УДК 338.27:338.33:338.332:656.7.043

JEL C65, L22, L52, O32

DOI: 10.17213/2312-6469-2020-3-118-133

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ПОДДЕРЖАНИЯ ГОТОВНОСТИ ПАРКА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО ЧИСЛЕННОСТИ И СТРУКТУРЫ

© А.Е. Карпов 2020

Институт им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия

Техническое обслуживание и ремонт авиационной техники и комплектующих изделий помимо стоимостных затрат сопровождается временными потерями, сокращающими общий налет парка воздушных судов. Задача поддержания приемлемого уровня готовности парка самолетов для обеспечения определенного качества услуг со стороны авиакомпании может быть решена путем приобретения запасных воздушных судов, что приводит к дополнительным финансовым издержкам. В работе предложен инструментарий, позволяющий выполнить оценку затрат на техническое обслуживание и ремонт парка самолетов, а также определить относительное увеличение численности парка воздушных судов и уровень сопутствующих расходов, необходимых для поддержания его готовности. В настоящее время актуальна задача оценки перспектив новой продукции российского авиастроения на рынках, которые уже заняты изделиями ведущих зарубежных производителей. Повсеместное предпочтение авиакомпаниями унифицированных парков воздушных судов определяет важность умения оценивать разницу в стоимости содержания однородных и смешанных парков самолетов при формировании инновационной политики производителей авиационной техники. В работе предложен метод, позволяющий выполнить сравнение стоимости поддержания требуемого уровня готовности однородного и смешанного парков самолетов.

Ключевые слова: воздушные суда, техническое обслуживание и ремонт, система массового обслуживания, двигатели, себестоимость, интенсивность эксплуатации, численность парка.

ESTIMATION OF THE COSTS FOR SUSTAINING THE AIRCRAFT FLEET READINESS DEPENDING ON ITS SIZE AND STRUCTURE

© A.E. Karpov 2020

*National research center "Institute named after N.E. Zhukovsky",
Zhukovsky, Russia*

Maintenance and repair of aircraft and components in addition to financial costs is accompanied by time loss that reduce the total flight time of the aircraft fleet. The task of

keeping an acceptable readiness level of the aircraft fleet in order to ensure a certain airline services quality can be solved by purchasing backup aircraft, which leads to additional financial costs. The paper presents a tool that allows to estimate maintenance and repair costs of the aircraft fleet, as well as determine the relative increase in the number of aircraft and the level of accompanying costs required to maintain its readiness. Currently, the task of evaluating the prospects for new products of the Russian aircraft industry in markets that are already occupied by products from leading foreign manufacturers is actual. The widespread preference of airlines for unified aircraft fleet determines the importance of the ability to estimate the difference in the cost of operating homogeneous and mixed aircraft fleet in the process of forming an innovative policy of aircraft manufacturers. In this paper, we propose a method which enable to compare the cost of keeping the required readiness level of a homogeneous and mixed aircraft fleet.

Keywords: aircraft, maintenance and repair, queueing system, engines, cost value, operating intensity, fleet size.

Введение

В качестве критерия эффективности в задачах формирования оптимальной структуры парка воздушных судов (ВС) принимают себестоимость эксплуатации ВС, одной из составных частей которой являются затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР). Они являются неотъемлемой частью полных эксплуатационных расходов (ПЭР). Но ТОиР, помимо стоимостных затрат, сопровождаются и временными потерями. Необходимость в таких работах возникает как в заранее регламентированные сроки обслуживания, так и в случае незапланированного выхода из строя составных частей ВС. В эти моменты самолет недоступен для полетов, поэтому, помимо составления плановых графиков полетов парка летательных аппаратов, авиакомпания должна быть всегда готова к внезапному выходу из строя ВС, готовящегося к перевозке пассажиров в ближайшее время, и оперативно предоставить для клиентов возможность перелета на другом самолете. Неготовность авиакомпании к таким событиям влечет за собой финансовые потери как за счет отмены ближайшего и последующих рейсов для этого самолета (что влечет за собой неустойки и упущенную выгоду), так и ввиду уменьшения спроса на услуги данной авиакомпании. Пассажиры предпочтут других перевозчиков, не допускающих подобных ситуаций.

В работе [1] составляющая ПЭР, связанная с техобслуживанием и ремонтом ВС, принимается как произведение трудоемкости на стоимость нормо-часа. Однако важно учесть простой самолетов вследствие выполнения таких работ, стоимость мер по обеспечению готовности парка ВС к выполнению полетов. При этом, как будет показано далее, значительное влияние будет оказывать масштаб парка самолетов.

В данной работе предложен метод, позволяющий для определенного типа ВС оценить затраты на техническое обслуживание и ремонт в зависимости от численности парка авиакомпании. Предложенная экономико-

математическая модель построена на основе теории массового обслуживания. Данный математический аппарат используется в предположении, что потребность в ремонте воздушного судна может возникнуть в любой момент времени с некоторой ожидаемой частотой (интенсивностью). Операции ТОиР разделяются на несколько групп, отличающихся сложностью и длительностью выполнения работ.

Одним из типов ТОиР является ремонт двигателя. В модели рассматривается возможность оперативной его замены. Тогда выбытие двигателей и систему их ремонта можно моделировать как независимую (от парка самолетов) систему массового обслуживания, поскольку в таком случае ВС практически сразу готово для эксплуатации. В исследованиях [2, 3] моделировались организационно-экономические аспекты технического обслуживания и ремонта авиадвигателей, причем рассматривались системы массового обслуживания (СМО) с ограниченной очередью, проводилась оценка целесообразности создания собственного ремонтного завода и оптимизация его пропускной способности с учетом возможности выполнения ремонтных работ централизованно, но с более высокими стоимостными и временными издержками. Но с другой стороны, в этих работах не рассматривался ремонт самих ВС и учет различных типов обслуживания с разной периодичностью и стоимостью, что и является предметом данного исследования.

Временные затраты при проведении ремонтных работ снижают общий налет парка, поэтому для обеспечения приемлемой для авиакомпании регулярности рейсов возможно приобретение запасных самолетов и комплектующих, которое сопровождается дополнительными издержками. Более детальное изучение влияния размера парка на данную статью операционных расходов, хотя бы на основе простейших математических моделей, позволит более корректно и экономически обоснованно учитывать при оценке ПЭР характерные для каждого типа самолета значения стоимости ТОиР и дополнительных расходов на поддержание готовности парка, с учетом его масштабов.

Последнее особенно актуально потому, что положительный эффект масштаба является для авиакомпаний одним из главных соображений в пользу однородного парка относительно смешанной альтернативы. Это, в свою очередь, определяет стратегии самих авиакомпаний и влияет на рынки авиационной техники. Новым производителям сложнее прорваться на рынки, занятые конкурентами, отчасти именно в силу эффекта предпочтения унифицированного парка. Умение определять разницу в стоимости содержания однородного и смешанного парков важно для формирования инновационной политики авиапроизводителей – а также производителей другой сложной продукции машиностроения. Предлагаемая модель поможет оценить, насколько значим описанный эффект в случае необходимости поддержания требуемого уровня готовности парка ВС.

Метод оценки стоимости технического обслуживания и ремонта и дополнительных затрат на поддержание готовности парка в зависимости от его численности

В данном исследовании не моделируется само выполнение операций по перевозке пассажиров (т.е. коммерческая эксплуатация парка), как, например, в работе [4], в которой рассматривался поток заявок на выполнение рейсов с постоянной интенсивностью. Здесь же предполагается построение СМО [5], воспроизводящих выполнение операций по ремонту ВС и его комплектующих. Интенсивность эксплуатации ВС (л.ч. в год) здесь является уже входным параметром и определяет интенсивность потоков заявок на техобслуживание и ремонт самолетов и их компонентов.

Пусть парк состоит из однотипных ВС, его штатная численность равна N_0 . Плановая интенсивность эксплуатации одного самолета θ_0 позволяет обеспечить общий часовой налет парка, который планирует выполнить авиакомпания за год. Предположим, что в любой момент времени с определенной частотой может возникнуть необходимость проведения работ по техническому обслуживанию и ремонту ВС, что влечет за собой временные потери, сокращающие реальный налет самолетов. Будем считать, что ремонт ВС выполняется исключительно на заводе, мощности которого значительно превосходят потребности отдельного парка авиационной техники, и очереди на ремонт не образуется. Самолеты, которые находятся в ремонте, недоступны для полетов, поэтому для увеличения охвата планируемого налета авиакомпания может приобрести запасные ВС в количестве N_3 . Когда все штатные ВС исправны, предполагается, что запасные ВС простаивают.

Показателем состояния СМО примем количество самолетов, находящихся в определенный момент в ремонте $N_{рем}$, в нашей модели оно является случайной величиной и может принимать значения от 0 до $N_0 + N_3$. Обслуживание самолета разделяется на несколько групп, однако не существует общепринятого стандарта, для разных типов самолетов выполняются планы ТОиР с отличающейся периодичностью и составом ремонтных работ (форм обслуживания). Помимо этого, для них сильно разнятся цены выполняемых работ. В данном исследовании исходные данные по типам и стоимостям ТОиР самолета (табл. 1) принимаются на основе работы [6], в которой описан порядок осуществления технического обслуживания европейского магистрального самолета Airbus A320 и стоимости работ.

Если потоки событий «поступление самолета в ремонт» и «возвращение самолета в эксплуатацию» являются простейшими (интервалы между событиями распределены согласно показательному распределению), тогда интенсивность поступления ВС в ремонт для разных типов технического обслуживания будет равна:

Таблица 1

Стоимость технического обслуживания и ремонта планера
и комплектующих самолета А320

Вид ТОиР	Интервал t_i л.ч.	Время ремонта τ_i сут.	Стоимость работ тыс. долл.	Стоимость материалов тыс. долл.	Полная стоимость тыс. долл.
A-check	425	0,417	11	3,3	14,3
C-check (1,2,3,5,6)	3875	10	11,9	34	153
C-check (8)	31000	45	21	50	260
5-летняя проверка	15500	30	57	340	910
9-летняя проверка	27125	45	90,3	600	1503

$$\lambda_i = N_{исп} \cdot \frac{\theta_0}{t_i} = \min \{ N_0; N_0 - N_{рем} + N_3 \} \cdot \frac{\theta_0}{t_i},$$

где t_i – периодичность ремонтных работ (л.ч.), индекс обозначает форму ТОиР.

Данная система является СМО с неограниченной очередью, поэтому общую интенсивность поступления самолетов на обслуживание будем определять в виде суммы интенсивностей для отдельных видов ТОиР:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i.$$

Интенсивность обслуживания здесь предлагается упрощенно оценить как обратную величину от средневзвешенного времени выполнения форм ТОиР, средневзвешенного – по долям для разных типов ремонта в общем потоке ВС. Для проверки предложенного аналитического решения можно будет сравнить его результаты с результатами, которые в дальнейшем будут получены с помощью имитационного моделирования СМО. В формуле ниже τ_i – средняя продолжительность выполнения i -го вида технического обслуживания (суток):

$$\mu(N_{рем}) = \frac{365}{\tau(N_{рем})} = \frac{365 \cdot \sum_i \lambda_i}{\sum_i (\tau_i \cdot \lambda_i)} \cdot N_{рем}.$$

Тогда среднее число используемых ВС будет равно:

$$\bar{N} = \mathbb{E}N_{исп} = \sum_{k=0}^{N_0+N_3} p_k \cdot N_{исп}^k,$$

p_k – вероятность события, при котором для полетов доступно k ВС.

Будем считать, что авиакомпания для обеспечения качества работы должна охватывать заданную интенсивность полетов с требуемым коэффициентом готовности

$$K_{\text{дост}} = \frac{\bar{N}}{N_0}.$$

Принимая для него пороговое значение $K_{\text{дост}}^{\text{мин}}$, можно оценить количество запасных самолетов, которое потребуется авиакомпании. Требуемый уровень готовности парка берется экзогенно, рекомендуемые значения коэффициента эффективности эксплуатации для парков магистральных самолетов устанавливаются на уровне 0,97- 0,99 [7]. Таким образом, определив новую численность парка $N = N_0 + N_3$, оценим реальную интенсивность эксплуатации парка:

$$\theta_1 = \frac{\theta_0 \cdot N_0}{N} K_{\text{дост}}(N).$$

В принципе, данная задача иначе может быть сформулирована как задача безусловной оптимизации, в которой учитываются стоимость содержания запасных ВС и финансовые потери из-за простоев самолетов. Каждый следующий запасной самолет приносит все меньший вклад в повышение готовности парка (и сокращение потерь из-за простоев). И с какого-то момента станет экономически нецелесообразным приобретение дополнительных ВС. В такой постановке основной сложностью является четкая оценка денежных потерь из-за простоя самолета, поэтому в работе решено ограничиться минимальным коэффициентом готовности.

Сначала оценим эффект, возникающий при учете временных затрат на ТОиР, если не приобретать запасные ВС. Примем стоимость нормо-часа ТОиР равной 50 долл./чел.-ч. Проведем расчеты для двух парков с численностью 10 и 20 самолетов при плановой интенсивности эксплуатации одного ВС в диапазоне от 1500 до 4000 летных часов в год. С помощью полученных оценок коэффициента готовности ВС можно определить количество летных часов, которое не удалось отлетать (общие временные потери авиакомпании по сравнению с плановым налетом парка), см. рис. 1.

В целом в рамках описанной модели получено, что при современном уровне интенсивности эксплуатации ВС (3000-4000 л.ч. в год) временные потери авиакомпаний могут составлять от 6,5 до 8,5% от общего планируемого налета (вне зависимости от численности парка). На графике красными линиями показаны временные потери, соответствующие простоям 1 (пунктирная) и 2 (сплошная) самолетов. Видно, что для парка из 25 ВС при средней интенсивности эксплуатации, равной 3700 л.ч., общие потери составляют около 7400 л.ч., что эквивалентно простоям целых двух самолетов.

Рис. 1. Простой парка в зависимости от интенсивности эксплуатации самолетов

Потери, соответствующие простою одного самолета в парках с 15 и 25 ВС, достигаются при средней интенсивности эксплуатации около 3000 и 1700 л.ч. соответственно.

В дальнейших расчетах принята средняя интенсивность эксплуатации самолетов, равная 3500 л.ч. Коэффициент готовности ВС в таком случае (при расчетах по данным из табл. 1) составит 92,4% вне зависимости от численности парка (что характерно для централизованного ремонта, выполняемого на заводе достаточно большой мощности). Авиакомпанию не могут устраивать такие существенные потери, поэтому проводится оценка целесообразности покупки дополнительного ВС. Если в дополнение к парку из 10 ВС приобрести один запасной самолет, то, согласно оценкам по описанной модели, готовность парка увеличится до 97,5%, к общему налету парка добавится около 1800 л.ч., но средний налет на одно ВС снизится примерно до 3100 л.ч. Покупка второго запасного самолета позволит достичь охвата планового налета 99,4%, общий налет парка увеличится еще на 650 л.ч., но средний налет на 1 ВС составит около 2900 л.ч. Далее вклад каждого следующего запасного ВС в общий налет парка и повышение его готовности быстро снижается.

Ниже приведен график потребного количества запасных ВС (в долях относительно штатной численности парка) в зависимости от размеров парка ВС, при котором достигаются коэффициенты готовности 0,97 и 0,99.

Помимо постоянного снижения удельной потребности в запасных ВС с ростом численности парка, ввиду дискретности этого параметра наблюдаются локальные скачки, возникающие за счет пополнения парка запасными самолетами, поэтому график имеет вид ступенчатой функции. На рисунке видно, что при малых масштабах наблюдается сильное влияние

покупки дополнительных запасных ВС, поэтому удовлетворение требованиям готовности не менее 0,99 в таких случаях не видится необходимым. При увеличении численности парка от 20 до 100 ВС требуемое относительное расширение парка меняется с 15% до 8,5% при $K = 0,99$. В случае более мягкого ограничения ($K = 0,97$) наблюдаем снижение потребностей в запасных ВС (относительно штатной численности парка) с 10% до 5,2%. Таким образом, в обоих случаях наблюдается примерно двукратное падение относительной численности дополнительных ВС, приобретаемых для поддержания требуемого уровня готовности парка.

Далее оценим непосредственно стоимость выполняемых работ по техническому обслуживанию и ремонту. По предложенной модели СМО можно определить среднее за период количество ремонтных работ. Оно оценивается как произведение ожидаемого количества ВС в ремонте и интенсивности обслуживания (выполнения ремонтных работ) одного самолета.

$$R = \mu(1) \cdot \mathbb{E}N_{\text{рем}} = \mu(1) \cdot \sum_{j=0}^{N_0+N_3} p_j \cdot N_{\text{рем}}^j.$$

Тогда годовую стоимость ТОиР данного парка ВС можно определить по следующей формуле:

$$c_{\text{ТОиР}} = \overline{c}_{\text{рем}} \cdot R = \frac{\sum_i (c_{\text{рем}}^i \cdot \lambda_i)}{\sum_i \lambda_i} \cdot \mu(1) \cdot \sum_{j=0}^{N_0+N_3} p_j \cdot N_{\text{рем}}^j,$$

Рис. 2. Относительное увеличение парка при его различных масштабах при выполнении требуемого уровня готовности парка ВС

где $\overline{c_{рем}}$ – средняя стоимость ремонтных работ. Отметим, что в данной модели удельная стоимость ТОиР в расчете на один летный час для парка любого масштаба N будет постоянной, как при другом количестве штатных самолетов, так и для любого количества запасных ВС.

Введем частный показатель эффективности – стоимость поддержания готовности парка. Этот показатель характеризует дополнительные финансовые затраты, возникающие ввиду необходимости иметь в парке запасные самолеты, и будет (вместе с их численностью) меняться в зависимости от его масштабов. Оценим его через произведение стоимости годового содержания дополнительного ВС $c_{аморт}$ на их количество N_z . Для дальнейших расчетов годовую ставку амортизации примем равной 5,4 млн долл. Сравним удельные затраты на ТОиР со стоимостью поддержания готовности парка (также в расчете на летный час). Наглядно результаты расчета приведены на рис. 3. На графике штрих-пунктирной линией изображена удельная стоимость работ по ТОиР, которая в данной модели не меняется в зависимости от масштаба парка. Показано, что даже при численностях штатных ВС около 30-35 единиц (что считается значительной численностью для парка ВС конкретного типа и характерно для средних, по российским меркам, авиакомпаний) стоимость поддержания готовности парка может быть сравнима со стоимостью ремонтных работ. При численности парка, равной 100 ед. (соответствует крупным авиакомпаниям даже по мировым меркам) для поддержания коэффициента готовности 0,97-0,99 дополнительный вклад составит 50-70% относительно вклада ТОиР в стоимость летного часа.

Рис. 3. Зависимость стоимости поддержания готовности парка от его штатной численности в расчете на один летный час

Помимо различных типов обслуживания ВС весомая часть расходов на ТОиР приходится на обслуживание двигателей. В принципе, этот вид технического обслуживания ВС можно было бы добавить в описанную выше модель СМО в качестве еще одной из форм ТОиР воздушного судна, но существует ряд нюансов, на которые нужно обратить внимание. На каждом самолете установлено 2 (как на большинстве современных пассажирских самолетов, в т.ч. семейства А320) или более двигателей, и их ремонт занимает продолжительное время (как правило, несколько месяцев). Однако, с учетом возможности быстрого съема двигателя с ВС, этот процесс не требует пребывания на обслуживании всего самолета. Поэтому, имея в доступе несколько дополнительных комплектов двигателей, авиакомпания может практически без временных потерь вернуть самолет в пригодное для полета состояние. С учетом вышесказанного в данной модели двигатели и процессы их ТОиР рассматриваются как отдельная независимая СМО, построенная аналогичным образом.

За показатель состояния этой СМО принимаем количество двигателей, находящихся в ремонте $N_{рем}^{\partial}$, причем входным параметром в рассматриваемой системе будет средняя интенсивность эксплуатации θ_1 всех ВС парка с учетом запасных, вычисленная с помощью полученного выше коэффициента готовности парка, а количество штатных двигателей (для всех имеющихся самолетов) принимается равным $2N = 2(N_0 + N_3)$. Когда первый двигатель вышел из строя, то его быстро меняют на один из запасных, и если принимать во внимание, что временные затраты на такую замену существенно меньше затрат времени на сам ремонт (в нашем случае это менее 0,5%, см. табл. 2), а вероятность системы оказаться в состоянии, когда нужна оперативная замена, будет лишь немногим меньше единицы, то в настоящей работе этой величиной можно пренебречь и принять, что в таком случае ВС сразу готово к эксплуатации (ниже, на основе полученных данных, будет приведена оценка вероятных временных затрат при оперативной замене двигателя).

При переходе системы в состояние, в котором дополнительных двигателей не осталось, количество используемых двигателей $N_{исп}^{\partial}$ уменьшится на два, и один исправный двигатель будет простаивать (в работе анализируются данные по самолету Airbus A320, который имеет 2 двигателя). Если на двух ВС вышло из строя по одному двигателю, то будем считать, что простаивает только один самолет, а второй за счет оперативной перестановки исправных двигателей продолжает эксплуатироваться. Поэтому количество эксплуатируемых двигателей в зависимости от состояния СМО можно вычислить с помощью формулы, представленной ниже:

$$N_{исп}^{\partial} = 2 \cdot \min \left\{ N, \left[\frac{2N + N_3^{\partial} - N_{рем}^{\partial}}{2} \right] \right\}.$$

Примем следующую оценку интенсивностей потоков поступления в ремонт и самого обслуживания двигателей:

$$\lambda_{\partial}(N_{исп}^{\partial}) = \frac{\theta_1}{t_{\partial}} \cdot N_{исп}^{\partial}; \quad \mu_{\partial}(N_{рем}^{\partial}) = \frac{365}{\tau_{\partial}} \cdot N_{рем}^{\partial}.$$

Далее, аналогично первой СМО (для ВС), по заданному коэффициенту готовности «парка» двигателей находим требуемую численность дополнительных комплектов N_3^{∂} и можем оценить годовую стоимость работ по техническому обслуживанию и ремонту двигателей, а также стоимость поддержания их готовности.

$$c_{ТОиР}^{\partial} = \overline{c_{рем}^{\partial}} \cdot R^{\partial} = \overline{c_{рем}^{\partial}} \cdot \mu_{\partial}(1) \cdot \sum_{j=0}^{2N+N_3^{\partial}} p_j^{\partial} \cdot N_{рем}^{\partial j}.$$

Итого имеем следующие выражения затрат на ТОиР и стоимости поддержания готовности парка:

$$c_{ТОиР}^{общ} = c_{ТОиР}(N_0; \theta_0) + c_{ТОиР}^{\partial}(N_0 + N_3; \theta_1);$$

$$c_{доп}^{общ} = c_{доп} + c_{доп}^{\partial} = c_{аморт} \cdot N_3 + c_{аморт}^{\partial} \cdot N_3^{\partial}.$$

С помощью приведенных в таблице 2 данных определим требуемую численность запасных двигателей в зависимости от масштабов парка ВС, и далее сравним суммарные затраты на ТОиР с общей стоимостью поддержания готовности парка самолетов.

На рис. 4 показано относительное увеличение количества двигателей, по сравнению с их численностью на всех штатных и запасных ВС. Рассмотрены те же значения требуемого коэффициента готовности, теперь уже для двигателей – 97% и 99%.

При коэффициенте готовности 97% хоть и нужно совсем мало запасных двигателей, например, всего три при 218 двигателях (100 штатных и 9 запасных ВС), но при этом временные потери будут эквивалентны простоя целых трех самолетов, что на практике недопустимо для парка такой численности. Поэтому в дальнейших расчетах требуемый коэффициент готовности для СМО двигателей принят равным 99%, а учет простоя ВС по причине ТОиР двигателей сократит общий налет всего парка (100 штатных самолетов) менее, чем на 2300 л.ч., что приемлемо в рамках рассматриваемой модели.

Таблица 2

Исходные данные показателей технического обслуживания
ремонта двигателей

Стоимость содержания доп. двигателя в год	600 тыс. долл.
Средняя стоимость ремонта одного двигателя	1,9 млн долл.
Средняя длительность ремонта двигателя	90 сут.
Периодичности ремонта двигателя	20000 л.ч.
Коэффициент готовности	0,97-0,99

Рис. 4. Количество запасных двигателей для достижения минимально требуемого значения коэффициента готовности

В парках, где эксплуатируется более 80 штатных двигателей, один запасной приходится более, чем на 20 штатных.

Оценим вероятность, с которой система оказывается в состоянии, когда нужна оперативная замена двигателя. Сюда подходят случаи с наличием неисправного двигателя и неэксплуатируемым в данный момент запасным двигателем, а также случаи, когда при съеме очередного двигателя остается один исправный от уже простаивающего самолета (далее такие состояния случаются по мере съема каждого второго двигателя). Например, для парка из 100 ВС ожидаемое число ремонтов в год в расчете на один самолет равно 0,15, а вероятность, что понадобится оперативный съем двигателя, — 0,73, тогда при длительности замены двигателя равной 8 часов общие потери в расчете на 1 ВС составят менее одного летного часа. Приведенные результаты подтверждают правильность решения пренебречь такими временными издержками.

На рис. 5 представлены результаты расчетов общей стоимости поддержания готовности парка ВС (уже с учетом ремонта двигателей).

По сравнению с рис. 3 видно, что вклад ТОиР в стоимость летного часа увеличился до 290 долл., и соответствующая линия теперь пересекается с графиком затрат на поддержание готовности парка при численности парка ВС 10-20 единиц. Основным интерес представляет именно соотношение рассматриваемых статей расходов. Для выбранного коэффициента готовности $K = 99\%$, удельные затраты на поддержание готовности парка, вызванные временными затратами на ТОиР, примерно равны удельным затратам на ТОиР при масштабах парка 10-20 ВС, а при увеличении численности и приближении ее к отметке в 100 самолетов все равно будут вносить весомый вклад, около 50-55% относительно стоимости самих ремонтных работ.

Рис. 5. Стоимость поддержания готовности парка ВС (в расчете на один летный час) с учетом ТОиР двигателей для разных значений штатной численности парка

Проведем оценки изменения стоимости поддержания готовности ВС при переходе от однородного парка самолетов к смешанному той же общей численности. Будем считать, что суммарная интенсивность полетов для смешанного и однородного парков примерно равнозначна. Причем, для простоты оценок можно считать, что разные типы самолетов и двигателей обладают близкими стоимостными и временными характеристиками в части ТОиР – что и в самом деле характерно для современных типов авиационной техники одного класса. Тем не менее, такие смешанные парки формируются – как при стремлении авиакомпаний диверсифицировать поставщиков авиационной техники (ситуация с самолетами Boeing-737 MAX показала, что это может быть важно для страховки от инновационных технических рисков), так и при покупке новых самолетов иного производителя, по сравнению с уже имеющимися. Такая ситуация особенно важна с точки зрения выхода российского авиастроения на рынки, уже занятые продукцией конкурентов. Актуальна оценка целесообразности приобретения авиакомпаниями новых российских самолетов (хотя бы для расширения парка или замены списанных), путем оценки дополнительных затрат, вызванных неоднородностью парка.

Важно определить относительное изменение расходов, связанное именно с появлением дополнительных затрат на содержание двух по сути различных парков ВС и необходимости в каждом из них иметь дополнительные самолеты (и двигатели) во избежание потерь из-за недоступности ВС, находящихся в ремонте. Как видно на рис. 3 и 5, уменьшение численности парка ведет к увеличению относительного вклада в затраты дополнительных ВС, потребных для поддержания заданной интенсивности полетов (которые бы не понадобились при отсутствии временных затрат при

ТОиР). Поэтому затраты в однородном парке будут меньше, чем в аналогичные расходы в смешанном парке той же общей численности.

$$\frac{c_{дон}^{общ}(N)}{K_{досм}(N)} < \frac{c_{дон}^{общ}(N_1)}{K_{досм}(N_1)} + \frac{c_{дон}^{общ}(N - N_1)}{K_{досм}(N - N_1)}.$$

Ниже в табл. 3 приведены исходные данные и результаты расчетов по вышеописанным моделям для нескольких смешанных парков ВС, которые должны выполнять транспортную работу, рассчитанную на 50 самолетов (все остальные исходные данные аналогичны примерам, рассмотренным ранее). Результаты расчетов представлены относительно значений для однородного парка штатной численностью 50 самолетов. Рассмотрены смешанные парки, где самолеты двух типов представлены в разных пропорциях – от сильно неравных до одинаковых, т.е. поровну обоих типов. В крайнем правом столбце рассмотрен еще более разнотипный парк, состоящий из самолетов трех типов.

Для большинства рассмотренных вариантов структуры парка ВС при переходе к смешанному парку финансовые затраты на поддержание его готовности увеличиваются на 36-38%. В случае равных численностей двух типов ВС, по 25 штатных единиц, понадобилось всего по 3 запасных самолета, за счет этого стоимость увеличилась всего на 20% относительно однородного парка.

Таким образом, с помощью приведенного инструментария можно оценивать целесообразность использования однородного или смешанного парка самолетов. Естественно, переход к смешанному парку выгоден, если будет обеспечена значительная экономия, по сравнению с возможностями при содержании однородного парка. Сокращение издержек может достигаться за счет различных статей ПЭР, от затрат на авиатопливо до амортизации авиационной техники и собственно затрат на ТОиР. Эту выгоду можно соотнести с полученными выше оценками дополнительных затрат из-за неоднородности парка, и оценить заинтересованность авиакомпаний в таком направлении развития. Предложенный инструментарий может быть полезен для прогнозирования рыночных перспектив новой продукции российского авиастроения на рынках, занятых конкурентами.

Таблица 3

Сравнение стоимости поддержания готовности унифицированного и смешанных парков при $N_0 = 50$, $K_{досм} = 0,99$

Структура парка	50	45+5	40+10	35+15	30+20	25+25	20+15+15
Запасные самолеты	5	7	7	7	7	6	9
Запасные двигатели	5	5	6	6	6	6	7
Относительное увеличение стоимости поддержания готовности парка	1	1,36	1,37	1,38	1,38	1,2	1,75

На практике техническое обслуживание и ремонт однотипного парка дешевле, чем смешанного, еще и потому, что накапливается опыт эксплуатации и ТОиР, что не учитывалось в данной работе. И если иностранные производители уже успешно прошли процесс отработки своих моделей, то новым российским изделиям он только предстоит (широко известны проблемы послепродажного обслуживания новых российских самолетов семейства SSJ). В этот период есть вероятность временной приостановки эксплуатации новых типов самолетов, что может нанести серьезный ущерб бюджету как авиастроительных предприятий, так и малых авиакомпаний. Этот фактор дополнительно сдерживает авиакомпании от приобретения новых, но не прорывных по своим характеристикам самолетов, в дополнение к уже освоенному парку ВС, и сильно препятствует появлению новых игроков на мировых рынках магистральных ВС.

Заключение

В работе предложен инструментарий для оценки затрат на ТОиР парка самолетов, а также для оценки сопутствующих расходов, необходимых для поддержания готовности парка ВС. При этом учитываются различные формы ТОиР с разной периодичностью и стоимостью, а также ТОиР двигателей как независимый (от обслуживания планера самолетов) процесс. На основе принятых исходных данных, характерных для современных самолетов семейства А-320, показано, что временные потери авиакомпании вследствие выполнения работ по ТОиР могут быть эквивалентны простоям нескольких ВС даже при малых и средних численностях парка (15-25 ВС). Определено относительное увеличение численности парка (при содержании запасных самолетов), требуемое для выполнения заданного коэффициента готовности самолетов. Получены оценки стоимости поддержания готовности парка. Показано, что вклад расходов на содержание запасных самолетов и двигателей в общую стоимость летного часа может быть сравним с издержками на выполнение самих работ по ТОиР.

С помощью разработанной экономико-математической модели можно сравнивать показатели стоимости поддержания готовности парков и работ по ТОиР для унифицированного и смешанного парков. Показано, что для весьма крупных парков (штатной численностью около 50 самолетов) затраты на поддержание их готовности при постепенном увеличении доли самолетов нового типа в парке могут возрастать почти на 40%, и только при выравнивании численностей самолетов обоих типов этот прирост сократится до 20%. При этом дальнейшее замещение самолетов старого типа новым вновь вызовет прирост соответствующих затрат, вплоть до полного замещения.

Полученные результаты целесообразно учитывать при оценке конкурентоспособности новых самолетов и двигателей, особенно в периоды стагнации технологического развития, когда преимущество новых изделий перед старыми может быть незначительным.

Литература

1. Хрусталева Е.Ю., Бурилина М.А. Финансово-экономическое обоснование необходимости обновления парка пассажирских самолетов // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2013. № 12 (150). – С. 2-12.
2. Клочков В.В. Организация конкурентоспособного производства и послепродажного обслуживания авиадвигателей. М.: Экономика и финансы, 2006. – 464 с.
3. Клочков В.В. Методы и программное обеспечение экономико-математического моделирования и оптимизации технического обслуживания и ремонта авиадвигателей // Авиакосмическая техника и технология. 2005. № 1. – С. 62-68.
4. Варюхина Е.В., Клочков В.В. Стандарты и нормы как инструменты протекционизма: проблема определения границ рынков (на примере гражданского авиастроения) // Журнал экономической теории. Институт экономики Уральского отделения РАН, 2016. № 2. – С. 57-71.
5. Колемаев В.А., Калинина В.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник / Под ред. В.А. Колемаева. М. ИНФРА-М, 1997. – 302 с.
6. A320 maintenance cost analysis. Maintenance and Engineering // Aircraft Commerce. 1999. Issue № 5. Pp. 38-48.
7. Смирнов Н.Н. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов [Текст]: учебник / Н.Н. Смирнов, Ю.М. Чинючин. - М.: МГТУ ГА, 2015. – 579 с.

Поступила в редакцию

03.04.2020

Карпов Артемий Евгеньевич – младший научный сотрудник Национального исследовательского центра «Институт им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия.

Karpov Artemiy Ev. – Junior Research Fellow, National research center «Institute named after N.E. Zhukovsky», Zhukovsky, Russia.

Россия, 140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1
1, Zhukovsky st., 140180, Zhukovsky, Russia
e-mail: karpovae@nrczh.ru