

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ УРОВНЯ АВТОНОМНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ПАРКА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Касаткин А. А.¹

(ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского»)

Организация технического обслуживания и ремонта парка воздушных судов принципиально отличается для воздушных судов разных классов. Зачастую техническое обслуживание и ремонт рассматриваются лишь как часть полных эксплуатационных расходов, однако для воздушных судов, обладающих малыми дальностью и скоростью полета, перегон судна на специализированные ремонтные предприятия или предприятия-производители может быть причиной значительных временных издержек. В статье рассматривается проблема организации технического обслуживания и ремонта парка воздушных судов местных воздушных линий в отдаленных и малонаселенных регионах. Рассматриваются различные подходы к технической эксплуатации парка воздушных судов: эксплуатация по регламенту и по фактическому состоянию, проведение технического обслуживания и ремонта в соответствии с РТЭ и переход к более автономному проведению технического обслуживания и ремонта. Старение высоконагруженной техники, обуславливающее увеличение потока отказов техники с ростом наработки, в данной работе не рассматривается. Проводится моделирование выполнения пассажироперевозок в регионе с учетом технического обслуживания и ремонта парка воздушных судов. Рассчитываются экономические характеристики пассажироперевозок.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт авиационной техники, местные воздушные линии, авиатранспортная система.

1. Введение

Значительная часть территории Российской Федерации относится к отдаленным, труднодоступным и малонаселенным регионам (ОТДМР), которые отличаются от прочих малыми плотностью и подвижностью населения. Для обеспечения транспортной связности в этих регионах организованы авиапе-

¹ Андрей Алексеевич Касаткин, м.н.с.(kasatkinaa@nrczh.ru).

ревозки внутри регионов – местные воздушные линии (МВЛ). Актуальность МВЛ наиболее высока в отдаленных и малонаселенных регионах Российской Федерации, например, Чукотский АО, республика Саха (Якутия), Сахалинская область.

Отличительными чертами воздушных судов (ВС) МВЛ являются: небольшая пассажировместимость (как правило, до 19 мест), небольшая практическая дальность (как правило, до 1500 км), небольшая потребная длина ВПП (до 1300 м). Следствием малой плотности и подвижности населения являются длительные межрейсовые интервалы, большое время ожидания рейса, высокая стоимость авиаперевозок в расчете на одного пассажира в силу необходимости содержания аэропортовой инфраструктуры в расчете на малое количество рейсов.

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) ВС является неотъемлемой частью эксплуатации воздушного транспорта и требует определенной инфраструктуры для обеспечения функционирования авиатранспортной системы. Выполнение ТОиР конкретного ВС непосредственным образом влияет на его исправность и на безопасность выполняемых им полетов. Малая численность парков ВС МВЛ в конкретном регионе или аэропорту приводит к сложностям в организации проведения технического обслуживания и ремонта (ТОиР) парка ВС: может быть экономически невыгодно создавать специализированные центры для обслуживания в регионах, в силу чего профессиональное выполнение сложных форм ТОиР возможно только на заводе-изготовителе. В существующих работах, например, [1, 5, 6], при рассмотрении системы МВЛ в ОТДМР ТОиР учитывается только как одна из статей эксплуатационных расходов. Особенности организации ТОиР в ОТДМР, вызванные этим простоем техники и другие аспекты эксплуатации, в основном, остаются вне поля исследований.

На текущий момент большинство типов ВС, в том числе и ВС МВЛ, обслуживается схожим образом: предполетные проверки и/или А-check проводятся экипажем на месте непосредственно перед вылетом, но более сложные формы обслуживания и ремонта, как правило, проводятся в специализированных технических центрах либо на заводе-изготовителе [2]. След-

ствием этого является необходимость планирования расписания полетов каждого борта с учетом его налета для обеспечения своевременного выполнения ТОиР, а продолжительность выполнения сложных форм ТОиР возрастает из-за необходимости перелета на завод-изготовитель или специализированный центр. В отличие от среднемагистральных и дальнемагистральных самолетов перелет для проведения ТОиР является существенным фактором при планировании эксплуатации самолетов МВЛ. Одним из основных типов самолетов МВЛ в настоящее время является Л 410-УВП, его практическая дальность составляет 1500 км. При постоянной эксплуатации в Чукотском АО перелет самолета Л-410-УВП на завод-изготовитель (УЗГА, г. Екатеринбург) для ТОиР будет состоять из 5 отрезков: Анадырь (Угольный) – Чокурдах – Саскылах – Норильск (Алыкель) – Новый Уренгой – Кольцово. Длительность такого перегона без учета отдыха экипажа, заправки ВС, прочих наземных этапов организации полета, а также погодных условий составит более 16 часов. При организации такого перелета с одним экипажем ВС будет недоступно несколько суток. Издержки времени такой схемы организации ТОиР существенны.

При рассмотрении задачи выполнения регулярных пассажироперевозок в конкретном регионе с заданным качеством предоставления услуг (зафиксированы объем транспортной работы и периодичность выполнения рейсов) различным схемам эксплуатации парка (как летной, так и технической) будут соответствовать различные уровни полных эксплуатационных расходов (ПЭР) и уровни аварийности полетов – основные характеристики авиатранспортной системы с точки зрения пассажира.

Описанная выше схема организации ТОиР эффективно применяется в густонаселенных регионах с развитой сервисной инфраструктурой. В дальнейшем будем рассматривать такой сценарий эксплуатации парка ВС как сценарий «А», отражающий наилучшее сочетание ПЭР и уровня аварийности полетов парка современных ВС (высокая интенсивность эксплуатации парка, сравнительно небольшие простои парка из-за проведения

ТОиР ввиду отсутствия длительного перелета на сервисную инфраструктуру).

При организации пассажироперевозок в ОТДМР с применением такого же современного парка ВС, техническая эксплуатация которого соответствует всем требованиям РТЭ, неизбежно возрастут полные эксплуатационные расходы. В силу специфики авиоперевозок МВЛ в ОТДМР (средние и большие расстояния, маленькие пассажиропотоки, малые плотность и подвижность населения) инфраструктура этой АТС является слабо развитой. При этом создание существенно более развитой инфраструктуры (как аэродромной, так и сервисной) может быть экономически невыгодно в силу той же специфики. Увеличение ПЭР обусловлено значительными временными издержками организации технического обслуживания парка на специализированной инфраструктуре, но уровень аварийности полетов при этом остается схожим с таковым для сценария «А». Таким образом, можно считать, что регламентному обслуживанию парка ВС в рамках специализированной инфраструктуры, эксплуатируемого в ОТДМР, – сценарию «D» – соответствуют более высокие ПЭР при том же уровне аварийности полетов в сравнении со сценарием «А».

Перевозчики, очевидно, заинтересованы в снижении полных эксплуатационных расходов. При выполнении пассажироперевозок МВЛ в ОТДМР временные издержки организации проведения сложных форм ТОиР (с перелетами на предприятия-изготовители и сервисные центры) чрезвычайно велики. Некоторые авиакомпании, совершающие пассажироперевозки в ОТДМР, стремясь избежать неприемлемо высоких временных и денежных затрат, на практике часто идут на нарушения установленных правил технической эксплуатации, превышение установленных и межремонтных ресурсов элементов ВС, пытаются выполнять своими силами операции ТОиР, которые по требованиям разработчиков и изготовителей должны выполняться исключительно в авторизованных организациях, располагающих сертифицированным оборудованием и квалифицированными кадрами.

На рис. 1 представлено сравнение числа авиационных происшествий (АП) из-за неисправности или отказа авиационной техники с общим числом АП в соответствующий год, произошедших с легкими и сверхлегкими ВС.

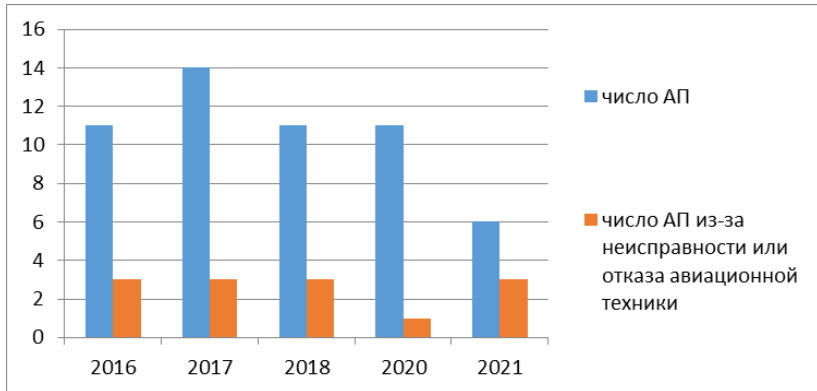


Рис. 1. Сравнение числа АП из-за неисправности или отказа авиационной техники с общим числом АП, произошедших с легкими и сверхлегкими ВС

Согласно статистике, собранной Межгосударственным авиационным комитетом, в 2016 г. произошло 11 авиационных происшествий (АП) с легкими и сверхлегкими ВС, среди которых 7 являются катастрофами с гибелью 12 человек. Из 11 АП 3 происшествия произошли из-за неисправности или отказа авиационной техники. В 2017 г. произошло 14 АП с легкими и сверхлегкими ВС, среди которых 8 являются катастрофами с гибелью 21 человека [7]. Из 14 АП 3 происшествия произошли из-за неисправности или отказа авиационной техники. В 2018 г. произошло 11 АП с легкими и сверхлегкими ВС, среди которых 4 являются катастрофами с гибелью 23 человека [8]. Из 11 АП 3 происшествия произошли из-за неисправности или отказа авиационной техники. [9] В 2020 г. произошло 11 АП с ВС взлетной массой менее 5700 кг, среди которых 7 являются катастрофами с гибелью 13 человек. Из 11 АП 1 происшествие про-

изошло из-за неисправности или отказа авиационной техники. [10]. В 2021 г. произошло 6 АП с ВС взлетной массой менее 5700 кг. Из 6 АП 3 происшествия произошло из-за неисправности или отказа авиационной техники. [11].

При этом в 2021 году в 31% случаев от суммарного числа всех авиационных происшествий с воздушными судами авиации общего назначения у воздушного судна отсутствовал или был просрочен сертификат летной годности, в 2020 году – в 41% случаев [10, 11]. В отчетах МАК неоднократно отмечается недостаточный контроль за поддержанием летной годности ВС, совершающих полеты в сфере АОН. [7, 8] Отмечается факт проведения ТОиР лицами, не имеющими соответствующей квалификации. [7, 8]

Иными словами, нынешняя альтернатива чрезвычайно дорогостоящей и неэффективной технической эксплуатации в соответствии с РТЭ – это нелегальная эксплуатация с грубыми нарушениями, негативно влияющими на безопасность полетов – сценарий «В».

Рассмотренные выше сценарии «В» и «D» в сравнении со сценарием «А» отражают проблематику технической эксплуатации современных ВС в ОТДМР: либо ВС обслуживается в полном соответствии с РТЭ, при этом мы имеем высокие расходы; либо для сокращения расходов мы отступаем от требований РТЭ, но уровень аварийности полетов значительно возрастает. Высокие расходы, соответствующие сценарию «D», обусловлены главным образом значительными временными издержками такой схемы организации ТОиР. Переход к нелегальной технической эксплуатации является попыткой эксплуатантов ВС МВЛ нивелировать эти временные издержки.

Чтобы сделать менее привлекательной такую альтернативу и снизить уровень аварийности, предлагается рассмотреть возможность:

- повышения автономности эксплуатации АТ (путем увеличения объема работ по ТОиР, выполняемых самостоятельно);
- перехода от регламентного ТО к эксплуатации по фактическому состоянию.

Предлагаемым решением проблемы обеспечения безопасности полетов с приемлемым уровнем затрат для эксплуатантов является переход к технической эксплуатации по фактическому состоянию с возможностью автономного проведения определенных форм ТОиР (отдельно не рассматривались) – сценарий «С» [3].

Переход к эксплуатации по фактическому состоянию с возможностью самостоятельного проведения ТОиР требует создания соответствующих технологий (технологии мониторинга фактического состояния ВС и пр.) или создания новых ВС, изначально спроектированных с учетом возможности автономной технической эксплуатации. В любом случае речь идет о создании принципиально новой авиатранспортной системы, изначально рассчитанной на возможность автономного проведения ТОиР. Общий уровень развития технологий в этом случае остается тот же, что и у существующего парка ВС МВЛ в ОТДМР, в силу чего некоторые летно-технические характеристики «нового» ВС могут оказаться хуже, чем у его прообраза (например, меньшая пассажировместимость в силу добавления бортмеханика в экипаж, меньшая полезная нагрузка и т.д.). Тем не менее такой переход может обеспечить приемлемый уровень аварийности полетов при сравнительно небольшом увеличении полных эксплуатационных расходов.

Для удовлетворения запросов как авиакомпаний, так и пассажиров ПЭР для сценария «С» могут несколько превышать таковые для сценария «А» (но быть меньше ПЭР для сценария «D») при условии обеспечения того же уровня аварийности полетов.

На рис. 2 представлено сравнение уровней ПЭР и БП для различных подходов к технической эксплуатации при выполнении заданной транспортной работы с заданным качеством.

Цель перехода к эксплуатации по фактическому состоянию с возможностью самостоятельного проведения ТОиР – снизить полные эксплуатационные расходы при заданном ограничении на максимальный уровень аварийности полетов.

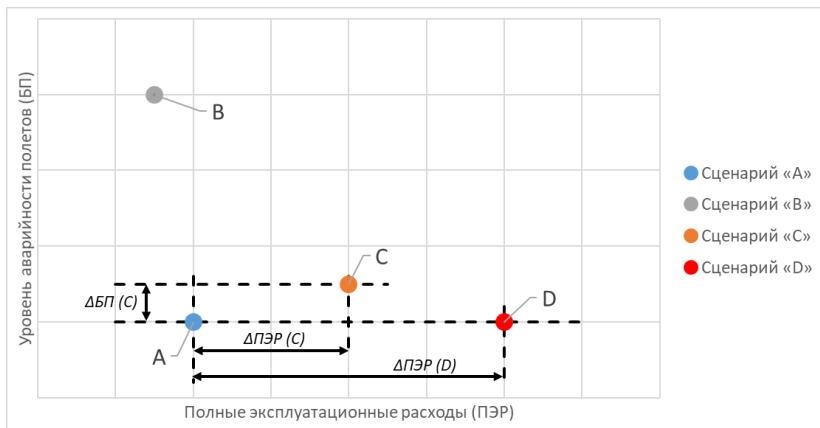


Рис. 2. Зависимость уровней аварийности полетов от ПЭР для различных стратегий и возможностей организации технического обслуживания и ремонта

Повышение уровня аварийности для точки С в сравнении с точкой А составило $\Delta\text{БП} (C)$, повышение полных эксплуатационных расходов – $\Delta\text{ПЭР} (C)$. Увеличение ПЭР для сценария, соответствующего регламентному обслуживанию ВС МВЛ в ОТДМР, в сравнении со сценарием, соответствующим точке А, составило $\Delta\text{ПЭР} (D)$. Переход на эксплуатацию по фактическому состоянию с возможностью самостоятельного проведения ТОиР при обеспечении требуемого уровня аварийности полетов будет совершен только при условии снижения ПЭР, обусловленного этим переходом (при $\Delta\text{ПЭР} (C) < \Delta\text{ПЭР} (D)$), и при обеспечении требуемого уровня аварийности полетов ($\Delta\text{БП} (C) < \max(\Delta\text{БП})$).

В действительности возможность автономного проведения ТОиР и возможность эксплуатации по фактическому состоянию не являются взаимосвязанными напрямую характеристиками, однако в данной работе при упоминании автономной технической эксплуатации будет подразумеваться техническая эксплуатация по фактическому состоянию с возможностью самостоятельного (автономного) проведения определенных форм ТОиР.

В данной работе определяются требования к характеристикам гипотетического ВС МВЛ, предусматривающего возможность самостоятельного выполнения экипажем более сложных форм ТОиР, при которых обеспечивается приемлемая стоимость его эксплуатации в сравнении с самолетом Л-410-УВП. Для решения поставленной задачи проведено моделирование выполнения пассажироперевозок МВЛ однотипным парком из таких ВС совместно с моделированием выполнения ТОиР парка. Задача разделена на следующие этапы, которые подробно описаны далее:

- составление расписания полетов (при его отсутствии);
- описание процесса организации ТОиР ВС;
- моделирование выполнения полетов рассматриваемым парком;
- моделирование выполнения ТОиР ВС рассматриваемого парка;
- расчет технико-экономических характеристик.

2. Составление модельного расписания полетов

Расписание рейсов является одним из видов исходных данных, однако в силу его отсутствия (по причине отсутствия регулярных пассажироперевозок на МВЛ), модельное расписание составлялось самостоятельно. Рассматривается выполнение регулярных рейсов на местных воздушных линиях однотипным парком в одном регионе на примере Иркутской области. Для отсева маршрутов с большой интенсивностью местными воздушными линиями считаются линии, где суммарный годовой пассажиропоток (P_{year}) не превышает 18000 человек. Пассажиропотоки в регионе были получены на основании модели подвижности населения [4].

Считается, что все самолеты совершают регулярные рейсы, расписание имеет недельную периодичность. Параметрами при составлении расписания являются: количество летных дней в неделю (N_{Days}); количество летных часов в день (N_{Hours}); ограничение на недельный налет одного ВС ($Flytime_{lim}$); время руления по дорожкам и прочие наземные операции с включенными

двигателями (Δ_1); время на наземную подготовку к полету, не включаемое в налет (Δ_2); крейсерская скорость ВС (V); пассажироместимость ($Pass_{capacity\ nominal}$); число механиков, которые добавляются в команду каждого ВС для самостоятельного проведения ТОиР сложнее первой формы (N_{mech}); средняя заполняемость кресел ($k_{fullfil}$). Исходными данными для составления расписания являются перечень линий местных авиаперевозок, протяженность этих линий (L) и пассажиропоток на этих линиях.

При составлении расписания были сделаны следующие допущения и предположения:

- изначально все ВС базируются в одном аэропорте – в региональном центре, фактическое количество ВПП этого аэропорта не рассматривается как ограничение для составления расписания (ввиду относительно малой интенсивности перевозок на МВЛ);
- расписание составляется для каждого отдельного ВС, считается, что каждое ВС привязано к конкретной линии и по расписанию совершает полеты только на этой линии.
- все ВС согласно расписанию совершают каждый день только парные рейсы: из регионального центра в отдаленный аэропорт и обратно;
- считается, что количество экипажей достаточно для выполнения полетов согласно расписанию, т.е. нормы налета и отдыха летного состава не являются ограничением при составлении расписания.

2.1. АЛГОРИТМ СОСТАВЛЕНИЯ РАСПИСАНИЯ

Одним из предположений, сделанных перед составлением расписания, является привязка каждого ВС к конкретной линии, на которой он совершает полеты. В силу этого достаточно описать составление расписания для одной линии, на остальных – аналогично.

Рассчитывается недельный пассажиропоток на линии:

$$(1) \quad P_{week} = \left[\frac{P_{year}}{52 * k_{fullfil}} \right].$$

Рассчитывается полная длительность рейса:

$$(2) \quad T_{full} = \frac{L}{V} + \Delta_{t1} + \Delta_{t2}.$$

Рассчитывается налет ВС за время рейса:

$$(3) \quad T_{flight} = \frac{L}{V} + \Delta_{t1}.$$

Рассчитывается фактическая пассажировместимость:

$$(4) \quad Pass_{capacity} = Pass_{capacity\ nominal} - N_{mech}$$

Рассчитывается потребное количество пар рейсов в неделю для перевозки всех пассажиров:

$$(5) \quad N_{flights_week} = \left\lceil \frac{P_{week}}{Pass_{capacity}} \right\rceil.$$

Рассчитывается максимальное количество пар рейсов, которые может совершить одно ВС за день:

$$(6) \quad N_{flights_aircraft} = \min \left(\left\lfloor \frac{N_{Hours}}{2 * T_{full}} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{Flytime_{lim}}{2 * T_{full} * N_{Days}} \right\rfloor \right).$$

Рассчитывается потребное количество ВС на данную линию:

$$(7) \quad N_{aircrafts} = \left\lceil \frac{2 * T_{full} * N_{flights_week}}{Flytime_{lim}} \right\rceil.$$

Все рейсы распределяются равномерно по дням недели между выделенными ВС, на каждое ВС приходится следующее число рейсов:

$$(8) \quad N_{flights_aircraft_per_day} = \left\lfloor \frac{N_{flights_week}}{N_{aircrafts} * N_{Days}} \right\rfloor.$$

Каждому ВС назначается $N_{flights_aircraft_per_day}$ парных рейсов в расписание в каждый день недели. Рейсы начинаются с начала полетного дня и идут без перерывов.

Рассчитывается количество нераспределенных парных рейсов:

$$(9) \quad N_{fl_{not\ distributed}} = N_{flights_week} - N_{fl_{eachaircraft\ per\ day}} * N_{aircrafts} * N_{Days}.$$

Нераспределенные рейсы в количестве $N_{fl_{not\ distributed}}$ назначаются имеющимся ВС по одному следующим образом: первому ВС – начиная с первого дня недели, второму ВС – начиная с последнего дня недели, третьему ВС – начиная с первого дня недели и т.д.

3. Описание процесса организации ТОиР ВС

Рассматриваются два сценария технической эксплуатации: традиционный сценарий – установленный регламент обслуживания по часам налета, обслуживание и ремонт производятся централизованно на заводе-изготовителе; альтернативный сценарий – эксплуатация по фактическому состоянию, ремонт производится силами экипажа самостоятельно в том аэропорте, где они находятся.

Допускается совмещение этих двух стратегий: легкие формы ТОиР – альтернативный сценарий обслуживания, тяжелые формы ТОиР – традиционный сценарий обслуживания.

При традиционном сценарии обслуживания моменты возникновения необходимости ТОиР равномерно распределены по летным часам (например, проводим ТОиР один раз в 3000 л.ч.). При автономном сценарии обслуживания моменты возникновения необходимости ТОиР имеют пуассоновское распределение с заданным математическим ожиданием (например, в среднем раз в 3000 л.ч. возникает необходимость в проведении одной операции ТОиР).

Исходными данными для составления описания жизненного цикла ВС являются: перечень форм ТОиР (количество форм – n); периодичность возникновения форм ТОиР (T_i л.ч. для i -й формы); длительности проведения форм ТОиР (τ_i ч. для i -й формы); $k_{Poisson}$ – количество форм ТОиР, начиная с первой, обслуживаемых по фактическому состоянию.

Составляется последовательность моментов времени возникновения необходимости проведения рассматриваемых форм ТОиР на оси времени, исчисляемого в налете данного ВС. Для первых $k_{Poisson}$ форм ТОиР моменты возникновения необходимости ТОиР имеют распределение Пуассона с математическим ожиданием $\lambda_i = \frac{1}{T_i}$, $i = 1, \dots, k_{Poisson}$. Оставшиеся формы ТОиР равномерно распределены с шагом T_i , $i = k_{Poisson} + 1, \dots, n$.

4. Моделирование выполнения полетов рассматриваемым парком

Исходные данные, необходимые для моделирования выполнения полетов, следующие: расписание полетов; места нахождения всех ВС; описания жизненного цикла всех ВС с учетом операций ТОиР; $k_{Poisson}$; $N_{reserve}$ – количество запасных ВС; T_{flight_lim} – назначенный ресурс одного ВС, исчисляемый в часах налета.

Алгоритм моделирования выполнения полетов рассматриваемым парком таков. Моделирование производится по дням поочередно для всех ВС.

- Если место нахождения ВС не совпадает с аэропортом отправления, то рейс отменяется, если совпадает – продолжаем проверки.
- Проверяем состояние ВС: если за время рейса необходимость ТОиР не возникает, то рейс выполняется, место нахождения ВС изменяется на аэропорт прибытия, налет увеличивается на T_{flight} часов.
- Если момент возникновения ТОиР совпадает с началом рейса, то рейс отменяется, начинается выполнение ТОиР.
- При возникновении необходимости i -й формы ТОиР за время рейса проверяем тип необходимого обслуживания:
 - если $i \leq k_{Poisson}$ – обслуживание по фактическому состоянию, необходимость ТОиР будет обнаружена после посадки, рейс выполняется, сразу после него начинается выполнение ТОиР;

- если $i > k_{Poisson}$ – обслуживание производится по регламенту, о необходимости ТОиР известно до рейса, рейс отменяется, начинается выполнение ТОиР.
- После проверки выполнения всех рейсов за день соответствующими ВС составляется перечень отмененных рейсов. На основании перечня отмененных рейсов составляется расписание для замен отмененных рейсов.
- Расписание для замен составляется путем проверки парности отменённых рейсов (из регионального центра в отдаленный аэропорт и обратно), добавления недостающих парных рейсов при необходимости.
- Моделирование замен производится поочередно для всех ВС, выполнивших свои плановые рейсы к моменту выполнения замены другого рейса. Проверки места нахождения ВС и состояния ВС при выполнении замен аналогичны описанным в пунктах 2) и 3).
- При выполнении полетов подсчитывается налет каждого ВС. При достижении налета, равного T_{flight_lim} , ВС списывается, никакие полеты больше не совершает.

5. Моделирование выполнения ТОиР ВС рассматриваемого парка

Исходные данные, необходимые для моделирования выполнения ТОиР, следующие: расписание полетов; места нахождения всех ВС; описания жизненного цикла всех ВС; $k_{self\ performed}$ – количество форм ТОиР, начиная с первой, которые экипаж может выполнять самостоятельно вне специализированной инфраструктуры.

Алгоритм моделирования выполнения ТОиР:

5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПОСОБА ВЫПОЛНЕНИЯ i -Й ФОРМЫ ТОиР:

- если $i \leq k_{self\ performed}$ – ТОиР производится на фактическом местоположении ВС, перелет на специализированную инфраструктуру не требуется;

– если $i > k_{self\ performed}$ – ТОиР производится централизованно на заводе-изготовителе или аэропорте базирования (в данной постановке задачи не принципиально, где именно, так как изменяется только длительность проведения ТОиР из-за необходимости учета длительности перелета).

В случае, если ВС находится не в региональном центре, ВС принудительно перелетает в региональный центр, длительность проведения ТОиР увеличивается на длительность перелета.

ТОиР выполняется непрерывно в течении всего полетного времени во все рабочие дни недели. Все рейсы обслуживаемого ВС, попавшие в этот промежуток времени, отменяются.

5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗВРАТА ВС К ВЫПОЛНЕНИЮ РЕЙСОВ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ТОиР:

После завершения выполнения ТОиР ВС возвращается к выполнению плановых полетов. Если ВС находится в отдаленном аэропорте и в этот день есть рейс в региональный центр, не выполненный к моменту завершения ТОиР, то ВС остается в отдаленном аэропорте, выполняет этот рейс в региональный центр, далее совершает полеты по плановому расписанию.

Если ВС находится в отдаленном аэропорте и в этот день нет рейса в региональный центр, не выполненного к моменту завершения ТОиР, то ВС летит в региональный центр, далее совершает полеты по плановому расписанию.

Если ВС находится в региональном центре, то перелет в отдаленный аэропорт не совершается, ВС совершает далее полеты по плановому расписанию.

6. Расчет экономических характеристик

Основной экономической характеристикой, рассматриваемой в данной работе, являются полные эксплуатационные расходы рассматриваемого парка за весь жизненный цикл, наряду с ними рассчитываются стоимость летного часа и стоимость пассажиро-километра.

Постоянные расходы состоят из расходов на выплату окладов экипажам, расходов на закупку парка ВС и прочих расходов.

(10) $Cost_{const} = Cost_{other} + Cost_{zp_const} + Cost_{AC\ park}$ – постоянные расходы, руб.;

$Cost_{other}$ – прочие расходы, руб.;

(11) $Cost_{zp_const} = (N_{pilot} * Wage_{rate\ pilot} + N_{mech} * Wage_{rate\ mech}) * N_{months\ fly}$,

$Cost_{zp_const}$ – расходы на заработную плату, руб.;

$N_{pilot} = 2$ – число пилотов в одном экипаже;

$Wage_{rate\ pilot} = 140000$ руб. – месячный оклад пилота;

$Wage_{rate\ mech} = 70000$ руб. – месячный оклад механика;

$N_{months\ fly}$ – суммарное число месяцев выполнения полетов

всеми экипажами в регионе;

(12) $Cost_{AC\ park} = AC_{Cost} * N_{aircrafts\ total}$,

$Cost_{AC\ park}$ – расходы на закупку парка ВС, руб.;

$AC_{Cost} = 420000000$ руб. – стоимость одного ВС;

$N_{aircrafts\ total}$ – суммарное число ВС в парке.

Переменные расходы состоят из двух частей: пропорциональной числу взлетов и посадок и пропорциональной налету ВС. Часть, пропорциональная числу взлетов и посадок, включает в себя аэропортовые сборы за обслуживание и пр.:

(13) $Cost_{per\ flight} = 7000 * N_{flights}$,

$Cost_{per\ flight}$ – переменные расходы, пропорциональные числу взлетов и посадок, руб.;

$N_{flights}$ – суммарное число выполненных взлетов и посадок

ВС рассматриваемой АС за рассматриваемый период;

(14) $Cost_{per\ hour} = (Cost_{fuel} + Cost_{toir} + Cost_{zp_bonus}) * N_{flight\ hours}$,

$Cost_{per\ hour}$ – переменные расходы, пропорциональные суммарному налету всего парка, руб.;

$N_{flight\ hours}$ – суммарный налет парка, ч;

$$(15) Cost_{fuel} = Fuel_{consumion} * Fuel_{price} ,$$

$Cost_{fuel}$ – расходы на ГСМ, $\frac{руб.}{ч}$;

$Fuel_{consumion} = 0,3 \frac{T}{ч}$ – расход топлива;

$Fuel_{price} = 60000 \frac{руб.}{T}$ – цена топлива;

$Cost_{toir} = 0,00001 * AC_{Cost}$;

$Cost_{toir}$ – стоимость ТОиР, $\frac{руб.}{ч}$;

$$(16) Cost_{zbonus} = N_{pilot} * Bonus_{rate\ pilot} + N_{meh} * Bonus_{ratemeh} ,$$

$Cost_{zbonus}$ – премиальная часть заработной платы, $\frac{руб.}{ч}$;

$Bonus_{rate\ pilot} = 1400 \frac{руб.}{ч}$ – ставка премии пилота;

$Bonus_{ratemeh} = 700 \frac{руб.}{ч}$ – ставка премии механика;

$$(17) TOC = Cost_{per\ hour} + Cost_{per\ flight} + Cost_{const} ,$$

TOC – полные эксплуатационные расходы, руб.;

$$(18) Fly\ hour_{cost} = \frac{TOC}{N_{flight\ hours}} ,$$

$Fly\ hour_{cost}$ – стоимость летного часа, $\frac{руб.}{ч}$;

$$(19) Passenger\ km_{cost} = \frac{TOC}{\sum_i Pass_i * Fl_{disti}} ,$$

$Passenger\ km_{cost}$ – стоимость пассажиро-километра, $\frac{\text{руб.}}{\text{ч}}$;

$\sum_i Pass_i * Fl_{disti}$ – совершенная транспортная работа;

$Pass_i$ – число пассажиров, перевезенных i -м рейсом;

Fl_{disti} – дальность i -го рейса, км;

i – индекс выполненного рейса;

В результате моделирования выполнения пассажироперевозок МВЛ однотипным парком определяются:

- расписание проведенных рейсов за рассматриваемый отрезок времени;

- перечень отмененных рейсов, которые не удалось совершить имеющимся парком ВС;

- налет каждого ВС и совершенная транспортная работа за рассматриваемый период времени;

- перечень выполненных форм ТОиР за рассматриваемый отрезок времени;

- готовность парка за рассматриваемый отрезок времени;

- полные эксплуатационные расходы, их структура;

- стоимость летного часа, стоимость пассажиро-километра;

При расчетах ПЭР, включая расходы на оплату труда, ГСМ и пр., считалось, что все цены и ставки гипотетического ВС, допускающего автономное обслуживание, и Л-410 совпадают, если отдельно не отмечено обратное.

7. Результаты расчетов

При моделировании во всех рассмотренных случаях рассматривались пять форм ТОиР, их длительности представлены в таблице 1. Периодичности выполнения этих пяти форм представлены в таблице 2 [2].

Таблица 1. Длительность выполнения рассматриваемых форм ТОиР

τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5
48 ч	72 ч	96 ч	120 ч	240 ч

Таблица 2. Периодичность выполнения рассматриваемых форм ТОиР

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
Первый набор	150 ч	500 ч	1000 ч	2000 ч	3000 ч
Второй набор	150 ч	500 ч	900 ч	1800 ч	2700 ч
Третий набор	150 ч	500 ч	800 ч	1600 ч	2400 ч

Различным ВС назначались различные периодичности форм ТОиР для предупреждения одновременного выхода на ТОиР тяжелой формы нескольких ВС, эксплуатируемых со схожими интенсивностями. 1-му и 4-му ВС назначается первый набор периодичностей, 2-му и 5-му – второй набор и т.д.

При $k_{Poisson} \neq 0$ в качестве результатов представлено осреднение результатов 10 различных реализаций.

Во всех рассмотренных случаях $N_{Days} = 5$, $N_{Hours} = 10$, $T_{flight_lim} = 20\,000$ л.ч., $V = 310$ км/ч, $\Delta_{t1} = 0,5$ ч, $\Delta_{t2} = 1$ ч, $Pass_{capacity_nominal} = 19$. Рассматривается отрезок времени длительностью 22 года.

В дальнейшем сценарии, где $k_{Poisson} = 0$, $k_{self-performed} = 1$, $N_{mech} = 0$, называются традиционным обслуживанием; сценарии, где $k_{Poisson} = 3$, $k_{self-performed} = 3$, $N_{mech} = 1$, называются альтернативным обслуживанием. Сначала были рассмотрены различные значения коэффициента заполняемости салона $k_{fullfil}$ и количества запасных ВС $N_{reserve}$ для определения требуемых численностей парка, обеспечивающих требуемый уровень готовности парка.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента готовности парка от численности парка для различных значений коэффициента заполняемости салона и различных сценариев обслуживания.

Во всех рассмотренных сценариях увеличение численности парка за счет увеличения числа запасных ВС приводит к увеличению коэффициента готовности парка. При сравнении результатов для одинакового коэффициента заполняемости и различных сценариев обслуживания стоит отметить, что сценарии, соответствующие альтернативному обслуживанию, во всех рассмотренных случаях демонстрируют более высокий коэффици-

ент готовности парка, чем сценарии, соответствующие традиционному обслуживанию.

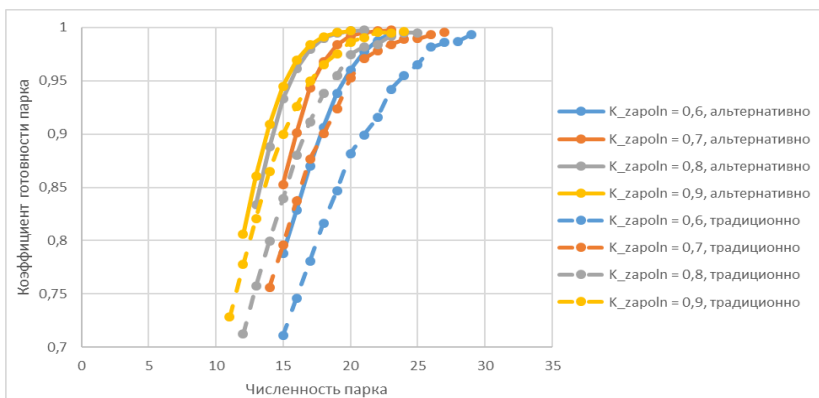


Рис. 3. Зависимость коэффициента готовности парка от парка

Иными словами, при выборе в пользу альтернативного обслуживания первых форм ТОиР при выполнении одной и той же транспортной работы для обеспечения требуемого коэффициента готовности парка потребуется меньшее число ВС, чем при традиционном обслуживании при прочих равных (например, коэффициент готовности парка 0,98 при коэффициенте заполняемости 0,7 достигается при численностях парка 19 ВС и 23 ВС для альтернативного и традиционного обслуживания соответственно).

На рис. 4 представлена зависимость полных эксплуатационных расходов от коэффициента готовности парка для различных коэффициентов заполняемости салона и различных сценариев обслуживания ВС. Во всех рассмотренных сценариях повышение коэффициента заполняемости салона при заданном коэффициенте готовности парка приводит к снижению полных эксплуатационных расходов.

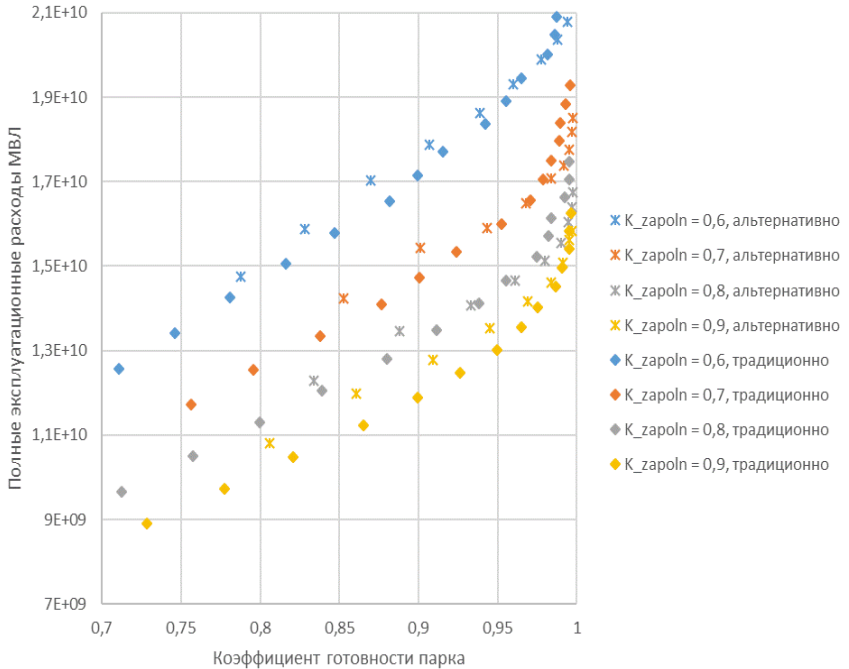


Рис. 4. Зависимость ПЭР от коэффициента готовности парка

Также при всех рассмотренных коэффициентах заполняемости салона применение традиционной схемы обслуживания оказывается дешевле перехода на альтернативное обслуживание при невысоких требуемых коэффициентах готовности парка. Полные эксплуатационные расходы для обеих схем обслуживания сравниваются при коэффициенте заполняемости салона 0,6 при обеспечении коэффициента готовности парка 0,98; при коэффициенте заполняемости салона 0,7 при обеспечении коэффициента готовности парка 0,97; при коэффициенте заполняемости салона 0,8 при обеспечении коэффициента готовности парка 0,95; при коэффициенте заполняемости салона 0,9 при обеспечении коэффициента готовности парка 0,99. При необходимости обеспечения более высоких коэффициентов готовности

парка переход на альтернативное обслуживание оказывается дешевле.

На рис. 5 представлена зависимость стоимости летного часа от коэффициента готовности парка для различных коэффициентов заполняемости салона и различных схем обслуживания ВС.

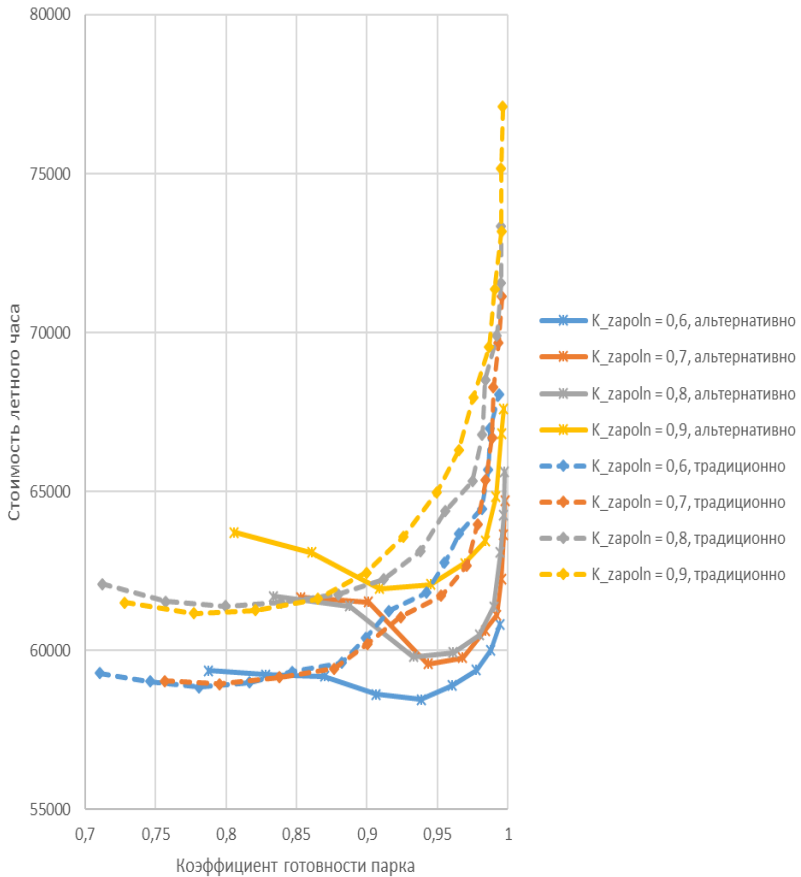


Рис. 5. Зависимость стоимости летного часа от коэффициента готовности парка

При необходимости обеспечения коэффициента готовности парка не менее 0,93 для всех коэффициентов заполняемости салона альтернативный сценарий выполнения ТОиР оказывается дешевле традиционного сценария выполнения ТОиР.

На рис. 6 представлена зависимость стоимости пассажиро-километра от коэффициента готовности парка для различных коэффициентов заполняемости салона и различных схем обслуживания ВС. Во всех рассмотренных сценариях повышение коэффициента заполняемости салона приводит к снижению стоимости пассажиро-километра. При сравнении различных схем проведения ТОиР при зафиксированном коэффициенте заполняемости салона переход к альтернативной схеме обслуживания оказывается дешевле при требовании высокого коэффициента готовности парка – от 0,95 до 0,98.

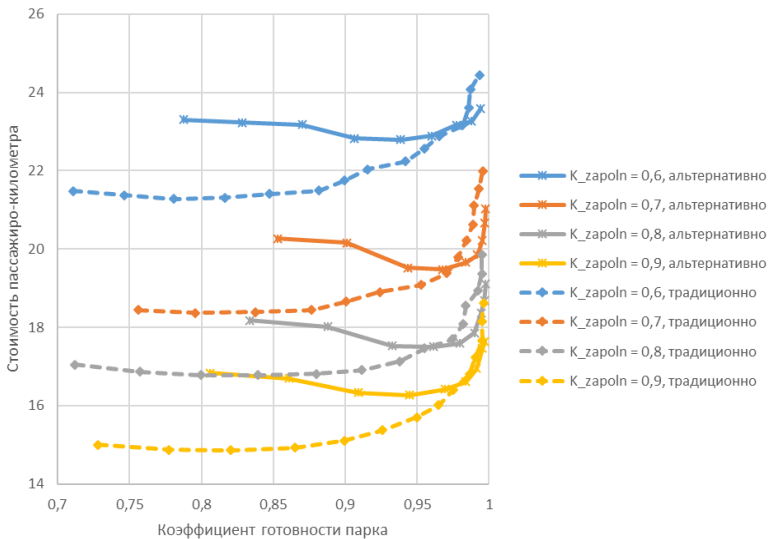


Рис. 6. Зависимость стоимости пассажиро-километра от коэффициента готовности парка

Во всех рассмотренных сценариях при применении альтернативной схемы обслуживания готовность обеспечивается меньшим числом ВС, чем при традиционной схеме обслуживания. Средний налет при альтернативной схеме обслуживания выше, также при альтернативной схеме обслуживания часть ВС полностью вырабатывает свой ресурс при выполнении пассажироперевозок. При $k_{fullfil} = 0,6$ снижение полных эксплуатационных расходов составило 0,6 млрд руб., при $k_{fullfil} = 0,7$ – 1,5 млрд руб., при $k_{fullfil} = 0,8$ – 1,1 млрд руб., при $k_{fullfil} = 0,9$ – 0,2 млрд руб. Полученные снижения полных эксплуатационных расходов могут быть использованы для определения допустимого увеличения стоимости гипотетического ВС, ставки заработной платы персонала, расхода топлива.

Для определения допустимого увеличения стоимости гипотетического ВС, ставки заработной платы персонала, расхода топлива проводится сравнение суммарных затрат на обеспечение перевозок на МВЛ в регионе при обеспечении одинаковых уровней готовности.

В таблицах 3–6 приведено сравнение сценариев, соответствующих обеспечению одинаковых коэффициентов готовности парка при одинаковом коэффициенте заполняемости и при различных схемах проведения ТОиР. Сценарии с $k_{Poisson} = 0$, $k_{self-performed} = 1$ соответствуют традиционной схеме обслуживания, сценарии с $k_{Poisson} = 3$, $k_{self-performed} = 3$ соответствуют альтернативной схеме обслуживания.

В указанных таблицах 3–6 сравниваются сценарии, при которых переход к альтернативному обслуживанию приводит к снижению полных эксплуатационных расходов. Выбранные сценарии описываются следующим набором параметров: $[k_{Poisson}, k_{self-performed}, k_{fullfil}, N_{reserve}, N_{mech}]$.

Таблица 3. Результаты расчета сценариев

Набор параметров сценария	Сценарий 1: [0; 1; 0,6; 14;0]	Сценарий 2: [3; 3; 0,6; 8; 1]
Стоимость летного часа, руб.	68050	60800
Стоимость пассажиро-километра, руб.	24,45	23,60
Полные эксплуатационные расходы, млрд. руб.	21,4	20,8
Стоимость ВС, млрд. руб.	12,2	9,7
Затраты на з/п, млрд. руб.	0,9	1,5
Затраты на ГСМ, млрд. руб.	5,7	6,2
Готовность парка	0,993	0,994
ВС, выработавшие ресурс	0	6,2
Средний налет, ч	10840	14870
Суммарное число ВС	29	23

Таблица 4. Результаты расчета сценариев

Набор параметров сценария	Сценарий 3: [0; 1; 0,7; 12;0]	Сценарий 4: [3; 3; 0,7; 5; 1]
Стоимость летного часа, руб.	69680	61120
Стоимость пассажиро-километра, руб.	21,55	19,85
Полные эксплуатационные расходы, млрд. руб.	18,8	17,4
Стоимость ВС, млрд. руб.	10,9	8,4
Затраты на з/п, млрд. руб.	0,8	1,2
Затраты на ГСМ, млрд. руб.	4,9	5,1
Готовность парка	0,993	0,992
ВС, выработавшие ресурс	0	2,8
Средний налет, ч	10400	14210
Суммарное число ВС	26	20

Таблица 5. Результаты расчета сценариев

Набор параметров сценария	Сценарий 5: [0; 1; 0,8; 11;0]	Сценарий 6: [3; 3; 0,8; 5; 1]
Стоимость летного часа, руб.	69900	61380
Стоимость пассажиро-километра, руб.	18,93	17,86

Таблица 5 (продолжение)

Полные эксплуатационные расходы, млрд. руб.	16,6	15,5
Стоимость ВС, млрд. руб.	9,7	7,6
Затраты на з/п, млрд. руб.	0,7	1,0
Затраты на ГСМ, млрд. руб.	4,3	4,6
Готовность парка	0,992	0,990
ВС, выработавшие ресурс	0	2,6
Средний налет, ч	10340	14070
Суммарное число ВС	23	18

Таблица 6. Результаты расчета сценариев

Набор параметров сценария	Сценарий 7 [0; 1; 0,9; 12;0]	Сценарий 8: [3; 3; 0,9; 7; 1]
Стоимость летного часа, руб.	75170	66810
Стоимость пассажиро-километра, руб.	18,15	17,47
Полные эксплуатационные расходы, млрд. руб.	15,8	15,6
Стоимость ВС, млрд. руб.	9,7	8,0
Затраты на з/п, млрд. руб.	0,6	1,1
Затраты на ГСМ, млрд. руб.	3,8	4,2
Готовность парка	0,995	0,995
ВС, выработавшие ресурс	0	4,6
Средний налет, ч	9160	12300
Суммарное число ВС	23	19

На рис. 7, 8, 9 приведены зависимости полных эксплуатационных расходов от относительного прироста стоимости ВС, затрат на заработную плату экипажа и расхода топлива соответственно. При $k_{fullfil} = 0,7$ снижение полных эксплуатационных расходов было наибольшим, для этого сценария допускается увеличение стоимости ВС на 17%, или увеличение затрат на заработную плату экипажа на 120%, или увеличение расхода топлива на 28%.

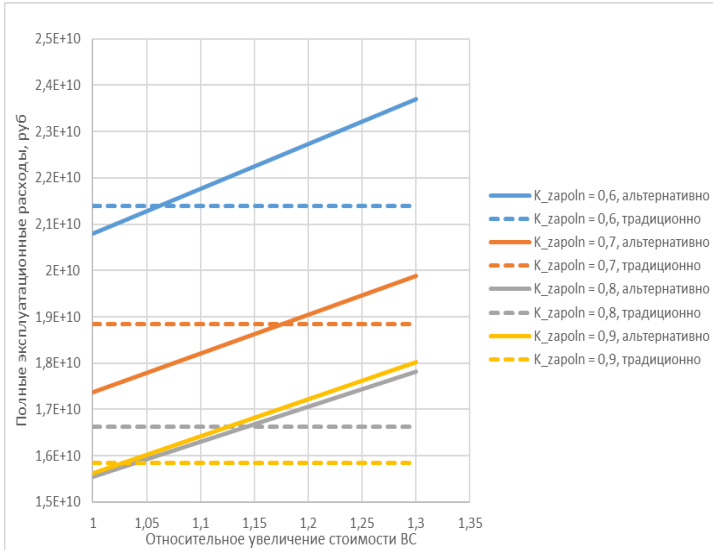


Рис. 7. Зависимость полных эксплуатационных расходов от относительного прироста стоимости ВС

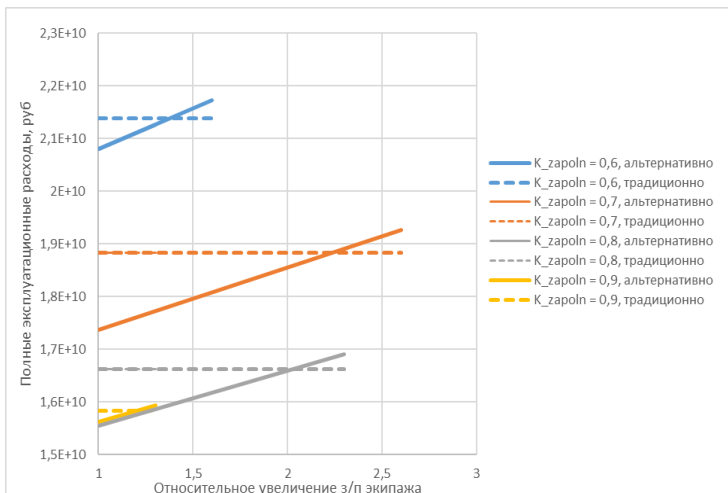


Рис. 8. Зависимость полных эксплуатационных расходов от относительного прироста затрат на заработную плату экипажу

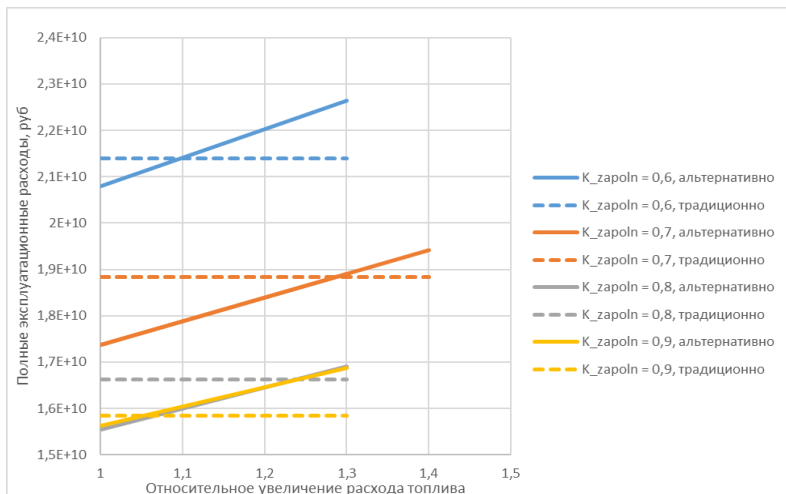


Рис. 9. Зависимость полных эксплуатационных расходов от относительного прироста расхода топлива

8. Выводы

Отметим, что в данной работе принимается допущение о постоянстве интенсивности потока отказов на протяжении всего срока эксплуатации, несмотря на то, что в реальности имеет место старение изделий и увеличение интенсивности потока отказов с ростом наработки. В центре внимания находится именно повышение автономности ТОИР авиационной техники и возможные в связи с этим эффекты для эксплуатации в отдаленных регионах.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Возможность самостоятельного обслуживания ($k_{self-performed} \neq 0$) при выполнении легких форм ТОиР по фактическому состоянию ($k_{Poisson} \neq 0$) приводит к повышению готовности парка по сравнению с регламентным обслуживанием ($k_{Poisson} = 0$) на специализированной инфраструктуре ($k_{self-performed} = 1$). При этом возрастает интенсивность эксплуата-

ции парка, как следствие возрастает число ВС выработавших назначенный ресурс за период моделирования.

2. При высоких требуемых значениях коэффициента готовности парка (0,99 и выше) переход к альтернативному обслуживанию приводит к снижению полных эксплуатационных расходов в сравнении с регламентным обслуживанием парка.

3. Наибольшее снижение полных эксплуатационных расходов было достигнуто при коэффициенте заполняемости салона, равным 0,7, при обеспечении коэффициента готовности парка, равного 0,99. Для этого сценария при переходе к альтернативному ТОиР ВС по состоянию допускается увеличение стоимости ВС на 17%, или увеличение затрат на заработную плату экипажа на 120%, или увеличение расхода топлива на 28%.

В дальнейшем в работах целесообразно учесть нарастание интенсивности потока отказов по мере увеличения наработки авиационной техники.

Литература

1. ГОРШКОВА И.В., КЛОЧКОВ В.В. *Экономический анализ перспектив развития воздушного транспорта в малонаселенных регионах России // Проблемы прогнозирования.* – 2011. – №6. – С. 36–52.
2. ДАЛЕЦКИЙ С.В., ДЕРКАЧ О.Я., ПЕТРОВ А.Н. *Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации.* – М.: «Воздушный транспорт», 2002.
3. ДАЛЕЦКИЙ Е.С. *Оценка эффективности эксплуатации изделий авиатехники при эксплуатации до безопасного отказа // Научный вестник ГосНИИ ГА.* – 2008. – №130. – С. 180–187.
4. ЕГОШИН С.Ф. *Влияние особенностей моделирования пассажирских потоков на выбор оптимального воздушного судна местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА.* – 2021. – №35. – С. 68–79.
5. КЛОЧКОВ В.В., РОЖДЕСТВЕНСКАЯ С.М., ФРИДЛЯНД А.А. *Обоснование приоритетных направлений развития авиацион-*

- ной техники для местных воздушных линий* // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018. – № 20(331). – С. 93–102.
6. *ФОМИНА И.В., ШЕВЕЛЁВА А.А. Повышение авиационной доступности территорий европейского и приуральского севера России* // Материалы международной-научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы – 2018», Санкт-Петербург, 13-14 ноября 2018 г. – С. 81–83.
 7. *Межгосударственный авиационный комитет. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2016 г.* [Электронный ресурс]. – 2017. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/552/bp-16-2.pdf> (дата обращения: 05.12.2022).
 8. *Межгосударственный авиационный комитет. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2017 г.* [Электронный ресурс]. – 2018. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/4b6/bp-17-2.pdf> (дата обращения: 05.12.2022).
 9. *Межгосударственный авиационный комитет. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2018 г.* [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/03e/bp-18-2.pdf> (дата обращения: 05.12.2022).
 10. *Межгосударственный авиационный комитет. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2020 г.* [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/1c1/bp-20-2.pdf> (дата обращения: 05.12.2022).
 11. *Межгосударственный авиационный комитет. Состояние безопасности полетов в гражданской авиации государств-участников соглашения о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства в 2021 г.* [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://mak-iac.org/upload/iblock/448/>

cvhy5ylxegg5sghcxr6icz0ircnj2ge/bp-21.pdf (дата обращения: 05.12.2022).

METHODS FOR MODELLING AND OPTIMIZATION OF THE LEVEL OF AUTONOMY OF MAINTENANCE, OVERHAUL AND REPAIR OF THE CIVIL AIRCRAFT FLEET

Andrey Kasatkin, National Research Center “Zhukovskiy Institute”, Zhukovskiy (kasatkinaa@nrczh.ru).

Abstract: The organization of maintenance, repair and overhaul of the aircraft fleet is fundamentally different for different classes of aircraft. Frequently, maintenance and repairs are considered only as part of the total operating costs, but for aircraft with short range and speed, transferring the aircraft to specialized repair facilities or manufacturing facilities can cause significant time costs. The article deals with the problem of organizing maintenance and repair of the aircraft fleet of local airlines in remote and sparsely populated regions. Various approaches to the technical maintenance of the aircraft fleet are considered: operation according to the regulations and according to the actual state, maintenance and repair in accordance with the maintenance manual and the transition to a more autonomous maintenance and repair. The obsolescence of highly loaded equipment, which causes an increase in the arrival rate of equipment failures with an increase in operating time, is not considered in this paper. Simulation of the performance of passenger transportation in the region is carried out, taking into account the maintenance and repair of the aircraft fleet. The economic characteristics of passenger transportation are calculated.

Keywords: aircraft maintenance, repair and overhaul; local air lines; air transport system.

УДК 021.8 + 025.1

ББК 78.34

DOI: 10.25728/ubs.2023.104.1

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.

Поступила в редакцию 09.03.2023.

Опубликована 31.07.2023.