

Сортировка сахарной свёклы с применением машинного зрения как способ повышения сохранности свеклосахарного сырья^S

А. И. ЗАВРАЖНОВ, д-р техн. наук, проф., академик РАН

ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

С. М. КОЛЬЦОВ (e-mail: smkoltsov@yandex.ru)

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Введение

Обеспечение сохранности свеклосахарного сырья является важной задачей, в которую входят вопросы, относящиеся к хранению, логистике, а также к определению оптимальных параметров корнеплодов сахарной свёклы.

При сравнении результатов хранения в полевых, оперативных и вентилируемых кагатах сроком более двух месяцев установлено, что наилучшая сохранность сахарной свёклы обеспечивается в кагатах, оснащённых системой активной вентиляции. Помимо поддержания оптимального температурного режима хранения одним из преимуществ вентилируемого кагата являются его увеличенные габаритные размеры. Благодаря этому соотношение массы насыпи к её поверхности, соприкасающейся с окружающей средой, составляет 1,05–1,35, в то время как у полевых кагатов – 0,35–0,42. При этом внешний слой насыпи, который подвержен влиянию окружающей среды, в полевых кагатах может достигать 77 %, тогда как в вентилируемых он составляет от 13 до 31 % от общей массы насыпи [1]. Сохранность свеклосахарного сырья при длительном хранении во многом зависит от исходного качества корнеплодов, сортового состава, состояния полей возделывания [2]. Тем не менее остаётся малоизученным вопрос влияния крупности сахарной свёклы при длительном хранении.

Удельная поверхность сахарной свёклы

В ходе проведения исследований в производственном сезоне 2021/22 г. было установлено, что в зависимости от крупности свёклы средняя продолжительность работы на отдельных вентиляционных ветвях отличается. Система активной вентиляции кагата состояла из 16 вентиляционных ветвей, на каждую из которых приходился фрагмент кагата массой 490 т свеклосахарного сырья. Вентиляционные ветви работают независимо друг от друга, и они не оказывают существенного влияния на соседние фрагменты кагата [3]. Период формирования вентилируемого кагата составил 8 суток. Крупность свёклы в начале и в конце формирования кагата сильно отличалась.

Для формирования одного фрагмента кагата совершалась разгрузка от 15 до 18 большегрузных

автомашин с прицепами. При определении крупности сахарной свёклы осуществлялся отбор проб из каждой третьей автомашины. Каждая проба включала в себя не менее 10 корнеплодов сахарной свёклы. Определение среднего веса корнеплода осуществлялось по общепринятой методике.

Результаты исследований для первых и последних четырёх фрагментов вентилируемого кагата приведены в табл. 1.

Из данных, приведённых в таблице, следует, что во фрагментах, состоящих из сахарной свёклы со средним весом 210–270 г, продолжительность работы вентиляторов составляла 150–162 часов, а во фрагментах, состоящих из сахарной свёклы со средним весом 530–590 г – всего 117–125 часов [4].

Таким образом, если на длительное хранение поступила не крупная сахарная свёкла, то среднесуточная продолжительность работы

Таблица 1. Продолжительность работы системы вентиляции в зависимости от крупности сахарной свёклы

Показатель	Фрагмент кагата							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 13	№ 14	№ 15	№ 16
Средний вес корнеплода сахарной свёклы, г	223	256	234	267	585	552	533	571
Продолжительность хранения, сутки	85	85	84	84	80	80	79	79
Продолжительность работы вентилятора за период хранения, ч	150	156	162	159	122	125	117	120

^S Выбор спонсора научных публикаций осуществляется по усмотрению редакции, любая взаимосвязь между видами деятельности спонсора и результатами научной работы исключается

вентилятора увеличивается на 19 %. Необходимо отметить, что вся сахарная свёкла, поступившая на длительное хранение вне зависимости от крупности, относилась к I категории.

При исследовании причин увеличения среднесуточной продолжительности работы вентилятора было произведено 3D-моделирование корнеплодов сахарной свёклы разного веса. Установлено, что при повышении массы корнеплода изменяется его удельная поверхность – отношение общей площади поверхности к массе корнеплода сахарной свёклы, который называется удельной поверхностью. Изменение параметров сахарной свёклы в зависимости от её крупности приведено в табл. 2.

На рис. 1 представлено изменение удельной поверхности в зависимости от массы корнеплода сахарной свёклы. Из графика следует, что чем больше масса корнеплода сахарной свёклы, тем меньше его удельная поверхность.

Крупная сахарная свёкла имеет более высокую инерционность, иными словами, она менее подвержена влиянию внешних факторов окружающей среды, которые приводят к изменению её температуры.

Наибольшее значение удельной поверхности (1,01 см²/г) у свёклы массой 130 г. Значимое снижение удельной поверхности до 0,7 см²/г происходит при увеличении массы корнеплода до 360 г. При достижении массы 560 г удельная поверх-

ность снижается до 0,6 см²/г, а при дальнейшем увеличении массы корнеплода удельная поверхность изменяется незначительно. Для определения $F_{уд}$ удельной поверхности в зависимости от массы корнеплода сахарной свёклы предлагается следующее уравнение:

$$F_{уд} = 0,808 \cdot e^{-0,004 \cdot M_{св}} + 0,509,$$

где $M_{св}$ – масса корнеплода сахарной свёклы.

При определении критерия крупности корнеплодов сахарной свёклы, предназначенных для хранения, предлагается учитывать значение удельной поверхности

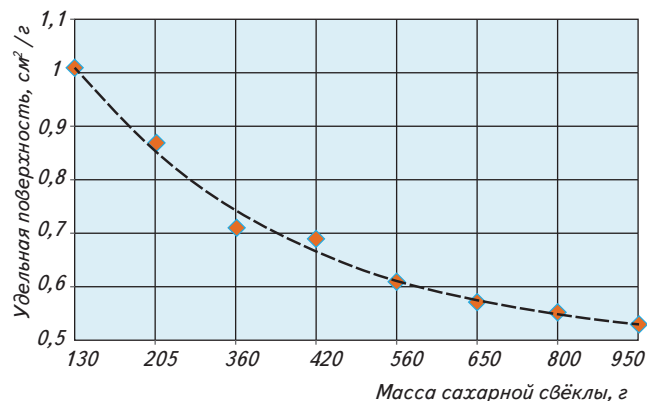


Рис. 1. Изменение удельной поверхности в зависимости от массы сахарной свёклы

корнеплодов. Исходя из графика, представленного на рис. 1, при хранении к мелкой свёкле предлагается относить корнеплоды массой менее 360 г, к свёкле средней крупности – 360–560 г, а к крупной – от 560 г.

Величина удельной поверхности сахарной свёклы влияет на повышение себестоимости затрат при транспортировке свекловичного сырья с полей возделывания на свеклопункт, а также на повышение рисков из-за увеличения потерь при хранении в кагатах.

Одним из факторов, влияющих на себестоимость затрат при транспортировке сахарной свёклы, является загрязнённость корнеплодов. Высокая степень загрязнённости в процессе уборки невыгодна как для сахарного завода, так и для грузоперевозчика: снижается стоимость рейса, но возрастает их общее количество. Учитывая, что

период привлечения грузоперевозчиков на уборку сахарной свёклы совпадает с периодом уборки других сельскохозяйственных культур, в ряде случаев может наблюдаться дефицит большегрузных автомашин на перевозке свекловичного сырья. Однако при планировании графика переработки сахарной свёклы не учитыва-

ется, что на соотношение массы свекловичного сырья к остаткам почвы оказывает влияние такой параметр, как удельная поверхность. Поскольку у мелкой свёклы соотношение площади поверхности корнеплода к его массе наибольшее, то и загрязнённость насыпи из такой свёклы будет выше, чем из более крупных корнеплодов. Иными словами, загрязнённость мелкой сахарной свёклы всегда будет выше, чем у крупной при прочих равных условиях.

При хранении мелкой сахарной свёклы с высокими значениями параметра удельной поверхности повышается риск образования локальных очагов самосогревания

Таблица 2. Изменение параметров сахарной свёклы в зависимости от её крупности

Длина, см	11	13	15	18	16	17	22	23
Обхват шейки корнеплода, см	18	20	24	25,5	31,5	32	28	34
Площадь поверхности корнеплода, см ²	132	179	256	293	341	371	443	504
Масса сахарной свёклы, г	130	205	360	420	560	650	800	950
Удельная поверхность, см ² /г	1,01	0,87	0,71	0,69	0,61	0,57	0,55	0,53

при хранении в кагатах. Эффективность хранения во многом зависит от конвекции воздушных масс. Вне зависимости от типа конвекции естественной (в полевых кагатах) или принудительной (в кагатах, оснащённых системой активной вентиляции) движение воздушных масс в межкорневом пространстве кагата позволяет отводить избыточную теплоту. Естественная конвекция в отличие от принудительной является неконтролируемым процессом, который приводит к повышенным потерям в полевых кагатах – 11–16 % при длительности хранения от двух месяцев. За этот же период хранения потери в кагатах системой активной вентиляции составляют 3–5 % [5].

Насыпная плотность сахарной свёклы в зависимости от крупности корнеплодов изменяется незначительно, а соответственно и объём межкорневого пространства. Однако в кагате, сформированном из мелкой свёклы, увеличивается количество межкорневых воздушных каналов за счёт уменьшения их проходного сечения. Учитывая, что загрязнённость мелкой сахарной свёклы выше, чем крупной, увеличивается вероятность перекрытия части межкорневых каналов с последующим образованием застойных зон, в которых будут образовываться локальные очаги самосогревания. Риск образования застойных зон возрастает также после усадки кагата, в процессе которого объём межкорневого пространства уменьшается.

Сортировка свеклосахарного сырья позволит обеспечить сохранность корнеплодов при длительном хранении за счёт распределения большегрузных автомашин, поступающих на свеклопункт либо на разгрузку с дальнейшим хранением, либо в переработку в зависимости от крупности сахарной свёклы.

Особенности сортировки свеклосахарного сырья

Объём приёмки сахарной свёклы на свеклопункт в среднем составляет от 3 до 10 тыс. т в сутки в зависимости от производительности сахарного завода. Чтобы обеспечить необходимый подвоз свёклы, большегрузные автомашины совершают около 100–400 рейсов с полей возделывания на завод. Ввиду ограниченного периода уборки сахарной свёклы, а также больших объёмов приёмки для переработки и хранения свеклосахарного сырья типовые методы сортировки по фракциям, которые применяются в овощехранилищах, не подходят для применения в свеклосахарной отрасли в связи с низкой производительностью. Для свеклопункта перспективным решением является определение соотношения крупных и мелких корнеплодов сахарной свёклы в кузове большегрузной автомашины при остановке на браковке, весовой или сырьевой лаборатории с помощью машинного зрения. Машинное зрение – это технология создания машин, которые могут производить обнаружение, отслеживание и классификацию объектов. Её применение позволяет распознавать на поверхности насыпи в кузове автомашины отдельные корнеплоды и определять их размер. В зависимости от соотношения крупных и мелких корнеплодов система технического зрения направляет автомашину для разгрузки на хранение или в переработку [6].

Данный способ имеет преимущества и недостатки. С одной стороны, анализ поверхности насыпи в кузове автомашины может иметь погрешность измерений, а способ сортировки автомашин не подразумевает разделение сырья на фракции, из-за чего часть мелкой свёклы всё равно попадает на хранение. С другой стороны, сортировка машинным зрением

позволяет определять соотношение крупных и мелких корнеплодов и при необходимости отбраковывать автомашины, направляя их сразу для разгрузки в переработку. Применение этого способа сортировки сахарной свёклы не приводит к увеличению времени простоя, так как может выполняться параллельно с другими технологическими операциями. Погрешность измерений нивелируется за счёт высокой частоты их проведения: если отбор и анализ проб в сырьевой лаборатории производится на одной из 3–5 автомашин, то сортировка сахарной свёклы машинным зрением производится на каждой автомашине.

Особенности работы технического зрения на поверхности насыпи сахарной свёклы в кузове автомашины

Машинное зрение было внедрено на сахарном заводе Тамбовской области как инструмент для определения следующих параметров: загрязнённости, сколов, наличия зелёной массы и подмороженных корнеплодов в насыпи кузова автомашины [7]. Данное машинное зрение рассматривалось в качестве прототипа.

В настоящее время этот прототип используется преимущественно для определения зелёной массы и сколов на корнеплодах. При решении других задач разработанное решение имело высокую степень погрешности. В случае разработки машинного зрения для сортировки сахарной свёклы были проанализированы и учтены наиболее существенные факторы, влияющие на адекватность системы распознавания объектов.

1. Освещение насыпи. Одним из факторов, влияющих на степень достоверности анализа машинного зрения, является уровень освещённости насыпи свёклы. В течение рабочей смены естественное освещение нестабильно,

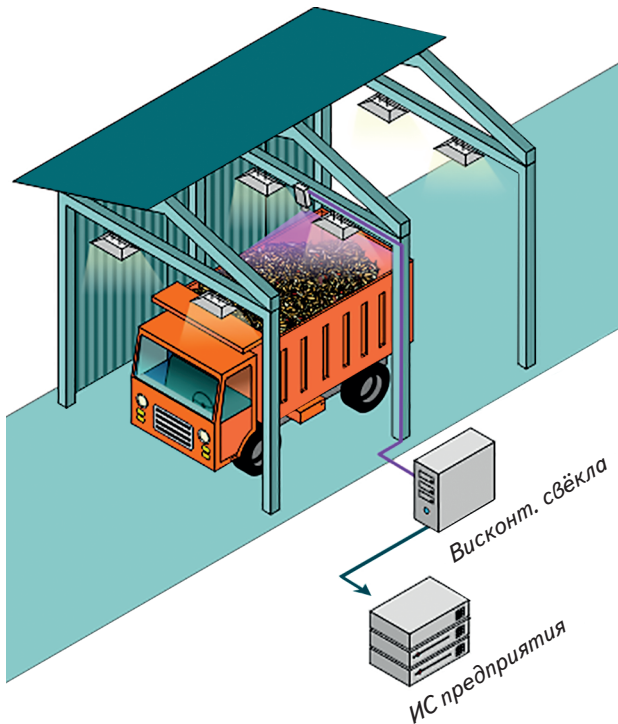


Рис. 2. Принципиальная схема работы системы машинного зрения для оценки качества сахарной свёклы на этапе приёма

что может приводить к искажению результатов. Для снижения влияния данного фактора применяется искусственное освещение, как показано на рис. 2. Большегрузная автомашина при анализе встает под навес, что позволяет нивелировать часть естественного освещения. Однако в наиболее активный период, когда солнце находится в зените, активность естественного освещения может достигать 1020 Вт/м². В то же время мощность промышленных прожекторов в большинстве случаев составляет 50–300 Вт. Для обеспечения корректной работы машинного зрения необходимо понизить уровень освещенности в зоне фотосъёмки до значений искусственного освещения.

2. Оттенки насыпи. В зависимости от типа почвы, размера корнеплода и метеорологических условий изменяется загрязнённость сахарной свёклы, а соответственно меняется её оттенок: чистая

свёкла имеет светлые оттенки, загрязнённая — тёмные. В зависимости от оттенков свёклы контуры корнеплодов на изображении могут сливаться. Для определения отдельного контура свёклы используются специальные фильтры, позволяющие настраивать параметры изображения: яркость, контрастность, насыщенность, температурный баланс, резкость, выдержка и др. Также важным параметром при распознавании корнеплодов является качество обучения нейронной сети.

3. Нейронная сеть — это математическая

модель (а также её программное воплощение), построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей. Для корректной работы нейронной сети необходимо её обучение на массиве изображений, сбор которых запланирован в сезоне 2022/23 г. В задачи обучения нейронной сети для выполнения сортировки сахарной свёклы входят:

- идентификация объектов на поверхности в кузове большегрузной автомашины с последующим игнорированием корнеплодов, расположенных ниже;

- достраивание контуров корнеплодов и верификация объектов согласно паттернам, которые будут задействованы в обучении нейронной сети;

- распознавание корнеплодов вне зависимости от степени загрязнённости.

Для сортировки насыпи сахарной свёклы разработан програм-

мно-аппаратный комплекс, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

Принцип работы программно-аппаратного комплекса: микроконтроллер 1 посылает команду для периодического проведения замеров расстояния лазерным дальномером 2. В случае обнаружения большегрузной автомашины измеряемое расстояние сокращается, а микроконтроллер подаёт команду на модуль-реле 4 на включение прожектора 5, после чего происходит фотографирование поверхности насыпи в кузове камерой 6. На основании полученной информации происходит обработка данных и поступает команда на табло 7 «В ПЕРЕРАБОТКУ» или «НА ХРАНЕНИЕ». Также полученная информация с дальномера и камеры отправляется на сервер 8, где производится графический анализ информации с последующим выводом на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора 9.

Машинное зрение может предоставить следующую информацию для начальников сырьевых служб:

- почасовая интенсивность движения большегрузных автомашин;
- изменение крупности сахарной свёклы в течение суток;
- степень загрузки участков по распределению на хранение или в переработку большегрузных автомашин.

В данной конфигурации программно-аппаратный комплекс может работать как внутри общезаводской системы, так и автономно. В дальнейшем при интеграции комплекса в общезаводскую систему возможно расширение функционала обрабатываемой информации.

Заключение

Разработкой представленного проекта занимается коллектив специалистов из ФГБНУ ВНИИТиН, ФГБОУ ВО ТГТУ и ФГБОУ ВО

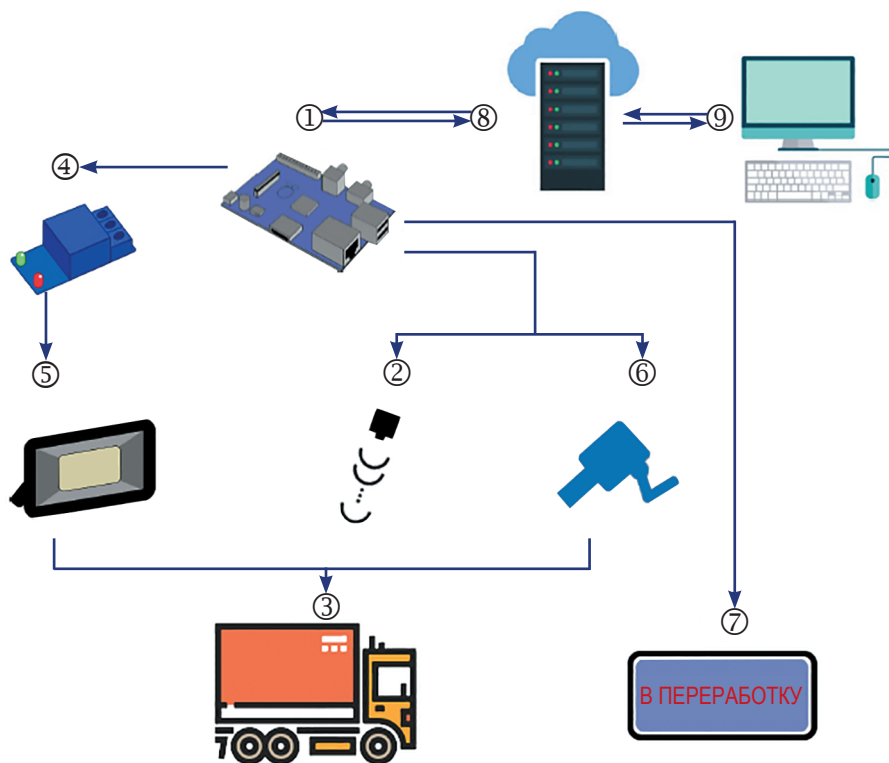


Рис. 3. Принципиальная схема работы машинного зрения при сортировке сахарной свёклы: 1 – микроконтроллер; 2 – лазерный дальномер; 3 – большегрузная автомашина; 4 – модуль-реле; 5 – прожектор; 6 – камера; 7 – светодиодное табло; 8 – сервер; 9 – АРМ оператора

МичГАУ. В настоящий момент система проходит лабораторные испытания. Производственные испытания намечены на сентябрь-ноябрь 2022 г.

Список литературы

1. Investigating natural cooling of piled sugar beet / A.I. Zavrazhnov, S.M. Koltsov, A.N. Zazulya [et al.] // 2021 International conference on agricultural science and engineering. Michurinsk, Russia, 2021. – P. 012089.

2. Смирнов, М.А. Резервы повышения сохранности корнеплодов сахарной свёклы / М.А. Смирнов, Л.Н. Путилина // Сахарная свёкла. – 2014. – № 5. – С. 46–48.

3. Управление режимами вентиляции при хранении корнеплодов в кагатах / А.И. Завражнов, И.А. Елизаров, С.С. Толстошеин, С.М. Кольцов // Сельский меха-

низатор. – 2021. – № 8. – С. 20–21.

4. Mathematical modeling of the temperature regime in a ventilated pile of sugar beet / A.I. Zavrazhnov, N.V. Zuglenok, A.A. Zavrazhnov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia, 2020. – P. 62067.

5. Путилина, Л.Н. Анализ способов хранения сахарной свёклы в условиях Центрально-Чернозёмного региона / Л.Н. Путилина, Р.А. Шрамко // Сахар. – 2021. – № 6. – С. 44–51.

6. Елизаров, И.А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А.Г. Схиртладзе. – Ст. Оскол, 2020. – 236 с.

7. ВИСКОНТ.Свёкла [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mallenom.ru/products/proslezhivaemost/viskontsvetkla/> (дата обращения: 29.07.2022).

Аннотация. Рассмотрено влияние крупности сахарной свёклы на продолжительность вентиляции кагата. Определена значимость параметра удельной поверхности на сохранность сахарной свёклы в кагатах. Представлен способ сортировки корнеплодов для свеклосахарного производства. Рассмотрены аспекты, влияющие на эффективность работы машинного зрения при определении крупности корнеплодов сахарной свёклы. Представлена принципиальная схема работы машинного зрения при сортировке сахарной свёклы.

Ключевые слова: сахарная свёкла, хранение, крупность, машинное зрение, кагат.

Summary. The influence of the size of sugar beet on the duration of ventilation of the sugar beet pile is considered. The influence of the specific surface area parameter on the safety of sugar beet in sugar beet piles has been established. A method of sorting root crops for sugar beet production is presented. Some aspects affecting the efficiency of machine vision in determining the size of sugar beet root crops are considered. A schematic diagram of the operation of machine vision when sorting sugar beet is presented.

Keywords: sugar beet, storage, size, machine vision, sugar beet pile.

