

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАССАЖИРСКИХ САМОЛЕТОВ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В СОСТАВЕ ПАРКА

Павел Владимирович ЖУРАВЛЕВ родился в 1982 г. в городе Москве. Ассистент МАИ. Основные научные интересы — в области внешнего проектирования и эффективности авиационных комплексов математического моделирования. Автор шести научных работ. E-mail: pvzhuravlev@mail.ru

Pavel V. ZHURAVLEV was born in 1982 in Moscow. He is an Assistant Professor at the MAI. His research scientific interests are in the field of pre-design and effectiveness of complex aviation systems and mathematical modeling. He has published 6 technical papers. E-mail: pvzhuravlev@mail.ru

В статье дается обоснование необходимости учета неопределенностей при решении задач проектирования пассажирских самолетов в составе оптимального (рационального) парка, приводится классификация основных видов неопределенностей, выделяются виды неопределенностей, оказывающие наибольшее влияние на результаты решения задачи проектирования пассажирских самолетов в составе парка, а также приводятся методы учета выделенных неопределенностей.

The article substantiates the necessity of taking into account the uncertainties during the process of design of passenger airplane as a part of an optimal (reasonable) fleet. Main uncertainties are sorted into groups. After that the uncertainties with most influence on the design are selected. The appropriate methods for taking the chosen uncertainties into consideration are proposed.

Ключевые слова: проектирование, внешнее проектирование, пассажирский самолет, парк, эффективность, математическое моделирование, неопределенность.

Key words: design, pre-design, passenger airplane, aircraft fleet, effectiveness, mathematical modeling, uncertainty.

В условиях рыночной экономики, диктующей свои правила проектировщикам и производителям авиатехники важным результатом процесса создания новых летательных аппаратов (ЛА) является заключение сделки об их продаже конечному потребителю (эксплуатанту). Соответственно, разработчики ЛА находятся в ситуации, когда на всех этапах закладки, разработки, проектирования и производства ЛА им приходится исходить из потребностей и условий, в которых создаваемый ЛА будет эксплуатироваться (применяться). Таким образом, возникает необходимость детального учета всех возможных вариантов условий функциониро-

вания проектируемого ЛА. В частности, необходимо помимо оценки эффективности осуществления перевозок при выполнении рейсов с количеством пассажиров, равным максимально возможной загрузке ЛА рассматриваемого типа, также учитывать эффективность применения ЛА с загрузкой меньше максимально возможной, а также на дальностях меньших, чем максимальная дальность для рассматриваемой загрузки [1]. Для проведения подобных оценок, и в том числе для учета различных условий эксплуатации проектируемого ЛА, необходимо использовать прогнозы спроса на авиационные пассажирские перевозки. На основе этих прогнозов

можно определить те сочетания условий, в которых будут функционировать проектируемые ЛА. При этом необходимо отметить, что прогнозы по объемам спроса на авиаперевозки обычно имеют размерность пассажиропотока [пасс. × км] [2, 3]. Это связано с тем, что величина пассажиропотока отражает объем транспортной работы, который зависит от общего объема производимого ВВП в стране или регионе. Таким образом, используя прогноз изменения величины ВВП, можно оценить ожидаемое изменение объемов транспортной работы различных видов транспорта, а значит, и объемов пассажиропотока [3]. При этом в соответствующих прогнозах обычно приводится распределение пассажиропотока по дальности перевозок или подразумевается сохранение процентного соотношения (формы) этого распределения, либо приводятся прогнозы по изменению средних дальностей перевозок [4, 5].

Естественно, помимо самого прогноза, крайне важна правильная его интерпретация и соответствие моделей расчетов, применяемых в ходе исследований, реальным условиям эксплуатации ЛА. В качестве иллюстрации этого тезиса рассмотрим пример изменения затрат на осуществление перевозок в течение заданного периода на линиях заданной транспортной сети. Для большей наглядности транспортная сеть была задана таким образом, что шаг изменения дальности полета на линиях был принят постоянным, как и шаг изменения загрузки рейса. При этом для того чтобы проследить зависимость изменения общих затрат на выполнение перевозок в течение заданного периода времени от загрузки и дальности рейса, пассажиропоток в течение рассматриваемого периода времени для всех линий был принят одинаковым.

Затраты на рейс растут с увеличением дальности полета и числа пассажиров, перевозимых в одном рейсе (загрузки рейса). Из рис. 1 видно, что затраты на один рейс не стремятся к нулю с уменьшением дальности полета и загрузки рейса (как это принималось в расчетных моделях в большинстве предыдущих исследований (например, [1, 6]).

Это связано с тем, что модель, используемая для расчета затрат на рейс (f_{ij}), выполняемый самолетом i -го типа на j -й линии, учитывает как переменную составляющую затрат (затраты, пропорциональные дальности L_j и загрузке $N_{\text{пас } j}$ рейса), так и ее постоянную часть (затраты, не зависящие от дальности и загрузки рейса, а определяемые самим фактом выполнения рейса). Среди постоянных затрат, пропорциональных количеству рейсов, значительную долю составляют сборы за взлет и посадку, а также расходы на предполетное и послеполет-

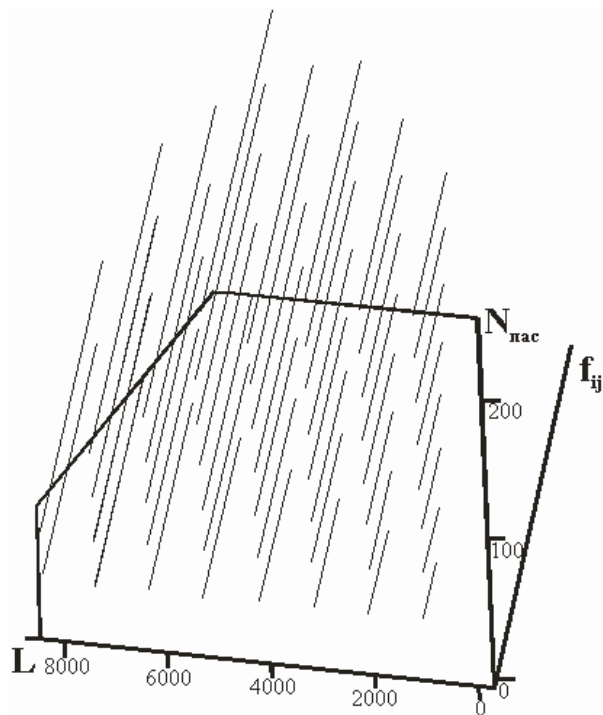


Рис. 1. Затраты на один рейс в зависимости от дальности полета на линии и загрузки рейса

ное обслуживание (в том числе пассажиров и багажа). При этом подобное разделение затрат представляется необходимым с точки зрения приближенности расчетных моделей к реальным условиям функционирования авиакомпании. Действительно, в реальной деятельности авиакомпании, как и любому другому предприятию, при выполнении каждого отдельного рейса приходится совершать некоторые затраты, не зависящие от дальности и загрузки рейса.

На рис. 1 также видно, что при увеличении дальности полета (дальности рейса) (при постоянной загрузке рейса) расходы на выполнение одного рейса также увеличиваются. При увеличении загрузки рейса (при постоянной дальности рейса) затраты на рейс также возрастают.

На больших дальностях доля затрат, связанных с увеличением дальности полета (в частности, доля затрат на топливо), значительно превышает по объемам долю затрат, связанных с увеличением количества пассажиров. Поэтому затраты на рейс растут быстрее при увеличении дальности, чем при увеличении загрузки рейса (при учете изменения дальности и загрузки рейса в процентах). Естественно, соотношение этих двух групп затрат изменяется в зависимости от дальности рейса, но необходимо иметь в виду, что при увеличении дальности затраты на топливо могут достигать 40 и более процентов от общих затрат на рейс. Если на линиях с относительно небольшой дальностью затраты,

связанные с пассажирами, могут превышать затраты, связанные с дальностью полета (иногда в полтора раза), то при увеличении дальности ситуация меняется на прямо противоположную. Например, для современного среднемагистрального самолета с максимальной пассажироместимостью, равной 250 пассажиров: увеличение загрузки на 25% при неизменной дальности приводит к изменению отношения затрат, связанных с пассажирами, к затратам, связанным с дальностью, на несколько процентов, а увеличение дальности на 5% изменяет это соотношение в соответствующую сторону на 20%.

Также представляет интерес зависимость суммарных затрат за рассматриваемый период (например, за год) на осуществление перевозок на заданной авиалинии от дальности полета на ней и значения загрузки (при одинаковом значении суммарного пассажиропотока (пасс. × км) за заданный период времени). Из приведенного на рис. 2 графика видно, что затраты на осуществление перевозок в течение года увеличиваются с уменьшением загрузки и дальности рейса. Этот феномен объясняется тем, что количество рейсов на каждой j -й линии $n_{\text{рейс } j}$ рассчитывается исходя из объемов суммарного пассажиропотока G_j , который перевозится авиакомпанией на j -й линии, деленного на произведение загрузки рейса $N_{\text{пас } j}$ на дальность рейсов L_j на j -й линии:

$$n_{\text{рейс } j} = \frac{G_j}{N_{\text{пас } j} \times L_j}. \quad (1)$$

С ростом дальности рейса L_j (при фиксированной загрузке рейса $N_{\text{пас } j}$) и с ростом загрузки рей-

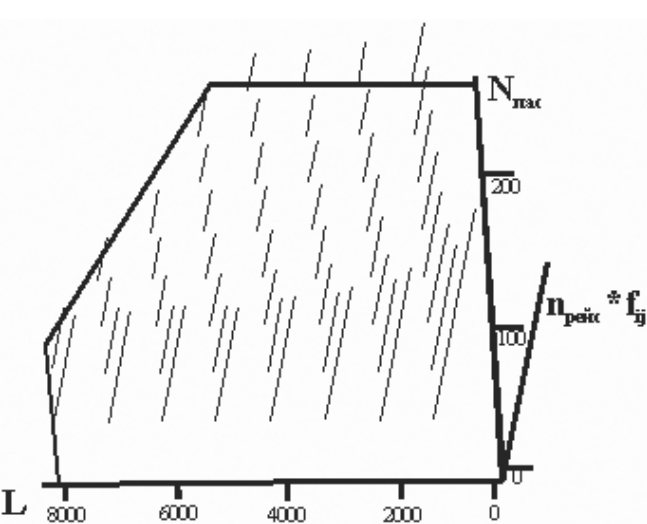


Рис. 2. Затраты на осуществление перевозок в течение заданного периода времени (например, года) на заданной авиалинии в зависимости от дальности полета и загрузки рейса (годовой пассажиропоток G [пасс. × км] на всех линиях одинаковый)

са $N_{\text{пас } j}$ (при фиксированной дальности рейса L_j) количество рейсов на j -й линии $n_{\text{рейс } j}$ будет уменьшаться. А это значит, что будет уменьшаться доля суммарных годовых затрат на j -й линии, пропорциональная годовому числу рейсов на j -й линии.

ЛА функционирует в составе парка вместе с ЛА других типов, как конкурируя с ними на линиях за возможность осуществления перевозок (исходя из того, какой из типов обеспечивает минимум расходов на линии), так и осуществляя взаимные замены с типами на линиях в случаях различных неполадок, сбоев и т.п. Таким образом, необходимо оценивать функционирование ЛА заданного типа в рамках парка, выполняющего перевозки на заданной сети авиалиний. В общем виде задачу формирования парка пассажирских самолетов можно представить как оптимизационную задачу, имеющую следующую постановку [1].

Информация о спросе на авиационные перевозки в рассматриваемом регионе (на совокупности авиалиний) используется в качестве исходных данных. Для решения парковой задачи исходные данные по спросу, сделанные в соответствующих прогнозах, обычно преобразуются и задаются в виде множества (дискретной совокупности) авиалиний

$X = \{x_j\}$, общее количество которых равно J . Каждая авиалиния $\{x_j\}$, входящая в указанное множество X , имеет порядковый номер-индекс j ($j = 1, \dots, J$). Множество авиалиний X также часто условно называется «транспортной сетью». Каждая j -я авиалиния описывается следующим набором характеристик:

$$\{x_j\} = \{G_j, N_{\text{пас } j}, L_j\}, \quad (2)$$

где G_j — пассажиропоток на j -й авиалинии за определенный период времени (например, за один год) (пасс. × км);

$N_{\text{пас } j}$ — количество пассажиров, которое перевозится на j -й авиалинии за один рейс (загрузка на j -й линии);

L_j — дальность полета на j -й авиалинии.

Каждая j -я авиалиния, задаваемая в качестве элемента набора исходных данных для решения задачи транспортной сети, формируется как совокупность рейсов на реальных авиалиниях, имеющих близкие значения (в пределах отклонения $\pm 5\%$ от агрегированного значения) как загрузки, так и дальности полета на линии. Таким образом, реальные рейсы, совершенные по одному и тому же реальному маршруту с различным количеством пассажиров на борту, могут быть в ходе агрегирования (пре-

образования) отнесены к различным авиалиниям транспортной сети x_j .

Для решения задачи формирования оптимального парка рассматривается и решается три типа иерархически связанных между собой задач, в которых используются три соответствующих иерархически связанных между собой критерия:

1. Задача оптимального распределения множества авиалиний между конкурирующими типами самолетов в парке. Процесс решения данной задачи во многом может быть сведен к определению областей специализации применения самолетов D_i ($i = 1, \dots, I$). Процедура состоит в закреплении каждой j -й авиалинии за тем i -м типом самолета, который обеспечивает выполнение рейса на этой j -й авиалинии с минимальными затратами f_{ij} .

2. Задача оптимизации параметров (обликов) самолетов i -го типа и определения их потребного числа из условия минимума суммарных затрат FD_i , необходимых для выполнения перевозок в области специализации D_i .

3. Задача выбора оптимального количества и набора типов самолетов в парке I , которые позволяют выполнять авиaperезвозки на заданном множестве авиалиний X с наименьшими суммарными затратами для всего парка F .

Таким образом, критериальная функция, используемая для определения состава оптимального парка, принимает следующий вид, в котором в формализованном виде отражены все три вышеуказанные задачи:

$$F(X, \bar{A}) = \min_A F(X, A) = \min_I \sum_{i=1}^I \min_{y_i \in Y} \min_{\{D_i\}} \sum_{x_j \in D_i} f_{ij}(x_j, y_i), \quad (3)$$

где $A = \{y_i\}$ — парк пассажирских самолетов, состоящий из I типов; \bar{A} — оптимальный парк пассажирских самолетов; \bar{y}_i — вектор оптимизируемых параметров самолета i -го типа ($i = 1, \dots, I$).

В ходе создания нового типа ЛА подобный анализ может производиться исключительно на основе имеющихся прогнозов, которые описывают спрос на момент начала производства и эксплуатации создаваемого ЛА.

Так, например, в последних прогнозах по объемам гражданских пассажирских перевозок фирм *Боинг* и *Эрбас* принят рост объемов перевозок около 5% в год, определены с точностью до единиц прогнозы на количество воздушных судов, которые

планируется производить и поставлять авиакомпаниям в течение ближайших 20 и более лет. Аналогичный детерминированный подход реализован в Стратегии развития гражданской авиации России до 2030 г.

Вместе с тем в деятельности авиатранспортной отрасли существует множество неопределенных факторов, которые в значительной степени влияют на спрос на воздушные перевозки, а следовательно, и на облики соответствующих ЛА и состав парка ЛА, используемого для удовлетворения этого спроса.

Эти факторы можно сгруппировать по следующим категориям: экономические; политико-экономические; технико-технологические.

Среди неопределенных факторов, относящихся к категории экономических (общеекономических), можно выделить следующие:

— основные факторы, на которые в первую очередь и непосредственно влияет общеэкономическая ситуация и ее изменение. В первую очередь, к этим факторам относится величина спроса на авиaperезвозки, его распределение и изменение. Кроме того, следует выделить уровень конкуренции между авиаперевозчиками на рынке, определяемый количеством авиакомпаний-конкурентов;

— второстепенные факторы, на которые общеэкономическая ситуация влияет в меньшей степени: цены на топливо, рабочую силу, закупаемые запасные части, самолеты, расценки работ и т.п.

Все вышеперечисленные факторы варьируются со временем и, несмотря на порой относительно невысокую скорость изменения, могут в итоге изменять свои значения значительно и, соответственно, оказывать сильное влияние на изменение будущих условий функционирования создаваемой авиационной техники, а значит, и на состав прогнозируемого парка ЛА.

Среди неопределенных политико-экономических факторов в первую очередь следует отметить следующие:

— общая тарифная политика, которую проводит государство или собственники в отношении установления уровней тарифов в аэропортах, схемы, порядка и правил оплаты аэропортовых сборов;

— правила, законы и политика выдачи авиакомпаниям лицензий на осуществление перевозок на соответствующих авиалиниях (а также осуществление прилетов и вылетов в соответствующие аэропорты);

— общая политика по налогам и сборам;

— политика, связанная с порядком и правилами осуществления инвестиций в инфраструктуру (в первую очередь, в аэропорты и системы УВД);

— общее влияние на экономический климат в стране через политико-экономические факторы (регулирование цен, темпов инфляции и т.п.).

Технико-технологические неопределенные факторы вынуждают авиакомпанию вносить изменения в нормальный режим работы и расписания полетов, в частности в расписание назначения самолетов на рейсы. Поскольку количество типов самолетов в парке и число самолетов каждого типа ограничено, а также в силу разнообразных экономических, организационных, политико-правовых ограничений и особенностей функционирования авиатранспортных компаний и их альянсов производятся замены на рейсах самолетов одних, изначально выбранных типов на другие — неоптимальные. Изменения расписаний и назначения на выполнение рейса того типа, который изначально не был для этого предназначен, приводят к необходимости функционирования создаваемого ЛА в условиях, далеких от оптимальных. Естественно, учет более широкого диапазона условий применения проектируемого ЛА (в том числе включая отмеченные выше неоптимальные условия эксплуатации) в ходе его разработки повышает его конкурентоспособность и делает его лучше приспособленным для длительной эксплуатации в будущем. Среди подобных факторов (причин) в первую очередь стоит отметить:

- поломки и отказы самолетов, в результате которых происходят задержки рейсов;
- внеплановые осмотры и ремонты;
- сбои в функционировании служб аэропорта;
- болезнь экипажей.

Воздействие факторов неопределенности может привести к значительным изменениям условий и результатов эксплуатации ЛА, как это имело место в 2001 г. в результате террористических действий в Вашингтоне, которые привели к ужесточению мер безопасности и увеличению затрат на ее обеспечение, или в условиях финансового кризиса в 2008—2009 гг., который, как и события 11 сентября 2001 г., привел к существенному спаду авиаперевозок и банкротству ряда авиакомпаний.

Таким образом, видно, что при формировании облика перспективных ЛА и состава авиационных парков должны учитываться неопределенности, которые влияют на условия их эксплуатации. Для учета факторов неопределенности оптимизацию обликов ЛА и состава парка необходимо осуществлять с использованием методов теории вероятностей.

К сожалению, в настоящее время отсутствует необходимое количество статистических данных, недостаточно изучены законы распределения случайных событий в авиатранспортных задачах, зна-

ние которых позволит существенно снизить риски, повысив степень обоснованности решений по определению обликов перспективных воздушных судов и составов парков, с учетом влияния изменяющихся условий их функционирования.

Однако подходы, учитывающие неопределенности условий функционирования ЛА, давно и успешно используются при формировании обликов авиационных комплексов (АК) и состава парков военной авиации. В ходе решения учитывается, что создаваемые АК должны обеспечивать выполнение стоящих перед ними задач в условиях противодействия противника, которые рассматриваются как неизвестные либо как наихудшие для оперирующей стороны [7]. При этом определяются вероятности выполнения задач и обеспечивается устойчивость полученных решений относительно облика АК и парка, состоящего из этих АК, к различным вариантам воздействий, связанных с изменяющимися неопределенными факторами (путем проверки результатов функционирования выбранного варианта парка и обликов, входящих в него АК, при варьировании значений неопределенных факторов).

Учесть неопределенность всех вышеуказанных факторов не представляется возможным. Поэтому необходимо выделить факторы неопределенности, которые в первую очередь и в наибольшей степени влияют на процесс решения поставленной задачи и его результаты.

Среди таких факторов в первую очередь логично было бы назвать фактор неопределенности спроса. Если этот фактор соотнести с формальной постановкой задачи формирования парка, то можно говорить о неопределенности конфигурации транспортной сети в течение рассматриваемого периода времени (или к заданному моменту времени). Процесс формирования облика ЛА, а также весь процесс формирования парка определяется спросом на пассажирские авиаперевозки, в связи с этим влияние данной неопределенности на результаты решения соответствующих задач очевидно.

Как видно на рис. 3, многие прогнозы по сути своей уже подразумевают неопределенность результатов (в том числе и относительно реализации прогнозных значений). В связи с этим в большом количестве прогнозов спроса на пассажирские авиаперевозки дается так называемый «диапазон точности» (который проиллюстрирован на рис. 3). В данном диапазоне показаны три вида оценки: пессимистическая, реалистическая и оптимистическая. Таким образом, организация, делающая прогноз, указывает на наличие неопределенности спроса. Логично, что для учета неопределенности спроса на

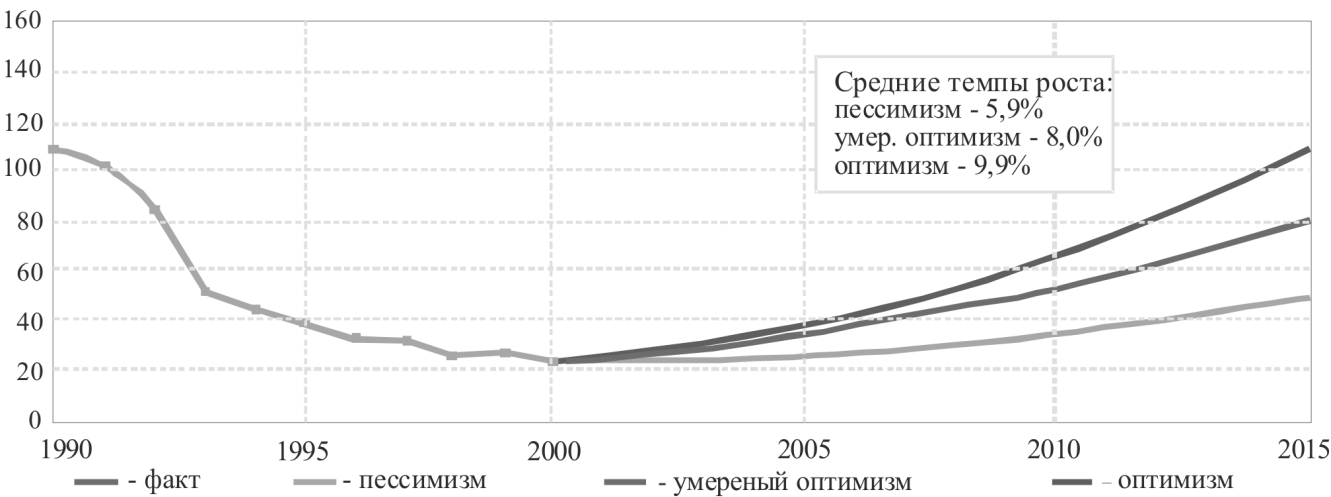


Рис. 3. Пример учета неопределенностей спроса на пассажироперевозки. Прогноз изменения объемов пассажироперевозок, представленный ГосНИИ ГА [2]

авиаперевозки имеет смысл проверять полученное в ходе оптимизации состава парка решение на устойчивость к изменению прогнозных значений спроса (конфигурации сети и характеристик линий). Можно также порекомендовать проводить подобное исследование, основываясь на оптимистических и пессимистических прогнозных оценках спроса, полученных от соответствующих организаций.

Необходимо отметить, что объемы перевозок стабильно росли в течение ряда последних лет и при этом сохранялся достаточно постоянный характер их распределения по дальностям полета. При этом наблюдались существенные «пики» объемов на дальностях полета 2000—2500 км, 3000—3500 км, 5000—5500 км и около 7000 км (для внешних линий), 1000—1500 км, 3000—3500 км и 6000—6500 км (для внутренних линий).

Раньше для удовлетворения указанного спроса использовались пять основных «классических» типов пассажирских самолетов, имеющих следующие максимальные дальности полета с максимальным числом пассажиров:

- местные — около 500 км;
- региональные — 1500—2000 км;
- ближнемагистральные — около 3000 км;
- среднемагистральные — около 5000 км;
- дальнемагистральные — более 7000 км.

Параметры и характеристики самолетов каждого «классического» типа оптимизировались, исходя из условий полета с определенным максимальным числом пассажиров (равным максимальной пассажироплощадности типа) (относительно небольшое варьирование максимальной пассажироплощадности принималось в расчет лишь в отдельных случаях, если также проводилась разработка ряда (се-

мейства) различных модификаций базовой модели) в сравнительно узком диапазоне дальностей полета.

Однако пики объемов пассажирских авиаперевозок по дальности полета и числу пассажиров в рейсе, хотя и не очень быстро, но меняются. Наличие подобных изменений порождает необходимость более полного учета изменения значений потребной дальности полета и загрузки рейса при оптимизации параметров и характеристик (облика) перспективных пассажирских самолетов и расширяет диапазон принимаемых в расчет значений этих величин. Необходимость учета этих изменений также связана с тем, что в ходе реальной деятельности авиакомпаний необходимо обеспечивать взаимозаменяемость самолетов близких размерностей при минимальном увеличении суммарных затрат на перевозку. В связи со всем вышеперечисленным к настоящему времени сформировалось понятие набора «смежных» типов самолетов, объединенных в соответствующие «семейства» и имеющих следующие максимальные дальности полета с максимальными пассажироплощадностями:

- регионально-ближнемагистральные — 1500—3000 км;
- ближнесреднемагистральные — 3000—5000 км;
- среднедальнемагистральные — более 5000 км.

При этом для каждого типа самолета обычно имеется две-три модификации (варианта) с разными дальностями и пассажироплощадностями, которые разрабатываются (а в последнее время возможность их разработки закладывается и учитывается еще на этапе проектирования базового варианта самолета) при выполнении условия максимальной унификации.

Таким образом, видно, что необходимость учета неопределенности спроса приводит к изменению принимаемых решений относительно состава (создаваемого) парка. Изменение решений приводит к переходу от парка с большим числом узкоспециализированных типов к парку с меньшим числом более универсальных типов. Однако подобный переход неоднозначно отражается на количестве рейсов, которые приходится выполнять самолетами «неоптимальных» типов, т.е. самолетами, в области специализации которых изначально не попадают соответствующие авиалинии. Можно утверждать, что вопрос определения процента рейсов, выполняемых самолетами неоптимальных типов, в случае размытия множеств требует дополнительной проработки.

Для интегрального учета влияния вышеуказанных факторов неопределенности и описания изменений принимаемых решений относительно обликов создаваемых ЛА и формируемых из них парков можно ввести понятие «замена выполняющего рейс оптимального типа самолета (который должен быть назначен на рейс, исходя из минимального уровня затрат на этот рейс) на неоптимальный».

Поскольку, как уже было показано выше, существует множество факторов, определяющих необходимость замены одних типов самолетов (оптимальных) другими (неоптимальными), имеет смысл рассматривать некие средние показатели, характеризующие данный феномен. Для формального представления подобной тенденции в рамках постановки задачи формирования парка вводится понятие так называемой «размытой» области специализации D_i самолета i -го типа. На границах «размытой» области специализации D_i часть рейсов на соответствующих авиалиниях выполняется не только исходно выбранными самолетами оптимального i -го типа, но и другими, неоптимальными в области специализации D_i типами самолетов. Обычно в таких случаях замена производится с помощью назначения самолетов одного из близких к оптимальному типов, т.е. самолетов типов, области специализации которых примыкают к области специализации D_i .

Итак, поскольку на спрос на пассажирские перевозки и назначение на конкретные рейсы самолетов того или иного типа, как уже было отмечено выше, влияет множество разнообразных случайных факторов, можно утверждать, что величина загрузки рейса имеет вероятностный характер. Это утверждение подтверждается практикой. Поскольку набор влияющих на величину загрузки факторов весьма обширен и их значительное число является независимым, то логично было бы согласно приня-

тым в теории вероятностей канонам предположить, что значения загрузки самолетов в ходе выполнения рейсов в течение их эксплуатации изменяются от рейса к рейсу и распределены по нормальному закону.

Математическое ожидание (МО) загрузки самолетов i -го типа $M_{\text{пас } i}$ равно значению средней загрузки рейса, совершаемого самолетом этого типа $\bar{N}_{\text{пас } i}$ (средней загрузке самолета i -го типа, средней загрузке i -го типа):

$$M_{\text{пас } i} = \bar{N}_{\text{пас } i}. \quad (4)$$

При этом само значение средней загрузки самолета i -го типа, вообще говоря, может быть разным для разных типов самолетов. В отечественной статистике, описывающей итоги деятельности структур воздушного транспорта, обычно приводятся данные по средней загрузке для всего самолетного парка.

Нормальное распределение значений случайной величины характеризуется не только МО, но и средним квадратическим отклонением (СКО, σ), показывающим, в какую область возле значения МО случайной величины попадают ее значения в большинстве случаев реализации событий. Область, в которую попадает почти 100% значений распределенной по нормальному закону величины, составляет $3 \text{ СКО } (\pm 3 \sigma)$. Очевидно, что, поскольку МО значения загрузки в рассматриваемом случае совпадает со средней загрузкой самолета i -го типа

$\bar{N}_{\text{пас } i}$, область $(+3 \sigma)$, в которую попадают все значения загрузок рейса, превышающие среднюю загрузку самолета i -го типа $\bar{N}_{\text{пас } i}$, простирается от значения средней загрузки самолета i -го типа $\bar{N}_{\text{пас } i}$ до значения максимальной пассажировместимости самолета i -го типа $N_{\text{пас } i}^{\text{max}}$:

$$3\sigma = N_{\text{пас } i}^{\text{max}} - \bar{N}_{\text{пас } i}. \quad (5)$$

Если отложить такое же расстояние от значения средней загрузки самолета i -го типа $\bar{N}_{\text{пас } i}$ вниз, получится недостающая часть области (-3σ) .

При этом необходимо учитывать, что значение средней загрузки самолета i -го типа $\bar{N}_{\text{пас } i}$ рассчитывается в авиакомпаниях для каждой дальности полета отдельно, исходя из (в процентах от) значения максимального количества пассажиров, кото-

рое может перевозить i -й рассматриваемый тип самолета на рассматриваемую дальность (с учетом ограничений по весу коммерческой нагрузки, обусловленных необходимостью наличия дополнительного топлива в баках). Таким образом, линия значений среднего числа пассажиров в одном рейсе самолета i -го типа (средних загрузок самолета i -го типа), нанесенная на диаграмму его транспортных возможностей, повторяет по форме верхнюю границу области, очерчиваемой данной диаграммой (рис. 4).

Поскольку при формировании области специализации типа авиалинии могут попасть в различные области диаграммы транспортных возможностей самолета, то, очевидно, часть их может попасть в области, значения загрузки одного рейса в которых для рассматриваемого типа будут крайне редки. Логично было бы предположить, что пассажиропоток с таких линий должен перераспределяться в первую очередь, и доля перераспределенного с них потока должна быть самой большой. Естественно, при этом необходимо учитывать положение j -й авиалинии не только относительно значения средней загрузки самолета i -го типа (предварительно было установлено, что j -я авиалиния принадлежит области специализации самолета i -го

типа), но и относительно значения средней загрузки самолета $(i+1)$ - или $(i-1)$ -го типа, на который планируется осуществлять перераспределение пассажиропотока.

Общий алгоритм перераспределения пассажиропотоков на j -й авиалинии с самолета i -го типа на самолет $(i+1)$ -го (меньшего) и/или $(i-1)$ -го (большего) типа выглядит следующим образом.

1. Определяется, в область специализации какого i -го типа самолета (D_i) входит данная рассматриваемая j -я авиалиния:

$$D_i = \left\{ \begin{array}{l} x_j / f(x_j, y_i) \leq f(x_j, y_k); \\ \forall k \neq i, x_j \in d(y_i), x_j \in d(y_k), \end{array} \right\} \quad (6)$$

где $d(y_i)$ и $d(y_k)$ — области достижимых заданий самолетов i -го и k -го типов (области, в которых самолеты соответствующих типов способны по своим техническим характеристикам осуществлять перевозки на авиалиниях).

2. Рассматривается, на какие типы самолетов $(i+1)$, $(i-1)$, $(i+2)$, $(i-2)$,... с j -й авиалинии требуется перераспределить пассажиропоток G_j (значения порядкового индекса типов самолетов возрастают, начиная с типа самолета с самой большой пассажи-

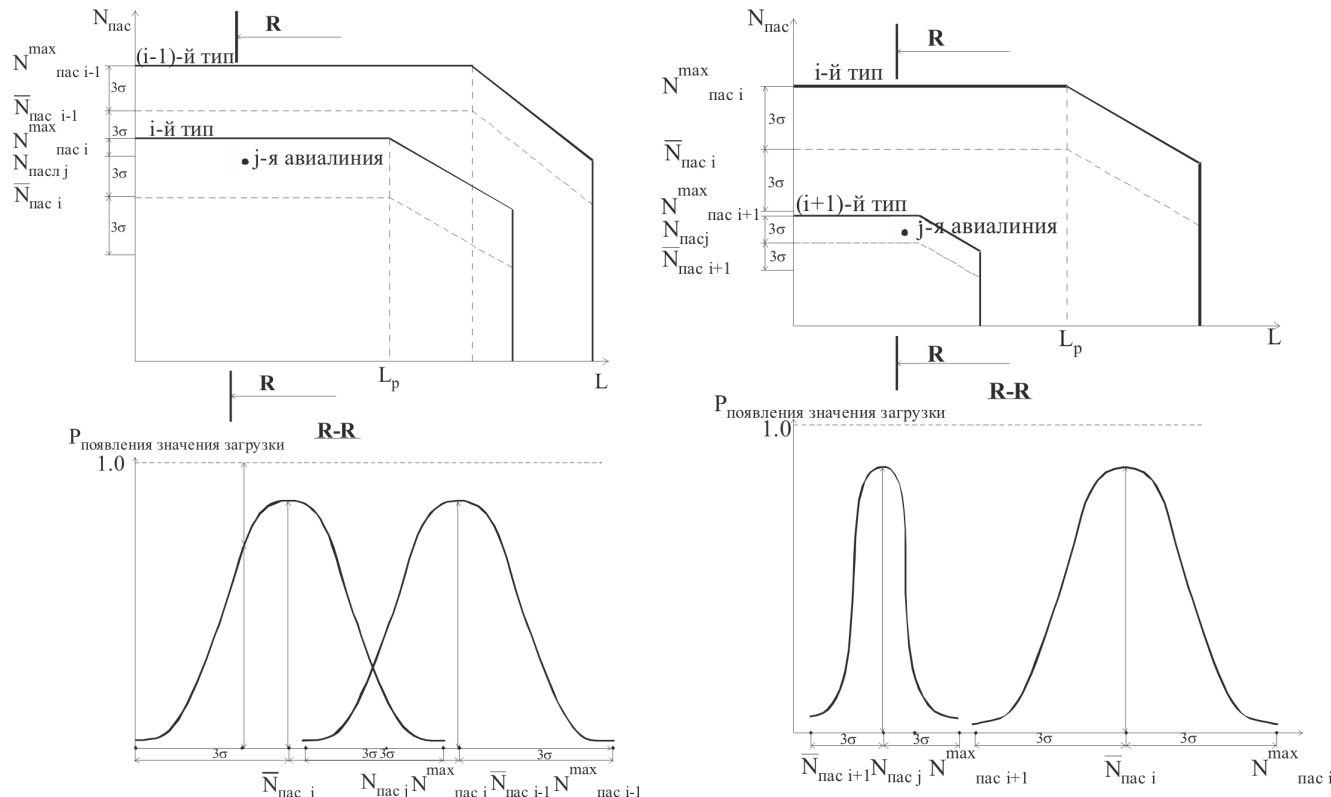


Рис. 4. Перераспределение потока на линиях с i -го типа на $(i-1)$ -й и $(i+1)$ -й. Распределение плотности вероятности возникновения загрузок для рассматриваемого типа самолета и перераспределение потока на линиях с i -го типа на $(i-1)$ -й и $(i+1)$ -й

совместимостью). Среди них могут быть типы самолетов со значением максимальной пассажировместимости как больше, чем у i -го типа (большой тип) ($N_{\text{пас}_{i-1}}^{\text{max}} > N_{\text{пас}_i}^{\text{max}}$), так и меньше (меньший тип) ($N_{\text{пас}_{i+1}}^{\text{max}} < N_{\text{пас}_i}^{\text{max}}$). В обоих случаях (перераспределение пассажиропотока с i -го типа самолета на $(i-1)$ -й с большей пассажировместимостью или на $(i+1)$ -й с меньшей пассажировместимостью), загрузка рейса на j -й авиалинии $N_{\text{пас}_j}$, заданная в исходных данных, должна лежать в пределах $\pm 3\sigma$ от математического ожидания значения загрузки типа, на который планируется осуществлять перераспределение, т.е.

$$(\bar{N}_{\text{пас}_{i-1}} + 3\sigma < N_{\text{пас}_j} < \bar{N}_{\text{пас}_{i-1}} - 3\sigma)$$

или

$$(\bar{N}_{\text{пас}_{i+1}} + 3\sigma < N_{\text{пас}_j} < \bar{N}_{\text{пас}_{i+1}} - 3\sigma).$$

3. Затем производится расчет объема пассажиропотока, который необходимо перераспределить на данной j -й авиалинии с самолета i -го типа на самолеты других типов. Для этого сначала рассчитываются вероятности возникновения значений загрузок равных значению загрузки на j -й линии для типов, на которые планируется осуществлять перераспределение (например, $P_{i+1}(N_{\text{пас}_j})$ или $P_{i-1}(N_{\text{пас}_j})$). После этого рассчитываются значения перераспределенного пассажиропотока ($G_{\text{пер } j, i-1}$ или $G_{\text{пер } j, i+1}$) по следующим формулам:

$$G_{\text{пер } j, i-1} = \frac{P_{i-1}(N_{\text{пас}_j}) \cdot G_j}{\sum_{k=i_1}^{i_2} P_k(N_{\text{пас}_j})}$$

или

$$G_{\text{пер } j, i+1} = \frac{P_{i+1}(N_{\text{пас}_j}) \cdot G_j}{\sum_{k=i_1}^{i_2} P_k(N_{\text{пас}_j}),} \quad (8)$$

где $\sum_{k=i_1}^{i_2} P_k(N_{\text{пас}_j})$ — сумма вероятностей появления значения загрузки соответствующего значению загрузки на j -й авиалинии для всех типов самолетов, на которые планируется осуществлять перераспределение (начиная с типа с номером i_1 и заканчивая типом с номером i_2).

Выводы

Вопросы эксплуатации и, в частности, неопределенностей в ходе эксплуатации создаваемых типов ЛА должны приниматься в расчет в ходе всего процесса создания ЛА, особенно на этапе предварительных исследований (внешнего проектирования). Также необходимо рассматривать процесс функционирования ЛА в рамках сложной системы, в которую он должен входить — парка ЛА, совершающего перевозки на заданной сети авиалиний. В связи с этим был выявлен набор неопределенных факторов, которые в наиболее значительной степени влияют на режим функционирования и состав используемого авиакомпаниями парка ЛА.

Разработаны методики оценки и учета указанных факторов неопределенности при определении оптимальных обликов разрабатываемых ЛА и формировании из них оптимального (рационального) парка. Эти методики базируются на понятии «размытые области специализации» типов пассажирских самолетов и «оценка устойчивости решений по отношению к изменению спроса».

При этом необходимо учитывать, что ввиду большого количества неопределенностей, оказывающих сильное воздействие на процесс функционирования будущего ЛА в составе парка, необходимо использовать модели, которые по уровню агрегирования, точности и чувствительности соответствовали бы уровню решаемых задач и давали бы возможность учесть соответствующие факторы. Например, в ходе решения задачи формирования облика АК с учетом условий его будущего функционирования в парке возможно использовать модели высокой точности, при этом задавая отдельно для каждой итерации процесса оптимизации начальную точку и диапазон варьирования переменных (обликовых параметров). Также для решения этой же задачи можно использовать значительно более упрощенные модели для поиска решения оптимизационной задачи в более широком диапазоне значений переменных либо для отыскания начальной точки, которая впоследствии будет использоваться моделями более высокого уровня точности. Наконец, можно использовать возможность построения поверхности, отражающей зависимость значений критериальной функции от значений переменных с помощью просчета ключевых (например, заданных с известным шагом) точек и использованием метода интерполяции.

Применение предлагаемых методик в процессе проектирования пассажирских ЛА приводит к увеличению общих затрат парка на осуществление перевозок на всей заданной транспортной сети на

8—10 и более процентов по сравнению с расчетом без учета «размытости» областей специализации типов. Этот результат подтверждает факт существенного влияния факторов неопределенности на состав оптимального (рационального) парка как с точки зрения числа типов, так и их перечня, особенно в условиях существенного изменения спроса на перевозку и значительного уменьшения коэффициента средней загрузки самолетов в парке.

Библиографический список

1. Брусов В.С., Баранов С.К. Оптимальное проектирование летательных аппаратов. Многоцелевой подход. — М.: Машиностроение, 1989.
2. Климов В., Павлов Ал., Павлов Ан., Гайсин Ф. Авиационный бизнес. — М.: Московский Рабочий, 2002.

3. Бодронов С.Д., Ковальков Ю.А. Экономика и организация авиастроения в России. — СПб.: Изд-во «Санкт-Петербург», 2001.

4. China Market Outlook for Civil Aircraft 2000 — 2019. AVIC I. Market Research Department, China Institute of Aeronautic Systems Engineering, 44 стр.

5. The Airbus Global Market Forecast 2000-2019. AIRBUS, 2000, 86 стр. url: <http://www.airbus.com>

6. Проектирование самолетов / Под ред. С.М. Егера. — М.: Машиностроение, 1983.

7. Руднев В.Е., Володин В.В., Лучанский К.М., Петров В.Б. Формирование технических объектов на основе системного анализа — М.: Машиностроение, 1991.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 25.02.2009