

УДК 62

***ВАКУУМНЫЙ СХВАТ ДЛЯ РОБОТИЗАЦИИ СБОРКИ ЗАКАЗОВ НА
ДАРКСТОРАХ******Шашкова Д.Ю.****магистрант**МГТУ им. Н.Э. Баумана**Москва, Россия****Бошляков А.А.****к.т.н., доцент**МГТУ им. Н.Э. Баумана**Москва, Россия***Аннотация**

Стремительный рост онлайн-заказов и нехватка персонала делают автоматизацию сборки заказов в дарксторах особенно актуальной. Нехватка персонала, необходимость круглосуточной работы и ограниченное время выполнения заказов делают традиционные методы комплектования неэффективными. Однако внедрение стандартных роботизированных решений, разработанных для распределительных центров, оказывается неприменимым в условиях дарксторов. В рамках данной работы предлагается концепция специализированного вакуумного захвата, предназначенного для автоматизированной сборки заказов с учётом разнообразия форм и размеров упаковки. На основе результатов анализа товаров, была выполнена классификация продукции, рассчитаны параметры усилий захвата и осуществлен выбор типа присосок и источника вакуума. Спроектированный схват учитывает особенности дарксторов, поэтому может быть внедрен без изменения их структуры. Полученные результаты показывают эффективность применения специализированного вакуумного захвата для сборки заказов и

могут быть использованы при проектировании комплексных решений автоматизации дарксторов.

Ключевые слова: вакуумный схват, даркстор, автоматизация складов, роботизация, захватные устройства.

DESIGN OF A VACUUM GRIPPER FOR ORDER PICKING IN DARK STORES

Shashkova D.Y.

Master's Student

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Boshlyakov A.A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract

The rapid growth of online orders and personnel shortages render automation of order picking in dark stores especially relevant. Personnel shortages, the necessity of round-the-clock operation, and limited order fulfillment time make traditional order picking methods inefficient. However, the implementation of standard robotic solutions developed for distribution centers proves inapplicable under dark store conditions. Within the scope of this work, a concept of a specialized vacuum gripper designed for automated order picking is proposed, taking into account the diversity of packaging shapes and dimensions. Based on the results of product analysis, product classification was carried out, gripping force parameters were calculated, and the type of suction cups

and vacuum source were selected. The designed gripper accounts for the specific characteristics of dark stores and therefore can be implemented without modifications to their existing structure. The obtained results demonstrate the effectiveness of applying a specialized vacuum gripper for order picking and can be used in the design of comprehensive automation solutions for dark stores.

Keywords: vacuum gripper, dark store, warehouse automation, roboticization, gripping devices

Стремительный рост спроса на быструю доставку и увеличение доли онлайн-заказов приводят к возникновению потребности во внедрении роботизированных систем. Одним из наиболее востребованных форматов таких объектов являются дарксторы — специализированные склады, где сборка заказов осуществляется без участия покупателей. В отличие от традиционных распределительных центров, дарксторы функционируют в условиях ограниченного пространства, плотной организации хранения и высокой интенсивности обработки товаров. Это требует применения специализированных технических решений, адаптированных под компактную и динамичную среду.

Увеличение объёма заказов требует привлечения большого числа сотрудников. Однако высокая текучесть кадров и круглосуточный режим работы делают ручную комплектацию нестабильной и подверженной ошибкам. Дополнительную сложность создаёт значительная доля продукции с коротким сроком хранения, для которой требуется быстрая и деликатная обработки. В таких условиях автоматизация дарксторов становится не просто желательной, а необходимой для повышения эффективности и надёжности логистических операций.

При этом существующие роботизированные комплексы не подходят для дарксторов. Плотное размещение товаров, разнообразие упаковок и стационарные стеллажи делают использование стандартных промышленных решений невозможным без серьёзной перестройки даркстора. Это показывает

необходимость разработки специализированных средств автоматизации, в частности захватных устройств, способных эффективно работать в условиях ограниченного пространства и обеспечивать бережное взаимодействие с продукцией.

В этом исследовании рассматривается проектирование вакуумного захвата, адаптированного к условиям даркстора. Работа включает анализ ассортимента продукции, выбор принципа действия и материалов, обоснование параметров вакуумной системы, а также разработку конструкции устройства, способного обеспечивать надёжное и бережное перемещение товаров в условиях высокой плотности хранения и ограниченного пространства.

Одним из известных решений автоматизации складских операций является система Sparrow, разработанная компанией Amazon [5]. Этот интегрированный робототехнический комплекс объединяет промышленный манипулятор с системой компьютерного зрения и алгоритмами искусственного интеллекта, что обеспечивает автоматическое обнаружение, захват и перемещение товаров со стеллажей в упаковочные контейнеры. Робот способен анализировать форму, габариты, штрихкоды и цифровые метки упаковки, что позволяет обрабатывать 65 % ассортимента продукции компании Amazon. Вакуумный захват устройства адаптирован для взаимодействия с разнообразными типами упаковки и обеспечивает производительность до 300–400 операций в час, что более чем втрое превышает показатели ручного труда и снижает уровень ошибок при сборке до менее 1 %. При этом время поиска товаров сокращается на 60–70 %. Однако высокая эффективность системы Sparrow достигается исключительно в условиях централизованных распределительных центров с мобильной организацией хранения. В дарксторах применение данной технологии существенно ограничено из-за несовместимости с стационарной структурой стеллажей и плотной планировкой. Для интеграции потребовалась бы установка направляющих, модификация конфигурации помещения и полное обновление

системы управления складом, что делает внедрение экономически и организационно нецелесообразным.

Другой пример – On-Grid Robotic Pick (OGRP) от компании Ocado. Эта система автоматизированной сборки и упаковки заказов использует роботизированные манипуляторы, работающие в модульной решётчатой структуре хранения [7]. Роботы извлекают товары непосредственно из ячеек без промежуточной транспортировки. Система оснащена камерами, сенсорами и алгоритмами машинного обучения, что позволяет обрабатывать широкий ассортимент без предварительной маркировки. В центрах Ocado внедрение OGRP позволило увеличить скорость сборки до 50 товаров в час на одного робота и сократить потребность в ручном труде более чем на 70 %. Однако такая система тесно связана с решётчатой архитектурой и не может быть внедрена в дарксторы без изменения его структуры: установка направляющих и строительство модульных ячеек. Это делает её использование в компактных складах экономически неоправданным.

Ещё одним решением в области автоматизации складских процессов является система SymBot, разработанная компанией Symbolic [9]. Она сочетает автономные мобильные платформы с визуальной навигацией и роботизированным манипулятором, реализующим сборку заказов с применением технологии Pick-to-Light и адаптивной маршрутизацией. Мобильная платформа оснащена колесными приводами с электродвигателями и системой навигации на базе лидаров и камер, использующей алгоритмы SLAM для построения карты пространства и предотвращения столкновений. Манипулятор осуществляет захват и укладку товаров по координатам, переданным WMS-системой. Процесс сборки включает подсветку целевой ячейки, сканирование упаковки, проверку веса и доставку в зону упаковки. Экспериментальные испытания показали повышение скорости сборки на 40 % и снижение ошибок до 0,2 %. Однако в условиях даркстора применение SymBot ограничено — его габариты затрудняют маневрирование, а клещевые захваты не

подходят для деформируемой упаковки, что увеличивает риск повреждений и снижает надёжность удержания при перемещении.

Таким образом, решения, разработанные для распределительных центров, не подходят для дарксторов без серьёзных изменений структуры склада. Учитывая ограниченное пространство, стационарную систему хранения и необходимость работы с деформируемыми товарами, требуется разработка компактного и специализированного захватного устройства, адаптированного к условиям даркстора.

В данной работе рассматривается проектирование конструкции вакуумного схвата для робота, предназначенного для автоматизированной сборки заказов на дарксторах. Существует несколько классов захватных устройств, каждый из которых имеет преимущества и недостатки в зависимости от формы, материала и хрупкости объектов, а также условий эксплуатации. Для обоснования выбора конструкции проведён сравнительный анализ с учётом ограниченного пространства, разнообразия упаковки и необходимости деликатного обращения с продукцией.

Среди наиболее распространённых типов выделяются мягкие, вакуумные и антропоморфные захватные устройства [1]. Мягкие схваты изготавливаются из гибких материалов, таких как силикон или эластомеры [6]. Конструкция на принципе Fin Ray Effector обеспечивает адаптацию пальцев к форме объекта, однако такие системы показывают недостаточную силу удержания и высокую чувствительность к точности наведения. Подобные решения, например, Soft Gripper, успешно применяются в пищевой промышленности благодаря способности захватывать объекты сложной формы. При этом ограниченная грузоподъёмность, невысокая скорость работы и сложность интеграции сенсоров и исполнительных механизмов существенно снижают целесообразность использования мягких схватов в условиях дарксторов.

Антропоморфные захваты имитируют движение и строение человеческой кисти. Один из примеров – четырёхпальцевый схват с двумя парами пальцев:

одна пара предназначена для точного удержания мелких объектов, другая — для надёжного захвата крупногабаритных изделий. Центральный шарнир позволяет пальцам вращаться и адаптироваться к различным формам объектов. Пальцы выполнены с применением гибких соединений, позволяющих им подстраиваться под поверхность без избыточного давления. Конструкция изготовлена методом 3D-печати из полиуретановых материалов и отличается малым весом, прочностью и низкой стоимостью. Основное преимущество антропоморфных захватов — универсальность: они способны манипулировать объектами различной формы и выполнять сложные операции, схожие с действиями человеческой кисти. Вместе с тем их применение связано со значительной сложностью интеграции и управления. Особенно затруднено применение таких захватов в задачах, требующих бережного обращения с легко деформируемыми упаковками, а также в условиях ограниченного пространства, характерного для полочного хранения, где их габариты и кинематика снижают манёвренность. Эти особенности показывают нецелесообразность использования антропоморфных систем на дарксторах.

Вакуумные захваты представляют собой устройства, специально предназначенные для деликатного перемещения хрупких и деформируемых объектов в автоматизированных комплексах. Их конструкция включает платформу с эластичными присосками, которые адаптируются к поверхности и равномерно распределяют давление, минимизируя риск повреждений. К основным преимуществам вакуумных систем относятся высокая адаптивность к размерам и форме изделий, компактное исполнение, простота интеграции с различными промышленными роботами и возможность применения без существенных изменений инфраструктуры склада. Основными ограничениями являются необходимость точного позиционирования относительно объекта, снижение эффективности при загрязнении рабочих поверхностей и ограниченная применимость при работе с тяжёлыми или пористыми упаковками. Несмотря на указанные ограничения, вакуумные схваты представляют собой наиболее подходящее техническое решение для дарксторов: они отличаются

компактными габаритами, обеспечивают надёжную фиксацию и позволяют бережно взаимодействовать с продукцией даже в условиях ограниченного пространства.

Разрабатываемый вакуумный схват обладает модульной конструкцией, что позволяет подстраивать конфигурацию схвата под каждую группу товаров с учётом массы, габаритов и характеристик упаковки. В качестве объекта анализа был выбран ассортимент даркстора сети «ВкусВилл». Исследование показало, что большая часть продукции упакована в картонные коробки массой от 40 г до 1,3 кг и габаритами от 10×4×4 мм до 300×300×120 мм. Материал упаковки — многослойный или ламинированный картон. Такой результат анализа определил необходимость разработки устройства, ориентированного на работу с плоской деформируемой упаковкой.

Для дальнейшего проектирования выполнена классификация продукции по массе, на основании которой определены усилия захвата:

- товары массой до 0,05 кг (например, чай) — требуемое усилие захвата до 1 Н;
- товары массой от 0,05 до 0,1 кг (например, десерты) — усилие 1–3,5 Н;
- товары массой от 0,1 до 0,2 кг (например, кофе, сыры, конфеты) — усилие 3,5–7 Н;
- товары массой от 0,2 до 0,5 кг (например, полуфабрикаты, макароны) — усилие 7–15 Н;
- товары массой свыше 0,5 кг (например, крупы, замороженные продукты) — усилие до 40 Н.

На основе классификации были выбраны: типы присосок, их количество и расположение. Главным критерием при разработке являлось обеспечение бережного захвата и надёжной герметичности даже при неполном прилегании. Это особенно важно, поскольку большинство объектов хранения обладают шероховатой или ламинированной поверхностью, а также могут иметь

деформации или следы влаги, что дополнительно снижает коэффициент трения и усложняет удержание.

В качестве материала присосок выбран силикон, обладающий высокой эластичностью, устойчивостью к износу и широким температурным диапазоном эксплуатации [4]. Силиконовые присоски сохраняют герметичность при отрицательных температурах и многократных циклах сжатия. Альтернативные материалы, такие как полиуретан или резина, имеют ниже показатели по морозостойкости и адаптивности к неровным поверхностям.

По типу были выбраны гофрированные присоски, поскольку их геометрия обеспечивает равномерное распределение давления, компенсирует микронеровности поверхности и позволяет эффективно работать при ограниченной силе прижатия — что особенно важно при обращении с тонким картоном.

Для определения геометрических параметров присоски и оценки её удерживающей способности был выполнен расчёт теоретической силы удержания [2]. Расчёт учитывает массу объекта, ускорение системы, коэффициент безопасности и трения, а также параметры вакуумного давления.

Диаметр присоски определялся на основе соотношения между силой удержания и эффективным вакуумным давлением, с учётом коэффициента эффективности $\eta = 0,6\text{--}0,8$. При модульной конструкции расчёт проводился для худшего сценария — удержания коробки максимальной массы и минимальной площади контакта. Для повышения надёжности применён принцип двойного резервирования: даже при частичной потере герметичности одной присоски устройство сохраняет работоспособность.

Конфигурация схвата включает комбинированный набор присосок диаметром 10, 18 и 30 мм, расположенных по зонам с учётом типовых размеров объектов [8]. Центральная зона предназначена для крупных присосок (30 мм), периферия — для меньших (10–18 мм), стабилизирующих захват упаковок.

Рассматривались два варианта источника вакуума: централизованный насос и локальный эжектор [3]. Централизованный насос способен создавать разрежение до -90 кПа, однако требует прокладки пневмолиний и отличается повышенной сложностью обслуживания. Локальный эжектор — компактен, не содержит подвижных частей, устойчив к вибрациям и обеспечивает вакуум до -85 кПа, и его можно размещать непосредственно в корпусе схвата. С учётом этих преимуществ был выбран встроенный эжектор с управлением через пневмоканал.

Общая концепция разрабатываемого вакуумного схвата основывается на принципах модульности, адаптивности и компактности. Несущая часть схвата представляет собой жёсткую платформу, на которой размещены вакуумные присоски различного диаметра, распределённые по зонам действия. Каждая присоска подключена к общей вакуумной магистрали через коллектор с управляемыми клапанами, что позволяет адресно активировать или отключать отдельные присоски в соответствии с формой и размерами конкретного объекта. Такой подход снижает расход сжатого воздуха и уменьшает нагрузку на источник вакуума. Распределение усилий между присосками учитывает положение центра масс объекта, обеспечивая устойчивое удержание даже при несимметричной упаковке. Управление схватом осуществляется на основе данных от системы технического зрения: после распознавания объекта формируется команда на открытие соответствующих клапанов и подачу вакуума в требуемые каналы.

Габариты конструкции определялись требованиями ограниченного межполочного пространства даркстора, высота которого составляет около 200 мм. Общая высота схвата в рабочем состоянии не превышает 120 мм, что достигается за счёт плоской компоновки элементов, встроенного вакуумного источника и вертикального размещения магистралей. Конструкция также предусматривает возможность быстросъёмной установки на манипулятор.

Таким образом, предложенная концепция вакуумного схвата обеспечивает бережное взаимодействие с упаковкой, отличается компактными габаритами и допускает адаптацию к различным типам продукции. Это позволяет использовать устройство для автоматизации комплектования заказов без необходимости реконфигурации существующей структуры склада.

В ходе исследования были проанализированы конструктивные особенности дарксторов. Выявлено, что существующие решения в области автоматизации — такие как робот Sparrow (Amazon), система On-Grid Robotic Pick (Ocado) и платформа SymBot (Symbotic) — не могут быть эффективно внедрены в такие среды без существенной модификации складской структуры. Основными ограничивающими факторами являются стационарная система хранения, узкие межстеллажные проходы, небольшая высота полок, высокая плотность размещения товаров, а также наличие легкодеформируемой продукции.

С учётом этих особенностей обоснована необходимость разработки специализированного вакуумного захватного устройства, способного функционировать в условиях ограниченного пространства и обеспечивать деликатное обращение с товарами. В рамках работы была предложена концепция модульного вакуумного схвата с встроенным источником разрежения и системой адресного управления присосками. Проведён анализ ассортимента продукции, характерного для дарксторов, выполнена классификация товаров по массе и габаритам, что позволило рассчитать требуемые усилия захвата и определить необходимые типоразмеры присосок. В качестве материала выбран силикон, обладающий высокой адаптивностью к неровным поверхностям и устойчивостью к температурным воздействиям.

Также был обоснован выбор встроенного эжекторного источника вакуума, обеспечивающего компактность конструкции, высокий отклик и надёжность работы в условиях переменных нагрузок. Общая компоновка схвата ориентирована на минимальные габариты и возможность работы в межполочном

пространстве высотой до 200 мм, что делает устройство совместимым с условиями работы на дарксторах. Разработанное решение может быть использовано для построения автоматизированной системы сборки заказов с возможностью дальнейшей интеграции с техническим зрением и системой управления складом.

Таким образом, полученные в работе результаты подтверждают целесообразность создания специализированного захватного устройства для дарксторов и могут быть использованы в дальнейшем при проектировании роботизированных комплексов.

Библиографический список:

1. Аксенов С.Н., Головня В.А., Краснослободцев В.Я. Вихревые захватные устройства роботов и методика их проектирования // Дисс. на соиск. учёной степени доктора технических наук. – СПб.: СПбГТУ, 2005.
2. ГОСТ 26063-84. Захваты промышленных роботов. Основные параметры и размеры. – М.: Изд-во стандартов, 1984.
3. Слепцов В.В., Дителева А.О., Кукушкин Д.Ю., Цырков Р.А., Дителева Е.О. Вакуум как континуальная среда, формирующая энергетические неоднородности с высокой плотностью энергии в жидкой фазе // Вакуумная техника, материалы и технология: XVI Межд. научно-техн. конференция (Москва, 2022). – М., 2022.
4. Вакуумная техника и технологии – 2022. Труды 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (21–23 июня 2022 г.) / под ред. Д.К. Кострина и С.А. Марцынюкова. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022.
5. Amazon. Sparrow: Robotic Item Picking System. —Режим доступа — URL: <https://www.aboutamazon.com> (дата обращения: 25.06.2025).
6. Festo. Adaptive Gripper DHEF — Product Documentation [Электронный ресурс]. — Режим доступа — URL: <https://www.festo.com> (дата обращения: 25.06.2025).

7. Ocado Group. On-Grid Robotic Pick Systems. —Режим доступа — URL: <https://www.ocadogroup.com> (дата обращения: 25.06.2025).
8. SCHMALZ. Vacuum Components for Automation [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.schmalz.ru/ru-ru/> (дата обращения: 25.06.2025).
9. Symbotic. SymBot Robotic Automation Platform. —Режим доступа — URL: <https://www.symbotic.com> (дата обращения: 25.06.2025).

Оригинальность 77%