

На правах рукописи



БОГОДЯЖ Артем Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИСКОВОГО БУНКЕРНОГО  
ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛЫХ ПО ТОРЦАМ  
АСИММЕТРИЧНЫХ ЗАГОТОВОК ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ**

Специальность: 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» на кафедре «Промышленная автоматика и робототехника».

**Научный руководитель:**

**Пантюхина Елена Викторовна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет»

**Официальные оппоненты:**

**Иванов Константин Михайлович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и производство артиллерийского вооружения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

**Вялов Сергей Алифтинович**

кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства машин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Защита состоится «8» декабря 2026 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.297.05 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет» по адресу: 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1, ауд. 1/450.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» и на сайте <https://science.donstu.ru/apex/f?p=853:7:::NO:RP::>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н.



В.В. Масленский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В условиях современных массовых производств возникают задачи повышения производительности технологического оборудования при обеспечении надежности его функционирования. Поэтому автоматическую загрузку оборудования, в том числе роторного типа, должны осуществлять высокопроизводительные и надежные системы. К такому типу устройств относятся дисковые бункерные загрузочные устройства механического типа (БЗУ), которые обеспечивая захват единичной штучной заготовки из общей их массы в бункере, приводят каждую заготовку в ориентированное положение и выдают к накопительному устройству технологического оборудования.

В течение нескольких последних десятилетий расширяется номенклатура изготавливаемых изделий и заготовок для их производства, в том числе с появлением новых, более эффективных технологий производства изделий. Например, появляются асимметричные заготовки типа тел вращения, имеющие полости на каждом или на одном из торцов, так называемые полые по торцам заготовки, с соотношением  $a$  высоты и диаметра наибольшего из торцов в диапазоне от 1,2 до 2, в том числе с неявной асимметрией и высокой сцепляемостью друг с другом. Известные ранее традиционные БЗУ не способны обеспечить стабильность при ориентировании таких заготовок, а их усовершенствованные конструкции при проведении экспериментальных исследований показали целый ряд проблем: снижение надежности и производительности, трудности в процессе переналадки, обусловленные тем, что универсальность достигалась только путем замены ориентирующих органов усовершенствованных БЗУ под каждое соотношение  $a$ .

Необходимость усовершенствования и проектирования высокотехнологичного универсального БЗУ с возможностью регулировки под размеры и расположение центра масс асимметричных заготовок с торцами разных диаметров с одной или двумя внутренними полостями по торцам с соотношением  $a = 1,2 \dots 2$  на базе разработки и теоретического исследования математических моделей вероятности захвата и производительности предопределяет актуальность исследования.

**Степень разработанности темы.** Научно-практические направления работы, относящиеся к комплексной автоматизации производственных процессов, производительности, надежности и функционированию технологических систем задаются на основе трудов отечественных ученых Артоболевского И.И., Артоболевского С.И., Волчкевича Л.И., Клусова И.А., Кордонского Х.Б., Кошкина Л.Н., Шаумяна Г.А.

Наиболее важные научно-прикладные аспекты исследования по функционированию БЗУ, исследованию процессов захвата и ориентирования в них штучных заготовок определяются в работах отечественных ученых: Белякова А.Н., Бобров В.П., Борисов А.А., Васин С.А., Камышный Н.И., Лукин С.А., Малов А.Н., Медвидь М.В., Пантюхина Е.В., Повидайло В.А., Прейс В.В., Прейс В.Ф., Пузиков И.В., а также зарубежных работах в виде обобщенных ре-

комендаций для выбора и проектирования БЗУ под конкретные изделия: Benhabib B., Boothroyd G., Ghosh S., Singh S.P., GrohW, Hesse S., Zapf H., Murch L.E., Poli C., Sandier B.Z.

В области автоматизации загрузки штучных заготовок, в том числе сложно поддающихся автоматическому ориентированию, повышение производительности технологического оборудования при обеспечении надежности его функционирования обуславливает необходимость усовершенствования и разработки БЗУ в направлении универсальности, высокой производительности и стабильной работы на основе научно обоснованных подходов. Это приведет к улучшению основных показателей процесса и позволит при необходимости регулировать и изменять влияющие на них параметры.

**Цель исследования** – повышение производительности дискового БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения путем реализации наиболее эффективного способа захвата и ориентирования и обоснования рациональных параметров рабочих органов устройства.

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие основные **задачи исследования**:

1 Провести анализ возможных способов захвата и ориентирования в БЗУ для полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения, разработать математические модели вероятности благоприятного захвата для каждого из них и теоретически обосновать направления модернизации БЗУ.

2 Разработать для полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения усовершенствованное дисковое БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс заготовки, реализовав в нем теоретически обоснованные способы захвата и ориентирования, при которых производительность максимальна.

3 Разработать конструктивные ограничения на параметры органов захвата и ориентирования усовершенствованного БЗУ, определяющие в виде диапазонов взаимосвязанных параметров заготовок и БЗУ условия его стабильного функционирования.

4 Разработать математические модели вероятности захвата полых по торцам асимметричных заготовок для описания и построения математических моделей производительности усовершенствованного БЗУ.

5 Провести экспериментальные исследования на натурном макете усовершенствованного БЗУ для нескольких видов полых по торцам асимметричных заготовок для проверки стабильного функционирования БЗУ и адекватности разработанных математических моделей вероятности захвата и производительности.

6 Разработать методику проектирования и обоснования эффективной конструкции усовершенствованного БЗУ для различных типов полых по торцам асимметричных заготовок.

7 Разработать компьютерные программы для расчета и теоретического исследования вероятности захвата и производительности усовершенствованно-

го БЗУ в зависимости от его параметров и параметров загружаемых полых по торцам асимметричных заготовок.

**Объект исследования** – усовершенствованное дисковое БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения с соотношением высоты и диаметра наибольшего из торцов в диапазоне от 1,2 до 2.

**Предмет исследования** – взаимосвязи и взаимовлияние между параметрами полых по торцам асимметричных заготовок и усовершенствованного дискового БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс заготовки, при которых будут обеспечены максимальная производительность и стабильное функционирование.

**Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.** Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.21. Машины, агрегаты и технологические процессы, а именно пункту 1 (Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов) и пункту 4 (Исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций с использованием моделирования, численных и физических экспериментов).

**Научная новизна** заключается в:

1 Разработанных математических моделях вероятности благоприятного захвата полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения, позволяющих обосновать направления модернизации БЗУ, реализовав в нем наиболее производительный способ захвата и ориентирования.

2 Установлении взаимосвязей между параметрами заготовок и органами захвата и ориентирования усовершенствованного БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс заготовки, определяющих условия стабильного функционирования БЗУ.

3 Разработанных математических моделях вероятности захвата полых по торцам асимметричных заготовок в усовершенствованном БЗУ, учитывающих влияние на процесс захвата геометрических параметров заготовок, их сцепляемости и коэффициента трения между ними во взаимосвязи с конструктивными и кинематическими параметрами БЗУ и коэффициентом трения между заготовками и элементами БЗУ.

4 Разработанных математических моделях производительности усовершенствованного БЗУ, позволяющих описать влияние на производительность конструктивных и кинематических параметров БЗУ, способа захвата и ориентирования заготовок, геометрических параметров и сцепляемости заготовок, а также значений коэффициента трения, как между заготовками и элементами БЗУ, так и между заготовками в процессе их захвата и ворошения в бункере.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** В результате исследований разработаны:

1 Математические модели вероятности благоприятного захвата полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения, позволяющие обосновать направления модернизации БЗУ, реализовав в нем наиболее производительный способ захвата и ориентирования.

2 Усовершенствованное дисковое БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс заготовки.

3 Конструктивные ограничения на параметры органов захвата и ориентирования, определяющие условия стабильного функционирования усовершенствованного БЗУ.

4 Математические модели вероятности захвата полых по торцам асимметричных заготовок в усовершенствованном БЗУ.

5 Математические модели производительности усовершенствованного БЗУ для полых по торцам асимметричных заготовок.

6 Методика проектирования и обоснования эффективной конструкции усовершенствованного БЗУ для полых по торцам асимметричных заготовок.

7 Компьютерные программы для расчета и теоретического исследования вероятности захвата и производительности усовершенствованного БЗУ.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертации внедрены на АО «Тульский патронный завод» и могут использоваться в различных отраслях промышленности при проектировании, производстве, эксплуатации, а также исследовании, новых дисковых БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения с соотношением высоты и диаметра наибольшего из торцов в диапазоне от 1,2 до 2.

**Методология и методы исследования** в диссертации при решении поставленных задач и проведении теоретических и экспериментальных исследований процессов захвата и ориентирования полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения применяются математические, компьютерные и натурные модели, построенные на основе теории вероятностей и общих физических законах. При проведении экспериментальных исследований на экспериментальном макете модернизированного БЗУ применялась современная измерительная и контролирующая аппаратура, методы регрессионного анализа, статистические методы обработки результатов экспериментов и современные компьютерные программы.

**Положения, выносимые на защиту:**

- математические модели вероятности благоприятного захвата полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения позволяют обосновать направления модернизации БЗУ, реализовав наиболее производительный способ захвата и ориентирования;

- усовершенствованное дисковое БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок с реализацией теоретиче-

ски обоснованных способов захвата и ориентирования, при которых производительность максимальна;

- конструктивные ограничения на параметры органов захвата и ориентирования, определяющие в виде диапазонов взаимосвязанных параметров заготовок и БЗУ условия его стабильного функционирования;

- математические модели вероятности захвата полых по торцам асимметричных заготовок в усовершенствованном БЗУ;

- математические модели производительности усовершенствованного БЗУ для полых по торцам асимметричных заготовок;

- методика проектирования и обоснования эффективной конструкции усовершенствованного БЗУ для полых по торцам асимметричных заготовок;

- компьютерные программы для расчета и теоретического исследования вероятности захвата и производительности усовершенствованного БЗУ в зависимости от его параметров и параметров загружаемых полых по торцам асимметричных заготовок.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных в диссертации результатов была подтверждена сопоставлением теоретических исследований с экспериментальными, применением научно обоснованных методов исследования, методов математической статистики для обработки экспериментальных данных, полученных на натурном макете усовершенствованного устройства для полых по торцам асимметричных заготовок тел вращения. Полученные результаты согласуются с известными теоретическими разработками и экспериментальными исследованиями других авторов.

Основные положения диссертации и полученные результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Национальная научно-техническая конференция с международным участием «Автоматизация: проблемы, идеи, решения АПИР-30» (г. Тула, 2025), IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» (г. Кемерово, 2025), 62-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием (г. Тула, 2026).

**Публикации.** Содержание диссертации отражено в 9 научных работах, из них 6 статей опубликовано в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и 5 приложений (программы для теоретического исследования вероятности благоприятного захвата полых по торцам заготовок и производительности модернизированного устройства, программы построения математических моделей вероятности захвата и производительности экспериментального макета устройства для двух видов заготовок типа II, результаты экспериментальных исследований и обработки полученных значений производительности, документ о внедрении результатов работы). Диссертация изложена на 200 страницах, содержит 69 рисунков, 7 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, реализация результатов работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, представлены данные о публикациях, структуре и объеме работы.

**В первой главе** рассмотрены полые по торцам стержневые, в том числе близкие к равноразмерным, асимметричные заготовки типа тел вращения и примеры технологий их получения, средства автоматической загрузки асимметричных по торцам заготовок и исследования в области проектирования производительных и надежных конструкций дисковых БЗУ.

Выявлено, что большую долю среди всех штучных заготовок типа тел вращения составляют асимметричные заготовки (рисунок 1), имеющие внутренние полости с одной или двух сторон, у которых соотношение высоты к наибольшему диаметру  $h / d_2$  составляет от 1,2 до 2.

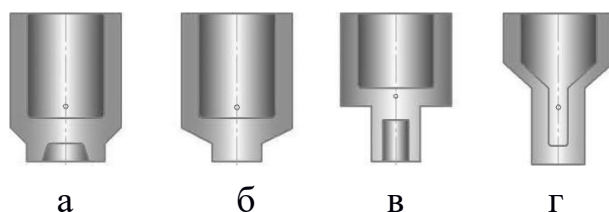


Рисунок 1 – Асимметричные заготовки с высотой в 1,2-2 раза превышающей диаметр с полостями: а – по каждому из торцов, переход между торцами конический; б – по одному из торцов, переход конический; в – по одному из торцов, ступенчатый переход; г – по одному из торцов, переход конический, полость ступенчатая с коническим переходом

Для таких изделий возникает необходимость разработки систем автоматической подачи в ориентированном положении к оборудованию технологических линий, которые должны быть надежны и обладать требуемой производительностью с возможностью ее повышения. Известные конструкции БЗУ, в том числе усовершенствованные для полых по торцам заготовок, не способны обеспечить стабильность при ориентировании таких заготовок, что требует их модернизации не только для ориентирования заготовок, но и способности переналадки под разные типоразмеры. При рассмотрении научных работ наиболее близких к объекту и предмету исследования диссертации и посвященных изучению процессов захвата асимметричных заготовок в БЗУ были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** приведены разработанные математические модели вероятности благоприятного захвата для каждого из возможных способов захвата и ориентирования в БЗУ полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения и теоретическое обоснование направлений модернизации БЗУ.

На рисунке 2 в качестве примера показаны полые по торцам взаимосцепляемые асимметричные заготовки с коническим переходом большего по диа-

метру торца в меньший с обозначением поверхностей и описывающих их углов  $\delta_I, \delta_{II}, \delta_{III}, \dots$  и их составных частей, а также возможное отклонение в кармане.

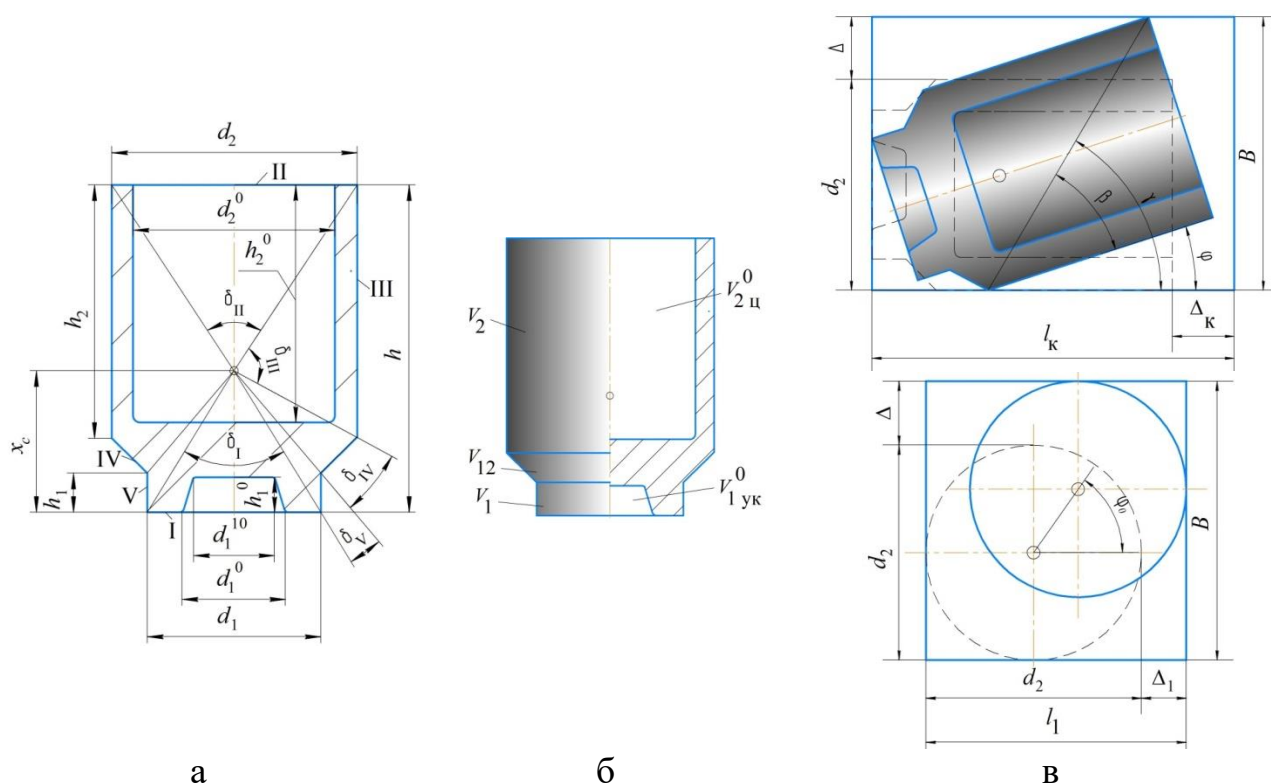


Рисунок 2 – Полые по торцам взаимосцепаемые асимметричные заготовки с коническим переходом большего по диаметру торца в меньший с обозначением поверхностей и описывающих их углов  $\delta_I, \delta_{II}, \delta_{III}, \dots$  (а) и их составных частей (б), а также возможное отклонение в кармане (в)

Рассматриваемые заготовки имеют поверхности I, II, III, ....., каждой из которых соответствуют при падении вероятности  $p_I, p_{II}, p_{III}, \dots$  и т.д. Вероятности  $p_I, p_{II}$  относятся к наименьшему и наибольшему торцу заготовки соответственно, вероятности  $p_{III}, p_V$  в совокупности описывают боковую поверхность заготовки, а вероятность  $p_{IV}$  описывает поверхность перехода одного торца заготовки в другой. С использованием расчетных схем сначала были получены математические выражения для описания каждой из этих вероятностей, а затем – координата центра масс заготовки через объемы каждой ее части. Затем были получены выражения, описывающие вероятность  $p_i$ , где ее значения максимальны  $p_{i\max}$  (заготовки в бункере размещаются одним слоем – самая верхняя точка бункера в зоне  $\phi_{\text{захв}}$  захвата), и минимальны  $p_{i\min}$  (заготовки размещаются несколькими слоями – самая нижняя точка бункера – центр зоны  $\phi_{\text{захв}}$  захвата) для 5 способов захвата и ориентирования: захват радиальными карманами (3 варианта): в положении стоя при пассивном ориентировании; в положении лежа при пассивном ориентировании; в положении лежа при активном ориентировании; захват тангенциальными карманами (2 варианта): в положении лежа при пассивном ориентировании; в положении лежа при активном

ориентировании. И в завершении с использованием полученных выражений были определены выражения вероятности  $p_i$  благоприятного захвата в зависимости от расположения карманов на диске радиусом  $R$  – радиальное (1) и тангенциальное (2):

$$p_i = 1 - (1 - p_{i\max})^3 (1 - p_{i\min})^{\frac{\pi R \phi_{\text{захв}}}{180 d_2}} \quad (1); \quad p_i = 1 - (1 - p_{i\max})^3 (1 - p_{i\min})^{\frac{\pi R \phi_{\text{захв}}}{180 h}} \quad (2).$$

На рисунке 3 показаны кривые, визуализирующие вероятность  $p_i$  и позволяющие оценить, при каком способе захвата и ориентирования вероятность  $p_i$  максимальна.

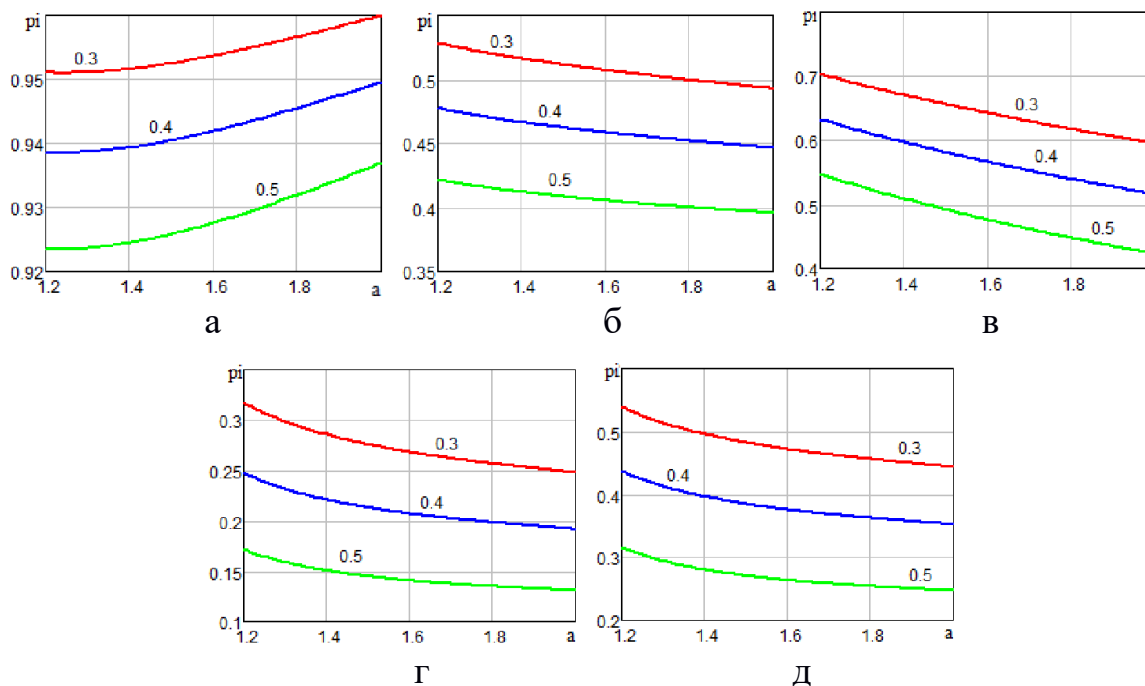


Рисунок 3 – Кривые, визуализирующие вероятность  $p_i$ , для оценки наиболее эффективного способа захвата и ориентирования при различных  $\mu$  при радиальных (а, б, в) и тангенциальных (г, д) карманах

Наибольшие значения вероятности  $p_i$  достигаются при радиальном расположении органов захвата в положении заготовок стоя и дальнейшим их пассивным ориентированием и составляют от  $p_i = 0,923...0,951$  до  $p_i = 0,937...0,600$ . Следовательно, именно эти способы захвата и ориентирования необходимо реализовать при модернизации БЗУ для полых по торцам заготовок. Аналогичные зависимости и их визуализации были получены и для других типов заготовок.

**Во третьей главе** представлены разработанное усовершенствованное дисковое БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов для полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения с реализацией в нем теоретически обоснованных способов захвата и ориентирования, при которых производительность максимальна, конструктивные ограничения на параметры органов захвата и ориентирования усовершенствованного БЗУ, определяющие в виде диапазонов взаимосвязанных параметров заготовок и БЗУ условия его стабильного функционирования и разработанные математи-

ческие модели вероятности захвата заготовок для описания и построения математических моделей производительности усовершенствованного БЗУ.

На рисунке 4 представлено модернизированное БЗУ с регулируемой высотой кармана и специальными скосами, расположенными между карманами на вращающемся диске, для асимметричных заготовок полых по торцам с соотношением высоты и наибольшего диаметра в диапазоне от 1,2 до 2. На вращающемся диске равномерно расположены радиальные карманы, между которых располагаются специальные направляющие скосы формы треугольной призмы.

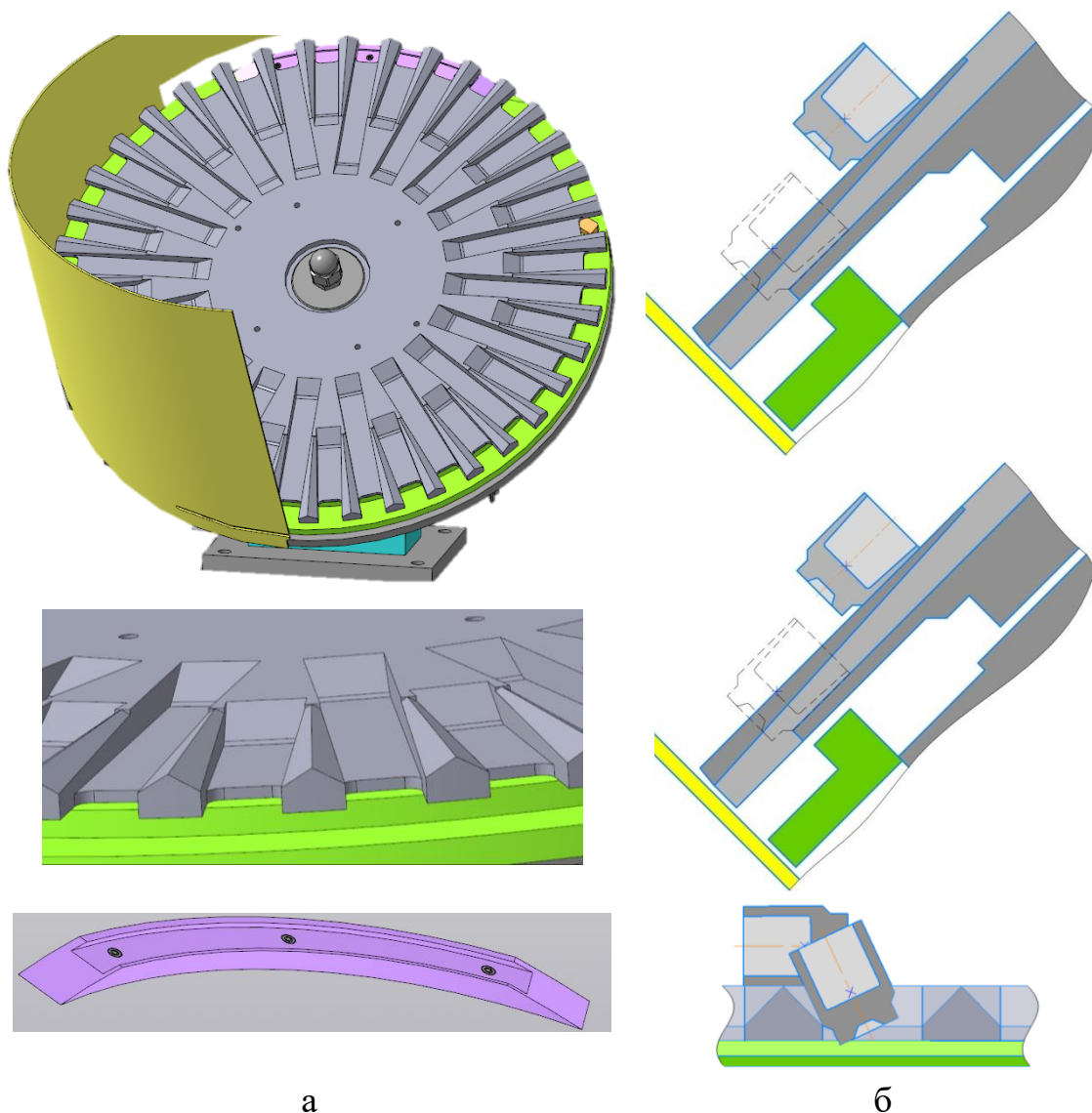


Рисунок 4 – Общий вид 3D-модели модернизированного БЗУ (а) и варианты западания заготовок в карманы (б)

В модернизированном БЗУ захват заготовок осуществляется не только в радиальном положении, но и в тангенциальном. Западание в карманы осуществляется по двум направлениям: со стороны радиальных пазов (движение заготовки к карману в радиальном направлении или боковой поверхностью, или одним из своих торцов); со стороны скосов в тангенциальном направлении.

На основании БЗУ установлено кольцо, в котором выполнена кольцевая проточка, с четырьмя вваренными шпильками, к каждой из которых имеется

пружина и гайка для возможности регулировки и переналадки (рисунок 5, а). На верхней части кольца устанавливается планка (см. рисунок 4, а), представляющая собой дугу, по краям которой выполнены уклоны, а на верхней поверхности паз. Планка обеспечивает пассивное ориентирование неправильно запавших в карманы заготовок (наименьшим по диаметру торцом вверх), так как они опираются на боковые стенки планки, и удержание в кармане правильно запавших заготовок, так как наименьший по диаметру торец проникает и движется по пазу планки (рисунок 5, б), которые в дальнейшем выталкиваются из карманов с помощью собачки.

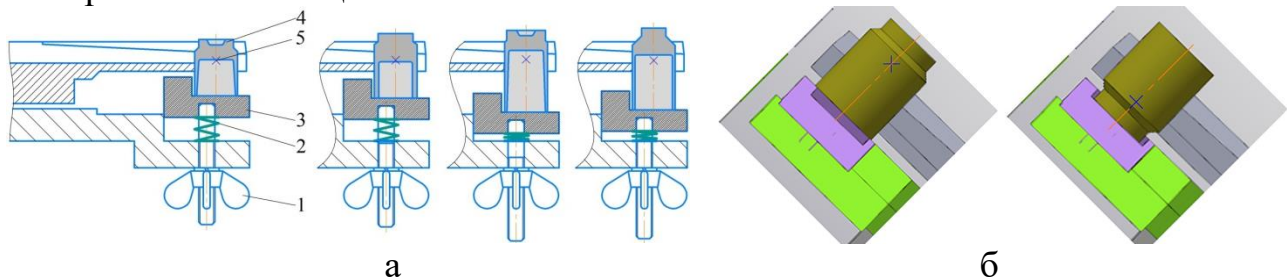


Рисунок 5 – Схема регулировки высота кармана для каждой заготовки (а): (1 – регулировочная гайка; 2 – упругий элемент; 3 – кольцо; 4 – заготовка; 5 – центр масс заготовки) и принцип работы планки при ориентировании (б)

Условия стабильного функционирования БЗУ базируются на разработке конструктивных ограничений в виде допустимых диапазонов параметров.

Для обеспечения захвата (рисунок 6) заготовок радиальные пазы должны быть такой длины, чтобы в них западо как можно больше заготовок. Анализируя и описывая условия западания заготовок, получены диапазоны длин коротких  $l_{пк}$  и длинных  $l_{пд}$  радиальных пазов и их максимальное количество:

$$R_d - (4...6)h \geq l_{пк} \geq 2,83h; R_d - (2...3)h \geq l_{пд} \geq 2,83h; k_{\max} = \frac{(8...12)\pi h}{B}.$$

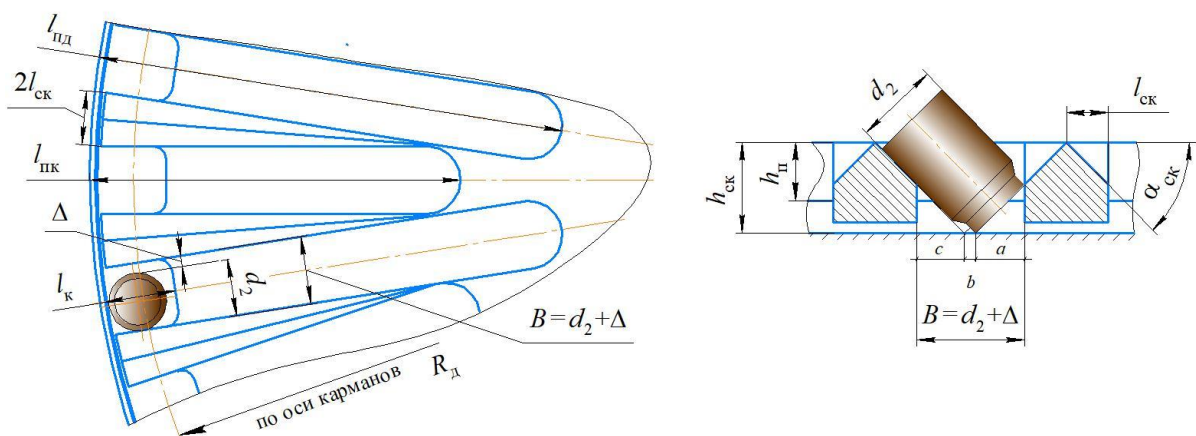


Рисунок 6 – Расчетные схемы по захвату заготовок в усовершенствованном БЗУ

Высоту радиальных пазов обуславливает такое нахождение заготовки в пазе, при котором при вращении диска и ворошении с навалом других заготовок ничего не вытолкнет из него, то есть  $h_{п}^{\min} = 0,5d_2$ .

Общая длина скосов  $2l_{\text{ск}}$  определяется радиусом  $R_{\text{д}}$  диска в зоне центра карманов. При максимальном числе радиальных пазов, принимая  $l_{\text{ск}} = 0,5d_2$ , получим оптимальный радиус диска по оси карманов  $R_{\text{д}} = \frac{(4...6)h(2d_2 + \Delta)}{d_2 + \Delta}$ .

Если известен радиус диска, то зная радиус, при  $2l_{\text{ск}} = d_2$ , определим

$$k_{\text{max}} = \frac{2\pi R_{\text{д}}}{d_2 + \Delta + 2l_{\text{ск}}} = \frac{2\pi R_{\text{д}}}{2d_2 + \Delta}.$$

Основной задачей скоса является его направляющее действие – заготовку в карман. Поэтому угол скоса  $\alpha_{\text{ск}}$  математически описывается выражением:

$$d_1 \sin \alpha_{\text{ск}} + \frac{d_2 - d_1}{2 \sin \alpha_{\text{ск}}} + h_{\text{ск}} - l_{\text{ск}} \tan \alpha_{\text{ск}} - d_2 - \Delta = 0. \text{ Карман при захвате заготовок}$$

в положении стоя конструируем равноразмерным, то есть  $l_{\text{к}} = B = d_2 + \Delta$ , или превышающим ширину на  $(0,1...0,2)\Delta$ .

Для стабильного и надежного ориентирования должны быть правильно сконструированы: высота кармана и размеры планки, уменьшающей высоту  $h_{\text{к}}^{\text{min}}$  кармана до допустимой величины по захвату, и высоты  $h_{\text{к}}^{\text{max}}$ , способствующей выпадению из кармана несориентированных заготовок (рисунок 7).

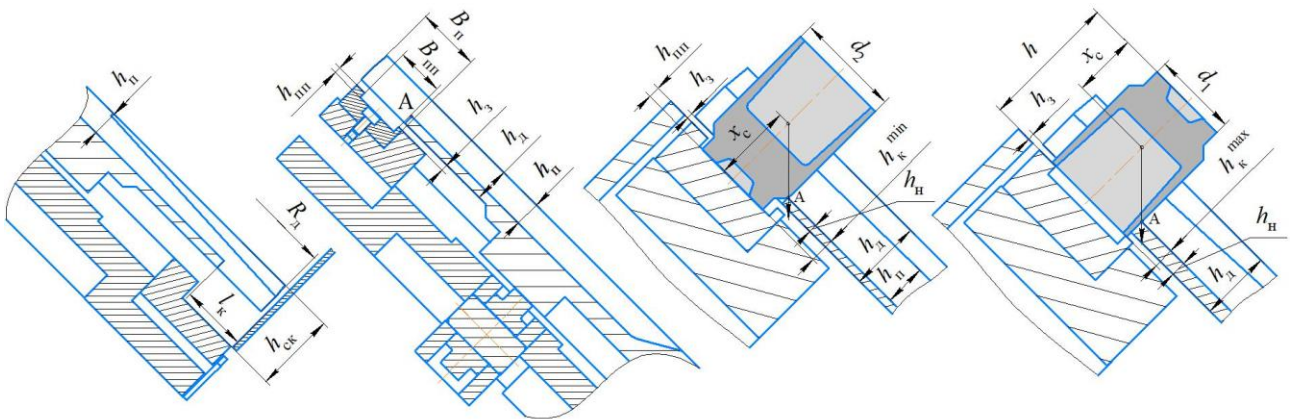


Рисунок 7 – Расчетные схемы по ориентированию заготовок

С использованием расчетной схемы условием стабильного ориентирования станет диапазон  $h - x_c - 0,5d_2 \text{ctg} \alpha_{\text{д}} > h_{\text{к}} > x_c - 0,5d_2 \text{ctg} \alpha_{\text{д}}$ .

Ширина планки  $B_{\text{п}}$  должна быть меньше или равна длине  $l_{\text{к}}$  кармана, но больше диаметра наибольшего торца, то есть:  $l_{\text{к}} \geq B_{\text{п}} > d_2$ . Выполненный на поверхности, обращенной карману, паз планки имеет ширину из диапазона  $d_2 > B_{\text{пп}} > d_1$ , чтобы в паз вошел только меньший по диаметру торец. Высота паза планки не должна превышать высоту меньшего по диаметру торца для исключения заклиниваний:  $h_{\text{пп}} < h_1$ .

Соблюдение всех условий и рекомендаций позволит в усовершенствованном БЗУ выдавать к технологическому оборудованию только правильно сориентированные полые по торцам заготовки.

Для математического описания вероятности захвата  $\eta$  в виде произведения трех вероятностей  $\eta = p_i p_c p_v$  при определении производительности усовершенствованного БЗУ  $\Pi = 60v\eta / t$  были определены только математические выражения для вероятностей  $p_c$  (учитывает сцепляемость заготовок) и  $p_v$  (учитывает влияние окружной скорости карманов), так как вероятность  $p_i$  была определена во второй главе работы.

Общее выражение вероятности  $p_c$  было получено при наличии сцепляемости заготовок, когда один ее торец может проникать в другой, и при ее отсутствии. Так как меньший по диаметру имеет полость, в которую не сможет проникнуть другой торец, то рассмотрим заготовку с одной полостью; при этом в качестве примера приведем заготовку с коническим переходом торцов (в диссертации приведены также ступенчатые заготовки без перехода).

После анализа всех возможных сочетаний, разработки выражений, описывающих каждое сочетание, и их преобразования получены выражения (3) для сцепляющихся и (4) для не сцепляющихся заготовок:

$$p_c = 1 - \frac{\left[ \sqrt{2}A(2F_I + 2F_{II}) + \sqrt{2}A_1(2F_{IV} + 2F_V + 4F_{VI}) + A(6F_I + 6F_{II} + 10F_{III} + 10F_{IV} + 10F_V) \right]}{2\sqrt{2} \cdot 6\pi \cdot [F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV} + F_V + F_{VI}]}; \quad (3)$$

$$p_c = 1 - \frac{\left[ \sqrt{2}A(4F_I + 4F_{II}) + A(6F_I + 6F_{II} + 10F_{III} + 10F_{IV} + 10F_V) \right]}{2\sqrt{2} \cdot 6\pi \cdot [F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV} + F_V + F_{VI}]}, \quad (4)$$

где  $F_I, F_{II}, \dots, F_{VI}$  – площади каждой поверхности заготовки;  $A = \arctan(\mu_0)$ ,  $A_1 = \alpha_{сц}$  в зависимости от коэффициента трения  $\mu_0$  между поверхностями заготовок и угла  $\alpha_{сц}$ , при котором сцепившиеся заготовки начнут разъединяться.

Аналогичные выражения были получены и для полых по торцам заготовок со ступенчатым переходом.

Вероятность  $p_v = 1 - v^4 \cdot v_{пред}^{-4}$  определяется предельным значением  $v_{пред}$  окружной скорости карманов, зависящим от способа захвата заготовок. Так как в усовершенствованном БЗУ заготовки могут западать в карман одним из трех способов, то математические выражения  $v_{пред}$  были получены для каждого из них.

На рисунке 8 в качестве примера показаны графики, визуализирующие изменение  $v_{пред}$  в зависимости от соотношения  $h / d_2 = a$ , для полых по торцам сцепляемых заготовок при трех вариантах западания: скользя по радиальному пазу боковой поверхностью (вариант 1); скользя по радиальному пазу основанием I с меньшим диаметром (вариант 2); скользя по скосу диска в тангенциальном направлении (вариант 3). Для заготовок с коническим переходом при любых значениях соотношения  $a$  ориентироваться стоит на  $v_{пред}$  по второму варианту захвата, а для заготовок со ступенчатым – при соотношениях  $a$  в рай-

оне 1,6 ориентироваться следует на скорость  $v_{\text{пред}}$  по второму варианту захвата, а при соотношении  $a$  свыше 1,6 – на  $v_{\text{пред}}$  по третьему варианту захвата.

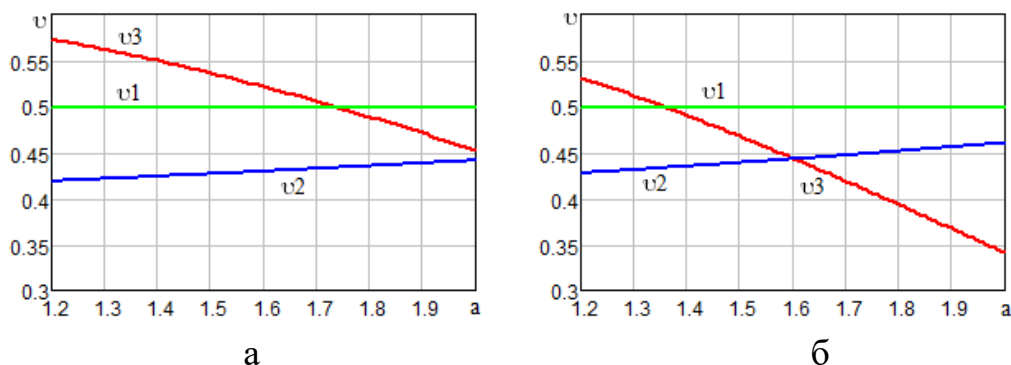


Рисунок 8 – Зависимости  $v_{\text{пред}}$  (м/с) по трем вариантам западания от соотношения  $a$  для заготовок с коническим (а) и ступенчатым (б) переходом торцов

С помощью полученных выражений разработанных математических моделей вероятности захвата и производительности усовершенствованного БЗУ были оценены диапазоны возможных ее значений. Наилучшие результаты при моделировании показало уменьшение длины скоса с 0,5 до 0,45 наибольшего диаметра, что повысит производительность до 230 шт./мин, и увеличение зазора по шагу с 0,1 до 0,25 наибольшего диаметра, то есть  $\Delta = 0,25d_2$ , что приведет к повышению производительности до 225 шт./мин на примере полых по торцам заготовок со ступенчатым переходом (рисунок 9).

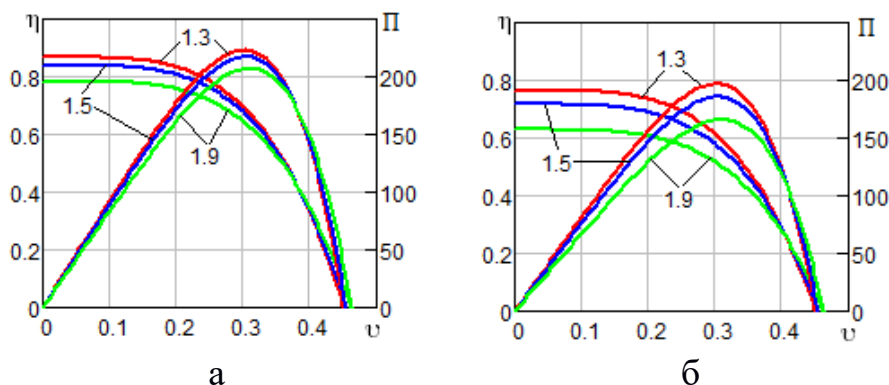


Рисунок 9 – Возможности усовершенствованного БЗУ для заготовок со ступенчатым переходом в виде графиков зависимости вероятности захвата и производительности (шт./мин) от окружной скорости  $v$  (м/с) при  $a = 1,3; 1,5; 1,9$  и коэффициентах трения  $\mu = 0,2$  (а) и  $\mu = 0,5$  (б)

Разработанные математические модели позволяют спрогнозировать производительность и внести при необходимости корректировки в параметры усовершенствованного БЗУ.

**В четвертой главе** представлены разработанный натурный макет усовершенствованного БЗУ для шести асимметричных полых по торцам заготовок с коническим переходом и результаты экспериментальных исследований для

проверки стабильного функционирования БЗУ и адекватности разработанных математических моделей вероятности захвата и производительности.

Для проведения экспериментальных исследований и проверки стабильного работы модернизированного БЗУ был разработан натурный макет для шести типов заготовок (рисунок 10).



Рисунок 10 – Макет и элементы модернизированного БЗУ для шести асимметричных полых по торцам заготовок

Проверка работоспособности и стабильной работы осуществлялась для обоснования разработанных ограничений на параметры органов захвата и ориентирования. На макете был реализован диапазон регулировки кольца относительно основания от 4,4 мм до 9,1 мм (рабочий ход пружины), что обеспечило высоту кармана в диапазоне 19,35 мм до 26,3 мм для загрузки всех заготовок. Все неправильно запавшие полые по торцам заготовки при эксперименте выпадали из карманов, а правильно запавшие заготовки собачкой удалялись из БЗУ.

Для проверки адекватности разработанных математических моделей вероятности захвата и производительности были отобраны полые по одному торцу заготовки с коническим переходом с  $h/d_2 = 1,5$  и с  $h/d_2 = 1,9$ . Сначала были разработаны теоретически модели вероятности захвата и производительности, с использованием разработанных программ. Затем были проведены по 10 экспериментов при 10 значениях окружной скорости карманов. С помощью разработанной программы проведена аппроксимация полученных средних значений вероятности захвата и производительности и сопоставление с полученными теоретически значениями.

На рисунке 11 в качестве примера приведены результаты для заготовки с  $h/d_2 = 1,5$ , при этом производительность усовершенствованного БЗУ составила до 260...280 шт./мин. Расчет отклонений экспериментальных значений вероятности захвата и производительности показал, что максимальная разница производительности составила менее 1,1 %. Аналогичные исследования проведены и для заготовок с  $h/d_2 = 1,9$ .

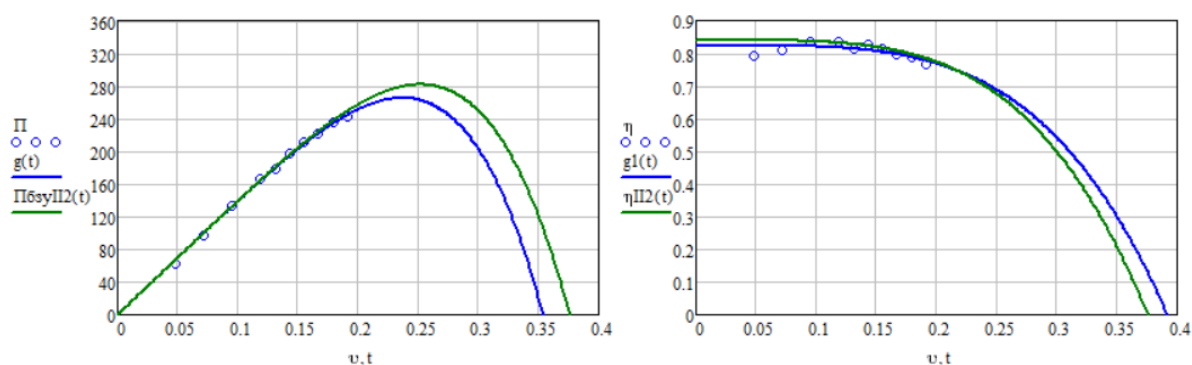


Рисунок 11 – Результаты сравнения теоретических и экспериментальных математических моделей производительности и вероятности захвата

**В пятой главе** представлена разработанная методика проектирования и обоснования эффективной конструкции усовершенствованного БЗУ для различных типов полых по торцам асимметричных заготовок.

При разработке оптимальной по всем параметрам конструкции усовершенствованного БЗУ необходимо последовательно осуществить работу по пяти основным направлениям.

Первым направлением исследования является выбор типа БЗУ для требуемых для автоматической загрузки заготовок, при котором производительность устройства будет наиболее высокой. Вторым направлением исследования является поиск наиболее эффективного способа захвата и ориентирования заготовок в БЗУ путем разработки математических моделей вероятности  $p_i$ , описывающий благоприятный вариант захвата заготовок из всех возможных, учитывая способ ориентирования. Третьим направлением является усовершенствование БЗУ для полых по торцам заготовок и определение условий его надежной и стабильной работы. Четвертым направлением исследования является разработка математических моделей вероятности захвата и производительности модернизированного БЗУ для различных типов полых по торцам асимметричных заготовок, что также позволит оценить влияние окружной скорости карманов на захват путем описания ее предельного значения через размеры кармана и параметры заготовок. Пятым направлением является теоретическое исследование производительности БЗУ во взаимосвязи с параметрами, которые можно при проектировании и при эксплуатации скорректировать. С помощью визуализации с применением разработанных программ выявляются наиболее влияющие факторы и обосновывается их выбор при проектировании и эксплуатации.

**В заключении** изложены основные результаты выполненного исследования, выводы и рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

**В приложениях** представлены программы в *MathCad* для теоретического исследования вероятности благоприятного захвата полых по торцам заготовок и производительности модернизированного БЗУ, для построения математических моделей вероятности захвата и производительности экспериментального макета БЗУ для двух видов заготовок, результаты экспериментальных исследований и обработки полученных значений производительности в *Excel*, а также документ о внедрении результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований была поставлена и решена актуальная научная задача по повышению производительности дискового БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения путем реализации наиболее эффективного способа захвата и ориентирования и обоснования рациональных параметров рабочих органов устройства.

1 Разработаны математические модели вероятности благоприятного захвата полых по торцам асимметричных заготовок типа тел вращения, позволяющие обосновать направления модернизации БЗУ, реализовав в нем наиболее производительные способы захвата и ориентирования. Выявлено, что наибольшие значения вероятности достигаются при радиальном расположении карманов в положении заготовок стоя и пассивным их ориентированием.

2 Разработано усовершенствованное дисковое БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок с соотношением высоты и наибольшего диаметра в диапазоне от 1,2 до 2. В модернизированном БЗУ реализованы теоретически обоснованные способы захвата и ориентирования, приводящие к максимальной производительности. Устройство является универсальным; захват заготовок осуществляется не только в радиальном направлении со стороны пазов, но и в тангенциальном – со стороны скосов; ориентирование заготовок, в том числе с неявным смещением центра масс, более стабильно за счет паза в планке.

3 Разработаны конструктивные ограничения на параметры органов захвата и ориентирования, определяющие в виде диапазонов взаимосвязанных параметров заготовок и БЗУ условия его стабильного функционирования. При исследовании процесса захвата были определены допустимые параметры радиальных пазов, направляющих скосов, диска, карманов, а при исследовании процесса ориентирования – допустимые параметры кармана и планки. Соблюдение полученных условий позволит усовершенствованному БЗУ выдавать к технологическому оборудованию только правильно сориентированные полые по торцам заготовки, обеспечив тем самым стабильность при работе.

4 Разработаны математические модели вероятности захвата и производительности усовершенствованного БЗУ, учитывающие влияние на процесс захвата геометрических параметров заготовок, их сцепляемости и коэффициента трения между ними во взаимосвязи с конструктивными и кинематическими параметрами БЗУ и коэффициентом трения между заготовками и элементами БЗУ, способа западания в карманы заготовок из радиальных пазов и со стороны направляющих скосов. Теоретические исследования показали, что в усовершенствованном БЗУ уменьшение длины направляющего скоса между карманами диска с 0,5 до 0,45 наибольшего диаметра при зазоре по шагу, равном 0,1 наибольшего диаметра приведет к повышению производительности с 205 до 230 шт./мин; наибольшая производительность достигается при зазоре по шагу, равном 0,25 наибольшего диаметра и составляет до 225 шт./мин.

5 Проверка работоспособности и стабильного функционирования, осуществленные на экспериментальном натурном макете модернизированного БЗУ для двух типов заготовок, каждого из которых было изготовлено по три вида с соотношениями  $h/d_2 = 1,3$ ,  $h/d_2 = 1,5$  и  $h/d_2 = 1,9$ , показали реализацию захвата со стороны радиальных пазов и скосов, и пассивного ориентирования всех заготовок с помощью планки. Проверка адекватности разработанных математических моделей для двух видов заготовок показала, что максимальная разница между теоретическими и экспериментальными значениями производительности при окружных скоростях меньших на 10..15 % окружной скорости, при которой производительность БЗУ достигает своих наибольших значений, для заготовок с  $h/d_2 = 1,5$  составила менее 1,1 %, а для заготовок с  $h/d_2 = 1,9$  – 2,8...4,2 %, а ее значения составили соответственно 280 и 257 шт./мин. Анализ дисперсии среднего значения производительности показал, что чем выше окружная скорость карманов, тем больше колебания производительности.

6 Разработана методика проектирования и обоснования эффективной конструкции усовершенствованного БЗУ для различных типов полых по торцам асимметричных заготовок, позволяющая обеспечить максимально возможные значения производительности при обеспечении требований надежного и стабильного функционирования. Основу методики составляет анализ на ранних этапах проектирования всех возможных к реализации в БЗУ способов захвата и ориентирования заготовок, построения математических моделей вероятности благоприятного захвата для каждого случая и выбор наиболее эффективного.

7 Разработаны компьютерные программы для расчета и теоретического исследования вероятности захвата и производительности усовершенствованного БЗУ в зависимости от его параметров и параметров загружаемых полых по торцам асимметричных заготовок, позволяющие спроектировать наиболее производительное БЗУ, скорректировав те параметры, которые оказывают наибольшее влияние на вероятность захвата и производительность.

8 Научно обоснованная методика проектирования и усовершенствованная конструкция универсального БЗУ для асимметричных заготовок с внутренними полостями по торцам, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований, используются на предприятии АО «Тульский патронный завод», а их внедрение в производство позволило достичь экономического эффекта в размере 1,18 млн руб. в год, что подтверждается соответствующим актом.

Полученные при выполнении диссертации результаты рекомендуется использовать при проектировании дисковых БЗУ с направляющими скосами и возможностью регулировки высоты карманов в зависимости от расположения центра масс полых по торцам асимметричных заготовок с соотношением высоты и наибольшего диаметра от 1,2 до 2 для повышения производительности.

Перспективой дальнейшей разработки темы диссертации являются разработка математических моделей процессов пассивного ориентирования заготовок и их выдачи из карманов в накопитель, что позволит определить ограничивающие данные процессы окружные скорости карманов и предусмотреть способы их повышения.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК:*

1. Пантюхина, Е. В. Проблемы автоматической загрузки асимметричных полых по торцам заготовок тел вращения / Е. В. Пантюхина, С. А. Васин, А. Е. Богодяж, А. Л. Бахно // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. – № 5 (127). – С. 124 – 128.

2. Пантюхина, Е. В. Методология обеспечения качества изделий в форме колпачка, близких к равноразмерным / Е. В. Пантюхина, А. Е. Богодяж, С. А. Васин, А. Л. Бахно // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2025. – Т. 23. – № 4. – С. 147 – 155.

3. Богодяж, А. Е. Анализ взаимосвязанного влияния параметров асимметричных по торцам заготовок и механических дисковых бункерных загрузочных устройств на вероятность захвата / А. Е. Богодяж, С. А. Васин, Е. В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 580 – 586.

4. Богодяж, А. Е. Особенности разработки универсальных усовершенствованных карманчиковых дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных заготовок тел вращения / А. Е. Богодяж // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 4. – С. 270 – 277.

5. Богодяж, А. Е. Обзор и направления исследований в области автоматической загрузки полых по торцам асимметричных заготовок тел вращения в оборудование массовых производств / А. Е. Богодяж, Е. В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 7. – С. 265 – 276.

6. Богодяж, А. Е. Разработка бункерного загрузочного устройства для асимметричных заготовок на основе результатов теоретического исследования вероятности благоприятного захвата / А. Е. Богодяж, И. В. Пузиков, Е. В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2026. – № 8. – С. 12 – 20.

*Публикации в сборниках трудов конференций  
и в других научных изданиях, индексируемых в РИНЦ*

7. Богодяж, А. Е. Взаимосцепляемость заготовок при описании вероятности их захвата в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / А. Е. Богодяж, Е. В. Пантюхина // Вестник ТулГУ «Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов Национальной научно-техн. конференции с международным участием: АПИР-30», 10 октября 2025 года. Тула: Изд-во ТулГУ, 2025. – С. 62 – 66.

8. Богодяж, А. Е. Автоматизация процесса загрузки полых по торцам заготовок в механических дисковых бункерных загрузочных устройствах / А. Е. Богодяж, Е. В. Пантюхина // Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции (26 – 28 ноября 2025 г.), Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: Д. М. Дубинкин (отв. ред.) [и др.]. Кемерово, 2025. – С. 355 – 358.

9. Пантюхина, Е. В. Пути совершенствования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных заготовок / Е. В. Пантюхина, А. Е. Богодяж // В сборнике: 62-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием. Сборник докладов. В 2-х частях. Тула, 2026. – С. 453 – 457.

**Подписано в печать 02.10.2026**  
**Формат бумаги 70×100<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная**  
**Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ 010а**  
**Отпечатано в Издательстве ТулГУ**  
**300012, г. Тула, просп. Ленина, 95**