

На правах рукописи

ГОЛОВЧЕНКО ГЛЕБ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**МЕТОДЫ РЕСУРСНО-ВРЕМЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ АЭРОПОРТОМ
В СБОЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Специальность

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» на кафедре № 8 «Прикладная математика и информатика»

Научный руководитель: Далингер Яков Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
проректор по РР и ХР, заведующий кафедрой №8
«Прикладная математика и информатика»
ФГБОУ ВО СПбГУ ГА

Официальные оппоненты: Чинючин Юрий Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Техническая эксплуатация
летательных аппаратов и авиадвигателей»
ФГБОУ ВО МГТУГА

Селиверстов Ярослав Александрович,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник лаборатории интеллектуальных
транспортных систем ФГБУН ИПТ
им. Н.С. Соломенко РАН

**Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ульяновский институт
гражданской авиации имени главного
маршала авиации Б.П.Бугаева»**

Защита состоится 23 ноября 2018 года в 10-00 на заседании диссертационного совета Д.223.012.01 на базе Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38, ауд. 334

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <http://spbguga.ru/root/main/ob-yavleniya-o-zashchite-dissertatsij/>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.223.012.01
кандидат технических наук, доцент



Я.М. Далингер

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время роль воздушного транспорта значительно возросла, так как он является наиболее быстрым средством перемещения на большие расстояния. В транспортной системе России авиационные перевозки занимают ключевое место среди пассажирского транспорта. В последние годы (2013 - 2017 гг.) наблюдается значительно развитие гражданской авиации, характеризующееся стабильным ростом пассажирских авиаперевозок, строительством новых аэропортов, модернизацией и реконструкцией текущих аэропортов и другими факторами. Увеличение пассажирских перевозок приводит повышению интенсивности выполнения авиарейсов и сокращению времени наземного обслуживания. Многие авиакомпании, выполняющие полеты в отечественные аэропорты, предъявляют всё более жесткие требования по качеству и времени выполнения наземного обслуживания. Так авиакомпания «Победа» в 2017 году сократила время разворота до 25 минут в аэропорту «Бегишево». Всё это приводит к увеличению рисков возникновения сбойных ситуаций.

В работе над сбойной ситуацией понимаем нарушение суточного плана полетов (СПП), при котором образуется массовое скопление пассажиров в аэропорту в двух основных случаях: закрытие аэропортов назначения, для которых аэропорт отправления является запасным, и прибытия в него рейсов «на запасной»; закрытие аэропорта на вылет и задержки рейсов. Нарушение СПП в свою очередь приводит к нарушению регулярности полетов, включающее в себя понятия регулярности отправления воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) и регулярности выполнения рейсов, а также характеризующее работу предприятий ГА и отрасли в целом по выполнению перевозок и других услуг воздушного транспорта (ВТ).

Важнейшей задачей становится задача сокращения времени на принятие управленческих решений, экономических и имиджевых потерь предприятий ВТ, а также социальных потерь авиапассажиров. Однако возникает существенное противоречие, связанное с рисками и наличием хорошо апробированных методов наземного обслуживания воздушных судов в различных ситуациях в аэропортах.

Степень научной разработанности проблемы. Постановки задач наземного обслуживания воздушных судов и методы их решения в представляемой работе базируются на классических работах: математического моделирования и исследования операций; теории графов и сетевых методов планирования; теории расписания; теории массового обслуживания; дискретного и стохастического программирования; статистического моделирования; теории вероятностей и ее инженерных приложений. Применительно к отраслевому применению по этой тематике заслуживают внимание широко известные работы авторов (А.М. Андронов, В.В. Андрианов, И.С. Голубев, Г.А. Крыжановский, В.Г. Староселец, А.Р. Яшкин и др.).

Конкретные задачи моделирования наземного обслуживания ВС, в том числе в штатной, нештатной и сбойной ситуации, в современной постановке исследовались в работах Ю.М. Чинючина, Е.В. Кониковой, В.А. Романенко, но только на имитационных моделях. В этих моделях не оптимизировались процессы ОУ аэропортом в сбойных ситуациях, а также не учитывалось ряд факторов: очередность обслуживания ВС в зависимости от их местоположения на перроне; возможность имплементации в моделях оперативной информации о состоянии ресурсов от автоматизированных и информационных систем (АС и ИС) оперативного управления процессами в аэропорту. Модели и средства подготовки персонала в нештатных ситуациях исследовались Е.А. Остапенко.

Современные требования, предъявляемые авиакомпаниями к аэропортам, недостаточно учтены в работах ученых. В связи с этим текущее методологическое обеспечение не позволяет решать практические задачи наземного обслуживания воздушных судов в сбойных ситуациях в аэропорту.

Объектом исследования является аэропорт (главный оператор) в состоянии сбойной ситуации.

Предметом исследования являются методы ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ аэропортом в сбойных ситуациях.

Целью диссертационного исследования является сокращение комплексных потерь в процессе выхода аэропорта из сбойной ситуации, за счет разработки модели и модифицированных методов ресурсно-временной оптимизации.

Необходимость разрешения выявленного противоречия в соответствии с целью, объектом и предметом исследования обусловила постановку задачи автором и подход к ее разрешению, что подтверждает существенное значение для системы воздушного транспорта РФ.

Задача, решаемая в диссертации - разработка методов ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ аэропортом в сбойных ситуациях, основанных на совместном или раздельном использовании разработанных аналитических и имитационной моделей, и их практической реализации в составе типовых подсистем АС «КОБРА-2».

Для достижения цели в работе проведены исследования в следующих направлениях:

- выявление приоритетов развития функционального и информационного обеспечения автоматизации процессов ОУ аэропортом, в том числе в сбойной ситуации, учесть их при глубокой модернизации АС «КОБРА» в АС «КОБРА-2» и обеспечить массовое внедрение ее типовых проектных решений в отечественных и зарубежных аэропортах;
- анализ динамики и тренда показателей регулярности отправок ВС и ее нарушений для аэропортов различных классов;
- разработка метода установления очередности вылета ВС при выходе из ССА;
- разработка аналитического метода, базирующегося на постановке, решении и автоматизированной реализации аналитических моделей

ресурсно-временной оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы бригад по ТО при ОУ аэропортом в сбойной ситуации, учитывающей не только состояние ресурсов аэропорта, которые меняются во времени, но и местоположение ВС на перроне;

- разработка имитационного метода, базирующегося на имитационной модели ресурсно-временной оптимизации графика работ бригад по ТО ВС при ОУ аэропортом и методики ее применения;

- разработка средств информационного обеспечения и автоматизировать процессы ОУ аэропортом в сбойной ситуации на базе разработанных аналитических и имитационной моделей в составе соответствующих модулей типовых подсистем АС «КОБРА-2».

Методология исследования базируется на комплексном подходе при решении поставленных задач с использованием разработанных диссертантом:

- новых моделей установления очередности вылетов ВС при выходе аэропорта из сбойной ситуации;

- новой математической модели ресурсно-временного распределения динамических и статических ресурсов аэропорта для обслуживания ВС в расчетной очередности их вылета;

- новой имитационной модели процессов ОУ аэропортом в стационарных и сбойных ситуациях.

Решение поставленных задач базируется на фундаментальных работах отечественных и зарубежных специалистов в области эксплуатации ВТ, теории исследования операций и имитационного моделирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- проведенный концептуальный анализ процессов взаимодействия служб аэропорта и развития ИТ аэропортов в целом позволил сформулировать задачу необходимости разработки метода ресурсно-временной оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы бригад по ТО при ОУ аэропортом в сбойной ситуации;

- впервые поставлена задача и разработаны новые аналитические модели ресурсно-временной оптимизации очередности отправления и графиков работы бригад по техническому обслуживанию ВС при ОУ в ССА, учитывающая не только состояние меняющихся во времени ресурсов, но и местоположение ВС на перроне;

- разработана новая имитационная модель ресурсно-временной оптимизации графика работ бригад ТО ВС при заданной очередности отправления ВС при ОУ аэропортом в штатной и сбойной ситуациях, отличающаяся от известных моделей использованием и вычислительной среды Mathcad, упрощающей модификацию критериев эффективности, исходных условий и алгоритмов моделирования.

- разработанные модель и методы доведены до программной реализации в АС «КОБРА-2», что позволяет автоматизировать процессы оперативного управления аэропортовой деятельностью.

Теоретическая значимость работы. Результаты исследования позволяют:

- применять по выбору главного оператора (оператора) новые аналитические и имитационные методы при ресурсно-временной оптимизации ОУ в ССА;
- осуществлять ресурсно-временную оптимизацию очередности отправления ВС и графиков работы бригад по ТО при ОУ выходом из ССА, учетом не только состояния меняющихся во времени ресурсов аэропорта, но и местоположения ВС на перроне.

Практическая значимость работы заключается в предоставлении органам ОУ главных операторов нового информационно-технологического инструментария для автоматизации процессов ОУ аэропортом в штатных и сбойных ситуациях на базе АС «КОБРА-2». Использование разработанного метода ресурсно-временной оптимизации ОУ ресурсами в ССА при установлении очередности вылета ВС и корректировке графиков работы бригад по ТО повышает эффективность эксплуатации аэропортов и оптимизирует потребное количество их динамических ресурсов.

Практические результаты исследования представляют:

- комплекс информационных средств и информационных технологий АС «КОБРА-2», разработанный под руководством диссертанта в «РИВЦ-Пулково», с дополнительными модулями ОУ выхода из ССА, что позволяет сократить среднее время обслуживания ВС в указанных аэропортах в штатной ситуации на 16%, а в сбойной ситуации на 29% (отражено в актах внедрения «РИВЦ-Пулково», аэропортов Абакан и Сургут);
- рекомендация по необходимости существенной переработки формы федерального статистического наблюдения 30-ГА для фиксации других показателей нарушения регулярности выполнения рейсов, кроме метеоусловий и отсутствия ГСМ;
- методика применения имитационной модели ресурсно-временной оптимизации ОУ ресурсами в ССА при эксплуатации АС «КОБРА-2», утвержденная «РИВЦ-Пулково»;
- материалы, включающие результаты исследований и отраженные в учебном пособии УМО по образованию в области аэронавигации.

Достоверность обеспечивается корректностью применения апробированных научных методов решения оптимизационных задач целочисленного программирования, и подтверждается положительными отзывами специалистов при обсуждении работы на научно-технических, в том числе и международных, симпозиумах и конференциях; экспертизой публикаций, отражающих основное содержание диссертации, в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях; высокой сходимостью экспериментальных данных, полученных в ходе испытаний соответствующих модулей автоматизации процессов ОУ выходом из ССА в АС «КОБРА-2», с данными, полученными в результате имитационного моделирования.

Обоснованность научных результатов и положений, сформулированных в диссертации и выдвинутых на защиту, обеспечивается: научной аргументированностью исходных теоретических положений; последовательным применением принципов выявления, анализа и принятия решений при проведении исследований; корректным выбором исходных данных, основных допущений и ограничений при формулировании постановок научных задач; результатами, полученными при имитационном моделировании.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод установления очередности отправления ВС при выходе из сбойных ситуаций, не использовавшийся ранее, является наиболее приемлемым для региональных аэропортов с невысоким уровнем автоматизации процессов оперативного управления.

2. Разработанная двухуровневая аналитическая модель ресурсно-временной оптимизации очередности отправления ВС и графиков работы бригад по наземному обслуживанию ВС при оперативном управлении аэропортом в сбойной ситуации позволяет аэропорту решать каждую из задач как в комплексе, так и по отдельности, исходя из практических задач и особенностей функционирования аэропорта.

3. Реализованные модули и средства информационного обеспечения АС «КОБРА-2», автоматизирующие расчеты ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления на базе аналитических моделей, сокращают среднее время обслуживания ВС в штатной и сбойной ситуации в аэропорту.

4. Разработанная имитационная модель и методика ее применения при ресурсно-временной оптимизации графика работ бригад по наземному обслуживанию ВС при заданной очередности отправления ВС в штатной и сбойной ситуации аэропорта впервые учитывает местоположения ВС на перроне и суточную динамику состояния ресурсов аэропорта.

Соответствие содержания диссертации требованиям специальности 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта». Содержанием диссертации является комплекс проблем и задач повышения эффективности оперативного управления аэропортом, что соответствует содержанию специальности. Объектом исследования являются аэропорты, занятые технологическим обслуживанием ВС в сбойной ситуации, что соответствует формуле специальности. Содержание диссертации отвечает следующим областям исследований: п.4. Системный анализ и управление процессами эксплуатации объектов ВТ; п.7. Совершенствование методов и средств управления и планирования, повышения эффективности деятельности авиапредприятий, механизации и автоматизации процессов эксплуатации ВТ; п.16. Разработка методов и средств информационного обеспечения процессов управления эксплуатацией авиационной техники.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих конференциях, что подтверждено документами их организаторов:

- «Авиационный IT форум 2015. 8-я ежегодная международная конференция» (организатор АТО-Events), Москва, 21.05.2015.
- «Авиационный IT-форум России и СНГ - 2015» (организатор «Центр стратегических разработок в гражданской авиации»), Москва, 10.12.2015-11.12.2015.
- 48-я московская международная конференция Ассоциации «Аэропорт» - «Эффективное управление наземным обслуживанием в аэропортах», Москва, 17.12.2015.
- «КОБРА-2016. Опыт использования инновационных ИТ – решений в деятельности аэропортов» (организатор «РИВЦ-Пулково»), Сочи, 12.05.2016.
- 50-я московская международная конференция Ассоциации «Аэропорт» - «Поиск новых подходов к развитию аэропортового бизнеса», Москва, 26.10.2016.
- 52-я московская международная конференция Ассоциации «Аэропорт» - «Стратегия эффективного управления аэропортами», Москва, 25.10.2017.
- «Наземное обслуживание в аэропортах-2017. 8-я международная выставка и конференция» (организатор АТО-Events), Москва, 27.09.2017.
- «Международный инновационный форум пассажирского транспорта SmartTRANSPORT 2017» (организатор Комитет по транспорту Санкт-Петербурга), Санкт-Петербург, 18.10.2017.
- «Взгляд в будущее» (организатор АТО-Events), Москва, 11.04.2018.

Внедрение результатов работы. Подсистема «СПП» АС «КОБРА-2» с модулем «ССЭ», реализующим алгоритм выхода из ССА, внедрена в 20-и аэропортах и 2-х авиакомпаниях (Акт «РИВЦ-Пулково»). Модули «ССО», реализующие аналитическую и имитационную модели ресурсно-временной оптимизации ОУ в ССА включены в проектную документацию АС «КОБРА-2» и внедрены в аэропортах «Абакан» и «Сургут» (Акты «РИВЦ-Пулково», аэропортов «Абакан» и «Сургут»). Внедрение модулей позволяет сократить время обслуживания ВС в указанных аэропортах в штатной ситуации на 16%, а в сбойной ситуации на 29%.

Пути дальнейшего развития – совершенствование методов по результатам накопления статистики по их практическому применению.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 17 печатных работах, в том числе: в изданиях по списку ВАК – 9; в издании, рецензируемом экспертами УМО – 1 учебное пособие; в других изданиях – 7.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 122 наименований, 1-го приложения с листингом из 12 операторов (программ) имитационной модели в вычислительной среде Mathcad. Диссертация содержит 156 страниц с 27 рисунками, 28 таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана оценка степени разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Изложены положения, выносимые на защиту. Отражены вклад автора, апробация и внедрение результатов исследования.

В первой главе приводится анализ нарушений регулярности отправления ВС, степени и состояния автоматизации процессов ОУ аэропортовой деятельностью в штатных и сбойных ситуациях.

На основе анализа классификатора нарушений регулярности полетов (РП) выделены наиболее значимые причины, влияющие на возникновение сбойных ситуаций в аэропорту по вине различных субъектов – аэропорта, авиаперевозчиков и др. Раскрыто влияние нарушений РП на следующие аспекты деятельности аэропортов:

- дефицит времени при принятии решений в процессе ОУ аэропортом, что особенно проявляется в сбойных ситуациях;
- показатели эффективности – KPI (Key Performance Indicator), включая безопасность полетов;
- социальные потери и прямой ущерб для авиапассажиров.

Несмотря на многообразие значимых нарушений РП, влияющих на возникновение ССА, на ВТ фиксируются только нарушения, связанные с метеоусловиями и с отсутствием ГСМ, отражающиеся в форме 30-ГА федерального статистического наблюдения. В работе приведен анализ динамики и трендов следующих показателей в целом по ГА:

- коэффициент нерегулярности полетов (D/S) (рисунок 1);
- среднего времени (T/D) опоздания отправления ВС (рисунок 2);
- доли времени опоздания отправления T_m / T (%) по метеоусловиям (рисунок 3).

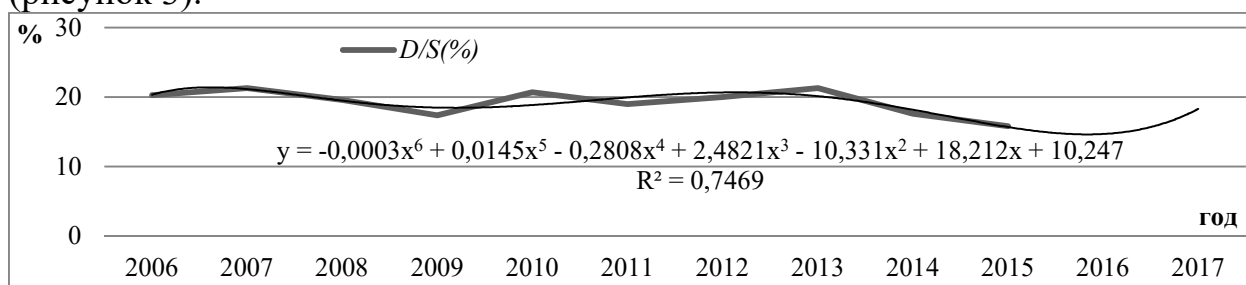


Рисунок 1 – Динамика и тренд доли рейсов, выполненных с опозданием

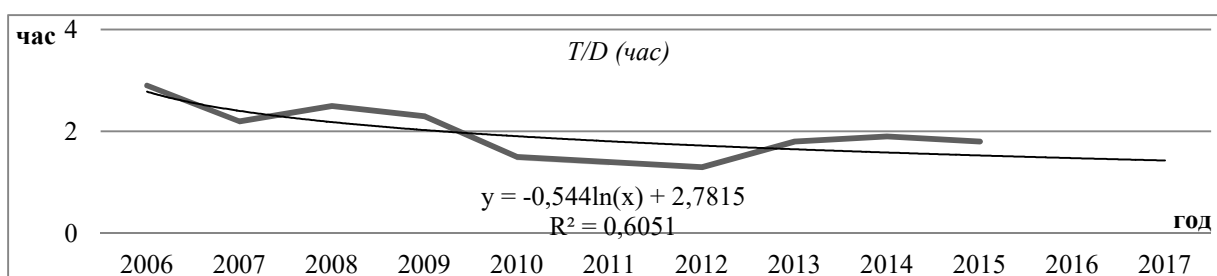


Рисунок 2 – Динамика и тренд среднего времени опоздания отправления ВС

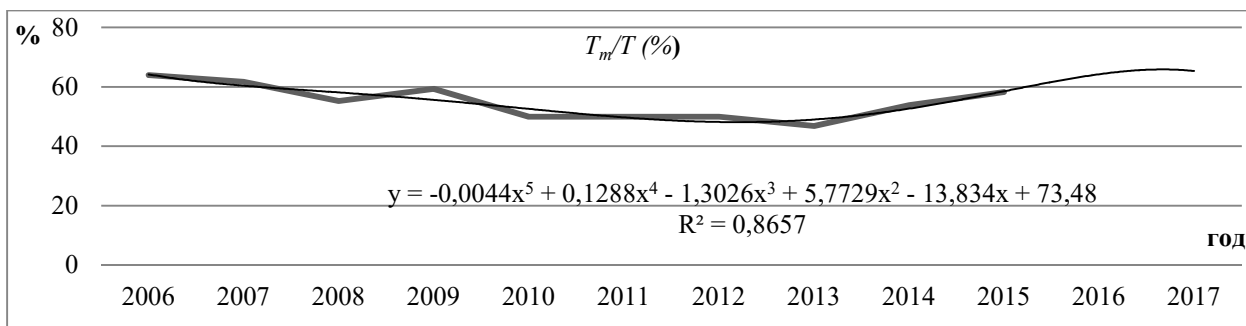


Рисунок 3 – Динамика и тренд доли времени опоздания отправления по метеоусловиям

Диаграммы, приведенные на рисунках 1-3, показывают:

- тренд коэффициента не регулярности полетов (D/S), отображенный уравнением полиномиальной регрессии с высоким значением коэффициента детерминации $R^2 = 0.7469$, показывает волнообразный характер без перспективы его снижения;

- тренд среднего времени опоздания отправления ВС (T/D), представленный уравнением логарифмической регрессии со значимым коэффициентом $R^2 = 0.6051$, показывает тенденцию уменьшения рассматриваемого показателя на ближайшую перспективу (в среднем за рассматриваемый период оно составляет 1.96 час);

- тренд доли времени (T_m/T), представленный уравнение полиномиальной регрессии с высоким коэффициентом $R^2 = 0.8657$, показывает непрерывное снижение влияния метеоусловий на время опоздания отправления ВС вплоть до 2013 года и рост в последние годы; т.е. метеоусловия в наибольшей мере влияют на РП и в ближайшей перспективе значение этого показателя будет существенно превышать 50%.

Для решения задачи анализа текущего уровня автоматизации аэропортов и выявления их потребностей в новых ИТ-решениях в 2015 – 2017 годах были проведены анкетные опросы ИТ-руководителей нескольких десятков аэропортов (в 2017 г – 37 аэропортов). По результатам анализа результатов опроса определены:

- приоритеты автоматизации процессов обслуживания в аэропортах (рисунок 4);
- приоритеты востребованности новых ИТ-продуктов (рисунок 5);
- наличие импортозамещающих отечественных ИТ-приложений (рисунок 6);
- недостатки отечественной ИТ-продуктов (рисунок 7), и др.

Функциональное взаимодействие подсистем и информационные потоки АС «КОБРА-2» при ОУ аэропортовой деятельностью представлено на рисунке 8. Шрифтом ***BOLD ITALIC*** на нем выделены подсистемы, автоматизирующие оптимизационные расчеты в ССА.



Рисунок 4 – Приоритеты основных направлений автоматизации процессов в аэропортах

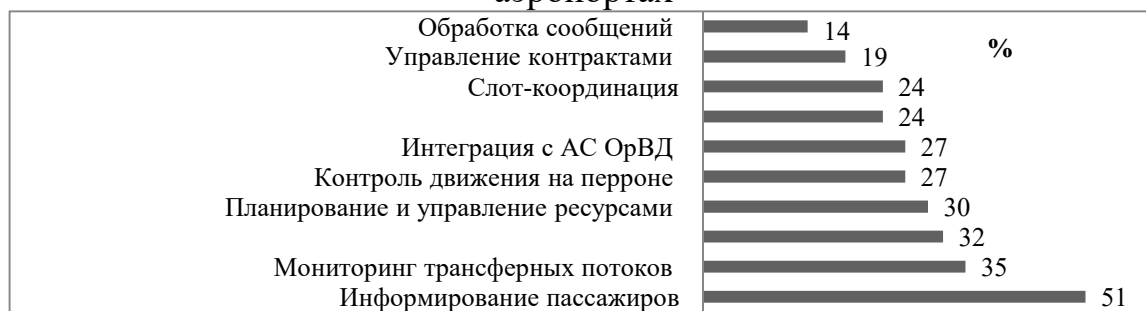


Рисунок 5 – Приоритеты востребованности новых IT-продуктов для аэропортов

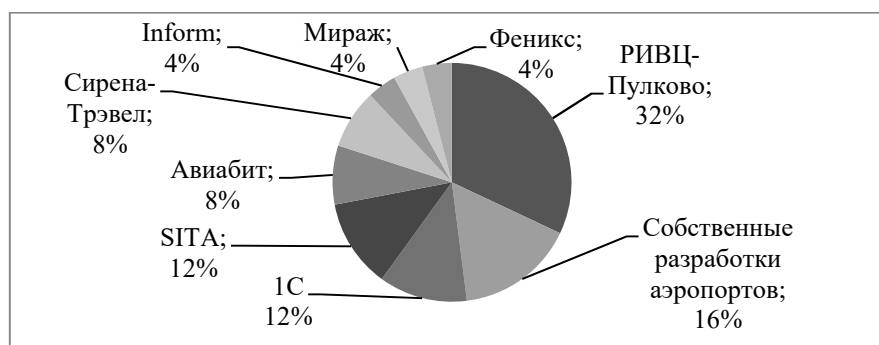


Рисунок 6 – Предприятия-разработчики и доля их ПО

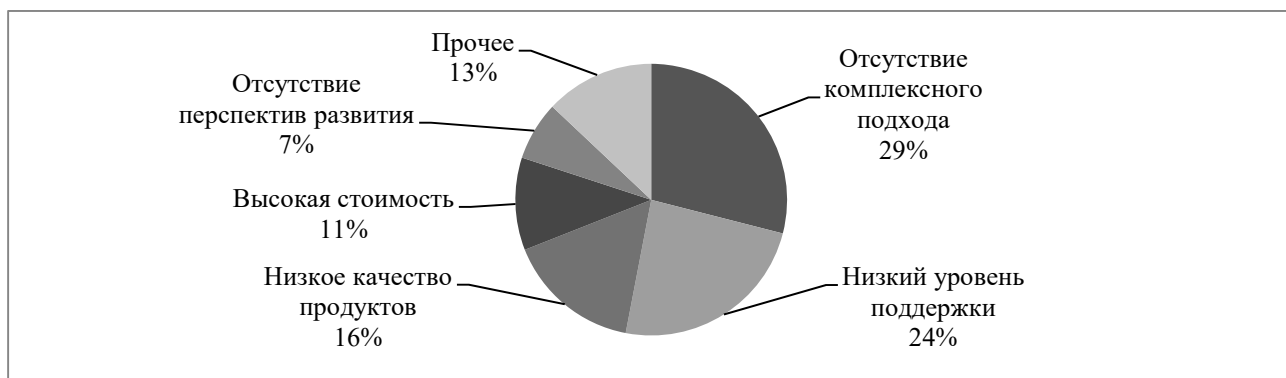


Рисунок 7 – Основные недостатки отечественных IT-продуктов и их вес

Регулирование процессов ОУ при штатных и сбойных ситуациях аэропорта осуществляется путем корректировки текущего СПП и порядка использования ресурсов аэропорта с использованием подсистем «СПП» и «УР».

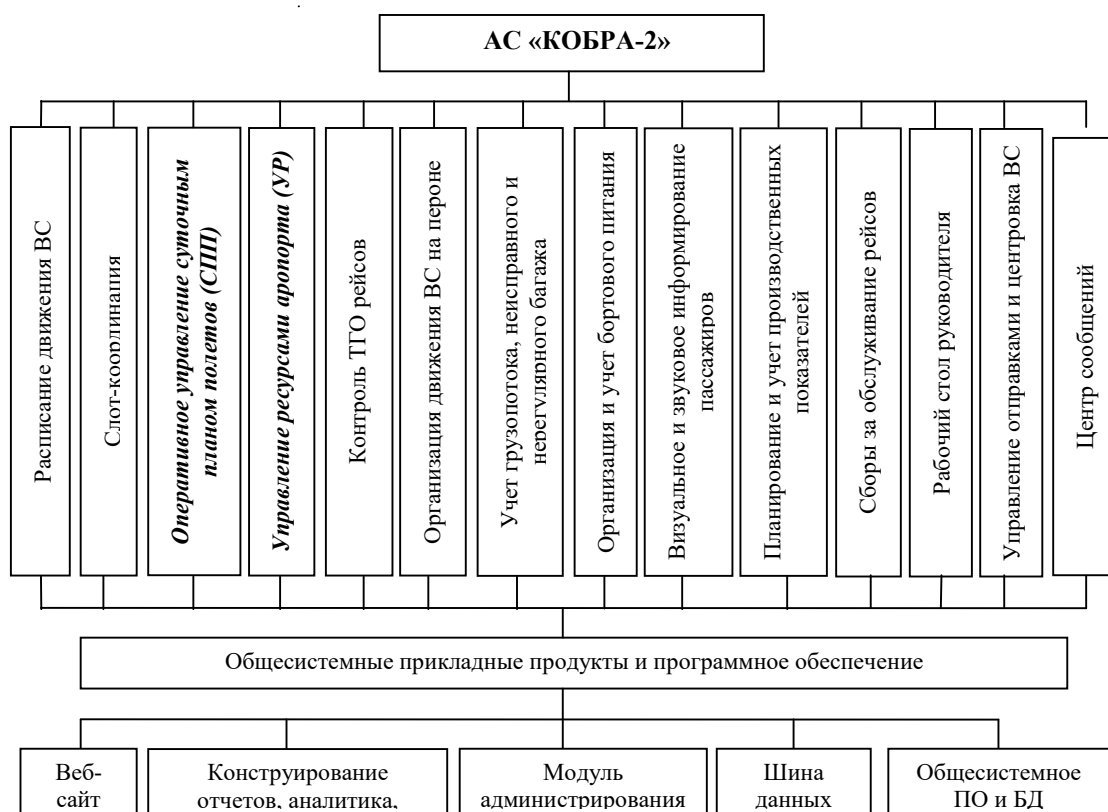


Рисунок 8 – Функциональная структура АС «КОБРА-2»

Выбор многими аэропортами IT-продуктов «РИВЦ-Пулково» диктуется высоким уровнем полноточности и комплексирования в АС «КОБРА-2». IT-продукты этой системы конкурентоспособны с западными аналогами и характеризуются поддержкой 365/24 и относительно невысокой стоимостью (таблица 1).

Таблица 1 – Соотношение по стоимости зарубежных подсистем (C_3) и подсистем АС «КОБРА-2» (C_K)

№	Зарубежные подсистемы-аналоги	Подсистемы АС «КОБРА-2»	C_3/C_K
1	GroundStar AODB (разработчик Inform, Германия)	Оперативное управление суточным планом полетов	3-4
2	SCORE (разработчик PDC, Дания)	Слот-координация	4-5
3	GroundStar RMS (разработчик Inform, Германия)	Управление ресурсами	20-30
4	AirportHub (разработчик SITA, Швейцария)	Центр сообщений	1.3-3
5	UltraFIDS (разработчик Ultra, Великобритания)	Визинформ и Электронный диктор	3-5
6	Maestro DCS Local (разработчик SITA, Швейцария)	Регистрация пассажиров	3-5
7	Invoice (разработчик RESA, Франция)	Сборы за обслуживание рейсов	4-5

Вторая глава посвящена разработке аналитических методов оптимизации процессов ОУ выходом аэропорта из сбойной ситуации. Процесс ресурсно-временной оптимизации ОУ выходом из ССА иллюстрируются диаграммой, представленной на рисунке 9, где в верхней части указаны моменты прилета Q_j ($j = 1, \dots, m$) и вылета T_i ($i = 1, \dots, n$) плановых и задержанных рейсов, и в нижней – решаемые при этом задачи.

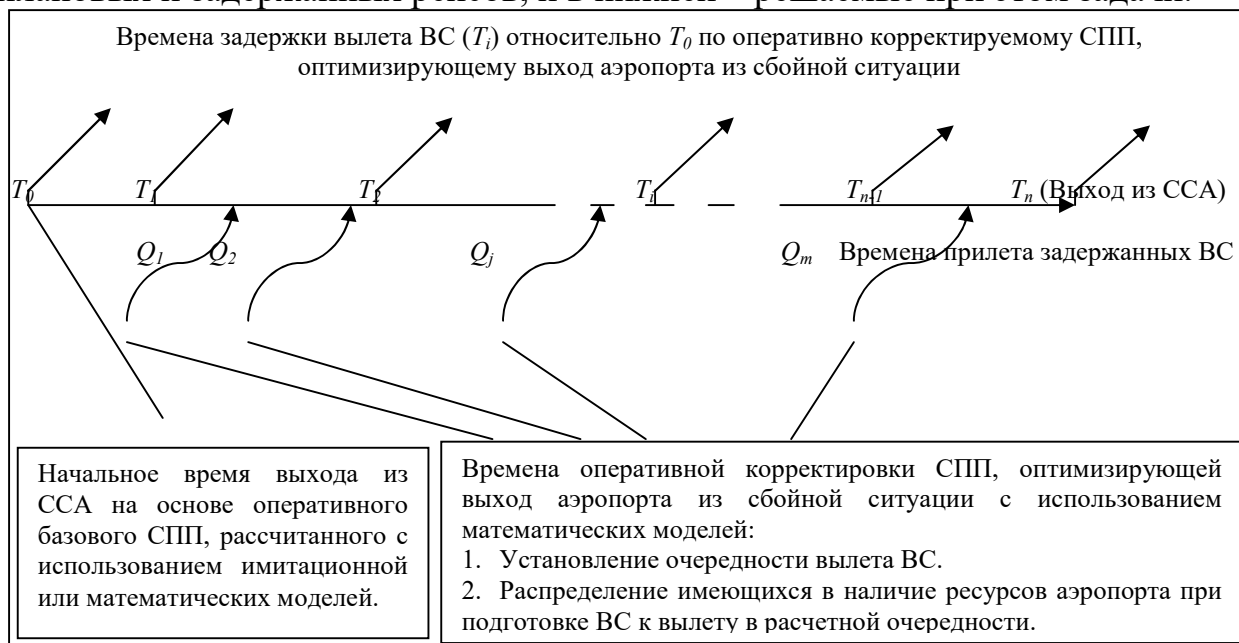


Рисунок 9 – Диаграмма ресурсно-временной оптимизации процессов ОУ в ССА

Основу аналитических методов, рассматриваемых в настоящей главе, составляют:

- модели, базирующиеся на оптимизационной постановке задач ОУ выходом из ССА;
- методы решения оптимизационных задач;
- модули автоматизации оптимизационных расчетов.

Первый из разработанных и внедренных в АС «КОБРА-2» методов автоматизации процесса ОУ в ССА базируется на алгоритме установления очередности отправления ВС, соответствующем НПП ГА-85 (рисунок 10).

В основе аналитических методов решения оптимизационных задач лежит постановка задач, *первой* из которых является задача оптимизации очередности подготовки ВС к отправлению при открытии аэропорта, а *второй* задачей – задача составления графиков работы бригад по обслуживанию ВС при заданной очередности отправок на основе выбранных критериев.

Постановка задачи оптимизации очередности отправления ВС (*первая задача оптимизационного метода*) сведена к задаче целочисленного программирования: найти перестановку $J = (j(1), \dots, j(n))$, минимизирующую функцию цели

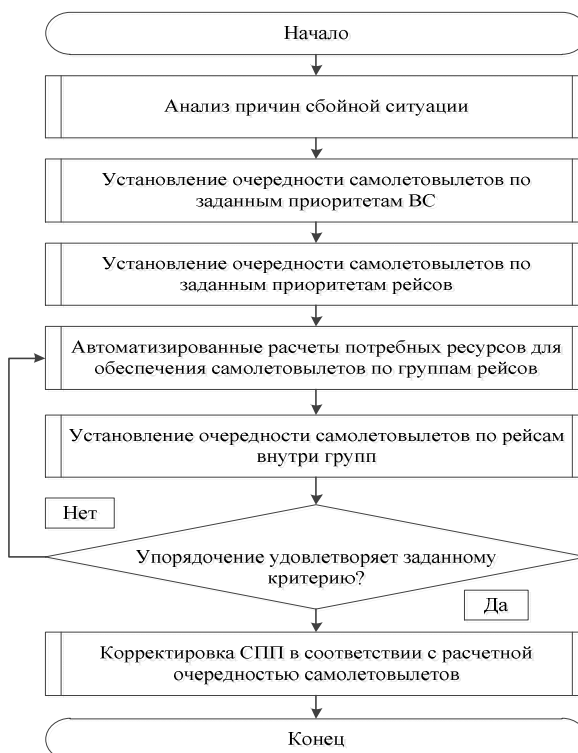


Рисунок 10 – Алгоритм упорядочения самолетовылетов в ССА

$$f(x) = \sum_{k=1}^n c_{j(k)} x_{j(k)} \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{k=1}^n \delta(\tau_s - x_{j(k)} - t_{j(k),i}) (\delta(x_{j(k)} + t_{j(k),i} - \tau_s)) h_{j(k),i}(\tau_s - x_j) \leq g_i(\tau_s), \quad i = 1, \dots, m, \quad s = 1, \dots, L. \quad (2)$$

где:

m – ресурсы аэропорта, обеспечивающих вылеты рейсов, $i = 1, \dots, m$;

$g_i(t)$ – функция, указывающая объём располагаемого ресурса i в момент t ;

n – количество ВС, ожидающих вылета, $j = 1, \dots, n$;

$(t_{j,i}, t_{j,i})$ – интервал времени после начала подготовки к вылету, когда для ВС j требуется ресурс i ;

$h_{j,i}(t)$ – функция указывающая объём потребляемого ресурса в момент времени t после начала обслуживания ВС;

c_j – потери за единицу времени задержки вылета ВС j после открытия аэропорта;

$\delta(z) = 1$, if $z \geq 0$, and 0 otherwise. – символ Кронекера;

$\{\tau_s\}$ – моменты в рассматриваемом интервале времени, для которых будет проверяться условие на достаточность ресурсов; число таких точек обозначим L .

Требуется для каждого ВС $_j$ указать время начала его подготовки к вылету x_j . При этом перерывы в подготовке ВС к рейсу по причине недостаточности ресурсов отсутствуют.

Для решения задачи применительно к ее постановке и условиям адаптирован метод последовательного поиска с горизонтом просмотра, равнозначный по эффективности другим методам, но более приемлемый при программировании на языке Mathcad. Используется перебор для меньшего – базисного числа элементов. При этом последовательно фиксируются элементы с известными местами в конечной перестановке: первое, второе и т.д.

Первоначально (на нулевом шаге) отбирается h элементов, объявляемых базисными. Величина h называется горизонтом просмотра, $1 < h \ll n$. Формируется множество всех $h!$ перестановок из отобранных (базисных) элементов. Устанавливается значение рекорда – некоторое возможное значение функции цели. Затем организуется два цикла по следующей схеме: внешний цикл по $h!$ перестановкам; внутренний цикл по неотобраным элементам.

Просматриваются все $(h + 1)!$ перестановки из очередного неотобранного элемента и базисных элементов. Для каждой перестановки проверяется её допустимость (соответствие всем имеющимся ограничениям) и вычисляется значение функции цели. Если перестановка допустима и её значение функции цели лучше *рекорда*, то она запоминается, а рекорд обновляется. Запоминаются также все $(h + 1)!$ перестановки, полученные с участием данного небазисного элемента.

После окончания внешнего цикла первый элемент рекордной перестановки объявляется финальным (входящим в заключительную перестановку). Далее описанная процедура повторяется. При этом в общем случае имеется k финальных элементов, значение *рекорда* и $(h + 1)!$ соответствующих перестановок. Первый элемент в перестановке, дающей рекорд объявляется финальным, а новый элемент базисным, если он таковым не был. Выбрасывая его из всех $(h + 1)!$ перестановок, получаем исходное множество перестановок *базисных элементов*. С ним и начинается описанная выше процедура отбора двух новых элементов – базисного и окончательного.

Вся процедура завершается, когда число базисных и окончательных элементов станет равным n . Искомая оптимальная перестановка $J = (j(1), \dots, j(n))$ получается приписыванием к окончательным элементам справа той перестановки базисных элементов, которая даёт значение рекорда. Общее число рассматриваемых перестановок определяется формулой:

$$d(n, h) = h! + \sum_{k=0}^{n-h-1} (n - k - h)(h + 1)! = h! + (h + 1)! \sum_{i=n-h}^0 i = h! + (h + 1)! \frac{1}{2} (n - h)(n - h + 1).$$

Полный перебор всех перестановок для $n = 20$, например, составляет $20! = 2.433 \times 10^{18}$, в то время как при использовании метода последовательного поиска с горизонтом просмотра число перестановок равно $3,674 \times 10^6$ при $h = 7$.

Постановка задачи составления графиков работы бригад по обслуживанию ВС (*вторая задача оптимизационного метода*) осуществлена при условиях, что известны:

- очередность обслуживания ВС, задаваемая в виде n -перестановки $J=(j(1),\dots,j(n))$;

- период времени для k -го по порядку ВС, в течение которого проводится его обслуживание – интервал $(\underline{t}_{j(k)}, t_{j(k)})$;

- местонахождение каждого ВС, число мест которых равно L .

Вводятся также следующие обозначения:

$V(j(k))$ – местонахождение k -го по порядку ВС;

$D_{\eta,\eta'}$ – время необходимое для перемещения бригады между местами η и η' , задаваемое квадратной матрицей D порядка $L \times L$;

G – число соответствующих бригад (средств механизации, исполнителей и пр.);

$\underline{\tau}_w$ и τ_w времена начала и окончания работы для w -ой бригады ($w = 1, \dots, G$).

Тогда число бригад $g(t)$, работающих в момент времени t , определяется по формуле, подобной формуле (1):

$$g(t) = \sum_{w=1}^G \delta(t - \underline{\tau}_w) \delta(\tau_w - t). \quad (3)$$

Для w -ой бригады последовательность номеров обслуживаемых ВС из перестановки $J=(j(1),\dots,j(n))$ задаётся вектором $j^{(w)} = (j_{1,w}, \dots, j_{|w|,w})$, где $|w|$ – число обслуживаемых ВС для бригады w .

Теперь задача формулируется так: найти целочисленные вектора $j^{(1)}, \dots, j^{(G)}$, которые минимизируют функцию

$$f(j^{(1)}, \dots, j^{(G)}) = \sum_{w=1}^G \sum_{\zeta=1}^{|w|-1} D_{V(j_{\zeta,w}), V(j_{\zeta+1,w})} \quad (4)$$

при ограничениях:

$$\bigcup_w j^{(w)} = \{1, \dots, n\}, \quad (5)$$

$$j^{(w)} \cap j^{(w')} = \emptyset, \quad w \neq w',$$

$$\underline{\tau}_w \leq \underline{t}_{j_{1,w}}, \quad t_{j_{|w|,w}} \leq \tau_w, \quad \forall w,$$

$$t_{j_{\zeta,w}} + D_{V(j_{\zeta,w}), V(j_{\zeta+1,w})} < \underline{t}_{j_{\zeta+1,w}}, \quad \zeta = 1, \dots, |w|, \quad w = 1, \dots, G.$$

Первые два равенства формулы (5) фиксируют, что каждое ВС должно быть обслужено одной бригадой. В них \cup означает сумму, а \cap – произведение элементов векторов. Третья строка формулы описывает требование проведения обслуживания в период времени работы соответствующей бригады. Последняя строка оговаривает, что время начала обслуживания следующего ВС не должно быть раньше времени окончания обслуживания предыдущего ВС плюс время на перемещение бригады к новому месту.

Для решения сформулированной задачи используется описанный ранее метод последовательного поиска с горизонтом просмотра. С этой целью

вместо G перестановок $j^{(1)}, \dots, j^{(G)}$ будем рассматривать одну n -перестановку $J = (j(1), \dots, j(n))$ из множества чисел $\{1, \dots, n\}$. Значение $j(v)$ трактуется так: если взять его по модулю G (т.е. остаток от деления $j(v)$ на G) и прибавить единицу, то это будет номер бригады, которая обслуживает ВС, стоящее в списке под номером v : $w = \text{mod}_G j(v)$. Следовательно, для конкретного вида обслуживания следует найти перестановку $J = (j(1), \dots, j(n))$, минимизирующую критерий (4). При этом прежние неизвестные определяются через новые по формуле

$$j^{(w)} = (j(v) + 1 : \text{mod}_G j(v) = w) \quad (6)$$

Заметим, что приведенные выше задачи могут решаться не только совместно, как задачи первого и второго уровней, но и отдельно друг от друга в зависимости от целей оптимизации при выходе из ССА.

В третьей главе описан разработанный инструментарий автоматизации расчетов оптимальной очередности отправления ВС и графиков работы бригад при наземном обслуживании ВС в ССА. В качестве вычислительной среды использован язык Mathcad.

Технология автоматизированных расчетов состоит из следующих процедур:

- организация информационного обеспечения (ИО);
- автоматизация обработки исходной информации;
- автоматизация расчета критериев эффективности;
- автоматизация процедуры расчета оптимальной очередности отправления ВС;
- автоматизация процедуры составления графиков работы бригад.

ИО включает структурированные в матричной форме массивы (файлы) данных:

- массив *Air*, элементы которого содержат код и тип ВС, число пассажиров рейса, выполняемого данным ВС, весовой показатель – потери c_j , относящиеся на единицу времени задержки для j -го ВС;
- массивы *R1* и *R2*, содержащие данные о располагаемых ресурсах.

В массивах *R1* и *R2* число строк равно числу видов ресурсов аэропорта (m), а строки содержат несколько записей, каждая – для своего интервала времени суток, в течение которого величина ресурса остаётся неизменной. Одна запись массива *R1* включает: начало θ -го временного интервала t_{θ} ; окончание θ -го временного интервала t_{θ} . После последней записи строки ставится -1. В массиве *R2* столько записей, сколько записей в соответствующей строке массива *R1*. В записи указан объём имеющегося ресурса в соответствующем интервале. Валидационные примеры данных массивов *Air*, *R1* и *R2* представлены в таблицах 2-4 соответственно.

Таблица 2 – Пример массива *Air*

<i>Air</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Air</i> ₂	1	3	4	2	1	5	5	4	2	3	3	4	2	5	3
<i>Air</i> ₃	20	100	230	88	51	204	210	112	98	120	98	134	96	211	89
<i>Air</i> ₄	3	1	2	1	1	1	1	3	1	1	1	2	3	1	1

Таблица 3 – Пример массива R1

i	$\underline{\theta}_1$	θ_1	$\underline{\theta}_2$	θ_2	$\underline{\theta}_3$	θ_3	$\underline{\theta}_4$	θ_4	$\underline{\theta}_5$	θ_5	
1	0	5	5	13	13	16	16	20	20	24	-1
2	0	6	6	14	14	17	17	21	21	24	-1
3	0	8	8	16	16	20	20	24	-1	0	0

Таблица 4 – Пример массива R2

i	$(\underline{\theta}_1, \theta_1)$	$(\underline{\theta}_2, \theta_2)$	$(\underline{\theta}_3, \theta_3)$	$(\underline{\theta}_4, \theta_4)$	$(\underline{\theta}_5, \theta_5)$
1	2	3	3	2	3
2	2	3	3	2	2
3	3	3	4	3	0
4	2	3	3	3	3
5	4	3	4	2	2
6	2	3	3	2	4

Пример массива Air включает данные о 15-ти ВС. В частности, для 10-го ВС тип $Air_2 = 3$, число пассажиров $Air_3 = 120$, величина потерь $Air_4 = 1$. Примеры массивов $R1$ и $R2$ включают данные для $m = 6$ видов ресурса и 5 записей. В частности, для ресурса 1 интервал $(\underline{\theta}_1, \theta_1) = (0, 5)$ есть первый интервал, в котором объём ресурса постоянен и равен $R2_{1,1} = 2$.

Информация об используемых ресурсах (об обслуживании) содержится в массиве Se . Он представляет собой матрицу, в которой строки соответствуют различным ресурсам. Строка содержит несколько записей, каждая – для одного типа ВС. Запись содержит три числа. Первые два числа – это начало $\underline{t}_{j,i}$ и окончание $t_{j,i}$ интервала времени после начала обслуживания ВС, в течение которого величина потребляемого ресурса остаётся неизменной. Третье число равно величине потребляемого ресурса в этом интервале $h_{j,i} > 0$. Число записей равно числу T типов ВС. На основании этих показателей рассчитывается функция $h_{j,i}(t)$, указывающая объём потребляемого ресурса i в момент времени t после начала обслуживания ВС j . Пример файла Se представлен в таблице 5 для $m = 6$ видов ресурса и 5 типов ВС. В частности, для 1-го типа ВС в интервале $(\underline{t}_{1,1}, t_{1,1}) = (3, 4)$ объём потребляемого ресурса первого вида постоянен и равен $h_{1,1} = 1$.

Таблица 5 – Пример массива Se

i	$\underline{t}_{1,i}$	$t_{1,i}$	$h_{1,1}$	$\underline{t}_{2,i}$	$t_{2,i}$	$h_{2,1}$	$\underline{t}_{3,i}$	$t_{3,i}$	$h_{3,1}$	$\underline{t}_{4,i}$	$t_{4,i}$	$h_{4,1}$	$\underline{t}_{5,i}$	$t_{5,i}$	$h_{5,1}$
1	3	4	1	4	5	1	4	6	1	3	5	1	4	6	1
2	3	4	2	3	5	1	3	4	1	3	5	2	6	7	2
3	2	4	1	3	4	2	3	4	2	4	6	1	3	5	2
4	2	3	1	2	3	2	2	4	2	3	4	1	3	7	2
5	3	4	2	3	4	1	3	5	2	3	6	2	5	6	2
6	4	5	1	4	6	1	4	6	1	5	7	1	5	7	1

Отметим, что все описанные массивы считаются заданными при выходе из ССА и формируются на основании имеющейся у главного оператора

информации о РДС и СПП, видах ВС и ресурсов для их НО, технологий обслуживания, и т.п.

Основными производными массивами являются График располагаемых ресурсов (*gg*) и График состояния ресурсов (*graphic*). Массив *gg* представляет собой матрицу, в которой m строк соответствуют ресурсам. Столбцы соответствуют равноотстоящим моментам времени суток, для которых проводятся расчёты. t -ый столбец соответствует t -му моменту суток. Начальный момент – начало суток ($t = 1$), последний момент – конец суток. Если шаг между рассматриваемыми моментами равен 10 минутам, то последний момент $t = 24 \times 60 / 10 - 1 = 143$. В этом случае размерность матрицы *gg* есть $m \times 143$. Клетки матрицы содержат располагаемую величину данного ресурса в данный момент времени суток. Этот массив формируется программно на основании массивов *R1* и *R2*. К началу суток массив должен быть сформирован. Пример массива *gg* представлен в таблице 6 для $m = 6$ видов ресурса и моментов времени суток $t = 1, \dots, 143$.

Таблица 6 – Пример расчётного массива *gg*

i / t	1	2	3	4	...	28	29	30	31	...	140	141	142	143
1	2	2	2	2	...	2	2	3	3	...	2	2	2	2
2	2	2	2	2	...	2	2	2	2	...	2	2	2	2
3	3	3	3	3	...	3	3	3	3	...	0	0	0	0
4	2	2	2	2	...	2	2	3	3	...	3	3	3	3
5	4	4	4	4	..	4	4	4	4	...	2	2	2	2
6	2	2	2	2	...	2	2	3	3	...	4	4	4	4

Структура матрицы *graphic* аналогична структуре матрицы *gg*, однако число строк в нём в два раза больше. Верхняя половина этой матрицы (до строки m включительно) содержит ту же информацию, что и матрица *gg*, однако клетки содержат остающуюся величину ресурса на данный момент времени (первоначально располагаемый ресурс минус используемый в данный момент). Нижняя половина этой матрицы (от строки $m+1$ и ниже) содержит информацию о номерах ВС, для которых используется данный ресурс в данный момент времени.

Для приведенных примеров исходных данных таблиц 2-6 с горизонтом просмотра $h = 3$, максимальным временем окончания обслуживания последнего ВС $T_{max} = 50$, моментом времени начала обслуживания ВС $\tau = 0$ и для критерия эффективности $\lambda = 1$ получен пример следующей очередности обслуживания ВС:

$$SecAlg(AiLi, 3, 50, 0, 1) = (4\ 2\ 3\ 1\ 5\ 12\ 6\ 9\ 13\ 11\ 10\ 15\ 7\ 14\ 8\ 39).$$

Автоматизация процедуры составления графиков работы бригад при НО ВС базируется на описанных выше массивах исходных данных. Результирующим является массив номеров ВС (*GtbAll*), обслуживаемых каждой бригадой. В работе описано взаимодействие подсистем АС «КОБРА-2» и используемые при этом АРМ в ССА.

В четвертой главе приводятся разработка и практическая реализация имитационного метода ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ работой бригад по НО ВС в штатных и сбойных ситуациях, в основу которого положены: имитационная модель; модуль автоматизации расчетов; методика применения модели. Разработанная модель носит универсальный характер и может использоваться как в сбойных, так и в штатных ситуациях. С помощью имитационной модели могут быть решены следующие задачи:

а) оценка адекватности разработанных аналитических моделей с учетом случайного характера времен выполнения операций;

б) оптимизация графиков работы бригад в штатных условиях работы аэропорта по текущему СПП;

в) ресурсно-временное распределение ресурсов аэропорта на начало выхода из ССА в условиях повышенной сложности;

г) для ОУ ресурсами аэропорта в ССА в комплексе с аналитической моделью.

ИО имитационной модели составляют те же массивы, что и в аналитической модели, но имеющие стохастический характер: массив *Air*, дополненный номерами стоянок ВС; графики состояния бригад $ggBt(\rho)$; массив *D* расстояний между местами стоянок ВС. Другими исходными массивами являются типовой и оперативный сетевые графики технологического и коммерческого обслуживания ВС.

Основной процедурой имитационной модели является расчёт продолжительности обслуживания рейса согласно сетевому графику, для которого продолжительности выполнения всех работ, как вырабатываемые в процессе моделирования случайные величины, известны. Разработанная модель валидирована на различных примерах, реализована в виде модуля «Имитация» и включена в состав проектных решений АС «КОБРА-2».

Заключение по диссертационной работе

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований разработаны методы ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ в ССА, базирующиеся на аналитических и имитационной моделях, и модулях автоматизации соответствующих расчетов. В процессе исследований получены следующие результаты:

1. На основе анализа действующей российской нормативной базы данных федеральной статистической отчетности по регулярности отправления ВС и анкетного обследования IT-руководителей аэропортов определены тренды различных статистических показателей регулярности отправления ВС в зависимости от метеоусловий по аэропортам ГА; выявлено состояние и приоритеты автоматизации процессов ОУ аэропортом.

2. Разработаны новые аналитические методы ресурсно-временной оптимизации процессов ОУ очередностью отправления ВС и работы бригад по НО ВС в ССА, базирующиеся на постановке, выборе метода и автоматизации решения поставленных задач.

3. На базе выполненных исследований разработаны и внедрены в аэропортах «Абакан» и «Сургут» информационное обеспечение и модули автоматизации ресурсно-временной оптимизации процессов оперативного управления «СПП-ССО» и «УР-ССО» в составе подсистем АС «КОБРА-2».

4. Впервые разработана имитационная модель ресурсно-временной оптимизации процесса ОУ работой бригад по НО ВС в аэропорту, учитывающая не только технологическую последовательность выполнения работ, но и наличие необходимых ресурсов.

5. Научно-практическая значимость диссертационного исследования подтверждена свидетельствами Роспатента на программы ЭВМ, актами внедрения и рецензируемое учебное пособие с грифом УМО.

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Головченко, Г.В., Смуров, М.Ю., Сухих, Н.Н. Автоматизация информативно-управляющих процессов в организационно-экономической системе авиапредприятия с помощью активной ПУС. // Транспорт РФ. 2014. – № 6 (55). – с. 35–38.
2. Головченко, Г.В. К задаче оптимизации оперативного управления самолетовылетами при сбойных ситуациях в аэропорту // Вестник СПГУГА. – Санкт-Петербург. 2016, № 1 (10), с. 29-37.
3. Головченко, Г.В. Метод оптимизации очередности подготовки самолетов к вылету при сбойных ситуациях // Вестник СПГУГА, 2016, № 2 (11), с. 29-37.
4. Головченко, Г.В., Костин, А.А. Статистический анализ показателей регулярности отправок воздушных судов // Вестник СПГУГА, 2016, № 4. (13), с.137-146.
5. Головченко, Г.В., Ребезова, М.И. Метод расчета сетевых графиков выполнения работ, учитывающий наличие располагаемых ресурсов. Научный Вестник МГТУГА, том 19, №5, 2016, с. 40-48.
6. Головченко, Г.В. и др. «КОБРА-2». Автоматизированная система комплексного обслуживания рейсов в аэропорту. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613225 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 14.05.2010 г.
7. Головченко, Г.В., Романов, А.Н. «Электронный диктор». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616682 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 26.08.2011 г.
8. Головченко, Г.В. и др. «Визинформ-3». Автоматизированная система визуального информирования пассажиров. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013618385 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 06.09.2013 г.
9. Головченко Г.В. и др. Система регистрации пассажиров и багажа (КОБРА DCS). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016613266 // Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ Роспатента от 28.01.2016 г.

Публикации в изданиях, рецензируемых экспертами УМО:

10. Головченко Г.В., Губенко А.В., Махарев Э.И., Смуров М.Ю. Автоматизация производственной и финансово-экономической деятельности предприятий гражданской авиации / Допущено УМО по образованию в области аэронавигации /– М.: ТИД «Студент». – 2016. – 349 с.

Публикации в других изданиях:

11. Головченко Г.В. Организация процессов совместного принятия решений на базе АС «КОБРА». М.: Аэропорт Партнер. Журнал Ассоциации «Аэропорт» ГА стран СНГ №1 (109), 2016, с. 9-10.

12. Головченко Г.В. Автоматизация аэропортов, проектирование эффективных IT-решений. М.: Аэропорт Партнер. Журнал Ассоциации «Аэропорт» ГА стран СНГ №2 (117), 2017, с. 21-23.

13. Головченко, Г.В. Основные тренды развития IT в аэропортах РФ. М.: Аэропорт Партнер. Журнал Ассоциации «Аэропорт» ГА стран СНГ №1 (120), 2018, с. 15-16.

14. Головченко, Г.В. Комплексная автоматизация деятельности аэропорта. Авиационный IT-2015. 8-я ежегодная международная конференция. Электронный ресурс: <https://events.ato.ru/events/2481/detail/>.

15. Головченко, Г.В. Текущая ситуация и перспективы развития IT в отечественной авиации. IT-форум «Наземное обслуживание в аэропортах-2017». 8-я международная выставка и конференция. М.: АТО, 26-27 сентября 2017. Электронный ресурс: <https://events.ato.ru/events/11096/detail/>.

16. Головченко, Г.В. Исследование IT-оснащенности российских аэропортов. ATO Events. Shaping the future of the air transport industry (DASR 2018). 11 апреля 2018. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://events.ato.ru/events/14398/detail/>.

17. Головченко, Г.В. Повышение производственно-экономических показателей авиапредприятий за счет внедрения современных IT-решений// Материалы Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы». СПб.: ИПТ РАН. 2017. 197-200 с, ISBN 978-5-9908209-6-8.