УДК 338.27:338.28:338.33

JEL C65, L52, O32

DOI: 10.17213/2312-6469-2019-4-106-125

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОГО АВИАСТРОЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТОВ)

© *А.Е. Карпов*^{*}, *В.В. Клочков*^{**} 2019

^{*}*Национальный исследовательский центр «Институт
им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия*

^{**}*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
г. Москва, Россия*

В среднесрочной перспективе (через 10-15 лет) на новых магистральных воздушных судах возможно применение электрических гибридных силовых установок. Их внедрение, вероятно, будет сопровождаться ужесточением экологических норм в ведущих авиастроительных державах мира – вплоть до требования обеспечить нулевую эмиссию вредных веществ в зоне аэропорта. Такое требование, выполнимое лишь при условии перехода на электрические гибридные силовые установки, будет стимулировать инновационное развитие авиационной техники. Но на первых порах соответствующие ему воздушные суда, вероятно, даже будут уступать по экономическим показателям самолетам с газотурбинными двигателями. В работе представлен метод обоснования решения о разработке в России и освоении производства самолетов с электрической гибридной силовой установкой, чтобы удовлетворить перспективным экологическим требованиям ведущих зарубежных стран, при альтернативе: ограничиться развитием самолетов с газотурбинными двигателями и их использованием только на внутреннем рынке. В модельных расчетах получены оценки минимально необходимого спроса на российские воздушные суда с электрической гибридной силовой установкой, при котором целесообразны их разработка и производство.

Ключевые слова: магистральные самолеты, инновационные технологии, электрическая гибридная силовая установка, прогнозирование спроса, себестоимость эксплуатации, эффективность.

RUSSIAN AIRCRAFT INDUSTRY INNOVATIVE DEVELOPMENT DIRECTION CHOICE (ON EXAMPLE OF MAINLINE AIRCRAFT)

© *A.E. Karpov, V.V. Klochkov* 2019

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

*Institute of Control Science RAS, leading research fellow,
Moscow, Russia*

In the medium term (10-15 years), new mainline aircraft may use electric hybrid power plants. Their implementation is likely to be accompanied by stricter environmental standards in the leading aircraft-building countries of the world – up to the requirement to ensure zero emissions of harmful substances in the airport area. This requirement is feasible only if the transition to electric hybrid power plants. It will stimulate the innovative development of aviation technology. But at first, the aircraft corresponding to it will probably even be inferior in economic indicators to aircraft with gas turbine engines. The paper presents a method of justifying the decision to develop in Russia and master the production of aircraft with an electric hybrid power plant to meet the promising environmental requirements of leading foreign countries, with the alternative: to limit the development of aircraft with gas turbine engines and their use only in the domestic market. In the model calculations, estimates of the minimum required demand for Russian aircraft with an electric hybrid power plant, in which their development and production are appropriate, are obtained.

Key words: mainline aircraft, innovative technologies, electric hybrid power plant, demand forecasting, cost of operation, efficiency.

Введение

Одной из первостепенных целей технологического развития современной авиационной промышленности является снижение вклада гражданской авиации в изменение климата [1]. Данный тезис сформулирован в дорожной карте Международной организации воздушного транспорта, IATA Technology Roadmap 2013. Авиационная промышленность поставила перед собой ряд амбициозных задач по сокращению эмиссии на глобальном уровне:

- повышение топливной эффективности (т.е. удельного расхода топлива в расчете на пассажиро-километр) в среднем на 1,5% в год до 2020 года;
- снижение общих (суммарных) авиационных выбросов углекислого газа с 2020 года;
- сокращение чистых выбросов CO₂ на 50% к 2050 году по сравнению с уровнем 2005 года;
- снижение удельных (на пасс.-км) выбросов вырабатываемой при полете закиси азота на 80%, 84% и 90% к 2020, 2035 и 2050 годам соответственно по сравнению с данным показателем для ВС в 2000 году [2].

Как обосновано в работах [3, 4], ужесточение экологических норм является одним из главных инструментов конкурентной борьбы на рынках гражданской авиационной техники. Страны-лидеры в этой технологической гонке, пользуясь возможностями установления норм и стандартов в контролируемых ими «технологических зонах», т.е. регионах мира, признающих решения их авиационных властей, устанавливают барьеры для проникновения на эти рынки продукции конкурентов, не обладающих необходимыми технологиями. Так институциональные барьеры влияют на инновационное развитие технологий, и наоборот. Причем, именно достижение пределов улучшения технико-экономических характеристик, невоз-

возможность создания новых типов изделий, «прорывных» с экономической точки зрения, заставляет ведущих игроков мирового рынка прибегать к нерыночным мерам, лоббировать ужесточение экологических и др. норм – даже если их экологическая целесообразность неочевидна (подробнее см. [3]). Этими соображениями обосновывается актуальность разработки соответствующих технологий и в российском гражданском авиастроении. В самом деле, если ВС российского производства не будут удовлетворять передовым экологическим нормам, они не смогут эксплуатироваться на международных авиалиниях.

Основное технологическое препятствие при решении задачи снижения общей эмиссии – использование газотурбинных двигателей (ГТД) в силовой установке и известных ископаемых авиатоплив. Резервы сокращения расхода топлива ГТД почти исчерпаны, достигнутые результаты уже близки к теоретическим пределам. Сейчас разрабатываются новые технологические концепции магистральных воздушных судов (ВС), которые в основном направлены на увеличение степени электрификации самолетов и способны в среднесрочной перспективе внести весомый вклад в снижение выбросов в атмосферу. Одной из потенциальных возможностей является создание ВС с электрической гибридной силовой установкой (ЭГСУ). Здесь подразумевается, что электрическая энергия используется в сочетании, по меньшей мере, с одним дополнительным источником питания (обычно энергией топлива). За последние годы было предложено множество концепций для различных сегментов рынка магистральных ВС (см. [5, 6]).

В работе [7] исследовался потенциал использования ЭГСУ для ближне-среднемагистрального двухвентиляторного ВС (BHLTwin-Fan) с пассажироместимостью 180 чел. при различной проектной дальности полета, в расчете на ввод ВС в эксплуатацию к 2035 году. Рассматривается концепция с двумя двигателями, в которой в крейсерском полете электродвигатель вращает вентилятор, а взлет и посадка осуществляются с помощью ГТД. Произведенные оценки показали, что при удельной емкости аккумулятора 1,5 кВтч/кг можно сократить расход топлива за рейс на 20% при энергетических затратах, аналогичных современным газотурбинным самолетам. Однако использование электроаккумулятора сопровождается ощутимым увеличением максимальной взлетной массы самолета, это происходит из-за веса батареи и дополнительного электрического оборудования. Это нивелирует преимущества гибридно-электрической технологии при более низкой емкости аккумулятора или более высокой дальности полета ВС. В связи с этим подходящая максимальная дальность полета самолетов для оптимального использования такой концепции будет меньше, чем для современных изделий в сегменте ближне-среднемагистральных перевозок.

В работе [8] приведены результаты исследований по концепции самолета N3-X (пассажировместимость 300 чел.) с турбоэлектрической распределенной установкой, использующей несколько расположенных в разных местах двигателей с приводом от электродвигателей. Электродвигатели же потребляют энергию, которую производят газотурбинные электрогенераторы, размещенные на планере. Для оценки преимуществ такой концепции силовой установки был проведен системный анализ транспортной конфигурации гибридного ВС для определения энергетических затрат, уровня шума и эмиссии. Было произведено сравнение с широкофюзеляжным самолетом Boeing 777-200LR с турбовентиляторным двигателем GE90-110B при аналогичной полезной нагрузке, крейсерской скорости и дальности полета. Результаты показали, что возможно снижение энергетических затрат на 70-72% и выбросов закиси азота до 85%. Такая концепция силовой установки рассматривалась и в работе [9], но уже для пассажировместимости 150 чел. (ESAero).

Также предлагалась концепция [10], состоящая из двух двигателей, использующих стандартное керосиновое топливо, электрических генераторов, системы распределения электроэнергии, а также нескольких распределенных по самолету электрических вентиляторов. Принцип работы заключается в том, что первичная энергия обеспечивается двумя турбовинтовыми двигателями, работающими на керосине, которые подают мощность вала на два электрических генератора. Затем электрическая энергия распределяется по схемам преобразования мощности на электрические двигатели, которые вращают вентиляторы.

В то же время проводятся исследования роли электроаккумуляторов в ЭГСУ и их влияние на экологичность самолетов, например, для сегмента региональных ВС. В работе [11] проводится оценка полных эксплуатационных расходов (ПЭР) ВС в зависимости от уровня гибридизации силовой установки. На данный момент найденные конфигурации гибридных электрических самолетов, являющиеся конкурентоспособными по прямым расходам, не соответствуют целевым показателям по снижению эмиссии, и наоборот. Таким образом, возможное появление на рынке таких ВС для достижения задач по сокращению эмиссии, ввиду повышения эксплуатационных расходов новых ВС, негативно повлияет на показатель доступности авиаперевозок. Положительное влияние на рынок авиаперевозок может быть достигнуто только при технологическом развитии энергетического сектора и модификации характеристик электроаккумуляторов, в частности значительного улучшения их весового совершенства. Критическим фактором является время, необходимое для того, чтобы новые технологии созрели для их реализации в новых авиационных программах.

В долгосрочной перспективе для достижения амбициозной цели сокращения выбросов к 2050 году потребуются другие концепции воздуш-

ных судов и воздушного транспорта, скорее всего, соответствующие переходу к полностью электрическим ВС [12, 13, 14].

В работе [15] был предложен общий подход к экономическому обоснованию применения ЭГСУ на российских магистральных самолетах. На данном этапе для российского авиастроения это лишь возможность, реализация которой требует прикладных научных исследований, а также развития технологий в электротехнике, в области накопителей и преобразователей энергии, электрических машин. Однако ЭГСУ сразу, по факту своего внедрения могут снизить выбросы в атмосферу в зоне аэропорта практически до нуля. Это может стать категорическим требованием в странах-лидерах мирового гражданского авиастроения уже в обозримом будущем, в среднесрочной перспективе – через 10-15 лет, когда будут созданы работоспособные ЭГСУ для магистральных самолетов – пусть даже и уступающие по экономическим показателям силовым установкам с ГТД. Поэтому уже сейчас актуально обоснование критического для российского авиастроения выбора:

- стремиться ли создавать аналогичные ЭГСУ, чтобы удовлетворить перспективным экологическим нормам ведущих зарубежных стран;
- или ограничиться в среднесрочной перспективе лишь развитием самолетов с ГТД, которые не будут допущены к полетам на международных авиалиниях и останутся лишь ВС «для внутреннего пользования».

Другими словами, были выявлены следующие альтернативы инновационного развития российского авиастроения в среднесрочной перспективе в сегменте магистральных самолетов. Первая – за счет применения ЭГСУ удовлетворить перспективным зарубежным экологическим нормам и, теоретически, получить доступ на мировой рынок. Однако нет гарантии, что российские ВС с ЭГСУ смогут занять значительную долю мирового рынка¹, а затраты на необходимые исследования и разработки окупятся. Поэтому второй альтернативой является продолжение производства ВС с ГТД и их модернизация. В таком случае минимизируются затраты на технологическое развитие магистральных самолетов в среднесрочной перспективе, а основные расходы в этом сегменте направляются на долгосрочное улучшение магистрального воздушного транспорта путем перехода на «полностью электрический» самолет в последующих поколениях гражданских ВС (за горизонтом 2030-2035 гг.).

Решение следует принимать на основе экономико-математических моделей и расчетов. В работе [15] в общем виде был предложен методологический подход к обоснованию решения о разработке технологий для создания магистральных ВС с ЭГСУ в интересах российского авиастроения, при возможности отказа от развития ЭГСУ в пользу традиционных ВС с

¹ Широко известно, что современные российские ВС, удовлетворяющие нынешним и даже перспективным мировым нормам и прошедшие зарубежную сертификацию, все равно не пользуются массовым спросом на зарубежных рынках по ряду причин.

ГТД. Сам подход к моделированию похож на предложенный в работе [16], где решалась задача оценки эндогенной доли рынка, которую могут занять ВС, не удовлетворяющие более жестким зарубежным экологическим нормам.

В данной работе предполагается на базе подхода, предложенного в работе [15], разработать уже конкретный методологический инструментарий, в частности, получить конкретные расчетные формулы для оценки справедливой цены самолета с ГТД относительно ВС с ЭГСУ. Будет сформулирована модель производственных затрат и приведено конечное выражение для оценки минимально потребного спроса на российские ВС с ЭГСУ, при котором прибыль авиастроения будет выше, чем при производстве ВС с ГТД. Для реалистичного набора входных данных будут проведены модельные расчеты при нескольких сценариях изменения структуры затрат ВС при внедрении ЭГСУ, и описаны качественные результаты.

Экономико-математические методы обоснования выбора направления инновационного развития российских магистральных самолетов

Рассмотрим модель представительной авиакомпании, выполняющей, в среднем, λ рейсов в сутки. Среднюю продолжительность рейса – внутреннего или международного – обозначим $t_{\text{рейс}}$, ч. Тогда интенсивность обслуживания заявок на выполнение рейсов одним ВС можно выразить как $\mu = \frac{24}{t_{\text{рейс}}}$, рейсов в сутки. Эти параметры потоков случайных событий

позволяют, пользуясь методами теории массового обслуживания, определить потребную численность парка ВС N , при которой заявки на выполнение рейсов будут удовлетворяться с заданным качеством, измеряемым коэффициентом регулярности рейсов, т.е. долей заявок, выполняемых без задержек: $K_{\text{рег}} \geq K_{\text{ГТреб}}$. Определяемая таким путем численность парка ВС соответствует однородному парку, состоящему из «универсальных» ВС, способных выполнять как внутренние, так и международные рейсы – в данном случае, это самолеты с ЭГСУ. Обозначим среднюю выручку за рейс r , ден. ед./рейс (она не зависит от того, на каких самолетах рейс выполняется), а средние операционные затраты для самолета с ЭГСУ – $c^{\text{ЭГСУ}}$ ден. ед./рейс. Тогда, принимая цену самолета с ЭГСУ равной $P^{\text{ЭГСУ}}$, ден. ед., а нормативный срок службы любых ВС – T лет, выразим ожидаемую среднесуточную прибыль авиакомпании с однородным парком следующим образом:

$$\Pi_{\text{а/к}}^{\text{однор}} = \left(r - c^{\text{ЭГСУ}} \right) \cdot \lambda - \frac{N \cdot P^{\text{ЭГСУ}}}{365 \cdot T}.$$

Если же авиакомпания сформирует смешанный парк ВС из самолетов с ЭГСУ, способных выполнять любые рейсы, и самолетов с ГТД, кото-

рые могут выполнять лишь внутренние рейсы, доля которых в общем потоке λ составляет γ , тогда, рассматривая этот парк как две системы массового обслуживания (СМО), удовлетворяющие потоки заявок интенсивностью $(1-\gamma) \cdot \lambda$ и $\gamma \cdot \lambda$, соответственно, можно аналогичными методами оценить потребные численности самолетов с ЭГСУ и с ГТД, $N^{\text{ЭГСУ}}$ и $N^{\text{ГТД}}$, при которых качество удовлетворения заявок – коэффициент регулярности рейсов – для каждого вида рейсов будет не ниже требуемого: $K_{\text{рег}} \geq K_{\text{ГТреб}}$. Тогда, зная операционные издержки и цену самолета с ГТД, обозначаемые $c^{\text{ГТД}}$ и $P^{\text{ГТД}}$, можно оценить среднесуточную прибыль авиакомпании с таким смешанным парком:

$$\Pi_{\text{а/к}}^{\text{смеш}} = \left(r - c^{\text{ЭГСУ}} \right) \cdot (1-\gamma) \cdot \lambda + \left(r - c^{\text{ГТД}} \right) \cdot \gamma \cdot \lambda - \\ - \frac{N^{\text{ЭГСУ}} \cdot P^{\text{ЭГСУ}}}{365 \cdot T} - \frac{N^{\text{ГТД}} \cdot P^{\text{ГТД}}}{365 \cdot T}.$$

Приравнивая значения прибыли авиакомпании с однородным и смешанным парками, можно определить «справедливую» цену самолета с ГТД, с учетом скидки за то, что он не может выполнять часть рейсов. В работе [16] был проведен анализ влияния размера авиакомпании на спрос на самолеты «для внутреннего пользования» и показано, что это влияние весьма сильно. Для относительно малых авиакомпаний именно в силу случайных эффектов в системах массового обслуживания силён «эффект предпочтения универсальности», т.е. доля рынка самолетов, не удовлетворяющих более жестким нормам, будет существенно ниже γ . Напротив, для авиакомпаний с очень крупными парками, порядка сотен ВС, эта доля может приближаться к доле внутренних рейсов. Поэтому подобные расчеты следует провести для нескольких типовых представительных авиакомпаний, и усреднить результаты.

Справедливая цена на ВС с ГТД определяется равенством значений прибыли, в расчете на летный час имеем следующее выражение:

$$\left(\frac{r}{\lambda} - c_{\text{ТОиР}}^{\text{ЭГСУ}}(N) - c_{\text{топ}}^{\text{ЭГСУ}} - c_{\text{бат}}^{\text{ЭГСУ}} - c_{\text{проч}}^{\text{ЭГСУ}} \right) \cdot N_{\text{ср}} - c_{\text{амор}}^{\text{ЭГСУ}} \cdot N = \\ \left(\frac{r}{\lambda} - c_{\text{ТОиР}}^{\text{ГТД}}(N^{\text{ГТД}}) - c_{\text{топ}}^{\text{ГТД}} - c_{\text{проч}}^{\text{ГТД}} \right) \cdot N_{\text{ср}}^{\text{ГТД}} + \\ + \left(\frac{r}{\lambda} - c_{\text{ТОиР}}^{\text{ЭГСУ}}(N^{\text{ЭГСУ}}) - c_{\text{топ}}^{\text{ЭГСУ}} - c_{\text{бат}}^{\text{ЭГСУ}} - c_{\text{проч}}^{\text{ЭГСУ}} \right) \cdot N_{\text{ср}}^{\text{ЭГСУ}} - \\ - c_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}} \cdot N^{\text{ГТД}} - c_{\text{амор}}^{\text{ЭГСУ}} \cdot N^{\text{ЭГСУ}}.$$

Здесь N – оптимальный размер однородного или смешанного парка при заданном потоке заявок; $N_{\text{ср}}$ – среднее количество занятых самолетов в однородном или смешанном парке; $c_{\text{аморт}}$ – амортизационные отчисления,

приходящиеся на один л.ч. (в работе принимается как отношение цены самолета P к длительности его возможной эксплуатации T , выраженной в л.ч.); $c_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}}$ является искомой величиной; $c_{\text{ТОиР}}$ – средние затраты на техническое обслуживание и ремонт за л.ч.; $c_{\text{топ}}$ – топливные расходы за л.ч.; $c_{\text{бат}}$ – амортизация электро-аккумулятора за л.ч.; $c_{\text{проч}}$ – прочие расходы, на которые технические характеристики самолета оказывают косвенное влияние.

Себестоимость технического обслуживания и ремонта ВС зависит от количества самолетов в парке (которые мы получим при оценке потребной численности парка для выполнения заданной интенсивности поступления заявок на полеты в авиакомпанию). Принятая в качестве входных данных зависимость будет использоваться при расчетах справедливой для авиакомпаний стоимости ВС с ГТД. Также примем, что для каждого фиксированного размера парка издержки на ТОиР ВС с ГТД в θ раз меньше, чем аналогичные затраты для самолета с ЭГСУ.

Предполагается рассмотреть несколько сценариев для структуры операционных расходов ВС с ЭГСУ, которая выступает в модели в качестве входных данных. Варианты сценариев будут отличаться технологическим совершенством техники, определяющим топливные расходы, что отразится на структуре полных эксплуатационных издержек. Результаты оценки справедливой цены ВС с ГТД предполагается визуализировать для нескольких типов авиакомпаний в зависимости от доли внутренних рейсов в общем объеме перевозок, и далее получить совокупные прогнозные оценки спроса на данный тип ВС.

Целесообразность разработки и производства таких самолетов с точки зрения авиапроизводителей можно оценить, пользуясь финансовыми моделями авиастроительных проектов (с учетом специфики функций затрат в авиастроении, см., например, [17]). Зная функцию затрат на производство заданного количества изделий за жизненный цикл, можно оценить и прибыль российского авиастроения при выборе такой альтернативы. Если же будет принято решение «догонять» лидеров мирового гражданского самолетостроения, разрабатывая самолеты с ЭГСУ, это, очевидно, потребует гораздо больших затрат на исследования и разработки [15]. Здесь объемы продаж таких самолетов российского авиастроения являются наиболее неопределенным параметром модели. Поэтому предполагается оценить пороговое значение ожидаемых объемов продаж российских самолетов с ЭГСУ, нацеленных на удовлетворение перспективным зарубежным экологическим нормам, исходя из равенства прибыли российского авиастроения при выборе такой альтернативы и прибыли от продолжения развития самолетов с ГТД.

Представим подробнее слагаемые себестоимости производства в обоих случаях. Пусть производство единицы ВС с ГТД сопровождается

следующими издержками, заданными экзогенным образом:

$$C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) = C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot (\delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}} + \delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} + \delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}} + \delta_{\text{НИОКР}}^{\text{ГТД}}),$$

где $\delta_{\text{мат}}$ – доля материальных затрат (которые в авиастроении в основном возникают за счет закупки покупных комплектующих изделий); $\delta_{\text{фот}}$ – доля затрат на оплату труда; $\delta_{\text{аморт}}$ – амортизация основных фондов; $\delta_{\text{НИОКР}}$ – доля затрат на научные исследования и разработки.

При повышении выпуска продукции снижается трудоемкость производства за счет эффекта обучения. В работе [18] предложен метод оценки влияния выпуска на производительность труда *APL*, далее будет использоваться следующая зависимость, соответствующая темпу обучения 15%:

$$\frac{APL(Q_1)}{APL(Q_2)} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{0,23}.$$

Данное влияние пропорционально воздействует на оплату труда, также изменится и потребный объем основных производственных фондов, который определяет амортизационные отчисления. Таким образом, прибыль российского авиастроения можно представить в виде:

$$\Pi_{\text{АП}}^{\text{ГТД}} = P^{\text{ГТД}} \cdot N^{\text{ГТД}} - C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot (\delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}} \cdot N^{\text{ГТД}} + (\delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} + \delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}}) \cdot (N^{\text{ГТД}})^{0,77} + \delta_{\text{НИОКР}}^{\text{ГТД}}).$$

Пусть производство единицы ВС с ЭГСУ сопровождается издержками

$$C_{\text{произв}}^{\text{ЭГСУ}}(1) = C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot (\alpha \cdot \delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}} + \beta \cdot \delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} + \varphi \cdot \delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}} + \eta \cdot \delta_{\text{НИОКР}}^{\text{ГТД}}),$$

где $\alpha, \beta, \varphi, \eta$ – коэффициенты изменения статей расходов по сравнению с производством ВС с ГТД. Приобретение электрических аккумуляторов добавляем к материальным издержкам. Формула для прибыли в таком случае принимает следующий вид:

$$\Pi_{\text{АП}}^{\text{ЭГСУ}}(N^{\text{ЭГСУ}}) = N^{\text{ЭГСУ}} \cdot P^{\text{ЭГСУ}} - C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot (\alpha \cdot \delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}} \cdot N^{\text{ЭГСУ}} + \beta \cdot \delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} \cdot (N^{\text{ЭГСУ}})^{0,77} + \varphi \cdot \delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}} \cdot (N^{\text{ЭГСУ}})^{0,77} + \eta \cdot \delta_{\text{НИОКР}}^{\text{ГТД}}).$$

Отсюда, приравнявая выражения для прибыли авиастроительных предприятий, можем оценить пороговое значение выпуска ВС с ЭГСУ, при которых производство $N^{\text{ЭГСУ}}$ таких самолетов будет для отечественного авиастроения эффективнее выпуска ВС с ГТД:

$$N^{\text{ЭГСУ}} \cdot (P^{\text{ЭГСУ}} - C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot \alpha \cdot \delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}}) - (N^{\text{ЭГСУ}})^{0,77} \cdot C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot (\beta \cdot \delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} + \varphi \cdot \delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}}) - P^{\text{ГТД}} \cdot N^{\text{ГТД}} + C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}}(1) \cdot (\delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}} \cdot N^{\text{ГТД}} + (\delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} + \delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}}) \cdot (N^{\text{ГТД}})^{0,77} + (1 - \eta) \cdot \delta_{\text{НИОКР}}^{\text{ГТД}}) = 0.$$

Параметрические расчеты и обоснование выбора направления инновационного развития российских магистральных самолетов

С помощью предложенных методов получим оценки спроса на ВС с ГТД в зависимости от технико-экономических характеристик самолета с ЭГСУ, а также доли внутренних рейсов в общем объеме перевозок. Также

оценим минимально необходимые объемы выпуска ВС с ЭГСУ, при которых их производство будет экономически выгоднее для авиационной отрасли, чем производство ВС с ГТД для части внутреннего российского рынка.

В иллюстративных расчетах примем следующий набор исходных данных, см. табл. 1.

Долю внутренних авиаперевозок российского рынка будем рассматривать как параметр. Для определения реалистичного диапазона значений этого показателя обратимся к его динамике в последние годы, см. табл. 2.

По данным, приведенным в таблице 2, доля внутренних перевозок в России в последние годы принимает значения от 46% до 64%. В иллюстративных расчетах примем более широкий и симметричный диапазон: $\gamma \in [0,3; 0,7]$. Ниже, в табл. 3, приведены результаты оценок оптимальных размеров парков ВС.

Теперь, зная оптимальные размеры парков, определим значения справедливой стоимости ВС с ГТД. Напомним, что предполагается производить оценки в долях относительно цены самолета с ЭГСУ. Рассмотрим следующие три сценария для структуры операционных расходов для одного ВС с ЭГСУ, в работе они принимаются в долях относительно выручки ВС. Сценарии характеризуются различными топливными расходами, здесь рассмотрены варианты, когда данные затраты у самолетов с ГТД относительно топливных издержек ВС с ЭГСУ составляют долю 1,2; 1,05 и 0,9 соответственно. Саму выручку для всех типов ВС в однородном и смешанном парках примем одинаковой и равной единице.

Таблица 1

Исходные данные для модельных расчетов

Размер авиакомпании	Случай 1	Случай 2	Случай 3
λ , заявок в сутки	200	80	15
τ , часов	9	9	9
K_{regmin} , %	97	97	97

Таблица 2

Динамика российского рынка авиаперевозок

Год	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
Перевезено, млн пасс.	105,1	88,6	92,1	93,2	84,6	74	64,1	56,9
Международные	42,5	32,2	39,5	46,9	45,3	38,6	31,4	27,7
Внутренние	62,6	56,4	52,6	46,3	39,3	35,4	32,7	29,2
Доля внутренних перевозок	0,596	0,637	0,571	0,497	0,464	0,478	0,51	0,513

Таблица 3

Результаты расчетов оптимальных численностей парков ВС

γ	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
Случай 1					
Однородный парк	93	93	93	93	93
ВС с ГТД	67	59	50	41	32
ВС с ЭГСУ	32	41	50	59	67
Случай 2					
Однородный парк	41	41	41	41	41
ГТД	31	27	23	19	15
ЭГСУ	15	19	23	27	31
Случай 3					
Однородный парк	11	11	11	11	11
ГТД	8	8	7	6	6
ЭГСУ	6	6	7	8	8

Таблица 4

Сценарии изменения структуры операционных расходов ВС при внедрении ЭГСУ

Характеристики ЭГСУ	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3
r	1	1	1
$c_{\text{ТОиР}}$	0,22	0,21	0,2
$c_{\text{топ}}$	0,25	0,29	0,335
$c_{\text{аморт}}$	0,15	0,14	0,13
$c_{\text{бат}}$	0,05	0,05	0,045
$c_{\text{проч}}$	0,33	0,31	0,29

Как уже отмечалось выше, для каждого из полученных в табл. 3 парков будут различаться расходы на техническое обслуживание и ремонт ВС, предположим, что относительные изменения описываются с помощью следующей зависимости:

$$\frac{c_{\text{ТОиР}}(N_1)}{c_{\text{ТОиР}}(N_2)} = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{0,17} \cdot 1$$

Также принимаем в модели, что прочие расходы равны для обоих типов самолетов, а для одного ВС с ГТД затраты на ТОиР будут на 10% меньше, чем при эксплуатации самолета с ЭГСУ.

¹ Получено при обработке данных о себестоимости технического обслуживания и ремонта самолетов А320 и оценке ее зависимости от численности парка воздушных судов на основе теории массового обслуживания в магистерской диссертации Карпова А.Е. «Прогнозирование спроса на новую продукцию авиастроения в условиях структурных изменений и нестабильной экономической конъюнктуры» (МФТИ, 2018 г.).

Ниже, на рис. 1-3, приведены полученные для трех сценариев структуры эксплуатационных расходов ВС с ЭГСУ справедливые цены (выраженные в виде доли амортизации ВС в общей выручке) ВС с ГТД в зависимости от доли внутренних рейсов на российском рынке авиаперевозок.

Рис. 1. Уровни приемлемых амортизационных затрат (для трех масштабов авиакомпаний по интенсивности поступления заявок λ) в зависимости от доли внутренних рейсов на российском рынке авиаперевозок. Сценарий 1

Рис. 2. Уровни приемлемых амортизационных затрат (для трех масштабов авиакомпаний по интенсивности поступления заявок λ) в зависимости от доли внутренних рейсов на российском рынке авиаперевозок. Сценарий 2

Рис. 3. Уровни приемлемых амортизационных затрат (для трех масштабов авиакомпаний по интенсивности поступления заявок λ) в зависимости от доли внутренних рейсов на российском рынке авиаперевозок. Сценарий 3

Горизонтальной линией на графике отмечены относительные (по отношению к выручке за л.ч.) амортизационные затраты для ВС с ЭГСУ за летный час, принятые в модели.

Анализ графиков подтверждает, что эффект масштаба парков дает возможность крупным авиакомпаниям рентабельно эксплуатировать самолеты «для внутреннего пользования» (т.е. с ГТД) при более высокой цене. В первом сценарии авиапроизводителям придется сделать серьезную скидку средним и малым авиакомпаниям, чтобы они были заинтересованы в эксплуатации данного типа ВС. В тоже время в третьем сценарии даже самые маленькие авиаперевозчики будут готовы заплатить за ВС с ГТД (поскольку они существенно экономичнее) больше, чем за ВС с ЭГСУ. Таким образом, имеет место сильное влияние стоимости потребляемой энергии ВС с ЭГСУ (в сумме по топливным расходам и энергии аккумулятора). Результаты можно также интерпретировать следующим образом: допустим, что лизинговые компании установили тариф на самолеты на уровне 0,1 (в долях от средней выручки за л.ч.), тогда ВС с ГТД в первом сценарии будут готовы приобрести только крупные авиакомпании, во втором сценарии – крупные и средние авиаперевозчики, а в третьем – все авиакомпании.

Чтобы далее оценить себестоимость производства, необходимо задать спрос на самолеты с ГТД. Объединенная авиастроительная корпорация, ОАК, прогнозирует рост российского рынка авиаперевозок в 2,5 раза до 2036 года [19], компании Airbus, Rolls-Royce и Siemens совместно планируют к этому моменту уже создать рентабельный прототип самолета с

ЭГСУ и начать его серийное производство [20]. Но массовое распространение продукта и замещение ВС старого поколения потребует дополнительного времени. Здесь мы рассматриваем длительный горизонт планирования (более 25 лет), когда проблематично оценить даже приближенные значения входных параметров модели. В иллюстративных расчетах будем использовать текущее распределение численности парка узкофюзеляжных самолетов (УФС) по российским авиакомпаниям. К крупным авиаперевозчикам отнесем группы «Аэрофлот» и «S7» (61,5% рынка), к средним – авиакомпании «Уральские авиалинии» и «ЮТэйр» (около 18,5% рынка), остальные авиакомпании в сумме имеют в распоряжении около 20% от использующихся УФС на российском рынке авиаперевозок. Пусть к моменту выхода ВС с ЭГСУ на мировой рынок потребность российского сегмента в самолетах вырастет и составит 1500 единиц (т.е. суммарное расширение парков составит около 1000 ВС по сравнению с 2017 годом). Пусть доля внутренних рейсов на российском рынке авиаперевозок составит 0,6, тогда, пользуясь полученными соотношениями потребных количеств ВС в парке для разных типов авиакомпаний (см. табл. 3), определим спрос на ВС с ГТД (также в табл. 5 приведены оценки справедливой цены ВС с ГТД, полученные на рис. 1-3).

В иллюстративном расчете примем следующие значения параметров модели себестоимости производства при значительном выпуске продукции (от 100 единиц авиатехники): $\delta_{\text{НИОКР}}^{\text{ГТД}} = 5\%$; $\delta_{\text{аморт}}^{\text{ГТД}} = 3\%$; $\delta_{\text{мат}}^{\text{ГТД}} = 82\%$, $\delta_{\text{фот}}^{\text{ГТД}} = 13\%$; Такие значения соответствуют производственно-экономическим показателям зарубежной авиационной промышленности [21,22]. Также для дальнейших расчетов примем следующие входные данные для ВС с ЭГСУ, см. табл. 6.

Таблица 5

Спрос на ВС с ГТД (результаты модельных расчетов)

Группа авиакомпаний	1	2	3
Доля внутренних рейсов	0,6	0,6	0,6
Потребность в расширении парка, ед.	615	185	200
Доля ГТД (из табл. 3)	0,59	0,585	0,57
Спрос на ВС с ГТД, ед.	363	108	114
Справедливая цена сценарий 1 (доля от ВС с ЭГСУ)	0,76	0,62	0,48
Справедливая цена сценарий 2 (доля от ВС с ЭГСУ)	1,02	0,87	0,73
Справедливая цена сценарий 3 (доля от ВС с ЭГСУ)	1,37	1,22	1,08
$C_{\text{произв}}^{\text{ГТД}} (1)$, млн долл.	1000	1000	1000

Таблица 6

Исходные данные модели себестоимости ВС с ЭГСУ

Сценарий	1	2	3
Цена ВС с ЭГСУ, млн долл.	150	135	120
Коэффициент изменения материальных затрат α	1,3	1,3	1,3
Коэффициент изменения затрат на НИОКР β	10	7,5	5
Коэффициент изменения затрат на ФОТ ϕ	1,25	1,25	1,25
Коэффициент изменения амортизационных затрат η	1,25	1,25	1,25
Доля топливных затрат при эксплуатации относительно ВС с ГТД	0,8	0,95	1,1

Данные сценарии, как и в расчетах выше, в первую очередь отличаются топливными расходами ВС с ЭГСУ относительно самолетов с ГТД. Первому сценарию соответствует самая высокая цена, т.к. авиакомпании готовы платить более высокую цену за ВС с низким расходом топлива, а также ввиду более высоких затрат на НИОКР.

Ниже на рис. 4-6 приведены результаты расчетов прибыли предприятий авиастроения. Оценим потребный выпуск ВС с ЭГСУ. Прибыль от выпуска ВС с ГТД может принимать различные значения, так как рассматривается три случая спроса на данные ВС и соответствующие справедливые цены. В сценарии 1, ввиду низких эксплуатационных расходов самолетов с ЭГСУ за счет снижения затрат на потребляемую энергию, авиакомпании будут приобретать смешанные парки только при сильно сниженных ценах на ВС с ГТД.

Рис. 4. Прибыль авиастроения при производстве ВС с ЭГСУ или ГТД в зависимости от объемов выпуска (сценарий 1)

При продаже самолетов с ГТД только крупным авиакомпаниям (группа 1) необходимо продать 450 ед. ВС с ЭГСУ для того, чтобы превысить прибыль российского авиастроения по сравнению с производством ВС с ГТД. При продаже крупным и средним авиаперевозчикам (группы 1 и 2) объемы выпуска должны составить 309 самолета, а при продаже самолетов с ГТД всем авиакомпаниям достаточно будет и 58 ед. ВС с ЭГСУ. Снижение потребного объема выпуска обусловлено тем, что приемлемые цены для крупных авиакомпаний значительно выше, чем у авиаперевозчиков с маленькими размерами парков (см. рис. 1). Причем, справедливые цены самолетов с ГТД («для внутреннего пользования») в третьем случае настолько низки, что даже при объеме выпуска ВС с ГТД, равном 585 ед. выручка от их продажи не сможет покрыть хотя бы производственные издержки. Спрос на ВС на внутреннем российском рынке УФС в данном примере задан на уровне 1000 ед., поэтому можно сказать, что пороговые значения объемов выпуска ВС с ЭГСУ, при которых целесообразно производство самолетов данного типа, могут быть достигнуты даже без выхода отечественной продукции на внешние рынки.

По сравнению со сценарием 1 справедливые цены ВС с ГТД увеличились (см. рис. 2), поэтому прибыль при продаже ВС с ГТД для 1 и 2 групп приблизилась к варианту с продажей только 1 группе авиакомпаний. При продаже самолетов с ГТД только крупным авиакомпаниям (группа 1) необходимо продать 850 ед.

Рис. 5. Прибыль авиастроения при производстве ВС с ЭГСУ или ГТД в зависимости от объемов выпуска (сценарий 2)

ВС с ЭГСУ для того, чтобы превзойти прибыль российского авиастроения по сравнению с производством ВС с ГТД. Такое значение превышает совокупный спрос этих авиакомпаний (615 ед.), поэтому для его достижения нужно реализовать часть ВС с ЭГСУ на внешних рынках. При продаже крупным и средним авиаперевозчикам (группы 1 и 2) объемы выпуска должны составить 756 самолетов, а при продаже самолетов ГТД всем авиакомпаниям достаточно будет и 543 ед. ВС с ЭГСУ. В этих случаях достаточно ориентироваться только на внутренний российский рынок авиаперевозок. Здесь справедливая цена ВС с ГТД даже выше, чем ВС с ЭГСУ. При продаже самолетов с ГТД только крупным авиакомпаниям (группа 1) необходимо продать 1962 ед. ВС с ЭГСУ для того, чтобы превзойти прибыль российского авиастроения по сравнению с производством ВС с ГТД. При продаже крупным и средним авиаперевозчикам (группы 1 и 2) объемы выпуска должны составить 2004 самолета, а при продаже самолетов ГТД всем авиакомпаниям нужно 1888 ед. ВС с ЭГСУ. На последнем рисунке видим, что изменение справедливых цен привело к тому, что прибыль от продаж ВС с ГТД 1 и 2 группам авиакомпаний стала выше, чем при продаже ВС только 1 группе. Для достижения полученных в расчетах пороговых значений объемов выпуска ВС с ЭГСУ, при которых целесообразно производство самолетов данного типа, необходимо иметь очень высокий по меркам российского авиастроения спрос (800-1600 ед.) на внешних рынках, что вряд ли реалистично.

Рис. 6. Прибыль авиастроения при производстве ВС с ЭГСУ или ГТД в зависимости от объемов выпуска (сценарий 3)

Заключение

Таким образом, предложен метод, позволяющий обосновать принятие решения о разработке и создании ВС с ЭГСУ и последующего освоения их производства, чтобы удовлетворить перспективным экологическим нормам ведущих зарубежных стран. Альтернатива – в среднесрочной перспективе ограничиться развитием самолетов с ГТД, которые будут использоваться только на внутреннем рынке, а на международных рейсах будут эксплуатироваться импортные ВС.

При технологической возможности создания в среднесрочной перспективе ВС с ЭГСУ, сокращающего энергетические затраты при эксплуатации на 20% по сравнению с ВС с ГТД (для принятых в работе расчетных исходных данных) целесообразно самостоятельное производство самолетов с ЭГСУ даже в расчете только на внутренний российский рынок. При технологической возможности создания ВС с ЭГСУ, способного уменьшить энергетические затраты при эксплуатации на 5% по сравнению с ВС с ГТД для достижения необходимого объема спроса помимо поставок на внутренний российский рынок может потребоваться выход на внешние рынки с продажей от 100 до 300 самолетов. При технологической возможности создания ВС с ЭГСУ, увеличивающей энергетические затраты при эксплуатации на 10% по сравнению с ВС с ГТД, целесообразно производство ВС с ЭГСУ только при гарантированно успешном выходе на внешние рынки и экспорте более 800 ед. авиатехники. Высокой емкости рынка можно добиться с помощью международной кооперации со странами, развивающими свое авиастроение и имеющими высокую емкость внутреннего рынка авиаперевозок (например, КНР, см. [23]). Эти качественные выводы справедливы именно для принятых в работе исходных данных. При других исходных данных о параметрах перспективных технологий выводы могут сильно измениться, но расчеты можно проводить, пользуясь предложенными моделями. Для определения реализуемых сценариев и последующего получения конкретных прогнозных оценок далее необходимо проводить анализ возможностей гражданского авиастроения (Форсайт предложения), оценку достижимых характеристик ВС с ЭГСУ со стороны производителей авиационной техники.

Литература

1. International Air Transport Association. IATA Technology roadmap 2013, 4th edition, 2013.
2. Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE), Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA)-Volume 1, Brussels, 2012.
3. Клинский Б., Назаренко Ю. К вопросу об антропогенном изменении климата, и о проблемах с Монреальским и Киотским протоколами // Двигатель. 2005. № 6.
4. Ключков В.В., Гусманов Т.М. Экологические стандарты как инструмент стимулирования спроса на продукцию авиационной промышленности // Маркетинг в России и за рубежом. 2007. № 3. – С. 39-45.

5. M.K. Bradley, C.K. Droney, Subsonic ultra green aircraft research: Phase I final report. Huntington Beach, California, 2011.
6. P. Miller, Potential propulsion solutions for hybrid-electric aircraft, Disruptive green propulsion technologies conference, Institute of Mechanical Engineers, London, 2014.
7. C. Pornet, S. Kaiser, A.T. Isikveren, M. Hornung, Integrated fuel–battery hybrid for a narrow-body sized transport aircraft, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 86, 2014, pp. 568-574.
8. H.D. Kim, J.L. Felder, M.T. Tong, J.J. Berton, W.J. Haller, Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* 86, 2014, pp. 558-561.
9. B. Schiltgen, A. Gibson, M. Green, J. Freeman, More electric aircraft: tube and wing hybrid electric distributed propulsion with superconducting and conventional electric machines, SAE Technical Paper 2013-01-2306, 2013.
10. H. Smith, Airframe integration for an LH2 hybrid-electric propulsion system, *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 86, 2014, pp. 562-567.
11. Hoelzen J. et al. Conceptual design of operation strategies for hybrid electric aircraft // *Energies* 2018, 11, 217.
12. A.T. Isikveren, A. Seitz, P.C. Vratny, C. Pornet, K.O. Plötner, M. Hornung, Conceptual studies of universally-electric systems architectures suitable for transport aircraft, *DeutscherLuft und RaumfahrtKongress, DLRK, Berlin*, 2012.
13. S. Stückl, J. Van Toor, H. Lobentanzer, VOLTAIR - The all-electric propulsion concept platform – a vision for atmospheric friendly flight, in: *Proceedings of the 28th International Congress of The Aeronautical Sciences, ICAS, Brisbane*, 2012.
14. A.M. Stoll, J. Bevirt, M.D. Moore, W.J. Fredericks, N.K. Borer, Drag reduction through distributed electric propulsion, *Aviation Technology, Integration and Operations Conference*, Atlanta, Georgia, 2014.
15. Ключков В.В., Карпов А.Е. Альтернативы технологического развития магистральных самолетов и национальные интересы России // *Друкерровский вестник*. 2018. № 6. – С. 129-143.
16. Варюхина Е.В., Ключков В.В. Стандарты и нормы как инструменты протекционизма: проблема определения границ рынков (на примере гражданского авиастроения) // *Журнал экономической теории*. 2016. № 2. – С. 57-71.
17. Ключков В.В. Управление инновационным развитием гражданского авиастроения. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 280 с.
18. Ключков В.В., Карпов А.Е. Анализ влияния обменного курса на экономическую эффективность локализации высокотехнологичного производства (на примере авиастроения) // *Аудит и финансовый анализ*. 2016. № 4. – С. 102-110.
19. Обзор рынка 2017-2036, ОАК, 2017.
20. <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/11/30/743657-elektrosamolet>.
21. Aircraft Manufacturing: 1997, 2002, 2007, 2012 // in: 1997; 2002, 2007, 2012 Economic Census. Manufacturing. Industry series / Статистический сборник – U.S. Census Bureau, 1999; 2004, 2009, 2014.
22. Aircraft Manufacturing tables // Statistics for Industry Groups and Industries / Статистический сборник – U.S. Census Bureau, 2015, 2016.
23. Ключков 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.

*Поступила в редакцию**15.09.2019*

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

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

Клочков Владислав Валерьевич – доктор экономических наук, кандидат технических наук, заместитель генерального директора Национального исследовательского центра «Институт им. Н.Е. Жуковского», г. Жуковский; ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия.

Klochkov Vladislav V. – Doctor of Economic Science, Candidate of Engineering Science National research center «Institute named after N.E.Zhukovsky», deputy general director, Zhukovsky; Institute of Control Science RAS, leading research fellow, Moscow, Russia.

Россия, 140180, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1
1, Zhukovsky str., 140180, Zhukovsky, Russia
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65
65, str. Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russia
e-mail: karpovae@nrczh.ru, fansy95@mail.ru
e-mail: vlad_klochkov@mail.ru