

На правах рукописи

Егошин Сергей Федорович

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ
ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ**

Специальность 2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации» (ФГУП ГосНИИ ГА).

Научный руководитель	Шапкин Василий Сергеевич , доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Сизов Александр Владимирович , доктор технических наук, старший научный сотрудник, член технического комитета Ассоциации вертолетной индустрии, главный конструктор отделения перспективного проектирования ОКБ АО «Вертолеты России» Урюпин Илья Вадимович , кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник отдела №62 отделения №6 Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА)

Защита диссертации состоится 28 мая 2026 года в 11 часов на заседании диссертационного совета 40.1.001.01 на базе ФГУП ГосНИИ ГА по адресу: 125438, г. Москва, ул. Михалковская, д. 67, корп. 1.

Тел.: 8(495) 450-26-15, факс 8(495) 450-62-06, e-mail: gosniiga@gosniiga.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП ГосНИИ ГА и на сайте <https://gosniiga.ru/science/dissertation-council/defence/awfg1bx6z455a49igue96cpu>

Автореферат разослан “_____” _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 40.1.001.01
канд. техн. наук

_____ Черников П.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» одной из задач указано повышение транспортной доступности отдалённых, труднодоступных и малонаселённых территорий страны (далее – труднодоступных территорий), где местные воздушные пассажирские перевозки (местные воздушные авиалинии, далее МВЛ) являются одним из основных видов транспорта. Транспортной доступностью называется «мера способности территории быть достигнутой при помощи транспорта, измеряемая временем, в течение которого данная территория может быть достигнута из определённой точки или другой территории при помощи различных видов транспорта по транспортной сети».

В субъектах РФ (регионах) с труднодоступными территориями большие расстояния и малая плотность населения делают труднореализуемой, а иногда и невозможной организацию круглогодичного наземного сообщения. Вследствие этого, МВЛ зачастую становятся единственной возможностью перемещения между населёнными пунктами. Однако организация местных перевозок требует значительных ресурсных затрат в расчёте на одного пассажира, эти затраты зависят в том числе от структуры парка воздушных судов (ВС) как части транспортной системы местных перевозок.

Таким образом, отмечается наличие противоречия практического характера между повышением транспортной доступности труднодоступных территорий и формированием необходимого парка ВС для реализации транспортной доступности труднодоступных территорий.

Кроме того, выявлено противоречие научного характера между необходимостью оценки уровня транспортной доступности труднодоступных территорий и отсутствием формализации показателей транспортной доступности, способов и методик расчёта потребного парка ВС.

В диссертации для разрешения указанных противоречий решается **научная задача** разработки методики выбора рационального парка ВС, предназначенных для применения на МВЛ при условии повышения уровня транспортной доступности труднодоступных территорий. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью создания инструментария, предназначенного для выработки управленческих решений о перспективных направлениях развития МВЛ в части выбора рациональных требований к перспективным ВС МВЛ.

Степень разработанности темы исследования. В области исследования парка ВС известны работы, проводившиеся в 70-80-е гг. В.В. Виноградовым, В.Г. Дабагяном, В.И. Емельяновым, В.Н. Касьяненко, Г.Г. Когут, Е.Ф. Косиченко, В.П. Кошкиным, А.В. Медведевым, Е.Г. Пинаевым, Э.И. Ресиним, Г.В. Рулевым, В.Н. Рябовым, Р.В. Сакачем, А.А. Фридляндом, а также более поздние работы М.А. Бородина, В.П. Горбунова, И.Б. Ивенина, И.В. Лесниченко, В.П. Маслакова,

И.О. Полешкиной, В.И. Самойлова, Д.Л. Тукеева, Г.М. Фридмана, и др., а среди зарубежных исследователей – работы Т.Л. Гэлловея, Дж. Р. Дина, Дж. Спинцыка, Дж.А. Стерна, Д.У. Хэйворда, У.Дж. Эванса др.

Существующие подходы к рациональному выбору потребного парка ВС строятся в основном на рассмотрении удельных технико-экономических характеристик (ТЭХ) ВС, на решении ряда декомпозированных задач оптимизации транспортных систем с фиксированной или варьируемой структурой сети маршрутов и инфраструктуры, в т.ч. в рамках транспортных задач математического программирования. Сложности решения подобных задач связаны с их большой размерностью, многоэкстремальностью и наличием дискретных переменных. Указанная сложность крайне затрудняет решение задач в общем виде, и к настоящему времени выработано ограниченное количество методов решения подобных задач при некоторых дополнительных допущениях.

Объект исследования – транспортная доступность труднодоступных территорий.

Предмет исследования – модели и методы выбора парка ВС, обеспечивающих транспортную доступность труднодоступных территорий.

Целью диссертационной работы является повышение транспортной доступности труднодоступных территорий страны посредством выбора парка ВС с учётом ограничений, являющихся формализованным описанием уровня транспортного обслуживания труднодоступных территорий.

Для достижения поставленной цели решается **комплекс взаимосвязанных задач**:

1. анализа транспортной доступности труднодоступных территорий РФ с целью выбора субъектов, для которых повышение транспортной доступности труднодоступных территорий посредством МВЛ является актуальным;

2. разработки методики выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий с учётом формализации соответствующих показателей и моделирования пассажирских перевозок;

3. формализации показателей транспортной доступности труднодоступных территорий;

4. формулировки оптимизационной задачи выбора парка ВС и критерии эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий;

5. разработки алгоритма решения задачи выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий, в т.ч. формулирования правила рационального выбора парка ВС в этой задаче;

6. разработки программного комплекса (ПК) для апробации методики выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий;

7. апробации работы ПК для оценки транспортной доступности конкретных труднодоступных территорий.

Методы исследования: в диссертационной работе использовались методы системного анализа, имитационного моделирования, линейного и нелинейного математического программирования, статистического анализа.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью применения известных математических методов и соответствием полученных результатов закономерностям функционирования существующих транспортных систем.

Научная новизна результатов исследования

Автором впервые получено:

1. Предложена формализация критериев транспортной доступности труднодоступных территорий, включающая максимальное время местной поездки и частоту рейсов как вводимые ограничения, с выбором их рациональных значений.

2. Разработана методика выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий, отличающаяся поиском рационального решения транспортной задачи математического программирования при совместной оптимизации маршрутной сети и инфраструктуры с учётом вводимых ограничений и с учётом особенностей МВЛ на труднодоступных территориях.

3. Разработан алгоритм решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий, снижающий требования к потребным вычислительным мощностям за счёт декомпозиции многоэтапного поиска.

4. Получены результаты расчётов парка ВС для конкретных труднодоступных территорий, обеспечивающего транспортную доступность с учётом рациональных значений вводимых ограничений.

По результатам расчётов получен парк ВС в сочетании с его эффективностью решения задачи обеспечения транспортной доступности на примере труднодоступных территорий Республики Саха (Якутия); при этом в числе прочих рассматривались концепции ВС, в отношении которых требуется принятие решения о целесообразности их дальнейшей разработки или внедрения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий страны на основе решения транспортной задачи математического программирования при совместной оптимизации маршрутной сети и инфраструктуры с учётом вводимых ограничений и с учётом особенностей МВЛ на труднодоступных территориях.

2. Многоэтапный алгоритм декомпозированного поиска рационального решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий за приемлемое время.

3. Результаты расчётов структуры парка ВС, обеспечивающего транспортную доступность с учётом рациональных значений вводимых ограничений, для конкретных труднодоступных территорий.

Практическая значимость. Полученные в диссертации результаты позволяют: рассчитывать потребный парк ВС с учётом ограничений на максимальное время местной поездки и частоту рейсов совместно со структурой маршрутной сети МВЛ; выработать решение, обоснованное данной методикой, о возможных направлениях развития МВЛ; сформировать рациональные требования к перспективным ВС МВЛ в зависимости от максимального времени местной поездки и частоты рейсов; проводить сравнительный анализ различных концепций перспективных ВС с учётом вводимых ограничений.

Внедрение результатов работы. Результаты работы представлены в т.ч. в материалах отчётов по НИР «Альтернатива» (2017-2019 гг.), «MANGO-ЦАГИ» (2022-23 г.), что подтверждено соответствующими актами.

Апробация работы. Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 4-ой научно-практической конференции «Проблемы управления научными исследованиями и разработками. Государство и наука: новые модели управления» (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 2018 г.); 5-ой научно-практической конференции «Управление научными исследованиями и разработками: роль науки в достижении национальных целей» (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 2019 г.); XXVII научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (МАИ, г. Евпатория, 2023 г.); МНПК «Транспорт России: проблемы и перспективы-2024» (ИПТ РАН, г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 работах, в том числе: 8 статей в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК при Минобрнауки РФ, и 3 работы в трудах и сборниках материалов научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, четырёх приложений. Содержание работы изложено на 161 странице, включая 58 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 97 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи диссертации, описана структура работы, перечислены полученные в диссертации новые результаты.

В первой главе проанализированы проблемы организации местных перевозок на труднодоступных территориях страны, состояние МВЛ за несколько лет в части парка ВС и структуры сети авиалиний.

МВЛ играют важную роль в транспортной системе государства, поскольку являются социально значимыми и решают проблему транспортной доступности труднодоступных территорий. В качестве характерного региона

в работе рассматривается Республика Саха (Якутия) как наиболее крупный по площади субъект Российской Федерации. Для этого региона сочетание небольших пассажиропотоков с большими расстояниями, неблагоприятными природно-климатическими условиями и низким уровнем доходов населения является ключевой проблемой, препятствующей развитию транспорта: значительная часть территорий не имеет круглогодичной наземной транспортной связи со столицей – городом Якутск.

Статистический анализ расписания МВЛ показывает, что обеспечение транспортной доступности территорий Республики Саха (Якутия) значительно отстает в сравнении с местными перевозками в других регионах России. Основой парка ВС МВЛ авиакомпаний «Полярные авиалинии» и «Якутия», выполняющих местные воздушные перевозки в регионе, являются самолёты Ан-24/26, которые, скорее всего, будут списаны в ближайшие несколько лет. Авиалинии, обслуживаемые самолётами Ан-24/26, связывают столичный аэропорт с аэропортами МВЛ в периферийных районах, при этом количество совершаемых рейсов – невелико, а частота выполнения рейсов – низка вплоть до реже 1 раза/неделю. Объем воздушных пассажирских перевозок, приходящихся на эти авиалинии, составляет ~90% от общего объёма региональных воздушных пассажирских перевозок, что соответствует характеру спроса. Оставшиеся ~10% объёма приходятся на воздушные перевозки внутри районов или между районами, и выполняются вертолётами Ми-8 или самолётами Ан-2/3, базирующимися в аэропортах-хабах. При этом, в отличие от рейсов магистральных воздушных перевозок, рейсы МВЛ, за некоторым исключением, выполняются по рабочим дням недели и в течение 8-ми часов, приходящихся на светлое рабочее время суток.

Подобная организация МВЛ, включая хабовую структуру маршрутной сети, позволяет снизить затраты на авиаперевозки в ущерб необходимости совершения пересадок в хабах, ожидания отправления рейсов по мере сбора достаточного количества пассажиров в хабе и т.д.

С другой стороны, ВС в парке авиакомпаний – это самолёты и вертолёты, произведённые в т.ч. в 1970-80 гг., и их применение обусловлено отсутствием современных ВС отечественной разработки, которые могли бы их заменить.

Как результат, в целях повышения транспортной доступности труднодоступных территорий, становится необходимым проведение исследований, направленных на выбор наиболее рациональных решений в части развития МВЛ региона с учётом повышения качества транспортных услуг применительно к выбору парка ВС.

Во второй главе рассматриваются модели и методы выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны с учётом ограничений на время местной поездки. Дано краткое изложение существующих подходов для выбора парка ВС МВЛ. Изложены принципы рассмотрения местных перевозок как сложной системы. В ней выделены ключевые элементы и взаимосвязи между ними. Рассмотрены в

комплексе лётно-технические и ТЭХ ВС, потребные транспортная сеть и наземная инфраструктура МВЛ, географические и демографические параметры субъектов РФ. Сформирован перечень характеристик ВС, необходимых для расчёта характеристик остальных элементов системы, результирующих показателей и ресурсов, потраченных на организацию местных перевозок. Для каждого из элементов системы задана математическая модель. Для указанной сложной системы сформулирована оптимизационная задача по критерию эффективности перевозок, который есть отношение объёмов местных пассажирских перевозок к ресурсам, потраченным на их осуществление. Отдельно рассмотрены условия и ограничения, вводимые в систему как формализация уровня транспортного обслуживания пассажиров.

Исследование транспортных систем в части расчёта оптимального потребного парка ВС как одного из её элементов относится к задачам большой размерности. В общем случае, это не позволяет использовать известные методы нахождения точного решения. Для получения же практических результатов, при поиске решения задач большой размерности широко применяется метод декомпозиции исходной глобальной задачи на взаимосвязанные подзадачи меньшей размерности, сформулированные, как правило, в терминах линейного и целочисленного математического программирования.

Применительно к МВЛ, к настоящему времени известны подходы к расчёту парка ВС как в упрощённой постановке (целочисленная задача математического программирования с ограничениями на количество аэропортов и авиалиний, решаемые методом ветвей и границ), так и более сложные, учитывающие дополнительные факторы. В отличие от них, в настоящей работе рассматривается методика выбора рационального парка ВС в рамках единой задачи целочисленного программирования по обобщённому критерию обеспечения транспортной доступности, сформулированной с учётом наземного транспорта, сезонности и суммарных затрат на перевозки, и предлагается метод решения подобной задачи применительно к МВЛ.

Местные перевозки рассматриваются как единая система, состоящая из парков транспортных средств (авиационных, наземных и пр.) и соответствующих им объектов инфраструктуры, связанных транспортной сетью. Внешней средой, с которой данная система взаимодействует как сложная система, является население регионов в местах своего компактного проживания. Целевой задачей системы является удовлетворение спроса на местные пассажирские перевозки.

В качестве оптимизируемой целевой функции введем критерий эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий E как отношение уровня обеспечения транспортной доступности W (функция от объёмов пассажирских перевозок, не выполненных с учётом ограничений) к ресурсам R , потраченным на осуществление этих перевозок:

$$E = \frac{W}{R} . \quad (1)$$

Социальная значимость местных поездок обуславливается целями этих поездок, а именно: доступ к магистральной сети (как правило, через административный центр региона как отправной пункт этой сети), и поездки в целях удовлетворения потребностей в части решения административных вопросов, образования, здравоохранения и т.п. При этом для жителей рассматриваемого региона цель поездки достигается по приезду в административный центр данного региона. В силу этого, возможно обособленное рассмотрение внутрирегиональных маршрутных сетей местных перевозок. При ряде допущений (например, при отсутствии взаимосвязи между стоимостью ВС и его серийностью, и пр.) могут обособленно рассматриваться и парки транспортных средств, и объекты инфраструктуры. Как результат, транспортная система местных перевозок в регионе рассматривается сепаративно от единой транспортной системы государства.

Техническая постановка задачи формулируется следующим образом. Местные перевозки внутри каждого региона должны обеспечивать перевозку заданного количества пассажиров из мест проживания на труднодоступных территориях в административный центр региона (столицу) с учётом дополнительных условий (географические, климатические, нормативные, экономические и пр.). Необходимо найти такой парк транспортных средств, при котором, с учётом возможного изменения структуры маршрутной сети, достигается минимум затрат на местные перевозки.

Пусть (для рассматриваемого региона) i – индекс пункта отправления ($1 \leq i \leq M$), j – индекс пункта прибытия ($1 \leq j \leq M+1$), k – индекс типа транспортного средства в парке транспортных средств ($1 \leq k \leq N$). Здесь количество пунктов прибытия совпадает с количеством пунктов отправления плюс $(M+1)$ пункт прибытия как столичный центр. Каждому пункту отправления соответствует a_i пассажиров, и b_j – суммарное количество прибывших в столицу пассажиров. Маршрутная сеть местных перевозок описывается в терминах сбалансированной транспортной задачи для M пунктов отправления, $(M+1)$ -го регионального центра как пункта прибытия и с учётом возможности перевозки через промежуточные пункты (рис. 1):

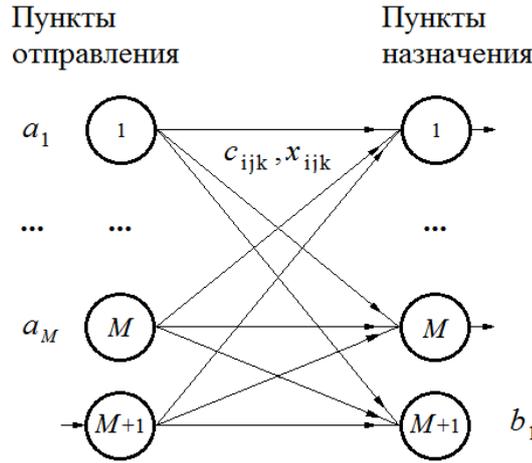


Рис. 1 – Сбалансированная транспортная модель с промежуточными пунктами для внутрирегиональных местных перевозок

Каждой транспортной связи соответствует некоторое искомое количество пассажиров x_{ijk} – количество пассажиров, перевозимых из пункта i в пункт j посредством транспортного средства k -го типа. В целях упрощения записи задачи, под пунктами отправления и прибытия подразумеваются и непосредственно населённые пункты, и аэропорты (как пункты с нулевым количеством пассажиров). При этом c_{ijk} – стоимость перевозки x_{ijk} пассажиров между i -ым и j -ым пунктами, а q_{ik} – затраты на авиационную инфраструктуру (а следовательно, и наличие таковой) в i -ом пункте в зависимости от типа k -го транспортного средства:

$$q_{ik} = \begin{cases} 0, & \{x_{ijk} = 0, \forall j\}, \{x_{ijk} > 0, \forall j, k \notin S^{BC}\} \\ c_{ik}^{ПП-верт}, & x_{ijk} > 0, \forall j, k \in S^{верт} \\ c_{ik}^{АЭРО}, & x_{ijk} > 0, \forall j, k \in S^{сам} \end{cases}, \quad (2)$$

где $c_{ik}^{ПП-верт}$ – затраты на содержание вертолётной площадки;

$c_{ik}^{АЭРО}$ – затраты на содержание аэропорта МВЛ;

$S^{верт}$, $S^{сам}$, S^{BC} – подмножества индекса, соответствующие вертолётам, самолётам и всем ВС, соответственно.

Для заданных объёмов перевозок выполняется:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{M+1} x_{ijk} = a_i, \quad i = 1, \dots, M; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M x_{ijk} = \sum_{i=1}^M a_i = b_1, \quad j = M + 1, \quad (4)$$

В настоящей работе c_{ijk} для ВС рассматриваются в общем виде, поскольку стоимость перевозки одного пассажира-километра нелинейно зависит от заполняемости салона, что особенно существенно для ВС небольшой пассажироместимости:

$$c_{ijk} = \left(\left[\frac{x_{ijk}}{z_k(L_{ij})} \right] + 1 \right) c_k^{peic}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk}), \quad \forall i, \forall j, \forall k \in S^{BC}, \quad (5)$$

здесь и далее $[]$ – целая часть числа;

L_{ij} – расстояние (ортодромическое) между i -ым и j -ым пунктами в r -ом регионе;

$z_k(L)$ – пассажировместимость ВС k -го типа как функция от расстояния L , на которое совершается перелёт;

$c_k^{peic}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk})$ – стоимость рейса ВС, т.е. стоимость перевозки пассажиров в количестве w_{ijk} человек посредством ВС k -го типа из i -го пункта в j -й при наличии в них соответствующей авиационной инфраструктуры (переменные q_{ik}, q_{jk}). Здесь количество пассажиров на рейс

$$w_{ijk} = \left[\frac{x_{ijk}}{\left[\frac{x_{ijk}}{z_k(L_{ij})} \right] + 1} \right]. \quad (6)$$

С учётом введённых обозначений, функция затраченных ресурсов на местные перевозки C есть суммарная стоимость всех затрат на перевозки (за единицу времени):

$$Res \equiv C = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M+1} c_{ijk} + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M q_{ik}. \quad (7)$$

Тогда для рассматриваемого региона формулируется следующая задача оптимизации эффективности местных перевозок с целью выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий:

$$\begin{cases} X_0 = \arg \max_X E(X) \\ F(X) \geq A \\ G(X) \leq D \end{cases}, \quad (8)$$

где X – вектор варьируемых параметров региона, включающий в себя количество пассажиров x_{ijk} и управляющие переменные q_{ik} ;

$F(X)$ – функция требуемых объёмов выполнения целевых задач A (вектор, состоящий из переменных a_i);

$G(X)$ – функция накладываемых ограничений D .

Вектор ограничений D – это условия, при которых производится выбор парка ВС. Они задаются как очевидным образом, так и с учётом специфики местных перевозок и применяемых транспортных средств.

- Количество перевозимых пассажиров не может быть отрицательным:

$$x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i, \forall j, \forall k; \quad (9)$$

- поездка между любой парой пунктов возможна с задействованием только одного типа транспорта:

$$\sum_{k=1}^N \xi(x_{ijk}) = 1, \quad \forall i, \forall j, \xi(x_{ijk}) = \begin{cases} 0, & x_{ijk} = 0 \\ 1, & x_{ijk} > 0 \end{cases}; \quad (10)$$

- выполнение рейсов самолётами более чем с одной промежуточной посадкой невозможно (для остальных транспортных средств такое условие не задается):

$$x_{izk} = 0, \quad \forall x_{zjk} > 0, j \neq M+1, k \in S^{cam}; \quad (11)$$

- при совершении местной поездки пересадка из одного самолёта в другой не производится:

$$k = k^*, \quad \forall x_{izk} > 0, \forall x_{zjk^*} > 0, j = M+1, k \in S^{cam}, k^* \in S^{cam}. \quad (12)$$

Кроме того, в задаче вводятся ограничения как условия выбора парка ВС для перспективной транспортной системы местных перевозок: условие частоты перевозок и условие соблюдения общего времени в пути «от двери до двери». В данном случае подразумевается, что повышение качества воздушного сообщения за счёт увеличения частоты перевозок, в том числе благодаря государственной поддержке, является неременным условием перехода к перспективной транспортной системе местных перевозок, отвечающей высоким социальным стандартам транспортной доступности.

Частота движения транспортных средств на каждом маршруте, связывающем i -ый пункт со столичным $(M+1)$ -ым пунктом, должна быть не реже, чем нормативная частота перевозок $T_{РЕГ}$. Данное условие выполняется как непосредственное задание численных значений a_i :

$$a_i = \left[T_{РЕГ} \times k_{сез} \times \frac{a_i^{(\Sigma)}}{365} \right] + 1, \quad \forall i, \quad (13)$$

где $a_i^{(\Sigma)}$ – суммарный годовой объём перевозок из i -го пункта отправления, $k_{сез}$ – коэффициент сезонности спроса на авиаперевозки, а значение $T_{РЕГ}$ задается как «количество рейсов в сутки».

Без введения условия (13) получилось бы решение, не согласующееся с реалиями местного сообщения: наиболее дешёвая перевозка – это перевозка наиболее крупными по вместимости транспортными средствами при частоте рейсов, соответствующей 100%-ой заполняемости салона.

Требование к общему времени в пути «от двери до двери» означает, что суммарное техническое время поездки по любому маршруту, связывающему i -ый пункт со столичным $(M+1)$ -ым пунктом, не должно превышать заданную продолжительность местной поездки $T_{МАРШ}$:

$$\frac{L_{i z_1}}{V_{i z_1 k}} + \frac{L_{z_1 z_2}}{V_{z_1 z_2 k}} + \dots + \frac{L_{z_{h-1} z_h}}{V_{z_{h-1} z_h k}} + \frac{L_{z_h z_{h+1}}}{V_{z_h z_{h+1} k}} + \dots + \frac{L_{z_H z_{M+1}}}{V_{z_H z_{M+1} k}} \leq T_{МАРШ}, \quad (14)$$

$$1 \leq h \leq H \leq M, \forall i, \forall k$$

где V_{ijk} – скорость выполнения поездки k -ым транспортным средством из i -го пункта в j -ый.

Под техническим временем поездки следует понимать время, обусловленное только техническими характеристиками транспортных

средств, т.е. без учёта времени ожидания, пересадки и пр. Данный подход приемлем, так как время поездки есть сумма времён всех этапов поездки, и, следовательно, параметры, связанные со временами ожидания, пересадки и пр., могут быть опущены при одновременном уменьшении $T_{МАРШ}$.

Введение условия (14) связано с необходимостью государственного регулирования в сфере местных перевозок как оказываемых транспортных услуг. С формальной математической точки зрения, без задания ограничения $T_{МАРШ}$ стало бы возможным узко ограниченное решение, при котором местные воздушные перевозки осуществлялись бы только в те населённые пункты, для которых отсутствует наземная/водная транспортная связь с региональным центром.

Выполнение условия (14) для совокупности a_i определяет значение функции W , которая в настоящей работе задавалась следующим образом:

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M a_i^*}{b_1}, \quad (15)$$

где a_i^* соответствуют тем населённым пунктам, для которых, с учётом типов рассматриваемых транспортных средств, не существует ни одного маршрута, для которого выполняется условие (14).

Таким образом, значения $T_{РЕГ}$ и $T_{МАРШ}$ следует трактовать как нормативные стандарты к качеству местных перевозок, вводимые на общегосударственном уровне.

Для расчёта параметров, входящих в задачу (8), были разработаны или адаптированы следующие математические модели:

- модель расчёта объёмов перевозок (компоненты вектора A) на основе существующей статистики годовой подвижности γ населения труднодоступных территорий в зависимости от удалённости L от столицы региона:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{L}{400}, & 200 \text{ км} \leq L \leq 600 \text{ км} \\ 1,5, & L > 600 \text{ км} \end{cases}; \quad (16)$$

- модель расчёта стоимости воздушных перевозок (на основе методики «Методические рекомендации по определению себестоимости внутренних и международных рейсов для российских авиакомпаний» разработки ГУП «Консультативно-методический центр экономики и права системы сертификации на воздушном транспорте Российской Федерации»);

- модель расчёта времени рейса на основе известных взаимоотношений с учётом среднестатистической поправки к времени выполнения рейса ~15 минут, включающей в себя и время движения ВС по земле, и увеличение времени перелёта вследствие кривизны маршрута, и пр.;

- модель наземного (автомобильного) транспорта как граф существующей автодорожной сети с постоянными удельными затратами на

перевозку одного пассажира и временем поездки, пропорциональным расстоянию между населёнными пунктами;

- модель затрат на строительство/реконструкцию аэропортов МВЛ на основе «Руководства по проектированию аэропортов местных воздушных линий», ГПИ и НИИ ГА «Аэропроект», и Укрупнённых нормативов цены строительства ФГУП «Администрация гражданских аэропортов (аэродромов)»;

- модель затрат на функционирование авиационной инфраструктуры на основе среднестатистической годовой стоимости содержания аэропорта МВЛ или вертолётной посадочной площадки с учётом амортизации нового строительства/модернизации за период до капитального ремонта;

- и др.

В силу большой размерности задачи (8), а также ограниченности вычислительных ресурсов, возникает необходимость выработки её рационального решения. Данное рациональное решение – это значение вектора варьируемых параметров X , полученное за некоторое заданное количество итераций решения задачи (8) по разработанному алгоритму. В процессе исследований была выработана рекомендация о рациональном значении «50 итераций» для получения рационального решения.

Тогда выбор рационального решения производится следующим образом (рис. 2):

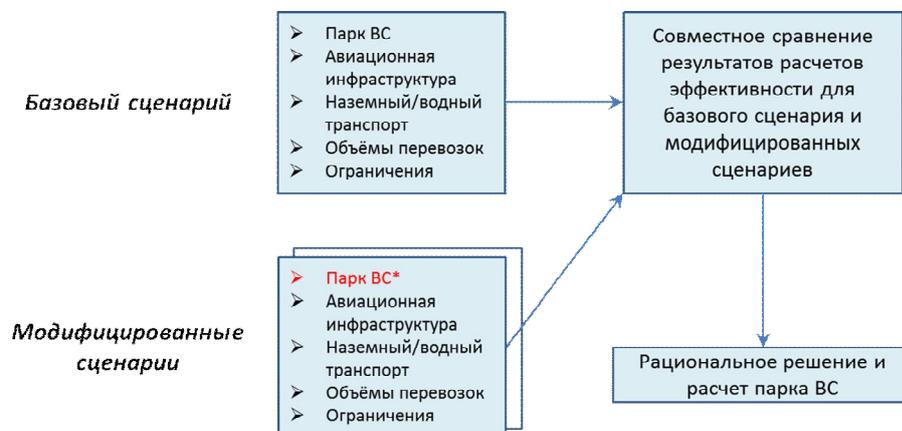


Рис. 2 – Процедура выработки рационального решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий

В процедуре сначала формируется базовый сценарий, включающий исходный N -типовой парк ВС, объекты инфраструктуры, объёмы перевозок и ограничения. Для данного сценария ставится задача (8) и находится её рациональное решение, т.е. находится значение целевой функции с соответствующими сетью авиалиний и распределением ВС по авиалиниям.

Затем формируются модифицированные сценарии, каждому из которых соответствует новый парк ВС, полученный путём замены в парке ВС базового сценария одного из типов ВС на другой тип ВС при неизменных

объёмах работ и ограничениях. Для каждого из модифицированных сценариев также находится рациональное решение задачи (8).

Окончательно проводится сравнение результатов расчётов для базового и модифицированных сценариев. Итоговый расчёт парка ВС соответствует сценарию с максимумом критерия эффективности (1) местных перевозок.

В третьей главе рассматривается многоэтапный алгоритм декомпозированного поиска приближённого решения сформированной математической задачи выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны с учётом дополнительных ограничений.

Первым шагом при решении задачи (8) было показано, что, при существующем уровне весового и аэродинамического совершенства планера самолётов, топливной эффективности газотурбинных двигателей и т.п., местные воздушные перевозки могут эффективно выполняться и с учётом достаточно жёсткого ограничения на время поездки $T_{МАРШ} \leq 3$ часа (рис. 3).

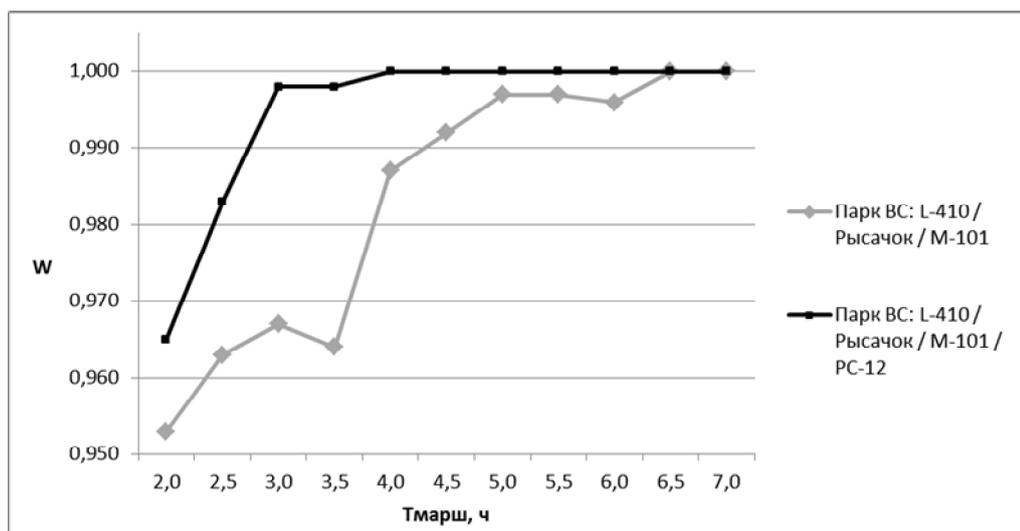


Рис. 3 – Уровень обеспечения транспортной доступности W в зависимости от $T_{МАРШ}$ и парка применяемых ВС

Как следствие, при наличии в парке современных ВС, введенный показатель эффективности перевозок будет зависеть только от объёмов потраченных ресурсов. Это позволяет упростить решение математической задачи (8): максимум критерия эффективности (1) будет соответствовать минимуму затрат на местные перевозки.

Тогда алгоритм поиска рационального решения задачи (8) строится из нескольких разовых этапов и нескольких этапов, выполняемых в итерационном цикле до нахождения наилучшего решения (рис. 4):

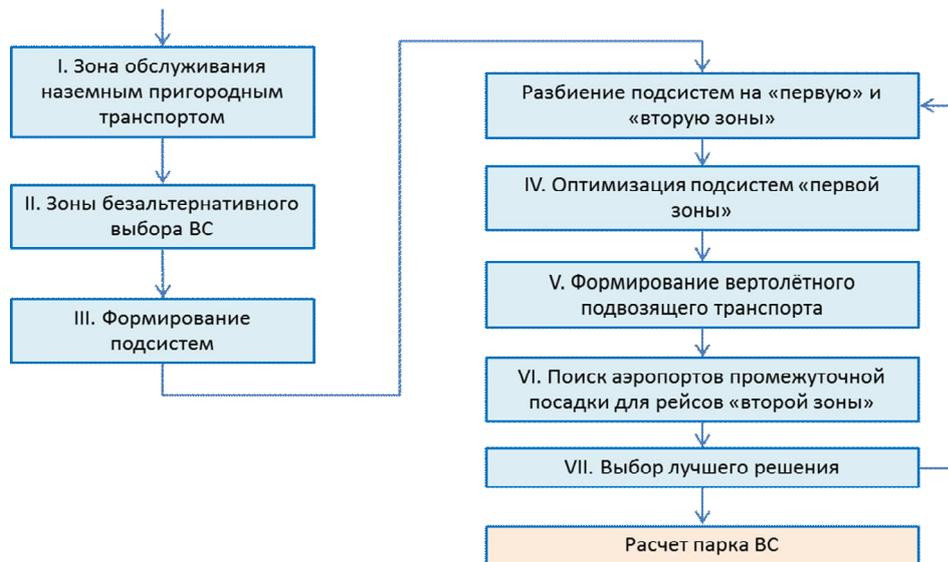


Рис. 4 – Укрупнённый алгоритм поиска рационального решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий

Алгоритм включает в себя следующие этапы:

I. Исключение из рассмотрения поселений, для которых возможна организация наземной поездки с учётом соблюдения условия (14) для $T_{МАРШ}$.

II. Обособление территорий региона (наиболее отдалённых), для которых условие $T_{МАРШ}$ или не выполняется, или выполняется только при условии прямого беспосадочного перелёта одного из ВС в парке ВС.

III. Формирование локальных транспортных подсистем (рис. 5), возможное благодаря введению $T_{МАРШ}$, что позволяет снизить размерность решаемой задачи путём декомпозиции исходной системы и выполнить расчёты за разумное время.

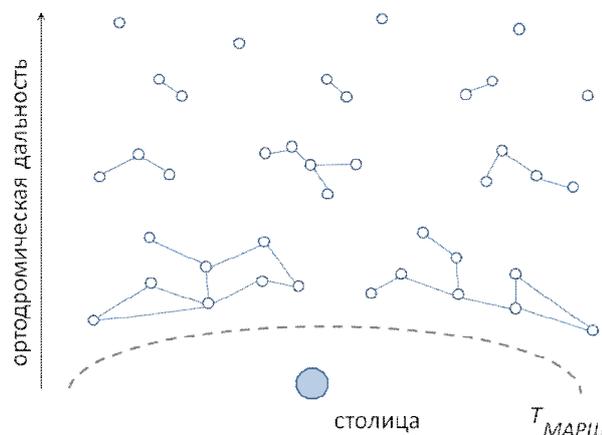


Рис. 5 – Разбиение графа наземных транспортных связей на подграфы

IV. Разбиение полученных подсистем на две группы: первую, из которой совершаются беспосадочные перелёты в столицу, и вторую, из которой совершаются перелёты только в аэропорты первой группы. Для

каждой из полученных подсистем первой группы решение находится с приемлемой точностью и за приемлемое время (с учётом итераций начального приближения решения) с применением метода градиентного спуска в пространстве бинарных переменных, задающих наличие транспортных связей и инфраструктуры в рассматриваемой подсистеме.

V. Укрупнение подсистем первой группы путём добавления подвозящего вертолётного транспорта, для чего рассматривается подзадача маршрутизации транспорта с несколькими депо (как обобщение задачи коммивояжёра) и вводится алгоритм оценки её приближённого решения. Выполнение этапа обосновано тем, что в условиях разрозненных населённых пунктов (например, на заболоченных территориях, где строительство автодорог крайне затруднительно) целесообразна организация циклических маршрутов подвозящего вертолётного транспорта с базированием вертолётов в аэропорте МВЛ как хабе.

VI. Совместная оптимизация подсистем первой и второй групп методом градиентного спуска в пространстве бинарных переменных, задающих аэродромы промежуточной посадки.

VII. Выбор наилучшего решения с учётом обособлений этапа II.

Этапы IV-VII алгоритма выполняются итерационно:

- задается исходное разбиение, в котором все подсистемы включаются в первую группу, и для каждой подсистемы производится поиск структуры сети маршрутов и инфраструктуры с учётом минимума затрат;

- после укрупнения подсистем на этапе V, полученные новые подсистемы первой группы последовательно переводятся во вторую группу, и для них производится поиск маршрутной сети этапа VI;

- процедура, указанная в предыдущем пункте, повторяется до тех пор, пока в первой группе не останется одна подсистема, и если при некотором очередном выполнении процедуры достигается снижение затрат – найденная структура сети маршрутов и инфраструктуры запоминается как лучшее решение.

Последовательность перевода подсистем из первой группы во вторую вводится на основе средней удалённости пунктов отправления подсистемы от регионального центра, что обосновано падением плотности населения (и количества пассажиров) с ростом удалённости от регионального центра.

После нахождения наилучшего решения задачи (8), количество ВС в парке рассчитывается с помощью вспомогательного алгоритма, который учитывает возможный месячный налёт ВС, сезонную готовность парка ВС, необходимость резервирования парка ВС.

В четвертой главе приводятся результаты расчётов парка ВС для региона Республика Саха (Якутия).

Было показано, что количество одновременно рассматриваемых ВС целесообразно ограничить четырьмя, а именно: три типа ВС – самолёты, один тип ВС – вертолёт. Если рассматривается парк ВС, состоящий из большого количества типов ВС, то по результатам расчётов структура

численности парка ВС имеет вид: несколько (не более 4-5) типов ВС являются основой парка ВС, и доля каждого из этих типов ВС в общей численности парка ВС составляет более 10%, в то время как на каждый из оставшихся типов ВС приходится не более 2-3%. Однако подобная ситуация требует обособленного моделирования затрат на эксплуатацию единичных ВС (с заведомо бóльшими удельными затратами, что невыгодно авиакомпаниям), поэтому для исключения подобных итоговых результатов и вводится ограничение по типам ВС в рамках одного сценария.

Базовый сценарий включает парк ВС на основе самолётов ТВРС-44 «Ладога», L-410UVP-E и ЛМС-901 «Байкал» и вертолёт «Ансат». Выбор этих типов ВС обусловлен тем, что ТВРС-44 и ЛМС-901 находятся в стадии разработки, и планируется их серийное производство для нужд МВЛ.

Предпочтительный выбор «Ансата» следует из технико-экономического сравнения его с Ми-8 при условии существенного повышения частоты рейсов (не реже «1 раз в 3 суток», хотя, безусловно, наличие Ми-8 в существующем парке ВС связано и с необходимостью выполнения грузоперевозок и авиационных работ, а не только пассажирских перевозок). При этом полученное решение хорошо совпадает с существующей сетью МВЛ в части местонахождения территорий, где должен применяться внутрирайонный подвозящий вертолётный транспорт.

Модифицированные сценарии строятся как разные комбинации самолётов L-410NG, «Рысачок» (как образец авиационной техники с уровнем технического совершенства близким к L-410UVP-E), синтез-облика самолёта ЛМС разработки ФГУП «ЦАГИ», а также самолёта короткого взлёта и посадки на базе L-410UVP, дополнительно оснащённого распределённой электросиловой установкой обдувки крыла с целью уменьшения длины потребной взлётно-посадочной полосы (условно L-410 КВП). ТВРС-44 и «Ансат» при этом рассматривались в парке ВС для всех сценариев.

Значение $k_{\text{сез}}$ задаётся равным 1,33 исходя из статистики объёмов воздушных перевозок.

Результаты расчётов представлены на рис. 6-9:

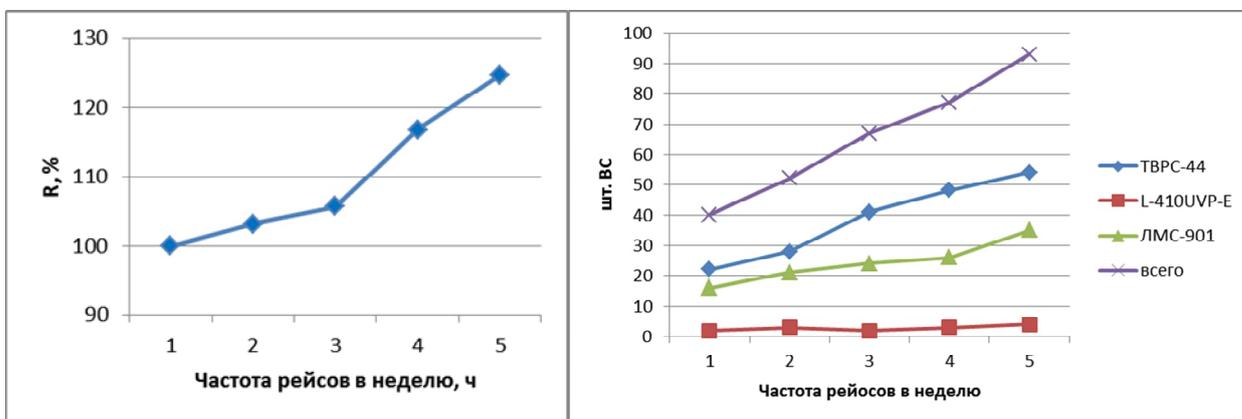


Рис. 6 – Суммарные затраты на организацию МВЛ и парк ВС для базового сценария в зависимости от средней частоты рейсов

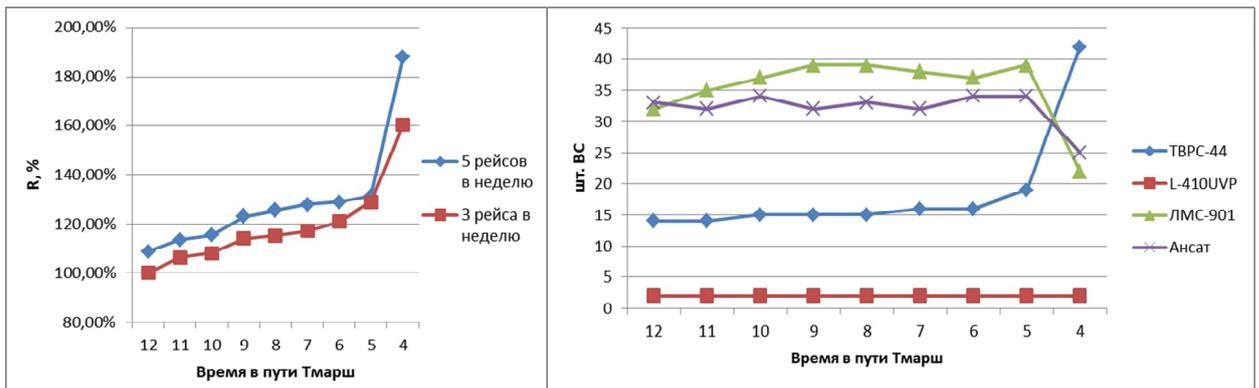


Рис. 7 – Суммарные затраты на организацию МВЛ и парк ВС для базового сценария в зависимости от суммарного времени в пути

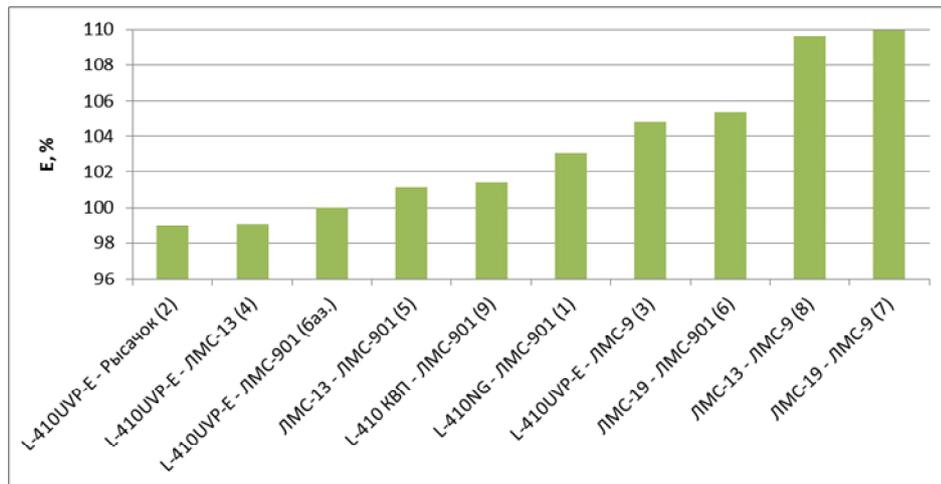


Рис. 8 – Сравнение эффективности сценариев для условий «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «время в пути – не более 4 часов»

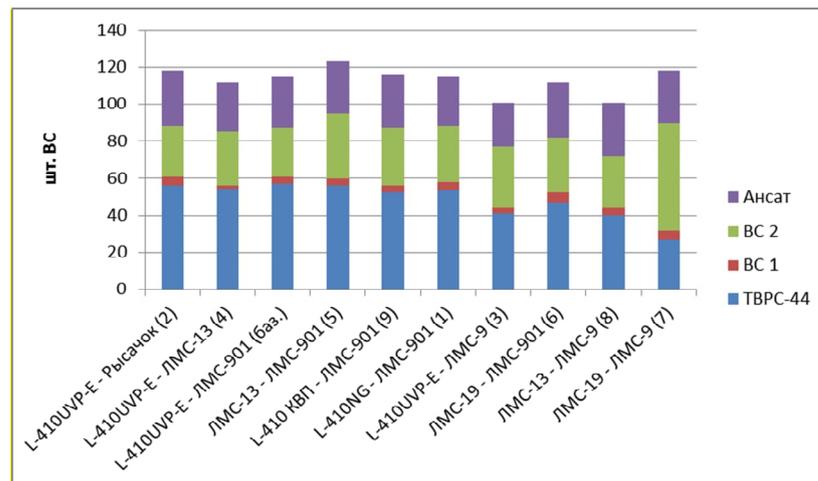


Рис. 9 – Структура парка ВС для рассматриваемых сценариев для условий «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «время в пути – не более 4 часов»

Анализ результатов расчётов показывает следующее.

1) Рис. 6: при частоте рейсов ~1-2 рейса в неделю (как средней по результатам анализа расписания, гл. 1) рассчитанный парк самолётов классов 3 и 4 с точностью до 1-2 ВС совпадает с парком авиакомпаний

«Полярные авиалинии» и «Якутия», тем самым доказываемая валидность методики; при этом повышение транспортной доступности вследствие увеличения частоты рейсов потребует увеличения затрат на выполнение рейсов на 20-25%.

2) Рис. 7: ограничение времени в пути $T_{МАРШ}$ в пределах 5-12 часов приводит к изменению суммарных затрат в пределах 10-20% и слабо влияет на парк самолётов; в то же время, при ограничении $T_{МАРШ} = 4$ часа наблюдается скачкообразный рост суммарных затрат на 30-60% и двукратное увеличение в парке количества самолётов ТВРС-44 (как наиболее скоростных), что связано с необходимостью выполнения данного ограничения для многих отдалённых районов.

3) Рис. 6-7: при введении ограничения $T_{МАРШ} = 4$ часа заполняемость салона ТВРС-44 мала (0,2-0,4), и возникает необходимость строительства десятков новых аэропортов, что в совокупности следует считать неприемлемым решением, указывающим на необходимость применения в парке других ВС: скоростных самолётов с крейсерской скоростью не менее 600 км/ч и пассажироместимостью в пределах 20-40 мест; при этом дальнейшее уточнение требований к подобному самолёту требует проведения дополнительных обликковых исследований.

4) Рис. 8-9: при введении условий перевозок «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «время в пути – не более 4 часов»

- наибольшая эффективность обеспечения транспортной доступности достигается при применении самолётов ЛМС для пары «19-местный ЛМС – 9-местный ЛМС», что делает это семейство привлекательным для применения на МВЛ;

- применение самолёта «Рысачок», как устаревшей авиационной техники, привело бы к незначительному снижению (~1%) транспортной доступности, что свидетельствует о том, что уровень технического совершенства самолёта ЛМС-901 «Байкал» соответствует уровню современной авиационной техники МВЛ;

- применение самолёта L-410NG с улучшенными ТЭХ приводит к незначительному (~3%) росту транспортной доступности, что обусловлено малой долей (и, как следствие, малым влиянием) 19-местных самолётов в парке ВС;

- использование в парке ВС самолёта L-410 КВП приводит к незначительному (до 2%) росту транспортной доступности, что связано в т.ч. с уменьшением массы полезной нагрузки, несмотря на экономию затрат на функционирование аэропортов (полученная оценка технологии обдувки крыла применима только для ВС классической компоновки пассажироместимостью 19 пассажиров);

- доля вертолётов в парке ВС во всех сценариях стабильно составляет 20-25%, что связано с особенностями расселения людей на труднодоступных территориях Республики Саха (Якутия), где малочисленное население проживает в немногочисленных разрозненных населённых пунктах, для

обслуживания которых в текущих условиях целесообразно задействовать базирующиеся в хабах вертолёты независимо от выбора самолётов в парке.

Основные результаты работы

На основании проведённых исследований и разработок получены следующие итоги:

1. Проведённые исследования показывают, что в настоящее время организация МВЛ не соответствует современным требованиям к местным перевозкам в части времени поездки, частоты рейсов, необходимости совершения пересадок, в т.ч. в Республике Саха (Якутия). В силу безальтернативности авиационного транспорта для многих районов труднодоступных территорий, перспективная транспортная система местных перевозок должна обеспечивать возможность совершения ежедневных местных поездок, поэтому, при существующей годовой подвижности населения, требуемый парк ВС для Республики Саха (Якутия) должен включать не менее 100-120 ВС.

2. Разработан инструментарий, реализующий многоэтапный алгоритм приближённого решения целочисленной транспортной задачи большой размерности при формализации ограничений на время местной поездки и частоту рейсов и при выборе рациональных значений для данных ограничений, позволяющий рассчитать парк ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий, исходя из возможностей современной вычислительной техники. Ключевым шагом алгоритма является декомпозиция задачи большой размерности на подзадачи без потери точности решения.

3. Проведены расчёты с целью оценки эффективности применения для МВЛ самолёта L-410NG; самолёта ЛМС-901 «Байкал»; синтез-облик семейства самолётов ЛМС разработки ФГУП «ЦАГИ»; самолёт КВП на базе L-410 с системой обдувки крыла. Расчёты показали, что для повышения транспортной доступности в перспективной транспортной системе местных перевозок Республики Саха (Якутия) целесообразно применение новых самолётов семейства ЛМС с улучшенными ТЭХ. Формирование парка самолётов МВЛ целесообразно выполнять по принципу «44-местное ВС / 9-местное ВС» с возможностью добавления в парк самолётов с крейсерской скоростью не менее 600 км/ч и пассажироместимостью в пределах 20-40 мест; уточнение требований к подобному самолёту требует проведения дополнительных обликовых исследований, выходящих за рамки настоящей работы. Применение распределённой электросиловой установки обдувки крыла на 19-местных самолётах классической компоновки, с целью уменьшения потребной длины взлётно-посадочной полосы, не приводит к заметному улучшению транспортной доступности. При этом, независимо от выбора типов самолётов, доля вертолётов в парке ВС должна составлять ~20-25%, что связано с особенностями проживания людей на труднодоступных территориях. Полученные выводы позволяют более рационально планировать разработку перспективных ВС и МВЛ в целом.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

Статьи в журналах Перечня ВАК РФ

1. *Егошин С.Ф., Смирнов А.В.* Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – Т. 21, №3. – С. 78-90.

2. *Егошин С.Ф.* Оценка структуры полных затрат на пассажирские перевозки в местном сообщении // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2019. – №28. – С. 80-92.

3. *Егошин С.Ф.* Применение летательных аппаратов вертикального взлёта и посадки для развития авиатранспортной системы местных перевозок России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. №29. С. 46-57.

4. *Егошин С.Ф.* Влияние особенностей моделирования пассажирских потоков на выбор оптимального воздушного судна местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2021. – №35 (346). – С. 68-79.

5. *Егошин С.Ф., Смирнов А.В.* Обоснование рациональных требований к самолётам местных воздушных линий России на основе моделирования авиатранспортной системы с учётом перспективных критериев эффективности // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25. №6. С. 40-52.

6. *Клочков В.В., Топоров Н.Б., Егошин С.Ф., Дегтярев О.И.* Оценка эффективности новой авиационной техники для местных воздушных линий России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. №38. С. 92-104.

7. *Егошин С.Ф., Шестаков И.Н.* Особенности организации местных воздушных перевозок в труднодоступных регионах // Вестник СПбГУ ГА. 2024. №1 (42). С. 112-123.

8. *Егошин С.Ф., Шестаков И.Н., Стручкова А.М.* Методика расчёта парка самолётов для повышения транспортной доступности удалённых территорий Республики Саха (Якутия) // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. №47. С. 99-108.

Другие публикации

9. *Карпов А.Е., Егошин С.Ф., Клочков В.В.* Прогнозирование перспектив организации местных авиаперевозок с помощью скоростных винтокрылых летательных аппаратов в регионах Сибири и Дальнего Востока // В сборнике: «Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник». Москва, 2020. С. 358-364.

10. *Охапкин А.А., Егошин С.Ф., Клочков В.В.* Интегрированные авиационные системы комплексного жизнеобеспечения в малонаселённых регионах России: перспективы и принципы построения // В сборнике: Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. Москва, 2020. С. 903-909.

11. Дунаевский А.И., Егшин С.Ф., Клочков В.В. Оценка влияния основных проектных параметров самолётов на стоимость перевозок в авиатранспортной системе местных воздушных линий // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2021. №9. С. 15-22.

12. Егшин С.Ф., Клочков В.В. Оптимизация транспортной системы в отдаленных, труднодоступных и малонаселенных регионах с учетом требований защиты окружающей среды и национальных интересов Российской Федерации // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2022. Т. 18. №7 (412). С. 1216-1236.

Множительный центр _____
Заказ от «__» _____ 2026 г. Тираж 80 экз.