

Интеллектуальная управляющая система для косвенной оценки объема повреждения плодоовощной продукции

Д.Ю. Сохинов, В.А. Каргин, Е.А. Назойкин, Р.А. Кравченко

Российский биотехнологический университет

Аннотация: В статье представлена интеллектуальная управляющая система для косвенной оценки объема повреждения плодов, основанная на применении системы технического зрения и сверточной нейронной сети (СНС). Разработан алгоритм, использующий анализ площади дефектов на поверхности плода для прогнозирования объема поврежденной мякоти. Предложенный подход включает этапы захвата изображений, предобработки, сегментации повреждений с использованием СНС, регрессионной оценки объема повреждения и принятия решений на основе нечеткой логики. Описана математическая модель, связывающая площадь дефекта с объемом повреждения, учитывающая распространение гнили внутри плода. Представленная система обеспечивает оперативный и объективный контроль качества плодов, способствуя оптимизации процессов сортировки, хранения и переработки в пищевой промышленности и АПК.

Ключевые слова: интеллектуальная управляющая система, техническое зрение, автоматизация сортировки, сверточная нейронная сеть, сегментация изображений, оценка повреждений плодов, нечеткая логика.

Введение

Растениеводство, как ключевая отрасль сельского хозяйства, играет важнейшую роль в обеспечении продовольственной безопасности и формировании устойчивого развития экономики страны [1]. Особую актуальность здесь приобретает развитие специализированных направлений, ориентированных, в том числе, на производство фруктов [2]. Разработка и внедрение современных технологий их выращивания, хранения и переработки позволяет повысить урожайность, улучшить качество продукции и снизить издержки производства [3, 4].

В частности, яблоки являются ценным сырьём в пищевой промышленности благодаря высокому содержанию витаминов, органических кислот и других биологически активных веществ [5]. При этом любое механическое или микробиологическое повреждение плодов снижает их пищевую ценность и влияет на итоговые органолептические свойства

продуктов переработки. Избыточная доля дефектной мякоти в партии сырья способна привести, например, к ухудшению вкуса и цвета сока, а также увеличивает риск попадания нежелательных примесей и микроорганизмов в конечный продукт.

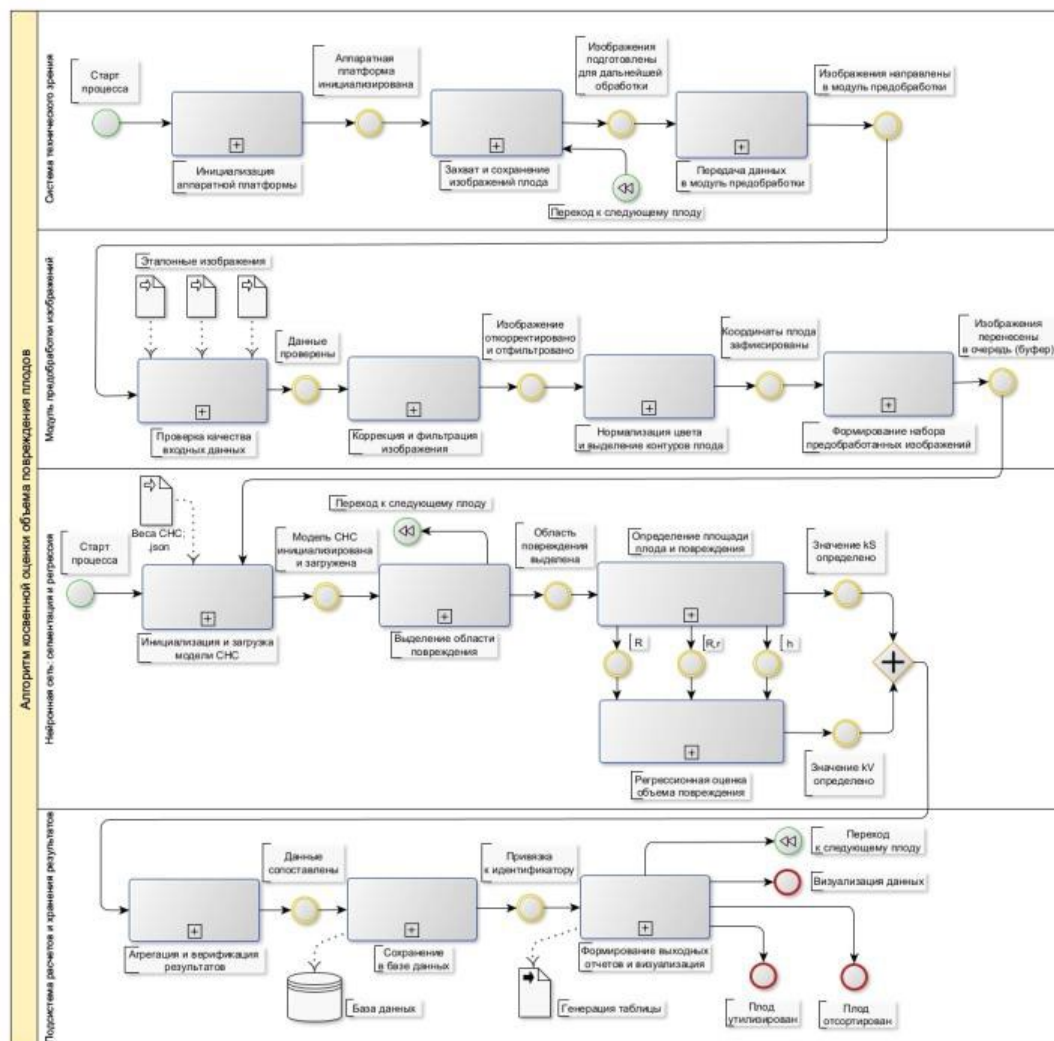


Рис. 1. - Алгоритм косвенной оценки объема повреждения плода в зависимости от площади дефекта

Традиционные подходы к визуальному осмотру плодов, основанные на субъективных экспертных оценках, ограничены по скорости и точности. Вследствие человеческого фактора существует риск пропуска дефектов или, напротив, избыточного отбраковывания пригодного сырья. Широкое внедрение автоматизированных систем технического зрения даёт

возможность более объективно оценивать состояние плодов в режиме реального времени, объединяя высокую производительность машинных алгоритмов с минимальным влиянием человеческого фактора [6, 7].

Разработка алгоритма оценки площади повреждения плода, например, гнилью, и корреляция её с ожидаемым объёмом непригодной к переработке мякоти, позволяет осуществлять рациональное планирование сортировки, хранение, переработку и смешение партий сырья, минимизируя потери и повышая экономическую эффективность производства. Такие алгоритмы способны более точно прогнозировать выход готовой продукции, своевременно принимать решения о целесообразности дальнейших операций, например, использование повреждённых яблок для производства пюре или добавок, если сок из них получить нецелесообразно, что в конечном итоге приводит к снижению себестоимости и оптимизации ресурсопотребления.

Таким образом, повышение оперативности и точности контроля степени повреждения плодов при автоматизированной сортировке представляется актуальной задачей.

Цель исследования

Разработать подход к косвенной оценке объема повреждения плодов с помощью системы технического зрения и сверточной нейронной сети.

Материалы и методы

На рис. 1 приведена визуализация алгоритма косвенной оценки объема повреждения плода в зависимости от площади дефекта.

Предложенный алгоритм (рис. 1), основанный на анализе площади поврежденной поверхности, представляет собой многоступенчатый процесс, интегрирующий систему технического зрения, модуль предобработки изображений, нейронные сети для сегментации и регрессии, а также подсистему хранения и визуализации результатов. Процесс организован в

соответствии с принципами BPMN, где ключевые функциональные блоки представлены в виде отдельных дорожек внутри единого пула [8-10].

Система технического зрения отвечает за первичный захват визуальной информации [7, 11, 12]. Инициализация аппаратной платформы предполагает настройку камер для получения оптимального разрешения и частоты кадров, а также калибровку системы освещения для обеспечения равномерности и исключения артефактов (рис. 2, а).

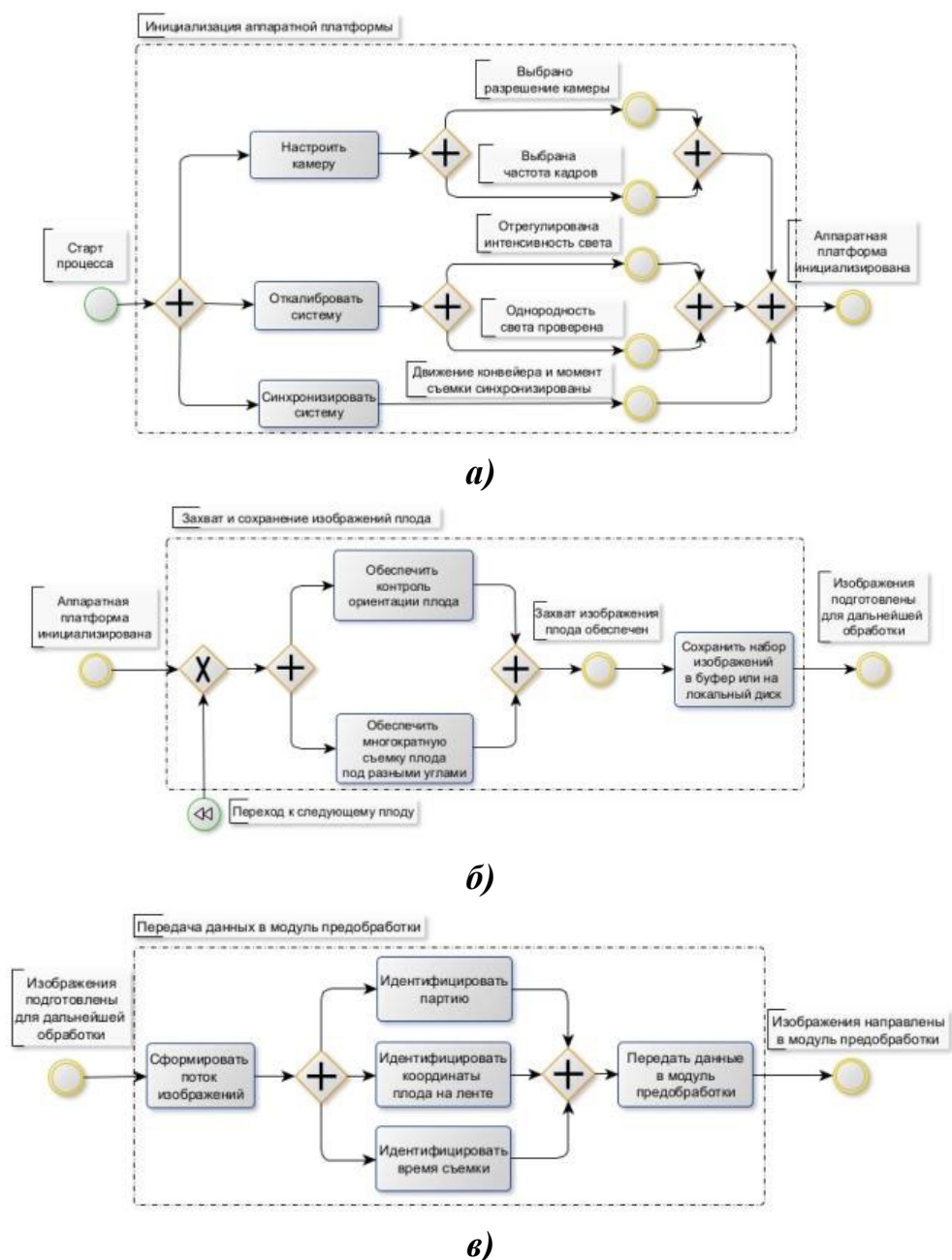


Рис. 2. - Подзадачи дорожки «Система технического зрения»

На этапе захвата изображения плода проводится контроль ориентации яблока (рис. 2, б). Многократная съемка под разными углами позволяет получить объемную реконструкцию и более точную оценку площади повреждения. Полученный набор изображений сохраняется в буфер или на локальный диск для дальнейшей обработки [13]. Завершающим этапом этой дорожки является передача данных в модуль предобработки, где формируется структурированный поток изображений, включающий идентификатор партии, координаты яблока на ленте и время съемки (рис. 2, в).

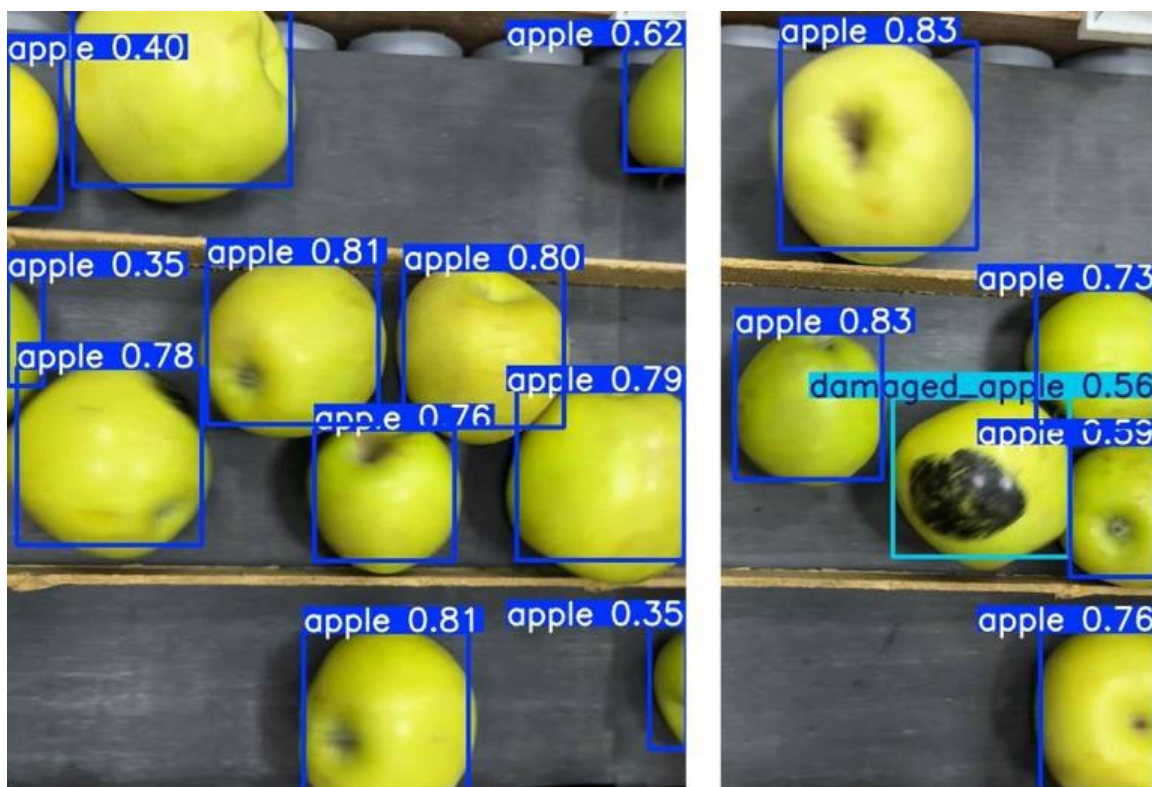


Рис. 3. - Результат работы системы технического зрения и модуля предобработки

Модуль предобработки изображений осуществляет подготовку полученных изображений для последующего анализа нейронными сетями. Первоначально проводится проверка качества входных данных, включающая анализ метаданных изображений и отбраковку кадров, не соответствующих

установленным критериям, например, слишком темные или размытые. Далее применяются методы коррекции и фильтрации для улучшения качества изображений. Для облегчения выделения дефектов проводится нормализация цвета и выделение контуров яблока. При необходимости осуществляется преобразование цветовой модели, а также выполняется поиск и фиксирование координат границ плода. Подготовленные изображения сохраняются во временное хранилище и передаются в очередь для обработки нейронной сетью. Результат работы системы технического зрения и модуля предобработки показан на рис. 3.

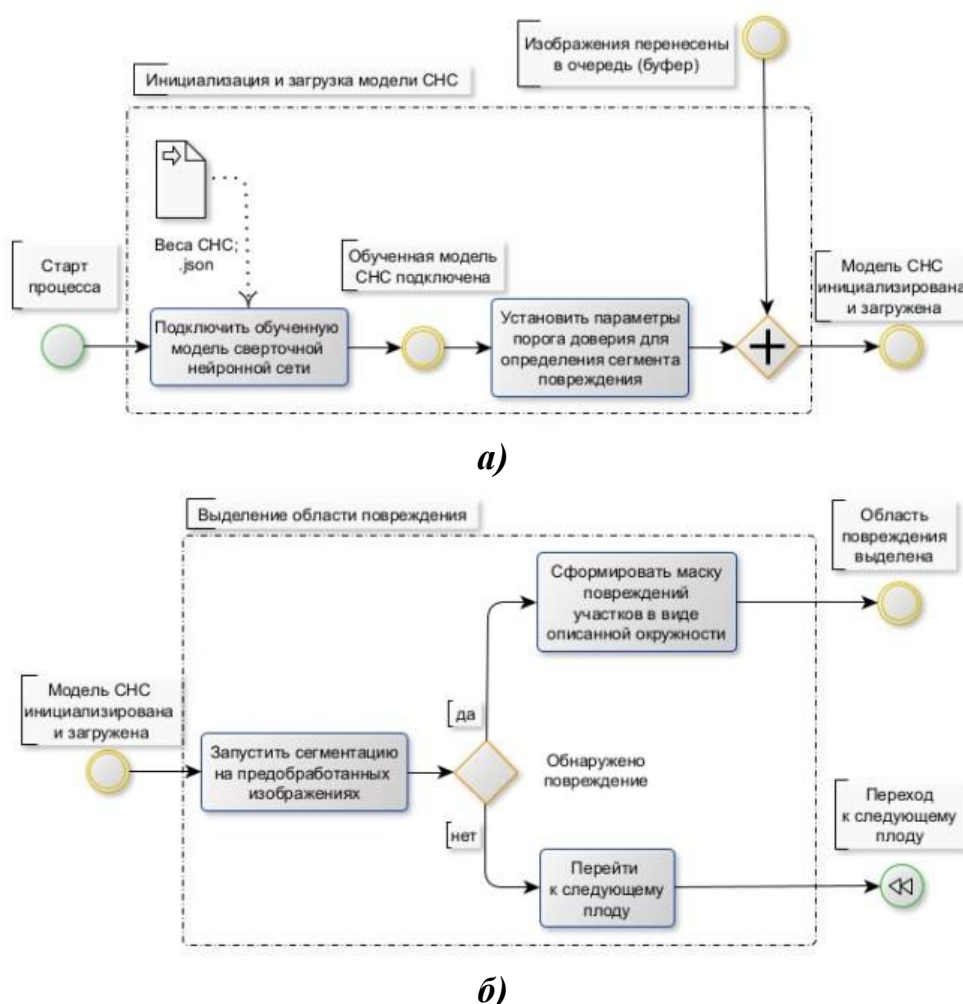


Рис. 4. - Алгоритмы реализации подзадач «Инициализация и загрузка модели СНС» (а) и «Выделение области повреждения» (б)

Сверточная нейронная сеть (СНС) реализует ключевой этап анализа – сегментацию повреждений и оценку их объема [14]. Первоначально происходит инициализация и загрузка предварительно обученной модели сегментации повреждений, например, YOLO. Устанавливаются параметры порога доверия для определения сегмента дефекта (рис. 4, а).

На этапе выделения областей повреждений запускается сегментация на каждом предобработанном изображении, формируется маска поврежденных участков и проводится опциональная постобработка для удаления ложных срабатываний и сглаживания контуров (рис. 4, б). Результат работы данной подзадачи представлен на рис. 5.

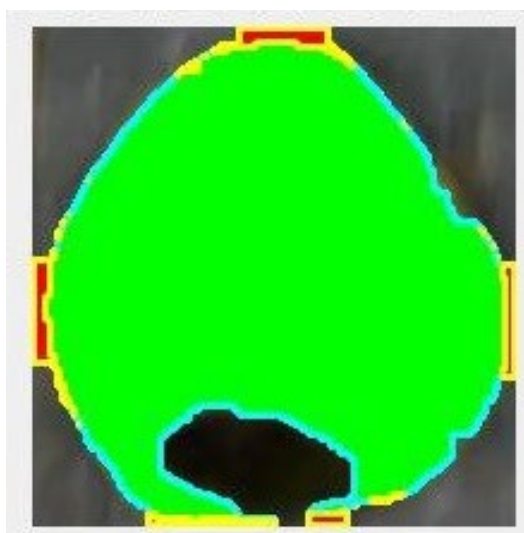


Рис. 5. - Результат работы подзадачи «Выделение области повреждения»

Результаты и обсуждение.

Задача регрессионного блока связать площадь повреждения с предполагаемым объемом, опираясь на эмпирические данные распространения заболевания внутри плода:

$$k_V = f(k_S), \quad (1)$$

где k_V , k_S – относительный объем и площадь повреждения.

$$k_S = \frac{S_{\text{повр}}}{S_{\text{ябл}}}, \quad (2)$$

$$k_V = \frac{V_{\text{повр}}}{V_{\text{ябл}}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{повр}}$, $V_{\text{повр}}$ – площадь и объем повреждения; $S_{\text{ябл}}$, $V_{\text{ябл}}$ – площадь и объем плода.

Рассмотрим реализацию алгоритма косвенной оценки объема повреждения плода гнилью в зависимости от площади дефекта (рис. 6).

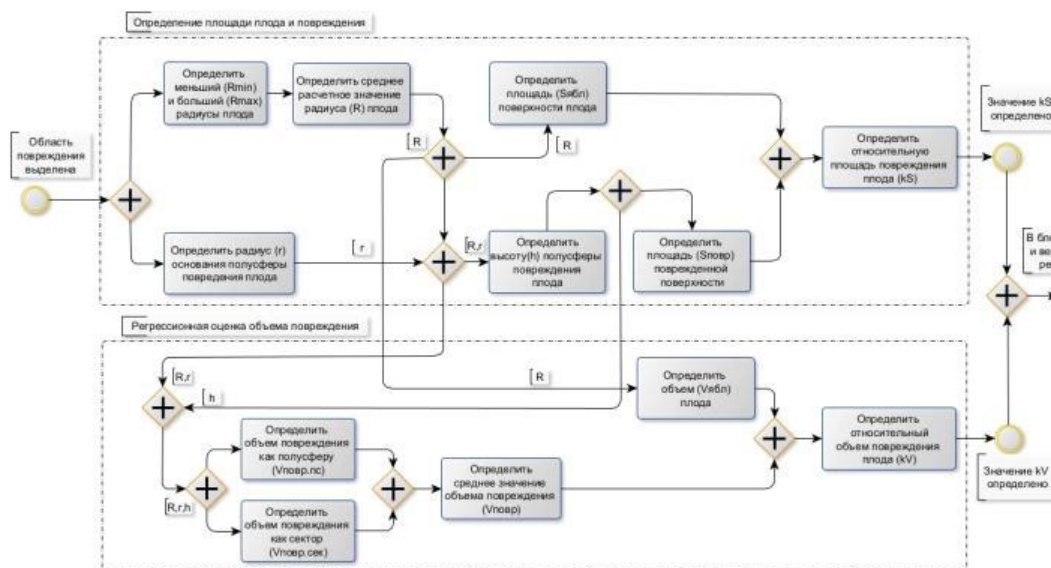


Рис. 6. - Реализация подзадач для определения площади плода и повреждения и регрессионной оценки объема повреждения

Для определения значений k_V , k_S введем ряд условий и ограничений. В частности, для оценки порядка величины дефекта аппроксимация плода в виде сферы и повреждения в виде полусферы представляется достаточным. Данный подход выбран в связи с необходимостью анализа большого количества образцов и упрощения алгоритма косвенной оценки.

С учетом допущений определим площадь поверхности $S_{\text{ябл}}$ и объем $V_{\text{ябл}}$ плода 2 (рис. 7):

$$S_{\text{ябл}} = 4\pi R^2, \quad (4)$$

$$V_{\text{ябл}} = \frac{4}{3}\pi R^3, \quad (5)$$

где $R = \frac{R_{\min} + R_{\max}}{2}$ – среднее расчетное значение радиуса плода; $R_{\min}$, $R_{\max}$ – меньший и больший измеренные радиусы плода.

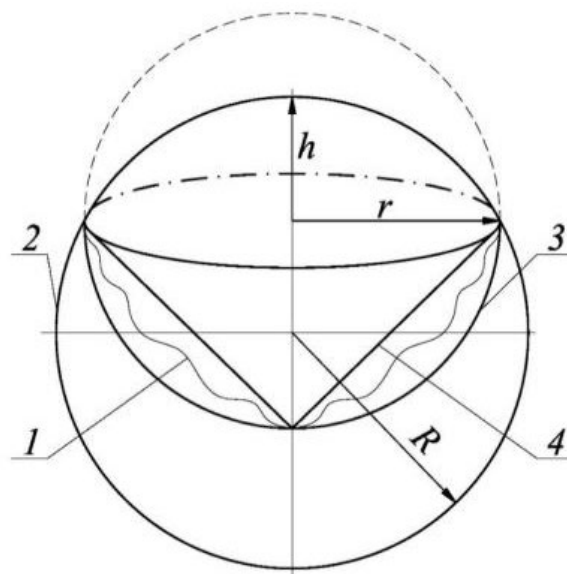


Рис. 7. - К расчету степени повреждения плода

Определим площадь повреждения $S_{\text{повр}}$ с учетом ее аппроксимации в виде полусферы (рис. 7):

$$S_{\text{повр}} = \pi(r^2 + h^2), \quad (6)$$

где r – радиус основания повреждения, $h = R - \sqrt{R^2 - r^2}$ – высота полусферы.

С учетом эмпирических данных о распространении гнили внутри плода определим объем повреждения 1 (рис. 7):

$$V_{\text{повр}} = \frac{V_{\text{повр}}^{\text{пс}} + V_{\text{повр}}^{\text{сек}}}{2}, \quad (7)$$

где $V_{\text{повр}}^{\text{пс}}$, $V_{\text{повр}}^{\text{сек}}$ – распространение гнили в виде полусферы 3 и сектора 4 (рис. 7).

$$V_{\text{повр}}^{\text{пс}} = \frac{2}{3}\pi r^3 + \pi h^2 \left(R - \frac{h}{3} \right), \quad (8)$$

$$V_{\text{повр}}^{\text{сек}} = \frac{2}{3}\pi r^2 h - \pi h^2 \left(r - \frac{h}{2} \right) + \pi h^2 \left(R - \frac{h}{2} \right). \quad (9)$$

С учетом (4)–(9) на рис. 8 представлена зависимость (1). Точками показаны эмпирические данные зависимости относительного объема гнили от площади повреждения.

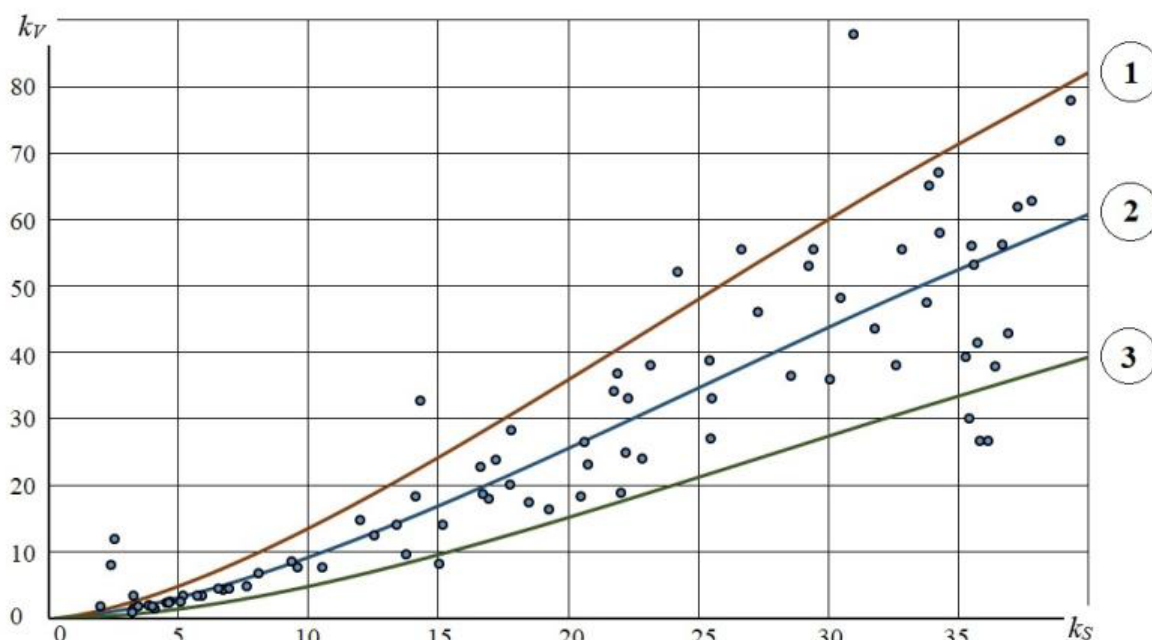


Рис. 8. - Аппроксимирующие диаграммы зависимости $k_v=f(k_s)$

Аппроксимирующие диаграммы 1, 2, 3 (рис. 8) характеризуют данные, рассчитанные соответственно по $V_{\text{повр}}^{\text{пс}}$, $V_{\text{повр}}$, $V_{\text{повр}}^{\text{сек}}$. Их анализ показывает, что среднее значение $V_{\text{повр}}$ наилучшим образом описывает реальный объем повреждения плода гнилью в зависимости от площади дефекта.

Подсистема расчетов и хранения результатов отвечает за агрегацию, верификацию, хранение и визуализацию полученных результатов. Здесь осуществляется прием данных о площади и объеме повреждения, представляющие собой численные значения и требующие интерпретацию для определения степени пригодности плодов к дальнейшей переработке. Использование четких пороговых значений может оказаться недостаточно эффективным, так как незначительное превышение установленного порога

может привести к отбраковке плода, который, по сути, пригоден для переработки.

Для решения этой проблемы предлагается использовать нечеткую логику для определения соответствия яблок по степени повреждения той или иной группе. Такой подход позволяет моделировать неопределенность и субъективность в оценке, что особенно актуально при работе с биологическими объектами, такими как яблоки, характеристики которых могут варьироваться в зависимости от сорта, условий выращивания и хранения.

На этапе фазификации численные значения площади и объема повреждения преобразуются в нечеткие значения, используя функции принадлежности, которая подбирается эмпирически или на основании экспертных оценок. Далее применяются правила нечеткого вывода, основанные на знаниях о взаимосвязи площади и объема повреждения со степенью пригодности яблока.

На этапе дефазификации нечеткое значение степени повреждения преобразуется в четкое значение, представляющее собой интегральную оценку степени повреждения, которая сопоставляется с внутренними пороговыми значениями для определения соответствия плода установленным стандартам, например, для отбраковки. Результаты записываются в базу данных с привязкой к идентификатору конкретного яблока или партии.

На этапе формирования выходных отчетов и визуализации генерируются сводные таблицы степени повреждения, подаются сигналы на автоматизированную систему сортировки, и отображаются результаты на терминале оператора.

Заключение

Таким образом, представленный алгоритм совместно с иллюстрацией в формате BPMN обеспечивает детализированный и сложный процесс оценки

внутреннего объема повреждения плодов гнилью на базе внешнего анализа, не требующий разрушения плода. Использование нечеткой логики для классификации плодов обеспечивает гибкость и адаптивность системы к различным требованиям и стандартам.

Данный подход повышает производительность и объективность контроля качества, позволяя предприятиям пищевой промышленности и аграрного сектора оптимизировать процесс сортировки и оперативно принимать решения, связанные с хранением и переработкой фруктов.

Список литературы

1. Милонова М.В., Астапенко А.А. Влияние санкций на агропромышленный комплекс России // Международная торговля и торговая политика. 2023. Т. 9. № 3. С. 127–133. DOI: 10.21686/2410-7395-2023-3-127-133. EDN: GMPGGF.
2. Дубовицкий А.А., Климентова Э.А., Григорьева Л.В. Анализ современного состояния отрасли садоводства в России и перспективы развития на основе реализации рыночного потенциала // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15. № 4(75). С. 124–138. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_124. EDN: GKOJZL.
3. Панин А.В., Тимохин Д.В., Головина Л.А., Логачева О.В. Цифровая индустрия и цифровые возможности в АПК: состояние, потенциал и тренды // Экономика сельского хозяйства России. 2021. № 11. С. 26–31. DOI: 10.32651/2111-26. EDN: ENVGNR.
4. Эпштейн Д.Б. О развитии АПК на основе цифровой трансформации // Российский экономический журнал. 2023. № 5. С. 46–62. DOI: 10.52210/0130-9757_2023_5_46. EDN: TUNQSH.
5. Lu Y., Lu R. Development of a multispectral Structured Illumination Reflectance Imaging (SIRI) system and its application to bruise detection of apples

// Transactions of the ASABE. 2017. Vol. 60. № 4. P. 1379–1389. DOI: 10.13031/trans.12158.

6. Абделхамид М.А., Судник Ю.А. Технологические методы оценки зрелости томатов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67. № 2(39). С. 93–98. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-2-93-98. EDN: DNKQEO.

7. Каргин В.А., Сохинов Д.Ю., Усанов К.М., Мокрушин С.А., Кротов И.В. Интеллектуальная автоматизированная система управления сортировкой фруктов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71. № 2(55). С. 100–106. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-100-106. EDN: GQEBAB.

8. Kopp A., Orlovskyi D. An approach to BPMN based business process models analysis and optimization // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2018. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-12.

9. Dijkman R.M., Dumas M., Ouyang C. Semantics and analysis of business process models in BPMN // Information and Software Technology. 2008. Vol. 50. № 12. P. 1281–1294. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.02.006.

10. Каргин В.А., Мокрушин С.А., Соловьев Д.А., Стрельников В.А. Методика представления алгоритмов управления насосной установкой в теплице в виде нотации BPMN // Аграрный научный журнал. 2024. № 11. С. 134–141. DOI: 10.28983/asj.y2024i11pp134-141. EDN: EKQTVE.

11. Boikov A.V., Payor V.A., Savelev R.V. Technical vision system for analysing the mechanical characteristics of bulk materials // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. Ser. 944 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012021.

12. Скворцов А. А., Анурьева М. С., Солодовников А. Н. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования отказов и

адаптивного управления производственными системами // Инженерный вестник Дона, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10059

13. Vidnerova P., Neruda R. Evolving Keras Architectures for Sensor Data Analysis // Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. ACSIS. 2017. Vol. 11. pp. 109–112. DOI: 10.15439/2017F241.

14. Казначеева И. А., Власенко А. В. Разработка алгоритма распознавания изображений для автоматизированной системы контроля дефектов стеклоткани на основе методов машинного обучения // Инженерный вестник Дона, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10058

References

1. Milonova M.V., Astapenko A.A. Mezhdunarodnaya trgovlya i trgovaya politika. 2023. V. 9. № 3. pp. 127–133. DOI: 10.21686/2410-7395-2023-3-127-133.

2. Dubovitskiy A.A., Klimentova E.A., Grigoryeva L.V. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022. V. 15. № 4(75). pp. 124–138. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_4_124.

3. Panin A.V., Timokhin D.V., Golovina L.A., Logacheva O.V. Ekonomika sel'skogo hozyaistva Rossii. 2021. № 11. pp. 26–31. DOI: 10.32651/2111-26.

4. Epstein D.B. Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal. 2023. № 5. pp. 46–62. DOI: 10.52210/0130-9757_2023_5_46.

5. Lu Y., Lu R. Transactions of the ASABE. 2017. Vol. 60. № 4. pp. 1379–1389. DOI: 10.13031/trans.12158.

6. Abdelhamid M.A., Sudnik Yu.A. Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2020. V. 67. № 2(39). pp. 93–98. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-2-93-98.

7. Kargin V.A., Sokhinov D.Yu., Usanov K.M., Mokrushin S.A., Krotov I.V. Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2024. V. 71. № 2(55). pp. 100–106. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-2-100-106.
8. Kopp A., Orlovskiy D. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2018. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-2-12.
9. Dijkman R.M., Dumas M., Ouyang C. Information and Software Technology. 2008. Vol. 50. № 12. pp. 1281–1294. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.02.006.
10. Kargin V.A., Mokrushin S.A., Solovyev D.A., Strelnikov V.A. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2024. № 11. pp. 134–141. DOI: 10.28983/asj.y2024i11pp134-141.
11. Boikov A.V., Payor V.A., Savelev R.V. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. Ser. 944 012021. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012021.
12. Skvortsov A.A., Anureva M.S., Solodovnikov A.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10059
13. Vidnerova P., Neruda R. Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems. ACSIS. 2017. Vol. 11. pp. 109–112. DOI: 10.15439/2017F241.
14. Kaznacheeva I.A., Vlasenko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2025, №5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10058.

Дата поступления: 6.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025