) была идентифицирована как основное место химического воздействия [10]. Расщепление этой связи катализируется гидроксидными ионами или протонами из агрохимического раствора, что приводит к снижению молекулярной массы и сопутствующему выделению бисфенола и диоксида углерода [11]. Данная реакция приводит к разрыву цепи, который макроскопически проявляется в виде увеличения хрупкости поверхности и "пожелтения" хрусталика. Реакцию гидролиза можно обобщить следующим образом:



Аналогичным образом полиметилметакрилат (PMMA) подвергается гидролизу по побочным группам сложного эфира ($-\text{COOCH}_3$) [12]. Воздействие агрохимикатов высокой кислотности приводит к превращению сложноэфирной группы в карбоновую, что в свою очередь приводит к выделению метанола. Это химическое превращение повышает гидрофильность поверхности полимера, способствуя поглощению воды (набуханию) и дальнейшему ускорению процесса разложения.



Было проведено теоретическое моделирование разрушения поверхности для анализа взаимодействия агрессивных химических компонентов с оптическим оборудованием. Последствия химического воздействия моделируются с использованием двух основных теоретических подходов. Скорость эрозии материала, которая имеет решающее значение для прогнозирования долговечности, теоретически моделируется с использованием кинетического подхода, основанного на уравнении Аррениуса [13]. Скорость растворения описывается следующим образом:

$$R_d = A \cdot C_a^n \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (5)$$

где R_d – скорость растворения; A – предэкспоненциальный коэффициент; C_a – концентрация действующего реагента; n – порядок реакции; E_a – энергия реакции, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – абсолютная температура, К.

Прямым следствием химической деструкции является изменение поверхности стекла, что коррелирует с ее оптическим воздействием. Результирующее увеличение шероховатости поверхности, которое является основной причиной рассеянного света и снижения качества изображения, определяется количественно с использованием теоретического среднеквадратичного значения шероховатости R_q [14]. Прогнозируемая R_q после длительного воздействия рассчитывается на основе расчетной равномерной глубины эрозии, H_{erosion} [15].

$$R_q \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2}, \quad (6)$$

где h_i – прогнозируемый профиль высоты поврежденной поверхности, м.; \bar{h} – средняя высота поверхности, м.; N – количество точек профиля.

Прогнозируемое увеличение R_q впоследствии будет использовано для оценки снижения спектральных коэффициентов пропускания в инфракрасном диапазоне (NIR), что является окончательным показателем для оценки ухудшения характеристик машинного зрения.

Основная часть. По результатам исследования агрохимических реагентов (удобрений, пестицидов, гербицидов) и их влияния на материалы систем технического зрения сформирована сводная таблица 3, позволяющая оперативно определять наиболее предпочтительные материалы для изготовления периферийных устройств СТЗ, эксплуатируемых в условиях воздействия агрохимических реагентов.

Основываясь на уравнении 5 (кинетическая модель Аррениуса), была получена теоретическая зависимость скорости деградации материала от температуры окружающей среды. График зависимости (рис. 1) показывает, как скорость разложения реагирует на температурные изменения, характерные для условий эксплуатации в условиях агропромышленного комплекса. Была показана зависимость скорости гидролитической деструкции (R_d) поликарбоната от температуры окружающей среды при воздействии щелочных реагентов (рН 10), рассчитанной с использованием модели Аррениуса. Кривая иллюстрирует экспоненциальное ускорение эрозии материала при повышении рабочей температуры сельскохозяйственной техники с 20 до 60 градусов по Цельсию.

Применяя кинетическую модель Аррениуса (уравнение 5), описанную в методике и представленную в виде зависимости на рисунке 1, следует вывод о том, что скорость растворения R_d экспоненциально возрастает с повышением температуры. В полевых условиях, когда корпуса камер могут сильно нагреваться из-за воздействия прямых солнечных лучей, энергетический барьер активации, обозначаемый E_a , преодолевается легче, что приводит к ускорению скорости травления. Данная непрерывная эрозия приводит к неравномерному разложению материала, увеличивая среднеквадратичную шероховатость (R_q), что было смоделировано уравнением 6.

Увеличение R_q оказывает существенное влияние на светопропускаемость. По мере приближения масштаба шероховатости к длине волны падающего света, т.е. когда $R_q \approx \lambda$, явление рассеяния становится преобладающим над зеркальным пропусканием, что приводит к уменьшению передаточной функции модуляции (MTF), что приводит к размытию изображения и снижению контрастности. В частности, интенсивность рассеяния (I_s) пропорциональна квадрату амплитуды шероховатости, что отражено в уравнении 7.

$$I_s \propto \left(\frac{4\pi R_q \cos \theta}{\lambda}\right)^2 \quad (7)$$

Таблица 3

Сравнительная характеристика химической стойкости материалов СТЗ

Материал в конструкции СТЗ	Основная функция	Ключевые уязвимости (типы реагентов)	Рекомендуемые условия применения (типы реагентов)	Прогнозируемый эффект при длительном воздействии
Неорганическое силикатное стекло	Защита оптических и внутренних компонентов	Высокощелочные реагенты (pH >9, e.g., NaOH): разрушают сетку Si-O-Si. Кислые реагенты (e.g., H ₂ PO ₄): ионообмен, выщелачивание. <i>Устойчиво к кислотам, кроме плавиковой.</i>	Нейтральные или слабокислые растворы. Кратковременный контакт с большинством агрохимикатов при условии оперативной очистки.	Помутнение, снижение светопропускания, образование пористого слоя, интерференционные искажения, повышенная абразивная уязвимость.
Поликарбонат (ПК)	Защита оптических компонентов (лёгкий, ударопрочный)	Щелочные реагенты: гидролиз карбонатной связи (-O-C(=O)-O-). Органические растворители: растрескивание, набухание.	Слабокислые или нейтральные среды. Избегать прямого контакта с щелочными солями и растворителями.	Пожелтение, увеличение хрупкости, растрескивание, значительная потеря оптической прозрачности.
Полиметилметакрилат (ПММА, орг-стекло)	Защита оптических компонентов (оптически прозрачный)	Кислотные реагенты: гидролиз сложноэфирной группы (-COOCH ₃). Органические растворители.	Слабощелочные или нейтральные среды. Избегать контакта с кислыми удобрениями и растворителями.	Гидролиз до карбоновой кислоты, повышение гидрофильности, набухание, помутнение.
Анодированный алюминий (Al ₂ O ₃ слой)	Корпус, крепление	Сильные кислоты и щёлочи: могут повредить оксидный слой. Соли (e.g., нитрат аммония): риск подповерхностной коррозии при повреждении слоя.	Большинство реагентов при сохранности оксидного слоя. Требуется защита от абразивного воздействия, нарушающего анодирование.	Точечная коррозия, разрушение защитного слоя, потеря внешнего вида и структурной целостности.
Нержавеющая сталь (Fe-Cr-Ni)	Корпус, силовые элементы	Хлорид-ионы (в некоторых солевых удобрениях/ПАВ): риск питтинговой коррозии. Кислые среды: общая коррозия.	Широкий спектр реагентов, особенно нейтральных и слабоагрессивных. Предпочтительный выбор для корпусов в агрессивных средах.	Появление точечной коррозии, общее потускнение поверхности.
УФ-клей (акрилаты)	Фиксация оптических элементов	Органические растворители: набухание, размягчение. Щёлочи: возможный гидролиз.	Для внутренней фиксации, защищённой от прямого контакта с реагентами. Требуется герметичного корпуса.	Потеря адгезии, размягчение или растрескивание шва, нарушение герметичности.
Силиконовый герметик (ПДМС)	Уплотнение разъёмов и стыков	Обладает высокой химической инертностью. Наименее уязвимый материал из рассмотренных.	Все типы агрохимических реагентов. Идеальный выбор для уплотнений в любых химических средах АПК.	Минимальная деградация. Сохраняет эластичность и герметизирующие свойства.

Основываясь на этой зависимости рассеяния, выводится корреляция, которая демонстрирует критическое влияние топологии поверхности на целостность сигнала (рис. 2).

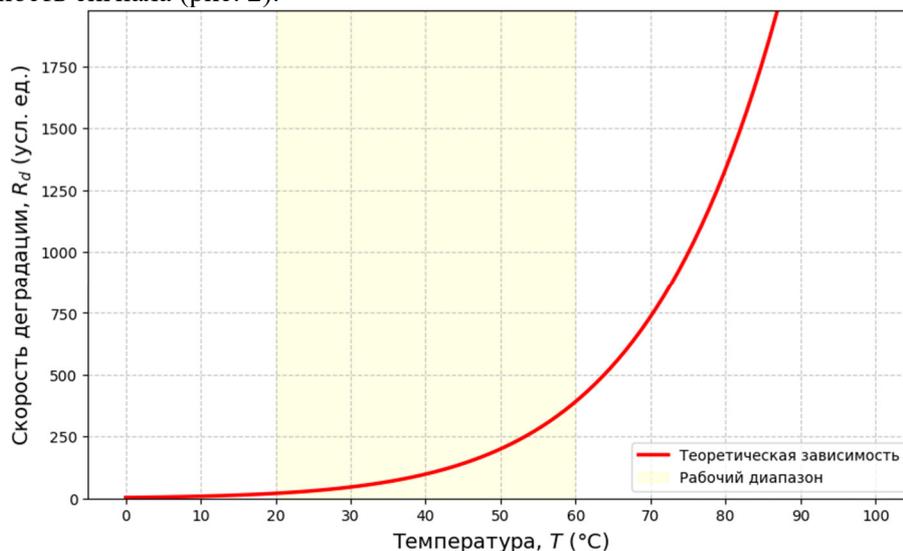


Рис. 1. Зависимость скорости деградации материала от температуры окружающей среды

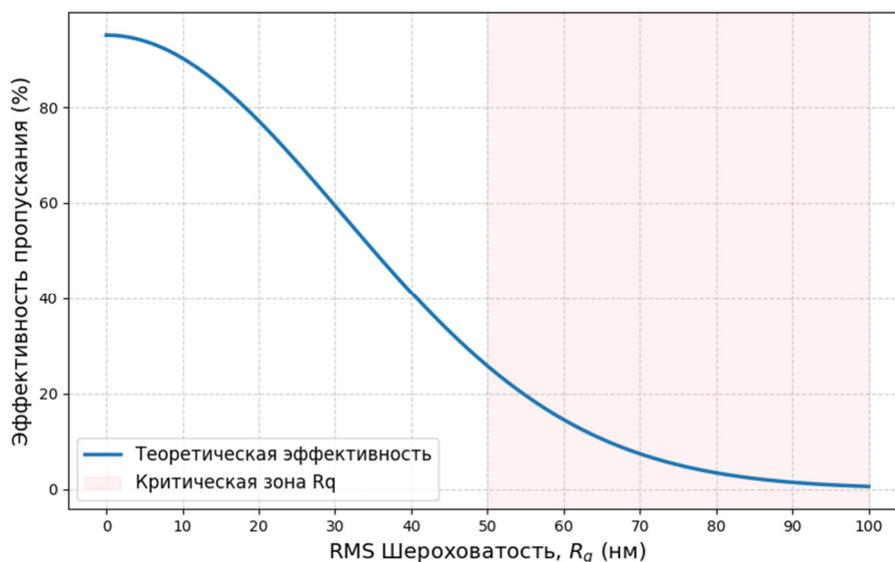


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от эффективности оптического пропускания

Была установлена следующая теоретическая корреляция: увеличение шероховатости поверхности свидетельствует об уменьшении эффективности оптического пропускания (%) в видимой области спектра ($\lambda = 550$ нм). График демонстрирует, что шероховатость, превышающая 100 нм, приводит к критической потере интенсивности света, которая падает ниже порога, необходимого для эффективного вывода нейронной сети.

Выводы. В настоящем исследовании была установлена аналитическая основа для определения несовместимости материалов путем систематической классификации ключевых агрессивных компонентов, включая регуляторы pH, органические

растворители и поверхностно-активные вещества, а также характеристики молекулярных структур распространенных оптических подложек (щелочно-силикатное стекло, поликарбонат и ПММА).

Теоретический анализ выявил два основных необратимых пути деградации:

1. В случае стекла на основе неорганических силикатов основной механизм заключается в химическом травлении и ионном выщелачивании, которые в основном осуществляются с помощью высокощелочных или кислотных реагентов. Эти реагенты разрушают структуру Si-O-Si и изменяют показатель преломления поверхности.

2. В случае оптических полимеров уязвимость связана с гидролитическим расщеплением сложноэфирных и карбонатных связей, в результате чего молекулярная масса значительно снижается и повышается хрупкость. Этот процесс еще больше осложняется наличием органических растворителей, которые способствуют образованию трещин и набуханию, вызванным растворителем.

Исследование продемонстрировало экспоненциальную зависимость скорости деградации от температуры окружающей среды, подчеркнув, что регулирование температуры является критическим фактором для продления срока службы датчиков в теплом климате. Теоретическое моделирование шероховатости поверхности продемонстрировало критическую корреляцию между среднеквадратичной шероховатостью (R_q), вызванной химической эрозией, и снижением эффективности оптического пропускания. Данная потеря зеркального отражения непосредственно соответствует существенному снижению отношения сигнал/шум и функции передачи модуляции. Следовательно, это снижает надежность и точность вывода встроенных нейронных сетей.

Обобщение результатов дает ценные, основанные на фактических данных рекомендации по выбору материалов, отдавая приоритет свойствам химической стойкости для долгосрочного использования. Это обеспечивает стабильную производительность и высокую экономическую эффективность автономных сельскохозяйственных роботизированных систем.

Благодарности. Данная статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы, реализуемой за счет средств федерального бюджета (источник финансирования – Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка программного обеспечения в интересах агропромышленного комплекса для мониторинга состояния ботвы и плодов тепличных растений с помощью машинного зрения и искусственного интеллекта» (шифр научной темы FFSM-2025-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дронина А.А., Зарипова Р.С. Возможные пути совершенствования агропромышленного комплекса с использованием сквозных технологий // Агротехника и энергообеспечение. 2022. № 4(37). С. 238–242. EDN PНKORP.
2. Захаренко В.А. Агрохимические аспекты химической безопасности пестицидов // Агрохимия. 2022. № 1. С. 50–57. DOI: 10.31857/S0002188122010112. EDN SQJYWY.
3. Акулов А.А., Омельченко Н.А., Талдыкин Д.С., Ганжа Н.М. Перспективы и эффективность применения систем машинного зрения в агропромышленном комплексе Российской Федерации // АКТУАЛЬНЫЕ проблемы СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА, науки и ОБРАЗОВАНИЯ: сборник статей II Международной научно-практической конференции, Пенза, 20 августа 2025 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2025. С. 14–19. EDN RSFSOQ.
4. Antropova N.S., Ushakova O.V. Prospects for studying tetracycline group antibiotics in the process of their accumulation in soils and translocation into plants // V international Conference "actual scientific & technical issues of chemical safety" (ASTICS-2020) : Book of Abstracts, Kazan, 06–08 октября 2020 года. Kazan: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, 2020. P. 104–105. EDN SJEUJP.
5. Свецкий А.В. Искусственный интеллект в агропромышленном комплексе: проблемы правового регулирования и перспективы использования // Сельское хозяйство. 2025. № 1. С. 24–38. DOI: 10.7256/2453-8809.2025.1.73722. EDN XHOEBD.
6. Ibadullaev A., Babaev A., Chorshanbiev U., Kurbanov S., Elmuratova L. Determination of the influence of composition modifiers based on secondary polymer materials on the corrosion of the pipeline system // Universum: технические науки. 2024. No. 1-4(118). Pp. 32–36. DOI: 10.32743/UniTech.2024.118.1.16654. EDN ONYFNJ.
7. Рожков Е.А. Параметры и режимы работы оптико-электронной установки для сортировки семян пшеницы в селекционных центрах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2024. 174 с. EDN PJVFGR.
8. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Minina Yu.S. Effect of mechanical activation of reagents on synthesis of Li-Sm ferrite // ChemChemTech. 2024. Vol. 67, No. 3. Pp. 63–72. DOI 10.6060/ivkkt.20246703.6931. EDN QXCXZU.
9. Кудрявцев Н.Г., Фролов И.Н. Практика применения компьютерного зрения и элементов машинного обучения в учебных проектах. Горно-Алтайск : Библиотечно-издательский центр Горно-Алтайского государственного университета, 2022. 180 с. EDN QFYFET.
10. Fomicheva T.A., Serenko O.A. Effect of temperature on the mechanical properties of the highly filled composites based on polypropylene and ground rubber scrap // INEOS OPEN. 2022. Vol. 5,

№. 4. Pp. 107–112. DOI 10.32931/ю2220а. EDN OQJOBW.

11. Блескин Д.И. История развития машинного зрения // Матрица научного познания. 2023. № 11-1. С. 88–94. EDN YBTTKJ.

12. Зубарев Е.Е., Пиль Э.А. Анализ современных устройств машинного зрения и ориентации автомобиля // Альманах современной науки и образования. 2012. № 3. С. 61–62. EDN OUVTSR.

13. Миннеханов Б.И. Машинное зрение // Студенческий. 2019. № 26-3(70). С. 19–21. EDN CFHMJR.

14. Садриев Р.Р. Искусственный интеллект и машинное зрение // Диспетчеризация и управ-

ление в электроэнергетике : Материалы Международной молодежной научно-практической конференции, посвященной 55-летию КГЭУ, Казань, 08–10 ноября 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. С. 604–606. EDN RTCUXA.

15. Плюхаев А.И. Подготовка обучающей выборки нейронной сетью для задач машинного зрения // ТЕХНОЛОГИИ XXI ВЕКА: ПРОБЛЕМЫ и ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ : сборник статей Международной научно-практической конференции : в 2 ч., Пенза, 13 июня 2017 года. Том Часть 2. Пенза: Общество с ограниченной ответственностью "Аэтерна", 2017. С. 57–59. EDN YRZMLP.

Информация об авторах

Карелина Мария Юрьевна, доктор технических наук, доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: karelinamu@mail.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Акулов Алексей Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: a.akulov.98@mail.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Подгорный Артем Велимирович, преподаватель кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: pavtxt@mail.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Логанов Никита Витальевич, ассистент кафедры «Детали машин и теории механизмов». E-mail: nikita.loganov.2001@yandex.ru. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Россия, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64.

Поступила 16.12.2025 г.

© Карелина М.Ю., Акулов А.А., Подгорный А.В., Логанов Н.В., 2026

Karelina M.Y., *Akulov A.A., Podgorny A.V., Loganov N.V.
Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI)
**E-mail: a.akulov.98@mail.ru*

RESISTANCE OF PERIPHERAL DEVICES OF VISION SYSTEMS TO THE APPLIED AGROCHEMICALS

Abstract. This article examines the physico-chemical degradation of the surfaces of technical vision systems used in the agro-industrial complex, as well as the reliability of computer vision systems operating in chemically aggressive environments. As autonomous agricultural machinery becomes increasingly dependent on optical data for navigation and crop monitoring, the reliability of camera interfaces under prolonged exposure to fertilizers, herbicides, and pesticides is becoming a critical engineering challenge. The study provides a detailed analysis of the interaction between the chemical components of widely used agrochemicals, with special attention paid to active ingredients, organic solvents and surfactants, as well as the housings of vision modules. The experimental basis includes a comparative assessment of the durability of materials of vision systems under controlled exposure to various concentrations of reagents. The main point of this study is the mechanisms of destruction of materials. The study correlated the duration of exposure and concentration of the reagent with quantitative indicators of optical characteristics, including loss of transmission in the visible and near-infrared spectra and an increase in surface roughness, as well as a chemical analysis of the interaction of reagents with materials of vision systems.

Keywords: precision agriculture, machine vision, chemical degradation, optical polymers, agrochemicals, sensor reliability.

REFERENCES

1. Dronina A.A., Zaripova R.S. Possible ways to improve the agro-industrial complex using end-to-end technologies [Vozmozhnye puti sovershenstvovaniya agropromyshlennogo kompleksa s ispol'zovaniem skvoznykh tekhnologij]. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2022. No. 4(37). Pp. 238–242. EDN PHKORP. (rus)
2. Zakharenko V.A. Agrochemical aspects of chemical safety of pesticides [Agrokhimicheskie aspekty khimicheskoy bezopasnosti pestitsidov]. *Agricultural Chemistry*. 2022. No. 1. Pp. 50–57. DOI: 10.31857/S0002188122010112. EDN SQJYWY. (rus)
3. Akulov A. A., Omelchenko N. A., Taldykin, D. S., Ganzha N. M. Prospects and effectiveness of using machine vision systems in the agro-industrial complex of the Russian Federation [Perspektivy i effektivnost' primeneniya sistem mashinnogo zreniya v agropromyshlennom komplekse Rossijskoj Federacii]. *ACTUAL problems of MODERN SOCIETY, SCIENCE and EDUCATION: collection of articles of the II International scientific-practical conference, Penza, August 20, 2025*. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2025. Pp. 14–19. EDN RSFSOQ. (rus)
4. Antropova N.S., Ushakova O.V. Prospects for studying tetracycline group antibiotics in the process of their accumulation in soils and translocation into plants. V International Conference "Actual Scientific & Technical Issues of Chemical Safety" (ASTICS-2020): Book of Abstracts, Kazan, October 06–08, 2020. Kazan: Federal Research Center for Chemical Physics named after N.N. Semenov of the Russian Academy of Sciences, 2020. Pp. 104–105. EDN SJEUJP.
5. Svetskij A.V. Artificial intelligence in the agro-industrial complex: problems of legal regulation and prospects of use [Iskusstvennyj intellekt v agropromyshlennom komplekse: problemy pravovogo regulirovaniya i perspektivy ispol'zovaniya]. *Sel'skoe khozyajstvo*. 2025. No. 1. Pp. 24–38. DOI 10.7256/2453-8809.2025.1.73722. EDN XHOEBD. (rus)
6. Ibadullaev A., Babaev A., Chorshanbiev U., Kurbanov S., Elmuratova L. Determination of the influence of composition modifiers based on secondary polymer materials on the corrosion of the pipeline system. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. 2024. No. 1-4(118). Pp. 32–36. DOI 10.32743/UniTech.2024.118.1.16654. EDN ONYFNJ.
7. Rozhkov E. A. Parameters and operating modes of an optoelectronic installation for sorting wheat seeds in breeding centers: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences [Parametry i rezhimy raboty optiko-elektronnoj ustanovki dlya sortirovki semyan psheicy v selekcionnyh centrakh: dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk]. 2024. 174 p. EDN PJVFGR. (rus)
8. Lysenko E.N., Surzhikov A.P., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Minina Yu.S. Effect of mechanical activation of reagents on synthesis of Li-Sm ferrite. *ChemChemTech*. 2024. Vol. 67, No. 3. Pp. 63–72. DOI 10.6060/ivkkt.20246703.6931. EDN QXCXZU.
9. Kudryavtsev N.G., Frolov I.N. The practice of using computer vision and machine learning elements in educational projects [Praktika primeneniya komp'yuternogo zreniya i elementov mashinnogo obucheniya v uchebnykh proektakh]. *Gorno-Altajsk: Bibliotechno-izdatel'skij centr Gorno-Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022. 180 p. EDN QFYFET. (rus)
10. Fomicheva T.A., Serenko O.A. Effect of temperature on the mechanical properties of the highly filled composites based on polypropylene and ground rubber scrap. *INEOS OPEN*. 2022. Vol. 5, No. 4. Pp. 107–112. DOI 10.32931/io2220a. EDN OQJOBW.
11. Bleskin D.I. History of the development of machine vision [Istoriya razvitiya mashinnogo zreniya]. *Matrica nauchnogo poznaniya*. 2023. No. 11-1. Pp. 88–94. EDN YBTTKJ. (rus)
12. Zubarev E.E., Pil' E.A. Analysis of modern devices of machine vision and vehicle orientation [Analiz sovremennykh ustrojstv mashinnogo zreniya i orientacii avtomobilya]. *Al'manakh sovremennoj nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 3. Pp. 61–62. EDN OUVTSR. (rus)
13. Minnekhanov B.I. Machine vision [Mashinnoe zrenie]. *Studencheskij*. 2019. No. 26-3(70). Pp. 19–21. EDN CFHMJR. (rus)
14. Sadriev R.R. Artificial intelligence and machine vision [Iskusstvennyj intellekt i mashinnoe zrenie]. *Dispatching and Control in Electric Power Industry: Materials of the International Youth Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of KGEU, Kazan, November 08–10, 2023*. Kazan: Kazan State Power Engineering University, 2024. Pp. 604–606. EDN RTCUXA. (rus)
15. Plyukhaev A.I. Preparation of a training dataset by a neural network for machine vision tasks [Podgotovka obuchayushchej vyborke nejronnoj set'yu dlya zadach mashinnogo zreniya]. *TECHNOLOGIES OF THE XXI CENTURY: PROBLEMS and PROSPECTS OF DEVELOPMENT: collection of articles of the International scientific and practical conference: in 2 parts, Penza, June 13, 2017*. Vol. Part 2. Penza: "Aeterna" Limited Liability Company, 2017. Pp. 57–59. EDN YRZMLP. (rus)

Information about the authors

Karelina, Maria Y., Doctor of Technical Sciences, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor. E-mail: karelinamu@mail.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Akulov, Alexey A. PhD. E-mail: a.akulov.98@mail.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Podgorny, Artyom V. Lecturer. E-mail: pavtxt@mail.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Loganov, Nikita V. Assistant of the Department, E-mail: nikita.loganov.2001@yandex.ru. Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University (MADI). 64 Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russia.

Received 16.12.2025

Для цитирования:

Карелина М.Ю., Акулов А.А., Подгорный А.В., Логанов Н.В. Стойкость периферийных устройств систем технического зрения к применяемым агрохимикатам // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-114-123

For citation:

Karelina M.Y., Akulov A.A., Podgorny A.V., Loganov N.V. Resistance of peripheral devices of vision systems to the applied agrochemicals. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 114–123. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-114-123