

На правах рукописи



Сидельников Иван Дмитриевич

**Организация материально-технического обеспечения
машиностроительной продукции на этапе эксплуатации с учетом
возвратных потоков и восстановления ресурса**

Специальность 05.02.22 — Организация производства (машиностроение)

Автореферат на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Бром Алла Ефимовна**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Баурова Наталья Ивановна**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», профессор кафедры производства и ремонта автомобилей и дорожных машин, декан факультета дорожных и технологических машин

Кравченко Игорь Николаевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», профессор кафедры технического сервиса машин и оборудования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им А.Н. Туполева - КАИ»

Защита состоится 23 июня 2022г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.23 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, ауд. 386.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н.



Е.С. Постникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последнее время в отечественных машиностроительных компаниях активно внедряется практика рециклинга, основанная на организации возвратных потоков изделий, выработавших свой технический ресурс, для восстановления и повторного использования в качестве запасных частей (ЗЧ) или производства новых агрегатов и блоков выпускаемой техники. Организация возврата и рециклинг в машиностроении отвечают современным требованиям экологичности и ресурсосбережения промышленного производства.

Поскольку машиностроительная продукция (МП) отличается высокой стоимостью, эксплуатанты заинтересованы в возврате элементов с большой наработкой/износом с целью получения более выгодных условий на приобретение запасных частей и материально-техническое обеспечение (МТО) процессов эксплуатации техники в целом; с другой стороны, производителям заранее известна структура металла возвращаемых элементов, возможности по рециклингу и затраты на восстановление ресурса.

Для обеспечения надежности и эффективности эксплуатации многие крупные компании, эксплуатирующие большой парк однотипных моделей техники, стали использовать различные формы кооперации, позволяющие организовать обменный фонд МТО с использованием платформенных IT-технологий. Такой обменный фонд представляет собой пул ЗЧ – систему коллективного пользования ЗЧ, которая используется эксплуатантами для обеспечения надежности и снижения затрат при эксплуатации на содержание собственного запаса за счет эффективной организации возвратных потоков в рамках общего информационного пространства.

Для производителей/поставщиков ЗЧ организация сотрудничества эксплуатантов в рамках таких пулов даст возможность анализировать корреляционные зависимости технического ресурса от реальных условий эксплуатации, что позволит формировать и актуализировать базы данных (БД) по фактическим показателям эксплуатации и возврата, которые затем должны использоваться для планирования процессов восстановления ресурса, производства и закупки ЗЧ.

Важность учета фактических параметров возвратных потоков в рамках пула ЗЧ обусловлена необходимостью получения актуальной информации об объемах и времени поступления изношенных элементов, что крайне важно для планирования производственных процессов восстановления технического ресурса. В свою очередь, это обеспечит минимизацию затрат на производство новых ЗЧ и МТО для удовлетворения потребностей пула эксплуатантов за счет рациональной организации рециклинга и закупки ЗЧ.

Это свидетельствует об актуальности разработки модели МТО эксплуатации техники в условиях организации пульных схем с учетом возвратных потоков и восстановления ресурса изделий.

Степень разработанности проблемы. В современных научных трудах отечественных ученых имеются теоретические и методологические разработки, охватывающие важные аспекты исследуемой области. В области организации

возвратных потоков, рециклинга и восстановления технического ресурса в машиностроении: Озорин С.П., Канке А.А., Федосеева В.А., Тарасов В.Ю., Молодан А.А., Кныш В.А., Колодин В.С.; с точки зрения эффективного управления МТО: Орлов А.И., Омельченко И.Н., Хоботов Е.Н., Бром А.Е., Рыжиков Ю.В., Черкасов Г.Н., Гаджинский А.М., Гераськин М.И., Бочкарев А.А., Лукинский В.С.

Область исследований диссертации соответствует пунктам 2 и 4 паспорта специальности 05.02.22: «Разработка методов и средств эффективного привлечения и использования материально-технических ресурсов и инвестиций в организацию производственных процессов», «Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов».

Цель работы – разработка модели организации процессов материально-технического обеспечения машиностроительной продукции на этапе эксплуатации с учетом фактических параметров возвратных потоков на основе создания пула запасных частей, обеспечивающей эффективное планирование производственных процессов.

Для достижения поставленной цели в диссертационном исследовании необходимо решить **следующие задачи**:

1. Анализ проблем организации процессов МТО продукции на этапе эксплуатации и обработки возвратных потоков на машиностроительных предприятиях.
2. Исследование и построение схем организации пулов ЗЧ для обеспечения поддержки эксплуатации продукции.
3. Разработка модели МТО продукции на этапе эксплуатации с учетом корреляционной зависимости параметров возвратного потока от условий эксплуатации в рамках организации пульных схем.
4. Разработка инструмента планирования процессов МТО с учетом времени восстановления технического ресурса элементов на предприятии.
5. Оценка эффективности внедрения разработанных модели и инструмента планирования процессов МТО на машиностроительном предприятии.

Научная новизна.

1. Исследованы различные формы кооперации эксплуатантов и построены схемы организации пулов ЗЧ для обеспечения поддержки эксплуатации, включающие замкнутый контур возвратных и прямых потоков элементов, формирующих обменный фонд.

2. Разработана многономенклатурная модель оптимизации МТО продукции с учетом фактических параметров процессов эксплуатации, обеспечивающая минимизацию затрат в условиях различных схем организации пулов запасных частей; в отличие от существующих моделей, моделируется система «изделие + запас на складе», что позволяет учесть вероятность отказа элемента в конечном изделии и вероятность отказа запасного элемента на складе.

3. Обоснован подход к учету параметров возвратных потоков на основе анализа корреляционной зависимости фактических показателей надёжности

элементов с выработанным ресурсом от условий эксплуатации и технического обслуживания.

4. Разработан инструмент планирования процессов МТО на основе определения времени обработки возвратных потоков с учетом фактической наработки элементов, что позволит планировать производственные процессы восстановления, производства и управления запасами ЗЧ по временным и объемным показателям.

Объект исследования: система материально-технического обеспечения машиностроительной продукции на этапе эксплуатации.

Предмет исследования: организация и моделирование процессов возврата, восстановления и материально-технического обеспечения машиностроительной продукции на этапе эксплуатации.

Результаты, выносимые на защиту:

– схемы организации пулов запасных частей в условиях разных форм кооперации эксплуатантов и создания обменного фонда для обеспечения поддержки эксплуатации;

– организационная модель МТО процессов эксплуатации для основных пульных схем с учетом фактических параметров возвратных потоков и вероятности отказа ЗЧ в запасе;

– подход к учету параметров возвратных потоков на основе анализа корреляционной зависимости фактических показателей надёжности элементов с выработанным ресурсом от условий эксплуатации;

– инструмент планирования процессов МТО на основе определения времени обработки возвратных потоков элементов с учетом их фактической наработки/износа.

Практическая ценность диссертационной работы. Разработанная в диссертационном исследовании организационная модель обеспечит надежность парка техники и минимизацию затрат на МТО эксплуатации в условиях кооперации эксплуатантов и формирования пульных схем ЗЧ; организация возвратных потоков элементов с учетом фактических условий эксплуатации позволит производителям рационально планировать процессы восстановления ресурса, производства и закупки ЗЧ по объёмным и временным параметрам.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованными математическими методами, теорией надежности, основывается на положениях, сформулированных в исследованиях отечественных и зарубежных специалистов.

Апробация результатов. Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях [17-23].

Результаты диссертационного исследования внедрены на АО «Московский вертолетный завод имени М.Л. Миля» и ООО «Производственная компания «Новочеркасский электровозостроительный завод», а также в учебный процесс факультета «Инженерный бизнес и менеджмент» МГТУ им. Н.Э. Баумана в дисциплине «Логистика замкнутого цикла», «Жизненный цикл продукции», «Интегрированная логистическая поддержка». Реализация результатов диссертационной работы подтверждены соответствующими актами внедрения.

Публикации. Основное положение работы отражено в 23 научных работах, общим объемом автора 6.94 п.л., из них в журналах, рекомендованных ВАК РФ – 11 [6-16], 7 статей в материалах научных конференций [17-23], а также 5 статей в журналах, рецензируемых SCOPUS [1-5].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов и заключения, списка литературы из 123 наименований, а также приложения. Диссертация содержит 104 страницы основного текста, 28 рисунка, 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, поставлены цели и задачи исследования, сформулированы практическая ценность результатов работы, научная новизна и выделены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе проведен анализ существующих систем и моделей организации МТО машиностроительной продукции на этапе эксплуатации, а также основ процессов возврата и восстановления технического ресурса элементов, получаемых по истечении срока наработки от эксплуатантов.

Длительный накопленный практический опыт эксплуатации технических систем свидетельствует о прямой зависимости основных комплексных показателей надежности – готовности, работоспособности и т.д. – от наличия ЗЧ в системе МТО. Дефицит запаса даже по одной-нескольким ЗЧ может увеличивать время восстановления в десятки раз, что даже при заложенных в конструкцию объекта высоких показателях безотказности и ремонтпригодности значительно снижает надежность техники при эксплуатации. Этим обусловлен постоянный поиск новых форм организации МТО, позволяющих не только решить проблему дефицита, но одновременно удовлетворить требованиям оперативности, экономии, рациональному использованию элементов, выработавших свой ресурс, путем рециклинга и повторного использования. Эти задачи необходимо решать одновременно в нескольких аспектах:

- учитывать при формировании МТО фактические условия и интенсивность эксплуатации, осуществлять переход к стратегиям эксплуатации по фактическому состоянию технического ресурса, совершенствовать методы прогнозирования спроса на ЗЧ;

- для оптимизации затрат при эксплуатации разрабатывать новые подходы к организации МТО, основанные на различных формах кооперации эксплуатантов, с учетом их экономической целесообразности для всех участников;

- организовывать движение и обработку возвратных потоков выработанных элементов для последующего восстановления, и использования в производственных и обеспечивающих процессах.

В диссертации была проанализирована функциональная сущность организации возвратных потоков на машиностроительном предприятии и выделены ключевые процессы, образующие замкнутый цикл возвратных потоков, представленные в Таблица 1.

Ключевые процессы замкнутого цикла формирования возвратных потоков

Процесс	Характеристика процесса
Осуществление сбора элементов у эксплуатантов, сортировка и складирование	Выбор программы и способа возврата изделий с выработанным техническим ресурсом, организация инфраструктуры возвратных потоков, включающей транспортировку и промежуточные склады.
Дефектовка	Принятия решения о целесообразности проведения восстановительного ремонта, переработки, утилизации после проведения процесса дефектовки. Оценка экономической целесообразности процессов восстановления.
Восстановление технического ресурса	Проведение реновации и модернизации изделий, восстановление стоимости изделий, извлечение полезных деталей.
Анализ фактических показателей возвратного потока	Определение доли восстановленных элементов относительно общего объема. Анализ интенсивности отказов, фактический наработки.
Организация перемещения и ввода в оборот по месту эксплуатации	Организация пула запасных частей, введение в оборот по месту эксплуатации техники, формирование обменного фонда в соответствии с критерием минимизации затрат для поддержки эксплуатационной надежности

Во второй главе исследованы основные схемы организации пулов ЗЧ в рамках различных форм кооперации эксплуатантов, разработана организационная модель МТО эксплуатации с учетом корреляционной зависимости параметров возвратного потока от условий эксплуатации, представлены модификации модели с учетом различных групп затрат, обусловленных выбором пульной схемы ЗЧ.

При эксплуатации большого парка однотипных элементов в последнее время используются различные формы кооперации эксплуатантов, чтобы снизить собственные затраты на создание и содержание запаса ЗЧ. Современные IT-технологии позволяют создавать различные варианты организации обменного фонда ЗЧ, предполагающие совместное использование или аренду ЗЧ по установленным правилам. Такой обменный фонд называется пулом ЗЧ, создаваемым для обеспечения надежности и снижения затрат на закупку ЗЧ за счет аккумуляции и оптимизации запаса по объему, структуре и номенклатуре ЗЧ.

Для авиатехники, сложных энергетических систем, нефти и газоперекачивающих станций, объектов техники с длительным сроком эксплуатации и большой номенклатурой комплектующих переход к пульным схемам ЗЧ значительно сокращает затраты на формирование и содержание собственного запаса ЗЧ за счет хранения используемых однотипных элементов в обменном фонде пула.

В рамках пульной схемы производитель/поставщик ЗЧ организует движение возвратных потоков элементов с выработанным ресурсом от

эксплуатантов на восстановление технического ресурса и производство ЗЧ; таким образом, формируется замкнутый контур возвратных и прямых потоков элементов, реализующий актуальное требование рециклинга в машиностроении.

В диссертации были выделены и исследованы основные виды схем организации пулов ЗЧ. На Рис. 1а представлена схема пула, когда эксплуатанты кооперируются на основе взаимной аренды ЗЧ и формируют собственные обменные фонды. На Рис. 1б пул представляет собой консолидированный обменный фонд коллективного пользования ЗЧ, создаваемый на базе общего органа управления и единой информационной платформы, деятельность которых финансируется эксплуатирующими компаниями. На Рис. 1в представлен вариант пула с обменным фондом, формируемым независимым оператором, берущим на себя выполнение всех процессов по формированию и управлению запасов ЗЧ для МТО эксплуатантов, включая восстановление технического ресурса выработавших элементов.

С одной стороны, выбор схемы организации пула должен соответствовать требованию минимизации затрат эксплуатантов на формирование собственного МТО; но, с другой стороны, пул ЗЧ должен обеспечивать участникам требуемый уровень надежности объекта техники в эксплуатации с учетом фактических параметров наработки и интенсивности отказов по каждому конкретному элементу. Это обеспечит эксплуатантам индивидуальный подход к планированию их потребностей, а производителям/поставщикам даст возможность внедрить в пульные схемы практику рециклинга на основе организации возвратных потоков выработанных элементов с дальнейшим восстановлением их технического ресурса и использованием в производстве и следующих поставках ЗЧ.

Для решения этой задачи в диссертационном исследовании была построена модель с учетом фактической интенсивности отказов, оптимизирующая объемы запасов ЗЧ по критерию минимизации затрат на МТО при соблюдении требования обеспечения уровня безотказной работы объектов техники в эксплуатации. Схема процесса моделирования представлена на Рис. 4.

Определение уровня надежности элементов сводится к анализу фактической наработки и фактической безотказности элементов в реальных условиях эксплуатации. При выявлении корреляционной зависимости между фактической наработкой на отказ с начала эксплуатации и после последнего ремонта, с высокой степенью вероятности можно сказать о взаимосвязи количества плановых отказов и количества фактических отказов.

Анализ корреляционной зависимости в диссертации проводился с помощью пакета Statistica на примере БД отказов элементов парков вертолетов МИ-8, эксплуатируемых и обслуживаемых в различных условиях. Пример агрегатов с высокой корреляционной зависимостью приведены в Таблица 2:

Таблица 2

Агрегаты с сильной корреляционной зависимостью

Двигатель ТВЗ-117ВМ			Стартер воздушный СВ-78БА		
	СНЭ	ППР		СНЭ	ППР
СНЭ	1,000000	0,839019	СНЭ	1,000000	0,748664
ППР	0,839019	1,000000	ППР	0,748664	1,000000

Проиллюстрируем пример распределения ВБР и интенсивности отказов в зависимости от фактической наработки для агрегата с сильной корреляционной связью (см. Рис. 2.). Реализация данной задачи осуществима в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений MatLab.



Рис. 1а. Схема пула на основе взаимной аренды и собственных обменных фондов



Рис. 1б. Схема пула с консолидированным обменным фондом



Рис. 1в. Схема пула с независимым оператором

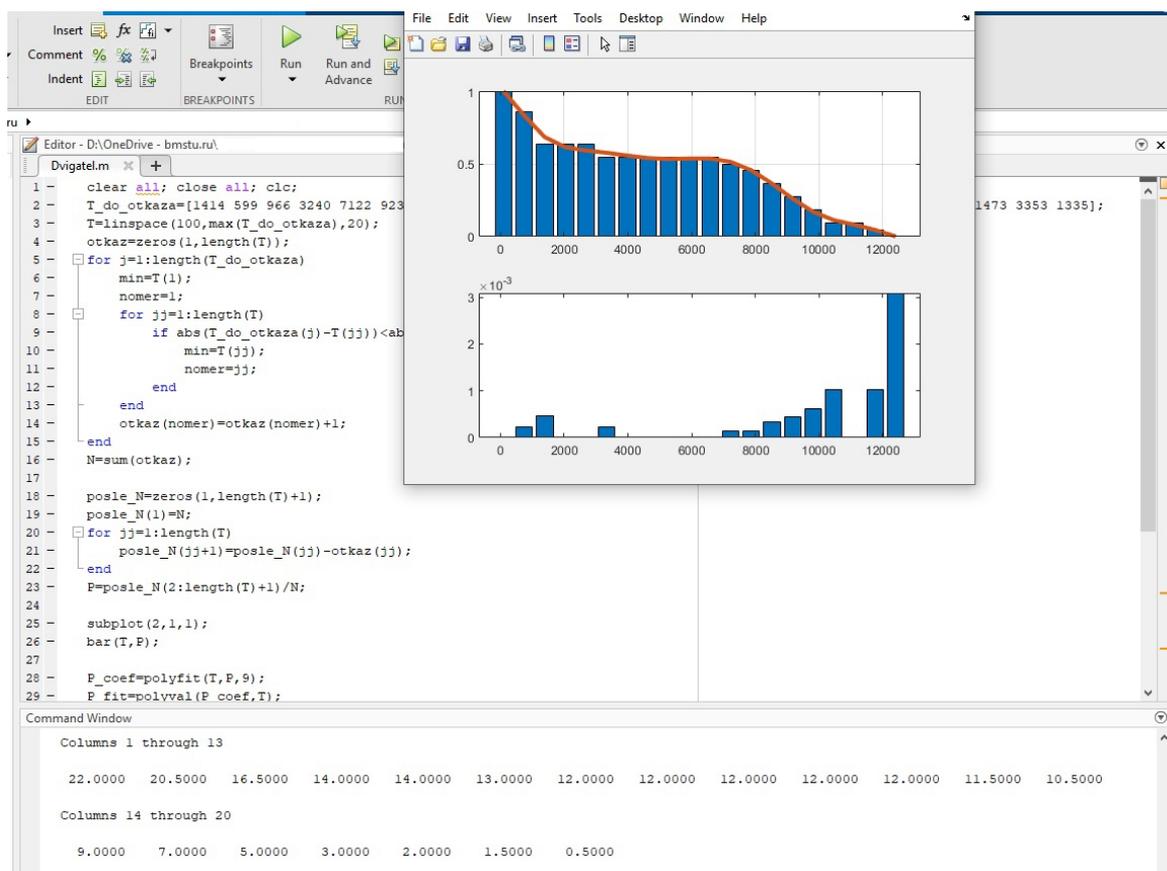


Рис. 2. – ВБР и интенсивность отказов от фактической наработки двигателя

В данном случае полученный график соответствует кривой типичной зависимости интенсивности отказов от наработки, что позволяет планировать восстановление технического ресурса и момент поступления элемента по возвратному потоку от эксплуатанта.

Для группы с высокой корреляционной зависимостью характерны постепенные отказы, при этом восстановление технического ресурса осуществляется в полном объеме. Данная группа элементов является ключевой при организации пульной схемы. Это обусловлено тем, что момент поступления агрегата с выработанным техническим ресурсом можно прогнозировать с высокой долей вероятности.

Это подтверждается диаграммами рассеяния, характеризующими тип корреляции. Сила корреляции определяется по тому, насколько близко расположены друг от друга точки на графике.

Диаграмма (Рис. 3.) иллюстрирует пример для групп элементов с сильной тесной связью, что свидетельствует о линейном типе корреляции.

Организация пульной схемы для оценки уровня надежности эксплуатации позволяет рассматривать систему «изделие + запас в обменном фонде». При переходе к вероятности отказа, поскольку она определяется интенсивностью отказов, зависящей от наработки, получим следующее выражение:

$$Q_c = 1 - P_c = 1 - \prod_{k=1}^L \prod_{i=1}^N (1 - q_{iik}^{m_k} q_{zi}^{n_i}) .,$$

где P_c – вероятность безотказной работы системы (надежность),

$q_{iik}^{m_k}$ – вероятность отказа k -го изделия при выходе из строя i -го вида элемента;

$q_{zi}^{n_i}$ – вероятность отказа по i – му типу ЗЧ.

При этом вероятность отказа изделия определяется функцией, описывающей условие сохранения работоспособности изделия.

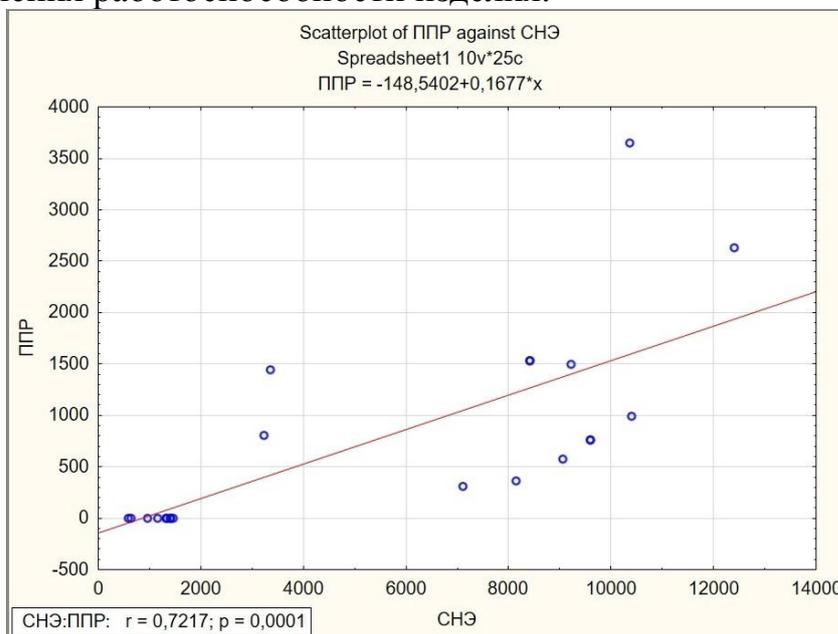


Рис. 3. – Диаграмма рассеяния для двигателя ТВЗ-117ВМ

Таким образом, разработанная организационная модель МТО с учетом фактических параметров процессов эксплуатации и групп затрат в условиях различных схем организации пулов запасных частей; в отличие от существующих моделей МТО моделируется система «изделие + запас на складе», что позволяет учесть вероятность отказа элемента в конечном изделии и вероятность отказа запасного элемента на складе.

Включение в процесс моделирования анализа корреляционной зависимости позволяет выявить группы элементов, образующих ядро обменного фонда в пульсной схеме.

В третьей главе разработан инструмент планирования процессов МТО на основе определения времени восстановления технического ресурса элементов, получаемых в рамках программы возврата от эксплуатанта, построен график динамики запасов с учетом закупаемых и восстановленных элементов, проведена апробация модели с оценкой экономического эффекта.

Инструмент планирования МТО должен учитывать разделение потоков: возвратный поток элементов для восстановления и дальнейшего использования и поток новых элементов от поставщиков. С этой целью и для корректировки объемов, закупаемых ЗЧ необходимо определить время восстановления технического ресурса элементов с наработкой, возвращаемых эксплуатантами, с учетом их доли в общем объеме возвратного потока.

В машиностроении с достаточной точностью можно определить (или будет заранее известна) длительность конкретного технологического процесса и его стоимость, но, с другой стороны, точную степень износа элементов можно определить только непосредственно при дефектовке. В процессе проведения дефектовки могут быть обнаружены скрытые дефекты, которые значительно увеличивают время восстановления, а также могут потребоваться новые элементы для замены.

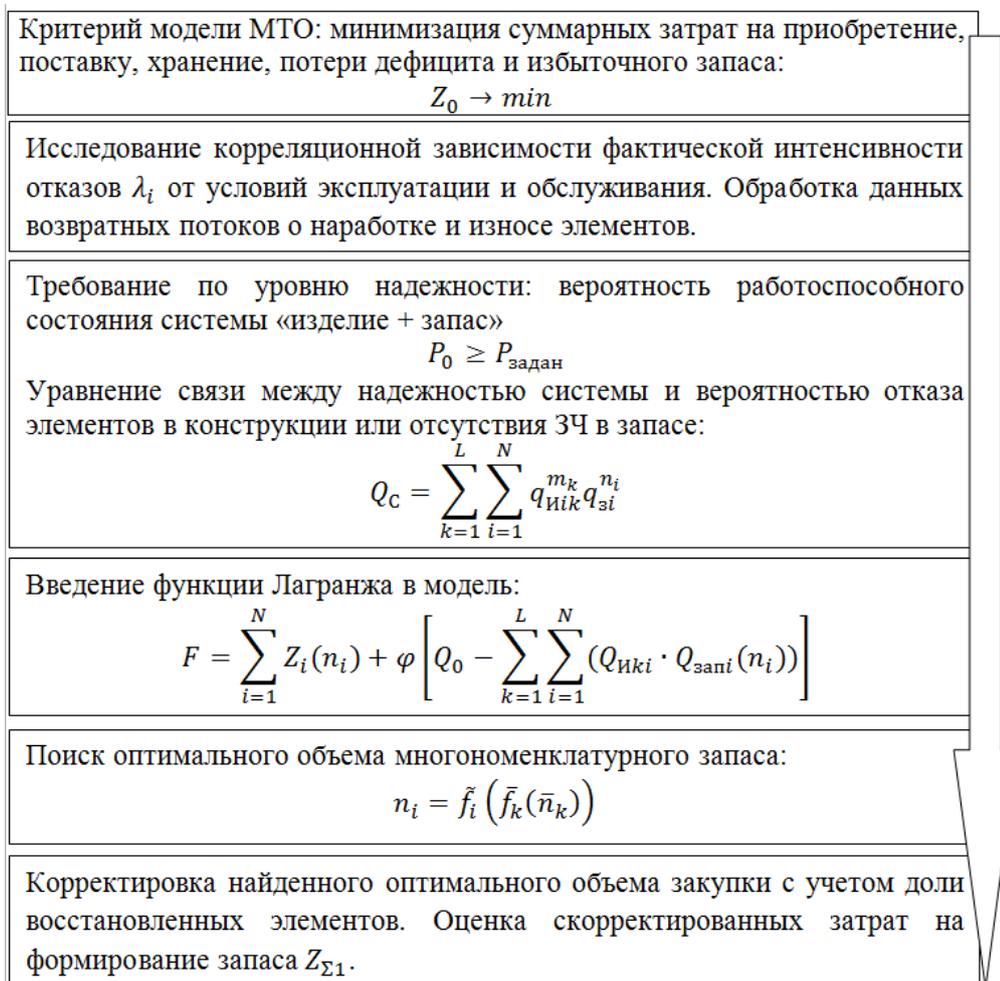


Рис. 4. Схема моделирования

Задача состоит в построении теоретической зависимости для плотности распределения $b(t)$ времени восстановления технического ресурса элементов блока. В таком случае часто проводят выравнивание статистических распределений, т.е. подбор теоретических зависимостей, описывающих наблюдавшиеся данные.

Часто приходится выполнять свёртку распределений, т.е. находить распределение суммы независимых случайных величин. В поставленной задаче надо построить распределение времени ремонта блока $b(t)$ по распределениям времени $v(t)$, необходимого для проведения дефектовки, и времени $w(t)$ проверки неисправного элемента с последующей заменой соответственно.

Решение данной задачи построим путем поиска неисправного элемента перебором. Пусть блок состоит из N равнонадежных элементов, из которых отказал только один. Перебирая порядковые номера элементов, получаем для ПЛС распределения времени восстановления блока выражение:

$$\tilde{b}(s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tilde{w}(s) \tilde{v}^{i-1}(s) = \frac{\tilde{w}(s)}{N} \frac{\tilde{v}^N(s) - 1}{\tilde{v}(s) - 1} \quad (1)$$

Если применить к правой части соотношения (1) обратное ПЛС, то можно найти искомую плотность распределения времени восстановительного ремонта блока $b(t)$, но более рационально рассчитать моменты $\{b_k\}$ этого распределения и по ним уже подбирать удобную для расчетов аппроксимацию плотности $b(t)$.

При решении поставленной задачи, выполняя необходимые преобразования, получим выражения для искомых моментов $\{b_k\}$:

$$b_1 = \frac{N-1}{2} v_1 + w_1$$

$$b_2 = (N-1) \left[\frac{v_2}{2} + v_1 w_1 + \frac{N-2}{3} v_1^2 \right] + w_2$$

$$b_3 = (N-1) \left[\frac{v_3}{2} + \frac{3}{2} (v_1 w_2 + v_2 w_1) + (N-2) (v_1^2 w_1 + v_1 v_2) + \frac{(N-2)(N-3)}{4} v_1^3 \right] + w_3.$$

Аппроксимируя исследуемое распределение $b(t)$ при большом N , подбираем другое распределение известного вида с теми же первыми моментами. Это найденное распределение должно быть удобным в расчетах и легко подбираемым по методу моментов распределением. Аппроксимирующим по двум моментам является распределение Эрланга третьего порядка, плотность которого с подобранными по методу моментов параметрами в обозначениях рассматриваемой задачи имеет вид

$$b(t) = \frac{\mu(\mu t)^2}{2!} e^{-\mu t}.$$

Данный подход позволит определить среднее значение времени, необходимого для восстановления технического ресурса. В свою очередь, результаты таких расчетов дают возможность разработать систему по обработке возвратных потоков, в которой будут в автоматическом режиме анализироваться

фактические параметры наработок безотказности, что позволит планировать производственный процесс восстановления в оперативном режиме.

Среднее значение времени $\langle T \rangle$, необходимое для восстановления технического ресурса блока определяется зависимостью:

$$\langle T \rangle = \int_0^{\infty} tb(t)dt,$$

$$\langle T \rangle = \int_0^{\infty} t \frac{\mu(\mu t)^2}{2!} e^{-\mu t} dt = \frac{\mu^3}{2} \int_0^{\infty} t^3 e^{-\mu t} dt$$

Для среднего значения времени, необходимого для восстановления технического ресурса блока получаем величину:

$$\langle T \rangle = \frac{\mu^3}{2} \frac{6}{\mu^4} = \frac{3}{\mu},$$

где $\mu = \frac{6}{Nv_1}$, и тогда окончательно для $\langle T \rangle$ имеем следующую зависимость:

$$\langle T \rangle = \frac{Nv_1}{2}.$$

Среднее значение времени, необходимое для восстановления технического ресурса блока, равно первому начальному моменту b_1 плотности распределения времени $b(t)$ восстановительного ремонта блока, который в свою очередь зависит от числа элементов в блоке и от первого начального момента v_1 плотности распределения времени $v(t)$, необходимого для проведения дефектовки.

Таким образом, при планировании МТО учитывается время восстановления элементов, что позволит корректировать время и объемы закупаемых новых ЗЧ. На Рис. 5. представлена динамика расхода и пополнения запаса ЗЧ с учетом поступления элементов с восстановленным техническим ресурсом.

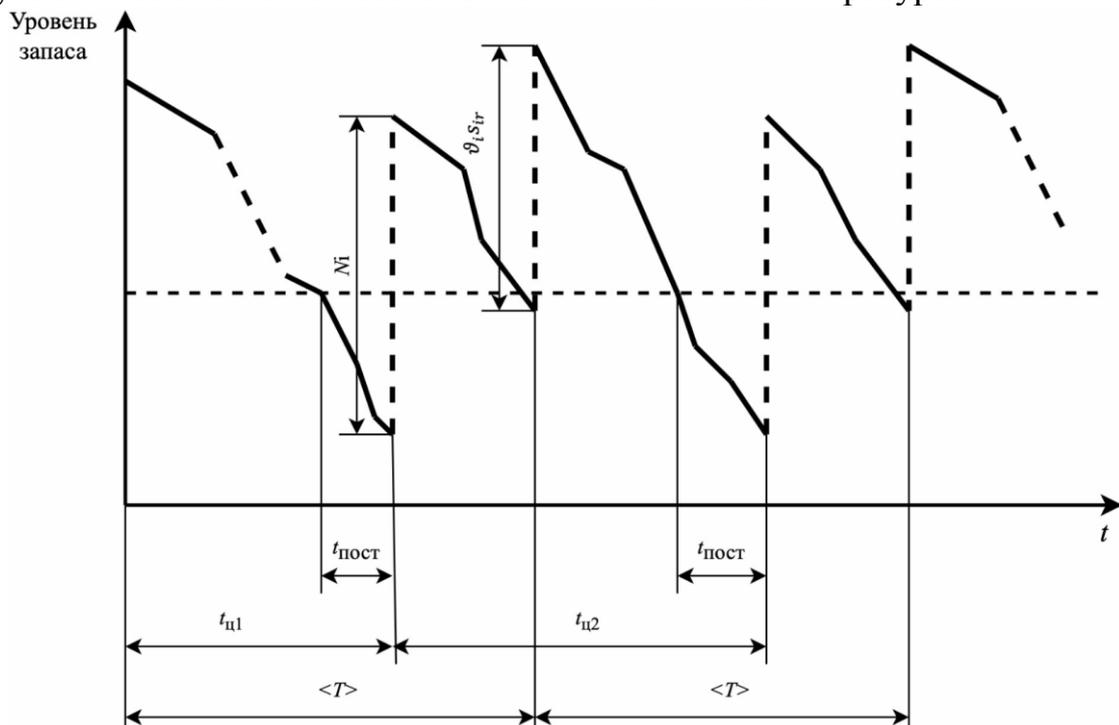


Рис. 5. Динамика расхода и пополнения запаса ЗЧ с учетом поступления элементов с восстановленным техническим ресурсом,

где $t_{цк}$ – фактическое время k -го цикла, $t_{пост}$ – время поставки, $\vartheta_i s_{ir}$ – объем элементов i -го вида с восстановленным ресурсом, N_i – скорректированный объем закупки i -го вида элементов.

Фактическая потребность в течение k -го цикла может быть покрыта за счет либо новых, закупленных элементов, либо за счет элементов с восстановленным техническим ресурсом. В свою очередь это позволяет скорректировать объем закупаемых элементов для пополнения обменного фонда n_i на долю изделий с восстановленным ресурсом $\vartheta_i s_{ir}$.

Апробация разработанной модели проводилась для парка вертолетов МИ-8 с оценкой стоимости содержания обменного фонда для трех основных пульных схем. Были выбраны элементы с высокой степенью корреляции, которые составят основную номенклатуру обменного фонда при кооперации эксплуатантов, с учетом их восстановления после износа (Таблица 3).

Таблица 3

Стоимость содержания обменного фонда при различных формах организации пулов

Номенклатура	Схема пула с консолидированным обменным фондом	Схема пула на основе взаимной аренды и собственных обменных фондов	Схема пула с независимым оператором
Стабилизатор	16290 тыс. руб.	24930 тыс. руб.	16770 тыс. руб.
Заслонка регулирующая 1919Т	1284,85 тыс. руб.	2379,85 тыс. руб.	1329,85 тыс. руб.
Двигатель ТВ3-117ВМ	414500 тыс. руб.	832500 тыс. руб.	480500 тыс. руб.
Стартер воздушный СВ-78БА	6398 тыс. руб.	11508 тыс. руб.	6678 тыс. руб.
Выключатель коррекции ВК-53РВ	2689,5 тыс. руб.	4249,5 тыс. руб.	2839,5 тыс. руб.
Лопасть несущего винта 8АТ-2710-000	141265 тыс. руб.	295165 тыс. руб.	146965 тыс. руб.
Совокупные затраты	582427,35 тыс. руб.	1170732,35 тыс. руб.	655082,35 тыс. руб.

Наиболее целесообразным является организация пула с консолидированным обменным фондом, поскольку в данном случае значительно снижаются объемы запасных элементов (на 22% в денежном выражении). При этом данные объемы потребностей корректируются на долю элементов, с восстановленным техническим ресурсом (см. Рис. 6а. и Рис. 6б.), что позволяет добиться снижения совокупных затрат на МТО на 13%.

Сформированный запас по выбранной схеме пула позволяет полностью покрыть потребность в ЗЧ, возникшую в следствии отказов элементов (см. Рис. 7), а также минимизировать затраты на формирование и поддержание обменного фонда.

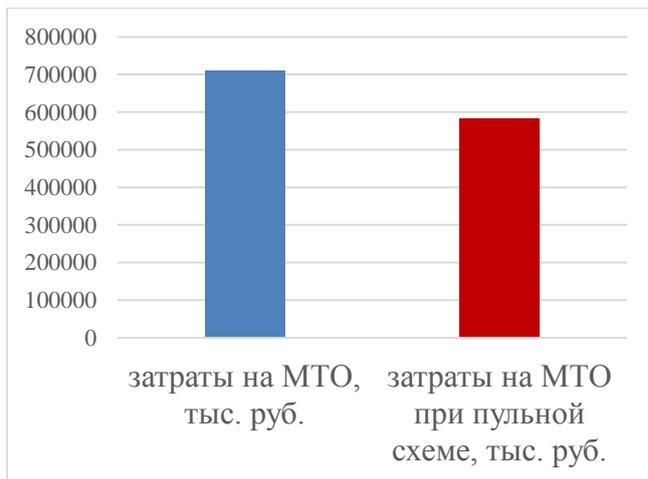


Рис. 6а. Сравнение затрат на формирование обменного фонда



Рис. 6б. Структура затрат на формирование МТО при пульной схеме

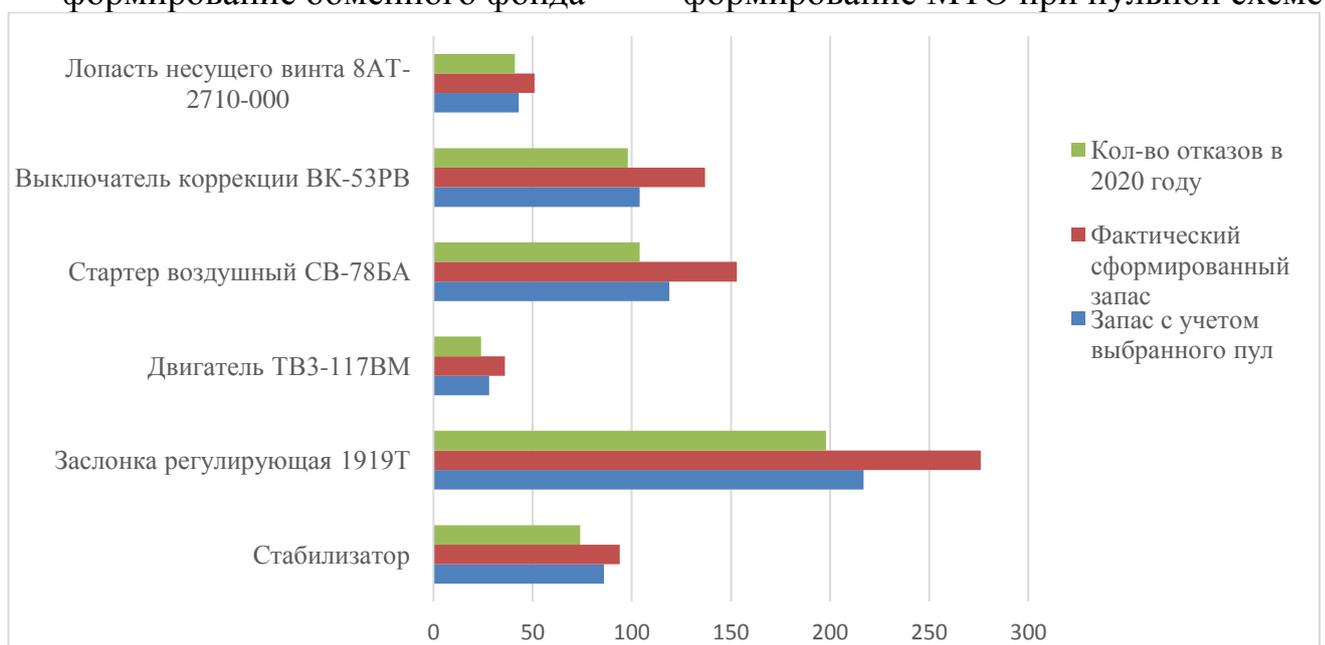


Рис. 7. Сравнение рассчитанного объема запаса с отказами за 2020 год

Таким образом, модель обеспечивает минимизацию затрат на формирование запаса ЗЧ в условиях организации пульных схем МТО с учетом фактических параметров возвратного потока выработавших свой ресурс элементов и вероятности отказа ЗЧ в запасе, а разработанный инструмент планирования МТО позволит эффективно планировать производственные процессы восстановления, производства и управления запасами ЗЧ по временным и объемным показателям, что даст возможность предприятиям активно внедрять рециклинг в производственную деятельность.

ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ подходов к организации МТО показал необходимость активного внедрения практики рециклинга и перехода к современным формам кооперации эксплуатантов, основанных на создании пулов ЗЧ с включением возвратных потоков элементов, выработавших свой ресурс, что позволит минимизировать издержки на МТО для эксплуатантов и затраты на производство и закупку новых ЗЧ для производителей продукции.

2. Исследование схем организации пулов запасных частей позволило сделать постановку задачи моделирования МТО эксплуатации с учетом различных групп затрат, обусловленных характером движения прямых и возвратных потоков в пульных схемах и корреляционной зависимости между фактической наработкой и условиями эксплуатации объектов техники.

3. Разработанная организационная модель МТО эксплуатации обеспечивает минимизацию затрат на формирование запаса ЗЧ в условиях организации пульных схем МТО с учетом фактических параметров возвратного потока, выработавших свой ресурс элементов и вероятности отказа ЗЧ в запасе.

4. Разработанный инструмент планирования МТО, основанный на определении времени восстановления технического ресурса элементов, получаемых в рамках программы возврата от эксплуатанта, позволит эффективно планировать производственные процессы восстановления, производства и управления запасами ЗЧ по временным и объемным показателям, что даст возможность предприятиям активно внедрять рециклинг в свою деятельность.

5. Внедрение разработанной модели и оценка экономической эффективности организации пульных схем ЗЧ с включением возвратных потоков для эксплуатантов продукции показали, что значительно сокращается объем хранимых элементов (более 22% в денежном выражении по всей рассматриваемой номенклатуре), а совокупные затраты на МТО снижаются на 13%, что позволяет сделать вывод о необходимости перехода к рациональной организации МТО, основанной на создании замкнутого контура потоков в рамках пула ЗЧ, включающих возвратный поток элементов с восстановленным техническим ресурсом и поток новых элементов от поставщиков. Интеграция производственных процессов эксплуатации, возврата и восстановления технических изделий лежит в основе эффективного МТО, обеспечивающего надежность техники при поддержке эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в перечень SCOPUS:

1. Sidelnikov I.D., Brom A.E., Kotova P. Simulation of optimal control of return flow of products from composite materials // «Key trends in composites science and technologies» (Advances in Composite science and technologies) 2021. DOI:10.1088/1742-6596/1990/1/012024 (0,5 п.л./ 0,3 п.л.)
2. Brom A.E., Sidelnikov I.D. Organizational approaches to composite repair of products with deterioration // «Key trends in composites science and technologies» (Advances in Composite science and technologies) 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1990/1/012023 (0,45 п.л./ 0,25 п.л.)
3. Sidelnikov I.D., Brom A.E., Omelchenko I.N. The influence of the use of composite materials on the rationing of material resources in mechanical engineering // «Key trends in composites science and technologies» (Advances in Composite science and technologies) 2019. DOI:10.1088/1757-899X/934/1/012008 (0,5 п.л./ 0,4 п.л.)
4. Brom A.E., Stoyanova M.V., Sidelnikova I.D. Selection of the best available technology based on the Analytic Hierarchy Process // «Key trends in composites science and technologies» (Advances in Composite science and technologies) 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/934/1/012007 (0,4 п.л./ 0,3 п.л.)

5. Brom A.E., Sidelnikov I.D., Terentyeva Z.S. The Optimization of Spare Parts Volume Considering Redundancy for Complex Equipment in the Conditions of Various Functional Purposes // В сборнике: Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018. 2018. С. 8551897. DOI: [10.1109/MLSD.2018.8551897](https://doi.org/10.1109/MLSD.2018.8551897) (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

6. Бром. А.Е., Сидельников И.Д. Оптимизация запаса обменного фонда для восстановленных элементов // Наука и бизнес: пути развития. № 12(114). 2020. С.49-51. (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

7. Сидельников И.Д. Организация пула запасных частей в условиях альянса эксплуатирующих компаний // Наука и бизнес: пути развития. № 12(114). 2020. С.74-78. (0,45 п.л.)

8. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Определение времени восстановительного ремонта при организации возвратных потоков и рециклинга в машиностроении // Наука и бизнес: пути развития. № 4(106). 2020. С.47-50. (0,5 п.л./ 0,4 п.л.)

9. Бром. А.Е., Сидельников И.Д. Конструктивно-технологические факторы в формировании материально-технического снабжения машиностроительного производства // Наука и бизнес: пути развития. № 12(102). 2019. С.77-82. (0,42 п.л./ 0,2 п.л.)

10. Сидельников И.Д. Организация и обработка возвратных потоков на предприятии машиностроения // Наука и бизнес: пути развития. # 12(102). 2019. С.115-119. (0,5 п.л.)

11. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Оптимизация многономенклатурного запаса в системах материально-технического обеспечения машиностроительной продукции гражданского назначения // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 19-24. (0,56 п.л./ 0,35 п.л.)

12. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Оптимизация многономенклатурного запаса для техники военного и специального назначения при заданных условиях отказа // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 3(81). С. 82-87. (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

13. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Модель оптимизации многономенклатурного запаса для техники военного и специального назначения в условиях малого размера парка // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 2(80). С. 9-14. (0,5 п.л./ 0,35 п.л.)

14. Омельченко И.Н., Бром А.Е., Сидельников И.Д. Критерий эффективности цепей поставок и построение целевой функции в задачах оптимизации материально-технического снабжения для сложной техники // Организатор производства. 2017. № 4. С. 83-91. (0,69 п.л./ 0,4 п.л.)

15. Бром А.Е., Сидельников И.Д. Организация материального снабжения для техники военного и специального назначения // Вестник московского государственного областного университета. Серия: Экономика. 2016. № 4. С. 56-61. (0,44 п.л./ 0,3 п.л.)

16. Сидельников И.Д. К вопросу об экономическом обосновании стратегий ремонтного обслуживания машиностроительной продукции // Экономика и предпринимательство. 2016. № 11-4. С. 875-879. (0,69 п.л.)

Тезисы докладов:

17. Сидельников И.Д., Бром А.Е. К вопросу о планировании материального снабжения в машиностроении с учетом рециклинга // сборник конференции: «Машиностроение: инновационные аспекты развития». III Международная научно-практическая конференция. Санкт-Петербург. 13 марта 2020. С. 134 -137. (0,25 п.л./ 0,1 п.л.)
18. Сидельников И.Д. Учет возвратных потоков и конструктивно-технологических факторов при организации материально-технического снабжения машиностроительного производства // Серия: теория и практика организации промышленного производства. Эффективность организации и управления промышленными предприятиями: проблемы и пути решения. Материалы III Международной научно-практической конференции. 2020. С. 118-120. (0,25 п.л.)
19. Сидельников И.Д., Аксенова Т.В., Снигур А.Р., Краева А.А. Эффективное управление запасами на предприятии при использовании комбинированной стратегии с постоянным объемом заказа // Серия: теория и практика организации промышленного производства. Эффективность организации и управления промышленными предприятиями: проблемы и пути решения. Материалы III Международной научно-практической конференции. 2020. С. 121-123. (0,25 п.л./ 0,1 п.л.)
20. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Организация рационального материального снабжения в условиях различных производственных режимов // В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). 2019. С. 1005-1007. (0,25 п.л./ 0,15 п.л.)
21. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Стратегические аспекты взаимодействия с поставщиками для производителей готовой продукции машиностроения // конференция «Стратегическое планирование и развитие предприятий». Москва: ЦЭМИ РАН, (11-12 апреля) 2017. (0,2 п.л./0,1 п.л.)
22. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Проблема обеспечения эффективного материально-технического снабжения для сложной техники // конференция «Будущее машиностроения России». Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, (25-28 сентября) 2017. (0,2 п.л./0,1 п.л.)
23. Сидельников И.Д., Бром А.Е. Организация материально-технического обеспечения для продукции, эксплуатируемой по техническому ресурсу// конференция «Эффективность организации и управления промышленными предприятиями: проблемы и пути решения». Воронеж: ВГТУ, (14-15 ноября) 2017. (0,31 п.л./0,2 п.л.)