

УДК 338.2:519.87:656.7

ББК 39.5+65.054

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СМЕШАННОГО ПАРКА САМОЛЕТОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Карпов А. Е.¹

(Московский физико-технический институт, Москва)

Клочков В. В.²

*(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)*

Конечная цель данной работы - прогнозирование спроса на широкофюзеляжные самолеты с малой и средней дальностью полета. В отличие от дальнемагистральных самолетов, они могут выполнять полеты не по всем возможным маршрутам, но их меньшая универсальность компенсируется меньшими эксплуатационными расходами, по сравнению с дальнемагистральными самолетами. Для этого предлагается оценить оптимальную численность смешанного парка, состоящего из среднемагистральных и дальнемагистральных самолетов, а также однородного парка дальнемагистральных воздушных судов, с учетом распределения спроса на перевозки по дальностям. Чтобы, помимо натуральной, оценить и стоимостную емкость рынка таких самолетов, следует определить приемлемые для авиакомпаний уровни цены среднемагистрального самолета и затрат на его эксплуатацию, компенсирующие выгоду от универсальности самолетов с большей дальностью. Разработанная для этих целей модель основана на теории массового обслуживания.

¹ *Артемий Евгеньевич Карпов, магистрант (fansy95@mail.ru).*

² *Владислав Валерьевич Клочков, доктор экономических наук, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экономической динамики и управления инновациями (vlad_klochkov@mail.ru).*

Ключевые слова: емкость рынка, парк воздушных судов, структура смешанного парка, операционные расходы, распределение рейсов по дальности.

1. Введение.

В июне 2016 года в рамках официального визита Президента России в Китай было подписано несколько документов по программе создания нового широкофюзеляжного пассажирского самолета (ШФС). РФ и КНР совместно реализуют Программу разработки, производства, продажи и послепродажного обслуживания самолета, получившего название CR929. Для выполнения этой задачи создано новое совместное предприятие, расположенное в Китае. Такой выбор обусловлен близостью к основному планируемому рынку сбыта ШФС, а именно, Юго-Восточной Азии [14].

При совместной разработке самолетов в рамках кооперационных проектов стороны могут придерживаться различных позиций по поводу выбора их характеристик, в т.ч. дальности полета [7]. По этому поводу продолжается согласование позиций РФ и КНР. По статистике, всего около 15% от общего числа рейсов ШФС имеют дальность свыше 10 тыс. км. Однако дальность полета почти всех моделей ШФС, выпускаемых компаниями Boeing и Airbus, составляет 12-15 тыс. км, т.е. они являются дальнемагистральными (ДМС). С одной стороны, это предоставляет авиакомпаниям возможность использовать такие самолеты для полетов на любую дальность и иметь однотипный парк ШФС, который в обслуживании, как правило, дешевле смешанного. С другой стороны, универсальность воздушного судна (ВС) требует больших затрат на его покупку и эксплуатацию, поскольку повышение дальности полета требует разнообразных дополнительных издержек.

Ожидается, что азиатский рынок в ближайшие годы будет быстро расти [11], при этом кооперация с КНР позволяет рассчитывать на благоприятные перспективы продаж ШФС на внутреннем рынке этой страны. В Азии очень часто ШФС используются как раз для полетов на среднюю и малую дальность.

Поэтому проект создания самолета, оптимизированного под меньшую дальность, имеет шансы стать успешным [8]. В то же время, отдельные эксперты предполагают, что темп роста спроса на ШФС будет уменьшаться [5], и к моменту начала серийного производства российско-китайского самолета (после 2025 г.) основная часть спроса на ШФС будет удовлетворена конкурентами. Поэтому, если делать ставку на производство самолета, рассчитанного на рейсы средней дальности (среднемагистрального самолета – СМС), необходимо предложить продукт, который с избытком компенсирует выгоду от универсальности импортного ДМС¹. В противном случае новое воздушное судно не станет конкурентоспособным на мировом рынке, т.к. его приобретение не будет экономически целесообразным для авиакомпаний.

Для оценки рыночных перспектив широкофюзеляжного самолета, рассчитанного на среднюю дальность, в работе предполагается оценить и сопоставить уровень натурального и стоимостного спроса авиакомпаний на ВС в случаях эксплуатации смешанного парка, состоящего из СМС и ДМС, и однородного парка ДМС. Если численности этих парков равны, то однородный парк имеет преимущество: когда все ДМС в смешанном парке выполняют рейсы, компания может удовлетворить заявку только на среднюю дистанцию, а для выполнения дальнего рейса свободных ВС не будет. Как показано в работе [1], для обеспечения идентичного однородному парку качества обслуживания спроса на перевозки (измеряемого коэффициентом регулярности рейсов, т.е. долей заявок на перевозки, которые могут быть удовлетворены без задержек), авиакомпании со смешанным парком потребуется заведомо больше воздушных судов. Поэтому выбор в пользу более объемного смешанного парка должен быть экономически оправдан.

¹ В данной статье для краткости самолеты с дальностью полета до 10 тыс. км будут называться среднемагистральными (СМС). Следует отметить, что это отличается от типичной трактовки данного термина: обычно дальность полета СМС – до 6-7 тыс. км.

Допустим, что можно обеспечить серийное производство широкофюзеляжных воздушных судов средней дальности. Для прогнозирования спроса на перспективные ШФС с различной дальностью полета предполагается построить модель на основе классической теории массового обслуживания (подробнее см., например, [4]). Состав смешанного парка будет оптимизироваться с учетом распределения заявок на полеты по дальности, которое оценивается на основе реальной статистики рынка авиаперевозок. Также по результатам оценки оптимального количества самолетов различной дальности можно будет оценить и справедливую цену продажи СМС (по отношению к цене ДМС). Эта цена должна рассчитываться так, чтобы затраты на приобретение СМС и его эксплуатацию компенсировали выгоду от универсальности самолетов с большей дальностью. На основе оценок оптимальной структуры смешанного парка и полученных значений справедливой цены для ВС с различными техническими характеристиками, и будут оцениваться доли натуральной и стоимостной емкости рынка, которые может занять среднемагистральный широкофюзеляжный самолет.

2. Экономико-математическая модель оптимальной структуры смешанного и однородного парков воздушных судов для выполнения рейсов на дальние и средние дистанции

С точки зрения авиакомпании основным критерием эффективности используемых ВС является прибыль от эксплуатации всего парка. Будем рассматривать два типа парка ВС: однородный и смешанный. Первый состоит только из дальнемагистральных самолетов, второй из СМС и ДМС. Справедливую стоимость СМС предполагается получить, ответив на вопрос: при какой цене самолета, рассчитанного на средние дистанции, прибыль от эксплуатации второго парка будет выше?

Парки ВС представим как многоканальные системы массового обслуживания (СМО). По аналогии с [1], будем считать, что минимально приемлемые численности парков ВС должны определяться исходя из требований обеспечения заданного ка-

чества обслуживания. В качестве критерия качества выберем коэффициент регулярности рейсов, т.е. долю рейсов, выполняемых без задержек. Он зависит от численности парка: $K_{reg}=K_{reg}(n)$. Примем минимально приемлемое для авиакомпании значение этого коэффициента K_{regmin} . Далее, используя это значение, будем определять оптимальный объем парка n_i^* , как минимальное значение, при котором коэффициент регулярности рейсов не ниже порогового ($K_{reg}(n_i^*) \geq K_{regmin}$). Тогда можно оценить минимальную численность парка воздушных судов которая требуется для удовлетворения спроса на перевозки.

Поток заявок включает в себя рейсы на большую и на среднюю дальности. Будем предполагать, что заявки поступают случайным образом, и свободные ВС назначаются на выполнение соответствующих рейсов, если позволяет их дальность. Это допущение согласуется с реальной практикой эксплуатации ВС в современных авиакомпаниях, где закрепление конкретных авиалиний за конкретным воздушным судном практикуется крайне редко, для обеспечения высокой интенсивности эксплуатации.

2.1. ОДНОРОДНЫЙ ПАРК ДМС

Пусть парк состоит из $n_{одн}$ однотипных ВС (рассматривается одна авиакомпания, все самолеты которой базируются в единственном аэропорту). Предположим, что заявки на полеты на средние и дальние дистанции поступают с интенсивностями λ_1 и λ_2 , заявок в сутки, соответственно. Пусть средние продолжительности выполнения парных рейсов (туда и обратно, с учетом стоянок в аэропортах) на данные дистанции равны τ_1 и τ_2 часов. Если потоки событий «заявка поступила» и «заявка выполнена» являются простейшими (интервалы между событиями распределены согласно показательному распределению), тогда интенсивности обслуживания в зависимости от дальности равны

$$(1) \quad \mu_1 = \frac{1}{\tau_1}; \mu_2 = \frac{1}{\tau_2}.$$

Данная система является n -канальной СМО с неограниченной очередью (предполагается, что, если на момент поступления заявки нет доступных самолетов, то рейс находится в режи-

ме ожидания). Тогда общую интенсивность потока заявок λ принимаем равной сумме λ_1 и λ_2 , а среднюю интенсивность обслуживания можно представить в следующем виде:

$$(2) \quad \mu = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\tau_1 \lambda_1 + \tau_2 \lambda_2}.$$

(т.е. она является средневзвешенной по долям поступающих заявок на дальние и средние дистанции). Коэффициент регулярности рейсов – это сумма вероятностей того, что СМО находится в состояниях с номерами от 0 до n , т.е. в системе находится не более n заявок, и очереди не образуется:

$$(3) \quad K_{reg}(n_{одн}) = \sum_{k=0}^{n_{одн}} p_k.$$

2.2. СМЕШАННЫЙ ПАРК

Пусть теперь парк состоит из $n_{смеш} = n_1 + n_2$ ВС, где n_1 - число СМС, n_2 - число ДМС. Введем коэффициент θ – долю рейсов на средние дистанции. Интенсивности заявок и обслуживания будем считать такими же, как в случае однородного парка.

Представив данную систему как единую СМО с разнородными каналами, мы сталкиваемся с некоторыми трудностями. В отличие от СМС, самолеты, рассчитанные на дальние дистанции, способны выполнять рейсы на любую дальность. Таким образом, получаем систему с односторонней взаимопомощью. В связи со сложностью ее аналитического описания далее будем рассматривать смешанный парк как две независимые СМО с неограниченной очередью (первая – с n_1 каналами, соответствующими СМС, вторая – с n_2 каналами, соответствующими ДМС). Каждая обслуживает свой поток заявок – на средние и на дальние дистанции, причем, взаимопомощь не учитывается. Для этих СМО также выразим коэффициенты регулярности рейсов:

$$(4) \quad K_{reg}(n_1) = \sum_{k=0}^{n_1} p_k; K_{reg}(n_2) = \sum_{k=0}^{n_2} p_k.$$

Далее численность смешанного парка будем оптимизировать так, чтобы условие $K_{reg}(n_i^*) \geq K_{regmin}$ выполнялось как для парка СМС, так и для парка ДМС. В этом случае из-за допущения о независимости двух СМО и отсутствии взаимопомощи мы получим верхнюю границу (пессимистическую оценку) необхо-

димой численности парка, что позволит в итоге получить нижнюю (также пессимистическую) оценку справедливой цены СМС.

2.3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В иллюстративных расчетах примем следующий набор исходных данных: $\lambda=50$ рейсов в сутки; средние продолжительности выполнения парного рейса на средние и дальние дистанции равны, соответственно, $\tau_1=14$ ч и $\tau_2=20$ ч; $K_{regmin}=97\%$; долю заявок на средние дистанции θ рассматриваем как параметр. Для определения реалистичного диапазона значений этого показателя обратимся к распределению пассажиропотока по дальности рейсов. Ниже на рис. 1 приведен график такого распределения для расстояний от 4000 км и выше (составлено на основе статистической информации компании OAG).

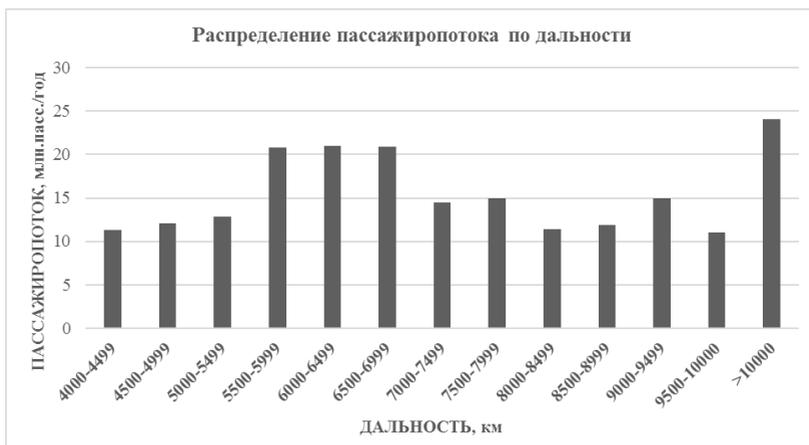


Рис. 1. Распределение доли общего мирового объема авиатранспорта, обеспеченного широкофюзеляжными самолетами, по дальности

По диаграмме можно определить, что для дальностей от 4 до 6,5 тыс. км доля пассажиропотока составляет около 39% (дальности ниже 4000 км в исследовании не рассматриваются), диапазон от 4 до 8 тыс. км соответствует доле 64%, от 4 до 9,5 тыс. км – более 83%. В принципе, появление среднемагистраль-

ных широкофюзеляжных самолетов может повлиять на структуру данного распределения благодаря привлечению части пассажиропотока, который сейчас обеспечивают узкофюзеляжные среднемагистральные ВС. Также неизвестно, как будет меняться спрос на авиaperезовки по дальностям до момента выхода нового ВС на рынок. Поэтому в иллюстративных примерах рассматриваются три дискретных значения доли θ : {0,4; 0,6; 0,8}. Эти три сценария охватывают широкий спектр возможных траекторий развития рынка авиaperезовок.

В таблице 1 приведены результаты расчетов при трех различных значениях доли заявок на средние дистанции: найдены оптимальные значения численности однородного и смешанного парков n^* и $n_1^* + n_2^*$, а также среднее число занятых в определенный момент ВС n_{cp}^* , n_{1cp}^* и n_{2cp}^* , соответственно.

Табл. 1. Результаты расчетов оптимальных параметров СМО

θ	n^*	n_1^*	n_2^*	n_{cp}^*	n_{1cp}^*	n_{2cp}^*
0,4	49	19	35	36,7	11,7	25
0,6	46	26	25	34,17	17,5	16,67
0,8	43	33	15	31,6	23,3	8,3

3. Метод оценки справедливой стоимости СМС

Теперь, после того, как мы определили оптимальные численности парков, можно выразить оценки выручки и затрат авиакомпании. Это позволит оценить справедливый уровень цен на СМС, при которых оптимальный неоднородный парк будет более выгодным, нежели состоящий только из универсальных дальнемагистральных воздушных судов.

Оптимальное количество судов в однородном парке будет меньше, чем в парке с двумя типами ВС, поэтому, если оба типа самолетов приносят одинаковую прибыль, то авиакомпании предпочтут приобретать ВС повышенной дальности. Затраты на эксплуатацию самолетов двух типов далее предполагаются различными. Также различной, в общем случае, может быть и средняя выручка за рейс $r^{(i)}$, $i=1,2$.

Пусть стоимость летного часа воздушного судна представима в упрощенной форме следующим образом:

$$(5) \quad c_{\text{час}} = c_{\text{аморт}} + c_{\text{опер}} + c_{\text{проч}}.$$

$c_{\text{аморт}}$ – амортизационные отчисления, приходящиеся на один л.ч. (отношение цены самолета p к длительности его возможной эксплуатации T , выраженной в л.ч.). В роли этой величины могут выступать и часовые расходы на аренду ВС. Сейчас авиакомпании предпочитают брать суда в лизинг, и доля таких затрат значительно превалирует над амортизацией собственных воздушных судов авиакомпании (даже для тех авиакомпаний, которые могут себе позволить иметь в собственности большую часть потребного парка ВС).

$c_{\text{опер}}$ – текущие операционные затраты в расчете на л.ч., которые в основном состоят из затрат на техническое обслуживание и ремонт, а также на горюче-смазочные материалы (ГСМ).

$c_{\text{проч}}$ – прочие расходы, на которые технические характеристики самолета оказывают косвенное влияние.

Величину $c_{\text{опер}}$ можно представить в следующем виде:

$$(6) \quad c_{\text{опер}} = c_{\text{ТОиР}} + g \times p_{\text{ГСМ}},$$

где $c_{\text{ТОиР}}$ – средние затраты на техническое обслуживание и ремонт за л.ч.,

g – удельный расход топлива за час полета (оба параметра различаются для разных типов ВС),

$p_{\text{ГСМ}}$ – цена тонны авиатоплива.

Таким образом, полные затраты за эксплуатацию самолета i -го типа можно описать следующей формулой:

$$(7) \quad C^{(i)} = (c_{\text{аморт}}^{(i)} + c_{\text{ТОиР}}^{(i)} + g^{(i)} \times p_{\text{ГСМ}} + c_{\text{проч}}^{(i)}) \times T.$$

Индексом 1 обозначаются СМС, индексом 2 – ДМС. Также введем величину $c_{\text{ТОиР}}^{(0)}$ – средние затраты на ТОиР на одно ВС в однородном парке ДМС, т.к. они меньше затрат на такой же тип ВС в неоднородном парке $c_{\text{ТОиР}}^{(2)}$.

Используя оптимальные значения численности парков, полученных в предыдущих пунктах, можно оценить пороговое значение цены на СМС, когда использование только ДМС будет менее выгодным, нежели эксплуатация неоднородного парка. Т.е. суммарная прибыль от эксплуатации n^* самолетов универ-

сального типа будет меньше прибыли от эксплуатации смешанного парка, содержащего СМС в количестве n_1^* и ДМС в количестве n_2^* . Данное условие после некоторых упрощений можно записать следующим образом:

$$(8) \quad (n^* - n_2^*) \cdot \left(\frac{r^{(2)}}{\tau_2} - c_{аморт}^{(2)} - c_{топ}^{(2)} - c_{проц}^{(2)} \right) - (n^* \cdot c_{ТОиР}^{(0)} - n_2^* \cdot c_{ТОиР}^{(2)}) \leq n_1^* \cdot \left(\frac{r^{(1)}}{\tau_1} - c_{аморт}^{(1)} - c_{ТОиР}^{(1)} - c_{топ}^{(1)} - c_{проц}^{(1)} \right).$$

Поскольку все доходы и расходы выражены в расчете на л.ч., амортизационные расходы за л.ч. отражают цену ВС, также приведенную к летному часу. Отсюда получаем условие для справедливой (максимально приемлемой для авиакомпании) цены СМС:

$$(9) \quad c_{аморт}^{(1)} \leq \frac{n_{ср}^* - n_{2ср}^*}{n_{1ср}^*} \cdot \left(c_{топ}^{(2)} + c_{аморт}^{(2)} + c_{проц}^{(2)} - \frac{r^{(2)}}{\tau_2} \right) - c_{проц}^{(1)} + \frac{r^{(1)}}{\tau_1} + \frac{n_{ср}^* \cdot c_{ТОиР}^{(0)} - n_{2ср}^* \cdot c_{ТОиР}^{(2)}}{n_{1ср}^*} - c_{ТОиР}^{(1)} - c_{топ}^{(1)}.$$

Подчеркнем, что для расчета операционных затрат не могут использоваться суммарные численности парков n^* , n_1^* и n_2^* , т.к. каждая СМО может находиться в состоянии, при котором часть самолетов находится в ожидании поступления заявки. Поэтому при расчете амортизационных затрат за л.ч. нужно считать математическое ожидание количества занятых ВС и подставлять в формулу значения $n_{ср}^*$, $n_{1ср}^*$ и $n_{2ср}^*$, указанные выше в табл. 1.

Выразим часовые операционные издержки самолетов смешанного парка относительно издержек самолетов однородного парка (дальнемагистральных) следующим образом:

$$(10) \quad \frac{r^{(1)}}{\tau_1} = \alpha \cdot \frac{r^{(2)}}{\tau_2}; \quad c_{топ}^{(1)} = \gamma \cdot c_{топ}^{(2)}; \quad c_{ТОиР}^{(2)} = \beta_2 \cdot c_{ТОиР}^{(0)}; \quad c_{ТОиР}^{(1)} = \beta_1 \cdot c_{ТОиР}^{(0)}.$$

Здесь α , γ – доли выручки на летный час и затрат на топливо СМС относительно соответствующих значений для ДМС; β_1 , β_2 – доли затрат на ТОиР соответственно для СМС и ДМС смешанного парка относительно ДМС однородного парка.

Перейдем к описанию технических характеристик самолетов. Расчеты будут производиться в долях относительно средней выручки от эксплуатации ДМС в расчете на л.ч. Для определения значений используемых в модели параметров для ДМС обратимся к источнику [13]. В этой работе приведены данные

по операционным расходам за один л.ч. различных семейств ШФС нескольких ведущих американских авиакомпаний за период с апреля 2016 года по март 2017. Из рассмотрения были удалены «выбросы»: информация о воздушных судах, принадлежащих авиакомпании Delta, ввиду очень низких значений амортизационных затрат, а также данные по самолету Boeing 747-400, который имеет очень высокие относительные затраты на авиатопливо¹. Затраты приведены в долларах, но поскольку здесь используется структура операционных издержек, денежные единицы и уровни цен принципиальны. Средние значения различных статей затрат были переведены в доли относительно суммарных расходов за л.ч.

Чтобы связать операционные расходы с выручкой, необходимо знать рентабельность авиакомпании. Предположим, что средние операционные расходы за л.ч. составляют 90% средней выручки за тот же период. Для учета российской специфики издержек были выбраны данные по операционным расходам из ежегодного отчета компании «Аэрофлот – российские авиалинии» [6]. В парке этой авиакомпании узкофюзеляжных самолетов в 4,5 раза больше, чем ШФС (причем еще есть столько же региональных ВС, сколько и ШФС), поэтому логично предположить, что структура расходов описывает, скорее, узкофюзеляжные самолеты. По итогам сравнения рассмотренных выше показателей ШФС с аналогичными для УФС [12], было отдельно посчитано, во сколько раз в среднем каждая составляющая издержек ШФС превышает аналогичный показатель для УФС. Подставляя эти коэффициенты для ШФС в структуру расходов авиакомпании «Аэрофлот – российские авиалинии» и нормируя выручку на единицу, получим новые доли интересующих нас показателей.

Таким образом, с учетом особенностей структуры затрат на эксплуатацию ШФС, принимаем следующие значения параметров:

¹ *Природа этих выбросов, разумеется, представляет интерес, но не входит в рамки данного исследования*

$$(11) c_{\text{ТОиР}}^{(2)} = 0,09; \quad c_{\text{топ}}^{(2)} = 0,32; \quad c_{\text{аморт}}^{(2)} = 0,07; \quad c_{\text{проч}}^{(2)} = 0,42.$$

Далее перейдем к оценке параметров самолетов смешанного парка.

1) Среднюю выручку за летный час ШФС обоих типов примем одинаковой, тогда коэффициент α будет неизменным и равным единице;

2) При изменении дальности полета меняются и часовые затраты на авиатопливо. Чтобы приблизительно оценить это изменение, обратимся к модели из [2], где удельный крейсерский расход топлива g выражен через упрощенную формулу Бреге:

$$(12) g = \frac{\exp\left(\frac{TSFC}{K} * \frac{L}{v}\right) - 1}{L} * (1 + Wt).$$

где $TSFC$, K , v , Wt , - обобщенные показатели технического совершенства летательного аппарата и его систем¹, L - дальность полета.

Для оценки потребления авиатоплива за рейс были рассмотрены диапазоны дальности от 2000 до 10000 километров. Ниже на рис. 2 приведен рассчитанный по формуле Бреге график зависимости удельного расхода топлива от дальности полета ВС. Приняты технологические параметры современных магистральных самолетов зарубежного производства – Boeing-777, Boeing-737NG и т.п. Как отмечено в [2], модель носит сильно упрощенный характер, однако, после сравнении с реальными значениями можно сделать вывод, что она применима для оценочных расчетов.

¹ $TSFC$ - часовой расход топлива двигателя, K - аэродинамическое качество планера, v - крейсерская скорость полета, Wt - весовое совершенство воздушного судна

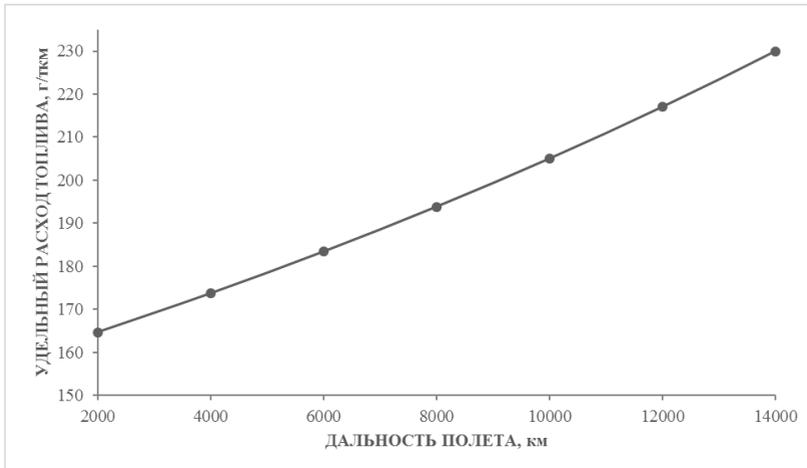


Рис.2. Зависимость удельного расхода топлива от расчетной дальности полета (пример)

В настоящем исследовании рассматриваются парные рейсы длительностью 14 или 20 часов, что приблизительно соответствует диапазону дальности полета от 5000 до 10000 километров. Сравнив полученные результаты для граничных значений расстояний, видим, что в рамках выбранной модели, при снижении дальности с 14000 км до 2000 км удельный расход топлива может уменьшиться на 20%. Отсюда, для наглядности, будем рассматривать долю затрат на топливо γ для СМС относительно ДМС в пределах множества $[0,8; 1]$;

3) Менее универсальное по дистанции ВС требует и меньших затрат на обслуживание, поэтому для среднемагистрального самолета будем рассматривать значения коэффициента β_1 , принадлежащие отрезку $[0,8; 1]$;

4) Обслуживание каждого ВС однородного парка приходится дешевле, ввиду отсутствия необходимости закупки оборудования для обслуживания нескольких семейств самолетов (эти затраты распределяются на большее количество ВС), снижения расходов на содержание ремонтных мощностей и запасов запчастей благодаря положительным эффектам масштаба парка. Поэтому выберем β_2 из промежутка $[1; 1,2]$.

Теперь можно оценить влияние издержек на ТОиР и топливных затрат на долю затрат на амортизацию (фактически – относительную цену СМС), которую могут себе позволить авиакомпании при условии сохранения уровня полных эксплуатационных расходов. Далее приведены графики зависимости приемлемой для авиакомпании цены СМС (относительно ДМС), при трех дискретных значениях доли рейсов на средние дистанции, от:

- доли средних затрат на ТОиР для СМС за час полета относительно ДМС.
- доли затрат на авиатопливо за л.ч. для СМС относительно ДМС.

В первом случае выбраны $\gamma=0,9$ и $\beta_2=1,1$; во втором - $\beta_1=1$; $\beta_2=1,1$.

На рис. 3. показана зависимость приемлемой для авиакомпании стоимости самолета от доли затрат на ТОиР для СМС за час полета относительно ДМС (при трех значениях доли рейсов на средние дистанции). Горизонтальной линией на графике отмечены относительные (по отношению к выручке за л.ч.) затраты на амортизацию для ДМС за л.ч., принятые в модели.

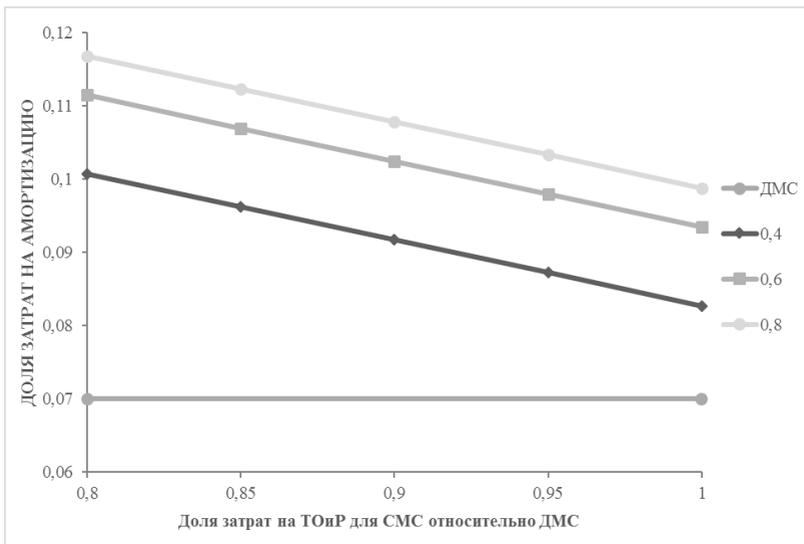


Рис. 3. График приемлемых затрат на амортизацию для авиакомпаний при различной доле затрат на ТОиР за л.ч. СМС относительно ДМС (для трех дискретных значений доли заявок на среднюю дистанцию)

Из графика видно, что при уменьшении затрат на ТОиР значение приемлемых затрат на амортизацию увеличивается. Даже при аналогичных затратах на ТОиР в сценарии с $\theta=0,4$ справедливая цена СМС выше стоимости ДМС на 8,3%. Стоит отметить, что повышение доли заявок на средние дистанции с 0,4 до 0,8 может увеличить справедливую цену на 20% и вносит вклад, сопоставимый с изменениями затрат на ТОиР - в рамках примера, их снижение может повысить справедливую стоимость на 22%.

Из этих графиков следует парадоксальный, на первый взгляд, результат, что самолет, рассчитанный на меньшую дальность, может быть дороже, чем ДМС, производство которого (при одинаковом уровне технологий) является более трудоемким и требует дополнительных исследований и разработок. Это может показаться нереальным. Но при сильном снижении эксплуатационных расходов вполне возможно, что авиакомпаниям выгодно даже доплатить значительную надбавку за экономичность СМС, и все равно иметь ощутимый выигрыш от его эксплуатации.

На рис. 4. показана зависимость приемлемой для авиакомпании стоимости самолета от доли затрат на авиатопливо в расчете на л.ч. относительно ДМС (при трех значениях доли рейсов на средние дистанции). Здесь рассматривается случай, когда издержки на ТОиР для обоих типов самолетов одинаковы, чтобы нагляднее продемонстрировать вклад топливных затрат. Горизонтальной линией на графике отмечены относительные затраты на амортизацию для ДМС на л.ч., принятые в модели.

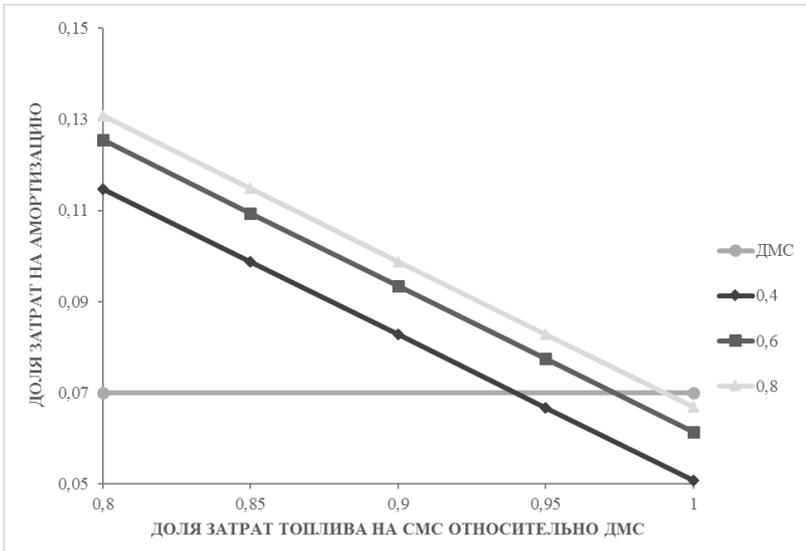


Рис. 4. График приемлемых затрат на амортизацию для авиакомпаний при различной доле затрат на авиатопливо за л.ч. СМС относительно ДМС (для трех дискретных значений доли рейсов на среднюю дистанцию)

Здесь мы наблюдаем схожую ситуацию: чем меньше затраты на авиатопливо, тем большую цену СМС готовы платить авиакомпании. Анализ графиков показывает, что в диапазоне доли затрат на топливо для СМС (0,8;0,94) покупка СМС всегда привлекательнее приобретения ДМС, при любом из трех рассматриваемых вариантов доли рейсов на короткую дистанцию. В свою очередь приемлемая цена СМС будет меньше аналогичного показателя для ДМС для всех сценариев при $\gamma > 0,99$. По графику видно, что вклад доли заявок на средние дистанции в изменение затрат на амортизацию значительно меньше по сравнению с влиянием коэффициента γ , при изменении которого приемлемая стоимость СМС может увеличиться более, чем в два раза.

Попробуем привязать последние расчеты к распределению пассажиропотока по дальности. Для упрощения, с учетом данных, приведенных на рис. 1, примем, что дистанция полета

6500 км приблизительно соответствует доле заявок $\theta=0,4$; 8000 км - $\theta=0,6$; 9500 км - $\theta=0,8$. Самолеты с такими дальностями полета будут иметь различный удельный расход топлива. Используя рис. 2, получим доли топливных затрат для СМС относительно ДМС (имеющего дальность полета 14000 км). Они приведены в таблице 2.

Таблица 2. Топливные затраты СМС относительно ДМС в зависимости от дальности полета СМС

доля заявок	дальность	доля топливных затрат
0,4	6500	0,81
0,6	8000	0,84
0,8	9500	0,88

Построим график зависимости цены среднемагистрального самолета, приемлемой для авиакомпании, от дальности, на которую рассчитано ВС. Для этого выберем точки для СМС из рис. 4, соответствующие долям топливных затрат из таблицы 2, и сравним их со значением для ДМС (эта точка отмечена на графике в правом нижнем углу рис. 5).

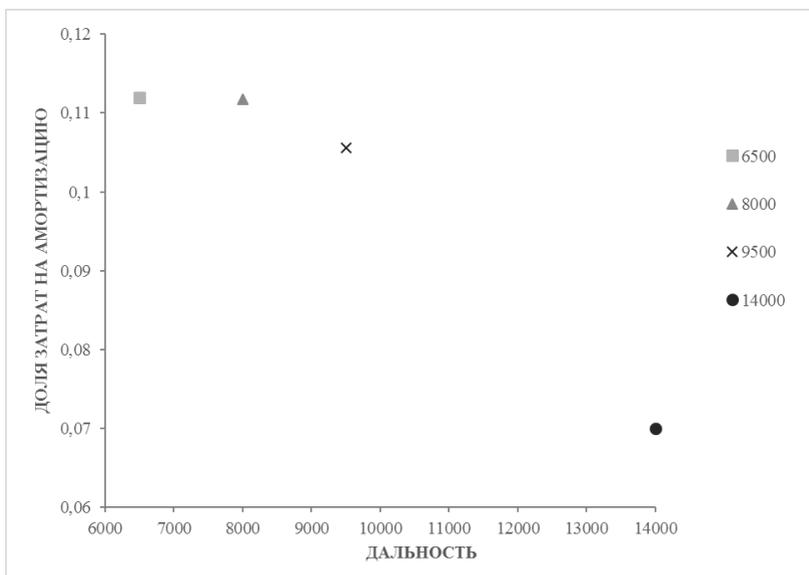


Рис. 5. График зависимости приемлемой доли затрат на амортизацию в зависимости от дальности ВС

На рис. 5 видно, что в рамках предлагаемой модели при повышении дальности полета СМС с 6500 до 8000 км его справедливая цена почти не изменится. В тоже время, для дальности 9500 км приемлемая доля затрат на амортизацию уменьшится на 6%. Получается, что при уменьшении расчетной дальности полета с 8000 до 6500 потери от снижения натурального спроса на такие ВС практически полностью компенсируются за счет снижения топливных затрат. Таким образом, на первый взгляд, самым привлекательным вариантом с точки зрения стоимости ВС является производство самолета, рассчитанного на дальность до 6500 км. Однако по этим результатам нельзя делать рекомендации по выбору дальности самолета. Как уже было отмечено выше, каждой дальности соответствует своя доля заявок на средние дистанции, следовательно будет отличаться и уровень спроса со стороны авиакомпаний. Поэтому все выгоды, возникающие в случае

выбора ВС с малой дальностью, в принципе, могут быть нивелированы за счет сильного уменьшения выпуска.

В расчетах на основе формулы Бреге рассматривается одинаковый технологический уровень ВС. Для ДМС и СМС принимаются равными такие характеристики, как аэродинамическое качество, весовое совершенство, параметры силовой установки. Однако обеспечение более дальних перелетов требует увеличения размеров и сложности элементов и систем ВС, что приведет к изменению значений этих характеристик. Поэтому само предположение об идентичности технологий является сильным упрощением. Более реалистичная модель, учитывающая изменение технологических характеристик при увеличении дальности полета, даст более точные значения расхода топлива относительно ДМС, что, вероятно, повлияет и на результаты оценки справедливой цены СМС.

Предположим, что авиакомпания признает предлагаемый СМС экономически выгодным и решит создавать смешанный парк воздушных судов. С помощью предложенной модели оптимальной структуры парка самолетов может быть рассчитано минимально требуемое количество ВС средней и большой дальности для выбранного уровня регулярности рейсов. Используя данные для численности парка и для справедливой цены СМС, полученные в иллюстративных примерах, можно оценить долю стоимости всего парка, которую авиакомпания будет готова потратить на самолеты средней дальности при их покупке по справедливой цене. Интересно проанализировать, каким образом будет меняться эта доля, а также натуральная доля СМС в парке, в зависимости от дальности, на которую рассчитано ВС. Ниже приведен график стоимостной и натуральной емкостей рынка для СМС относительно полной стоимости парка при различных значениях расчетной дальности полета.

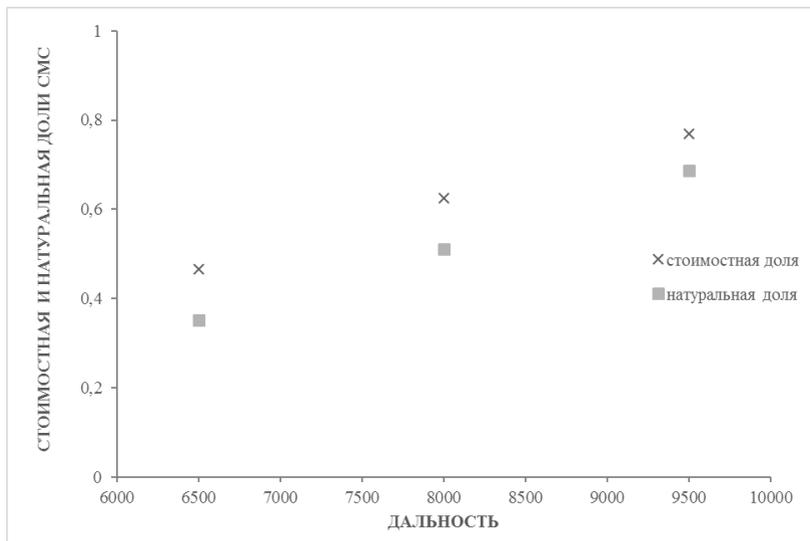


Рис. 6. График стоимостной и натуральной доли СМС в смешанном парке в зависимости от расчетной дальности полета СМС

Анализ графиков показывает, что потенциальный спрос авиакомпании на СМС напрямую зависит от выбора дальности воздушного судна. При дальности 6500 км имеем натуральную долю 46%; для дальности 8000 км – 62%; для дальности 9500 км – 77%. Разница между стоимостными и натуральными долями (от 8 до 13%, причем, в пользу стоимостной доли) объясняется полученным выше результатом: среднемагистральный самолет может быть дороже, чем дальнемагистральный.

Очевидно, что, чем выше дальность полета, тем более универсален самолет, тем выше натуральная и стоимостная доля рынка, которую он может занять. Однако из этого еще отнюдь не следует, что наиболее эффективным экономически будет выбор максимально возможной дальности полета, т.е., фактически, разработка ДМС. Прирост натурального и стоимостного объемов продаж, достигаемый благодаря повышению дальности полета, необходимо соотносить с потребным для повышения дальности приростом затрат на разработку и производство самолета,

а также увеличением времени выхода продукта на рынок. В работе исследуется экономическая эффективность самолета именно с точки зрения авиакомпании. Однако помимо потенциального спроса, в зависимости от дальности и эксплуатационных характеристик самолета будет меняться стоимость исследований и разработок для каждого выбранного типа ВС. Показательным примером, когда отличаются расходы на проекты одного поколения технологий, являются проекты российских авиадвигателей ПД-14 и ПД-35. Первый рассчитан на применение на узкофюзеляжных среднемагистральных самолетах, а второй предназначен для ШФС. На создание первого типа было потрачено около 70 млрд. руб., когда как сейчас, на начальном этапе разработки, второй проект уже оценивается в 180 млрд. рублей [9,10]. Этот случай подтверждает, что разные классы изделий требуют различных объемов исследований. Отсюда возникает необходимость в оценке потенциальных затрат на разработку самолета при повышении дальности, на которую он будет рассчитан, даже при сохранении технологического уровня. Увеличиваться в абсолютном смысле будет каждая часть себестоимости производства (материальные издержки, затраты на оплату труда), а также стоимость НИОКР. Поэтому выбор оптимальной дальности ВС, помимо прогноза стоимостной емкости рынка, следует делать еще и с учетом себестоимости разработки и производства. Эта себестоимость отражена в эксплуатационных расходах ВС в виде амортизационных затрат, и полученные ограничения по возможной цене продукта могут сильно повлиять на оптимальную дальность самолета. Одним из способов снижения затрат на разработку новой линейки ВС является совместное производство с КНР, емкость рынка которого позволит иметь уровень выпуска, значительно сокращающий себестоимость производства ВС [3].

При сдвиге даты начала серийного производства теряется часть рынка, которую будут занимать другие конкурирующие проекты. Сейчас в сегменте ШФС мировой рынок между собой делят Boeing (787 Dreamliner, производится с 2011 года) и Airbus (A350 XWB, производится с 2015 года). К моменту начала серийного выпуска российско-китайского ВС (после 2025 г.)

иностранные самолеты будут более привлекательны с точки зрения надежности, репутации и положительного опыта эксплуатации, что может быть определяющим фактором при выборе новых ВС при расширении или обновлении парка, даже несмотря на то, что отечественные судна будут экономически выгоднее «при прочих равных». Помимо этого, есть риски, что за это время конкурентами будет предложена прорывная технология, появление которой не позволит занять какой-либо сегмент рынка, кроме своего внутреннего. Поэтому если на повышение расчетной дальности полета нового ШФС требуется значительное время, этот фактор также необходимо принимать во внимание, выбирая оптимальную дальность полета перспективного ВС. Впрочем, партнеры России в указанном кооперационном проекте могут преследовать не столько коммерческие цели обеспечения максимальной рентабельности данного проекта, сколько стратегические цели приобретения технологических компетенций, позволяющих им строить ВС с большой дальностью полета. Возможно, этим и обусловлена позиция партнеров при уточнении требований к российско-китайскому ВС.

4. Выводы

Разработана модель, позволяющая оценить уровень приемлемой для авиакомпаний цены самолета в зависимости от его расчетной дальности полета и других технических характеристик при различных распределениях спроса на перевозки по дальности. В рамках модели было получено, что изменение доли рейсов на средние дальности в диапазоне 0,4-0,8 и уровня затрат на ТОиР в пределах 90-110% от базового уровня могут изменить справедливую цену самолета в пределах 23%, тогда как изменение затрат на авиатопливо в пределах 80% от базового уровня может увеличить значение приемлемой для авиакомпании цены почти в 2 раза. Приемлемые для авиакомпании цены самолета при повышении расчетной дальности полета с 6500 км до 8000 км почти не меняются, т.к. увеличение спроса на авиаперевозки полностью компенсируется уменьшением эксплуатационных издержек. Для дальности 9500 км наблюдается

некоторое снижение справедливой цены. Во всех трех рассмотренных случаях приемлемый уровень цены среднемагистрального самолета более чем в полтора раза превышает цену ДМС.

Оценены доли натуральной и стоимостной емкости рынка, которые могут быть заняты среднемагистральными широкофюзеляжными самолетами, в зависимости от их расчетной дальности полета. Анализ результатов показал, что при расчетной дальности 6500 км можно занять стоимостную долю рынка 46%, 62% при дальности 8000 км и 77% при дальности 9500 км. Натуральная доля рынка, полученная по модели СМО, уступает стоимостной на 8-13%.

Чтобы дать рекомендации по оптимальному уровню расчетной дальности полета ВС, необходимо провести комплексную оценку конкурентоспособности проекта с учетом прироста затрат на разработку и производство самолета с большей дальностью, а также увеличения длительности его создания.

Литература

1. ВАРЮХИНА Е.В., КЛОЧКОВ В.В. *Влияние «конкуренции стандартов» на конъюнктуру международных рынков промышленной продукции (на примере гражданского авиастроения)* // Материалы V международной конференции «Актуальные проблемы экономики и управления на предприятиях машиностроения, нефтяной и газовой промышленности в условиях инновационно-ориентированной экономики» (г. Пермь, 28 апреля 2015 г.). Пермь: ПНИПУ, 2013. С. 569-579.
2. КЛОЧКОВ В.В. *Управление инновационным развитием гражданского авиастроения* // М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 280 с.
3. КЛОЧКОВ В.В., КАРПОВ А.Е. *Анализ экономической эффективности кооперации России и КНР на рынке широкофюзеляжных пассажирских самолетов* // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2016. № 8. С. 17-31.

4. КОЛЕМАЕВ В.А., КАЛИНИНА В.Н. *Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник* / Под ред. В.А. Колемаева. // М. ИНФРА-М, 1997. - 302с.
5. <http://airspot.ru/news/ekonomika-i-finansy/boeing-netoropitsya-zapuskat-programmu-777x>
6. http://ar2016.aeroflot.ru/aeroflot/annual/2016/gb/Russian/pdf/annual_report.pdf
7. <http://expert.ru/expert/2015/38/dalnost-protiv-vmestimosti/>
8. <http://www.ato.ru/content/formirovanie-novoy-nishi-srednemagistralnye-shirokofyuzelyazhnye-samolety-standoviyatsya-vse>
9. <https://www.aviaport.ru/digest/2016/06/27/389799.html>
10. <https://www.aviaport.ru/news/2010/12/10/207245.html>
11. http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/market/current-market-outlook-2017/assets/downloads/2017-cmo-compressed_091917.pdf
12. http://www.planestats.com/bhsn_2017mar
13. http://www.planestats.com/bhsw_2017mar
14. <http://www.uacrussia.ru/ru/press-center/news/rossiya-i-kitay-podpisali-ryad-dokumentov-o-sozdanii-novogo-shirokofyuzelyazhnogo-samoleta>

OPTIMAL PLANNING OF THE STRUCTURE OF A MIXED AIRCRAFT FLEET ON THE BASIS OF THE QUEUEING THEORY

Klochkov Vladislav Valerievich, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Economic sciences (vlad_klochkov@mail.ru).

Karpov Artemiy Evgen'evich, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, student (fansy95@mipt.ru).

Abstract: This paper introduces a model based on queueing theory that allows estimating the acceptable for the airlines cost level of the average distance aircraft and its exploitation value, compensating the benefit from the versatility of the aircraft with high range. It

is expected to estimate the level of airline demand for aircraft in cases of mixed fleet, consisting of medium-haul and long-haul aircrafts and for a homogeneous fleet of high range aircrafts. In the framework of the model, it was found that the range distribution of transportation demand and costs level for maintenance and repair can change a fair aircraft price in the range of 20-25%, whereas the alteration in the cost of jet fuel may change the acceptable for airline aircraft value almost in 2 times. Taking into account the real distribution in range of the transportation market wide-body aircrafts with short and medium range may be in demand. Moreover, comparing with long-haul aircraft their lower versatility compensate lower operating costs.

Keywords: aviation industry, airline, international cooperation, range of aircraft, operating costs, cost market capacity.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...

*Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...*