

УДК 351.814.32

DOI 10.51955/2312-1327\_2025\_1\_86

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА. ЧАСТЬ 1

*Александр Юрьевич Княжский,  
orcid.org/0000-0001-7901-2861,  
кандидат технических наук  
АО «Обуховский завод»,  
проспект Обуховской обороны, д. 120  
Санкт-Петербург, 192012, Россия  
knjagskij@mail.ru*

*Сергей Валентинович Баушев,  
orcid.org/0000-0003-3772-7636,  
доктор военных наук, профессор  
АО «Обуховский завод»,  
проспект Обуховской обороны, д. 120  
Санкт-Петербург, 192012, Россия  
s.baushev@goz.ru*

**Аннотация.** В общей системе организации воздушного движения одну из основных функций выполняет подсистема планирования использования воздушного пространства, осуществляющая предварительное (стратегическое), суточное (предтактическое) и текущее (тактическое) планирование с требуемыми показателями качества, значения которых зависят от расположения и задач аэродрома.

Данная статья является первой частью обзора существующих систем планирования использования воздушного пространства. Целью настоящего исследования является обзор и сравнительный анализ существующих моделей воздушного движения. В настоящее время известны следующие модели воздушной обстановки: сетевые, вероятностные, динамики загрузки, экспертные, развития воздушной обстановки, потенциалов, энтропийные. В статье проведен их обзор, выявлены преимущества и недостатки. Данные модели используются для прогнозирования интенсивности воздушного движения, вычисления кратчайших маршрутов, формирования порядка вылетов и прилетов воздушных судов. Однако возрастание требований к пропускной способности воздушного пространства и необходимость обеспечения высокого уровня безопасности воздушного движения, при ограничениях параметров полета воздушных судов, расходу топлива и другим показателям качества обслуживания воздушного движения создает проблемную ситуацию, которая в настоящее время не решена в существующих системах планирования использования воздушного пространства. Использование существующих моделей при высокоинтенсивном воздушном движении приводит к существенному повышению среднего расхода топлива, в связи с чем необходимо их совершенствовать.

**Ключевые слова:** модели воздушной обстановки, планирование использования воздушного пространства, ПИВП, безопасность воздушного движения, расход топлива, траектории.

# CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR PLANNING AIRSPACE MANAGEMENT. PART 1

*Alexander Yu. Knyazhsky,  
orcid.org/0000-0001-7901-2861,  
Candidate of Technical Sciences  
JSC «Obukhov Plant»  
Obukhovskaya Oborony Avenue, 120  
St. Petersburg, 192012, Russia  
knjagskij@mail.ru*

*Sergey V. Baushev,  
orcid.org/0000-0003-3772-7636,  
Doctor of Military Sciences, Professor  
JSC «Obukhov Plant»  
Obukhovskaya Oborony Avenue, 120  
St. Petersburg, 192012, Russia  
s.baushev@goz.ru*

**Abstract.** In the general air traffic management system, one of the main functions is performed by the airspace planning (ASP) subsystem, which carries out preliminary (strategic), daily (pre-tactical) and current (tactical) planning with the required quality indicators, the values of which depend on the location and tasks of the aerodrome.

The paper is the first part of the review of existing airspace planning systems. The purpose of the study is to review and comparatively analyze existing air traffic models. Currently, the following air situation models are known: network, probabilistic, load dynamics, expert, air situation development, potentials, entropy. The paper provides an overview of them, identifying their advantages and disadvantages. These models are used to predict air traffic intensity, calculate the shortest routes, form the order of departures and arrivals of aircraft. However, the increase in requirements for airspace capacity and the need to ensure a high level of air traffic safety, with restrictions on aircraft flight parameters, fuel consumption and other indicators of air traffic service quality creates a problematic situation, which, at present, has not been resolved in the existing airspace planning systems. The use of existing models in high-intensity air traffic leads to a significant increase in average fuel consumption, which is why they need to be improved.

**Keywords:** air situation models, airspace planning, ASP, air traffic safety, fuel consumption, trajectories.

## **Introduction (Введение)**

В задачи организации воздушного движения (ОрВД) входят управление воздушным движением и планирование использования воздушного пространства, осуществляемые безопасными, экономичными и эффективными способами с учетом интересов всех сторон [Федеральные ..., 2011].

Подсистема планирования использования воздушного пространства осуществляет предварительное (стратегическое), суточное (предтактическое) и текущее (тактическое) планирование с соблюдением требуемых показателей качества. Значения данных показателей задаются нормами ИКАО, ГОСТ и другими документами и могут варьироваться в зависимости от расположения и задач аэродрома. Обобщенно процесс организации воздушного движения представлен на рис. 1.

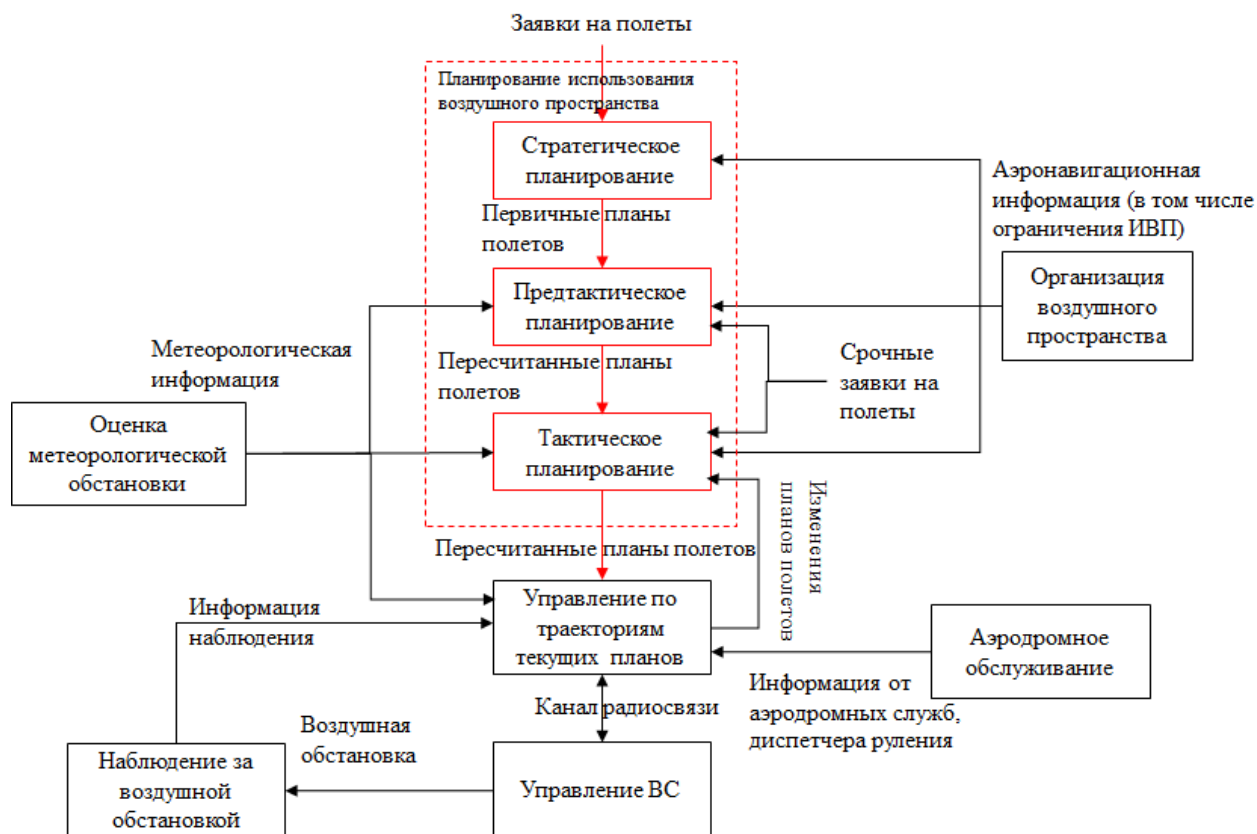


Рисунок 1 – Процесс организации воздушного движения

Планирование использования воздушного пространства заключается в организации потоков воздушного движения с соблюдением заданных требований к безопасности, пропускной способности и экономичности воздушного движения. Планирование использования воздушного пространства делится на три этапа: стратегическое (за двое и более суток), предтактическое (накануне) и тактическое (изменение плановой траектории в процессе полета) [Федеральные ..., 2011]. Результатом стратегического планирования является предварительное расписание полетов ВС на длительный период. В процессе предтактического планирования корректируются плановые траектории ВС таким образом, чтобы соблюсти поступившие ограничения и заявки на полеты. В процессе тактического планирования траектории ВС корректируются с учетом планов, поступивших в течение последних 24 часов [Федеральные ..., 2011].

К пропускной способности воздушного пространства, точности и достоверности информации наблюдения предъявляются достаточно высокие требования. С другой стороны, необходимо обеспечивать высокий уровень безопасности воздушного движения в условиях жестких ограничений к параметрам движения ВС, расходу топлива и другим показателям качества обслуживания воздушного движения. Данное противоречие создаёт проблемную ситуацию, которую необходимо разрешить. В зарубежной литературе некоторые модели воздушного движения описаны в [Airline crew..., 2003; AhmadBeygi et al., 2009; Antunes et al., 2019; Barnhart et al., 2004; Barnhart et al, 1998; Flight string..., 1998; Daskin et al, 1989].

## Materials and methods (Материалы и методы)

Материалами исследования являются научные публикации, в которых описываются и исследуются модели представления воздушной обстановки. Основные материалы изложены в работах: Рудельсона Л. Е., Советова Б.Я., Чеха В.А., Кулиды Е.Л., Barnhart C., Chaimatanan S., Wilson A.G.

Методы исследования: анализ, синтез, индукция.

## Discussion (Дискуссия)

### Сетевая модель

Известна сетевая модель использования воздушного пространства, основой которой является связный планарный гиперграф  $G(v_i, r_{ij})$ , составляемый из заданных маршрутов ВС (рис. 2)<sup>1</sup>. Вершинами графа  $G$   $v_i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) считаются навигационные пункты  $I$ , точки пересечения трасс и аэродромы. Дуги графа  $r_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, I; i \neq j$ ) соответствуют участкам трасс между навигационными пунктами. Каждая дуга  $r_{ij}$  характеризуется весовым коэффициентом  $g_{ij}$ , зависящим от пропускной способности и/или стоимости движения  $c_{ij}$  по участку  $r_{ij}$ . Весовые коэффициенты зависят от метеорологической обстановки, ограничений воздушного пространства и качества связи. В более сложной реализации модели весовые коэффициенты являются функциями, зависящими от высоты и точки участка трассы (расстояния).

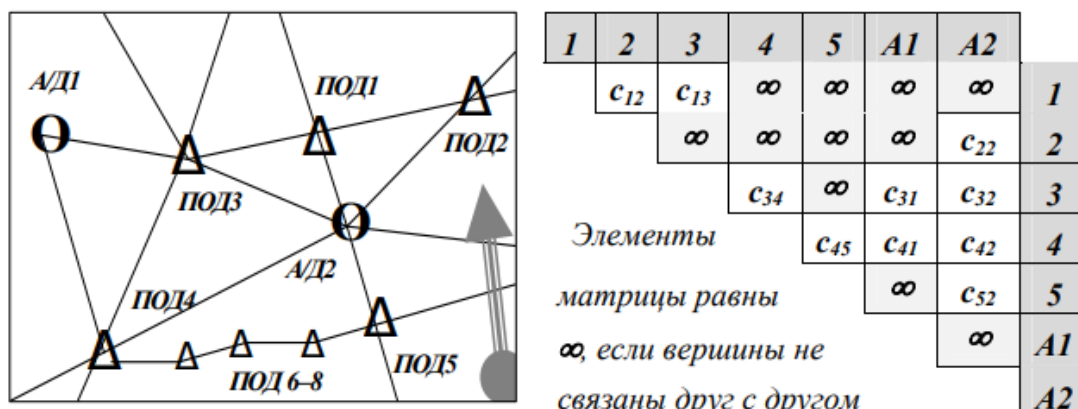


Рисунок 2 – Представление данных о маршрутах движения ВС (без учета внутренних вершин ПОД 6-8)<sup>1</sup>. Серой стрелкой обозначено направление ветра

Для осуществления компьютерного моделирования граф  $G(v_i, r_{ij})$  представляется в виде матрицы  $M$ , элементы  $m_{ij}$  которой зависят от  $g_{ij}$  и  $c_{ij}$ . Также известна сетевая модель [Zhe Liang et al., 2020], для сокращения вычислений разделяющая граф  $G(v_i, r_{ij})$  на подграфы, с учетом точек взлета и посадки. При этом, в данной модели установлено ограничение на максимально допустимое число одновременно находящихся в воздухе ВС в определенном секторе.

<sup>1</sup> Рудельсон Л. Е. Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением: Учеб. пособие / Л. Е. Рудельсон; М-во трансп. Рос. Федерации. Федер. гос. образоват. учреждение высш. проф. образования Моск. гос. ун-т гражд. авиации. Каф. вычислит. машин, комплексов, систем и сетей. Москва: МГТУ ГА, 2004. 96 с. EDN OWRTSJ.

## Вероятностные модели

### Многоканальные системы массового обслуживания

С точки зрения теории очередей в рамках модели Эрланга централизованная служба планов полетов является многоканальной системой массового обслуживания (СМО) с ограниченной очередью и относительным приоритетом. Плановые времена вылетов в поступающих заявках распределены по пуассоновскому закону. После их обработки распределение меняется на экспоненциальное, а процесс изменения состояний СМО не является марковским [Бочаров и др., 2005]. В большинстве случаев СМО можно описать системой алгебраических уравнений конечного порядка.

### Вероятностная модель в задаче планирования авиарейсов

В [Ребров и др., 2007] представлена вероятностная модель в задаче планирования авиарейсов. На входе системы – два случайных потока заявок, содержащих планы полетов, с заданными интенсивностями  $\lambda_i$ . Заявки из первого потока имеют более высокий приоритет обслуживания, чем из второго. Если заявка с большим приоритетом поступает в момент обработки заявки с низким приоритетом, она помещается в очередь сразу после завершения обработки текущей заявки. Далее обрабатываются все заявки более высокого приоритета из очереди, потом – более низкого. В случае отсутствия в буферном накопителе (БН) свободных мест вместо заявки низкого приоритета помещается заявка высокого приоритета. При полной загрузке БН заявками высокого приоритета все поступающие новые заявки не попадают в обработку. Качество обслуживания измеряется отношением средних времен обслуживания заявок из двух входных потоков.

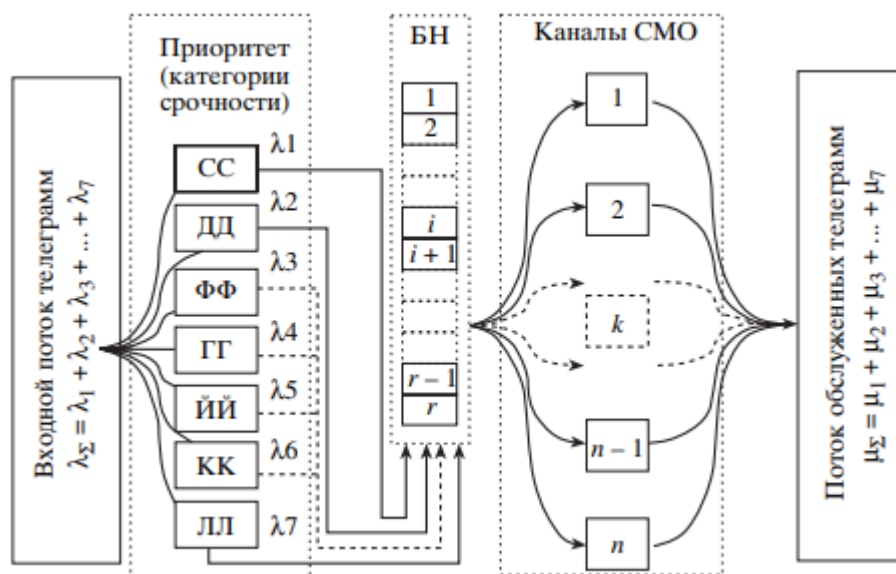


Рисунок 3 – Система обслуживания с одним буферным накопителем и различными приоритетами входных заявок [Ребров и др., 2007, с. 102]

Также [Ребров и др., 2007] известна СМО, функционирующая на основе БН, разделенного на секции, содержащие очереди из заявок на полеты в соответствии с их приоритетами.

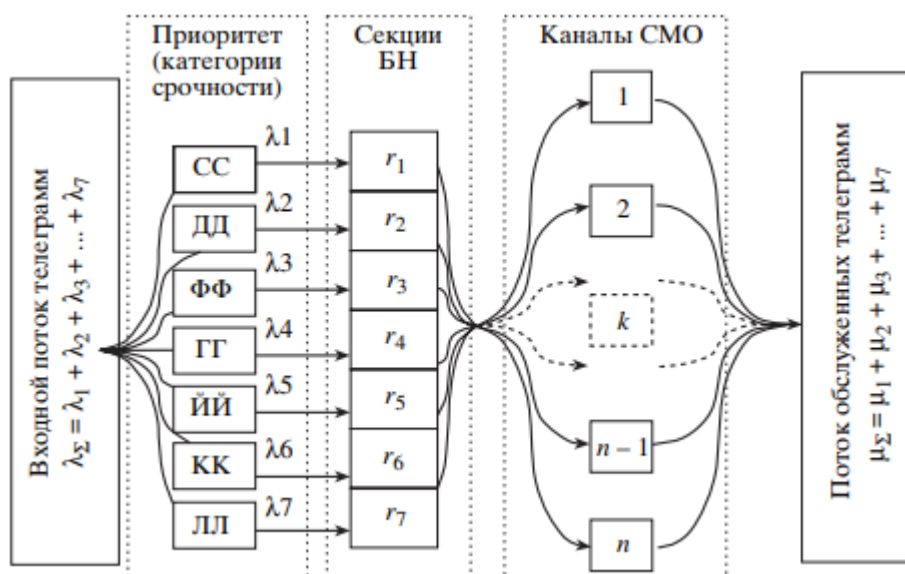


Рисунок 4 – Система обслуживания с относительными приоритетами и приемом заявок на полеты ВС в отдельные секции буферного накопителя [Ребров и др., 2007, с. 100]

При высоких интенсивностях входных потоков заявок возрастает вероятность потери заявки в результате перегруза системы. В результате чего вероятности потерь заявок высокого приоритета приближаются к вероятностям потерь заявок низкого приоритета. Наиболее высокое качество работы СМО достигается при равенстве средних времен обработки заявок потоков всех приоритетов [Ребров, 2007].

#### Модель динамики загрузки

Основной составляющей модели динамики загрузки является информационный образ (ИО), представляющий из себя записанную в базу данных (БД) интегрированную и своевременно обновляемую информацию о воздушной обстановке от всех источников, включающую описания состояний всех воздушных и наземных объектов, метеорологическую, аэронавигационную, плановую и другую необходимую для управления информацию. Также ИО содержит статистические данные об изменении воздушной обстановки во времени с учетом дня недели, месяца и т. д. Информационным образом воздушной обстановки называется множество моделей, позволяющих сформировать полное описание воздушной обстановки с учетом избыточности информации. Воздушная обстановка зависит от месяца, времени, дня недели, погоды и других факторов. Зависимости между ними выражены в виде гистограмм.

ИО описывает ВС, наземные транспортные средства и другие объекты, а также группирует накопленную информацию таким образом, чтобы выявить зависимости в динамике потоков ВС.

ИО позволяет создать эффективную наземную сеть передачи данных за счет быстрого доступа к записям БД о воздушной обстановке. ИО включает в себя гистограммы почасовой загрузки аэродромов, секторов и пунктов

обязательного донесения, прогнозируемой метеорологической обстановки, представляя данные в удобном виде для передачи и интерпретации другими системами<sup>1</sup>.

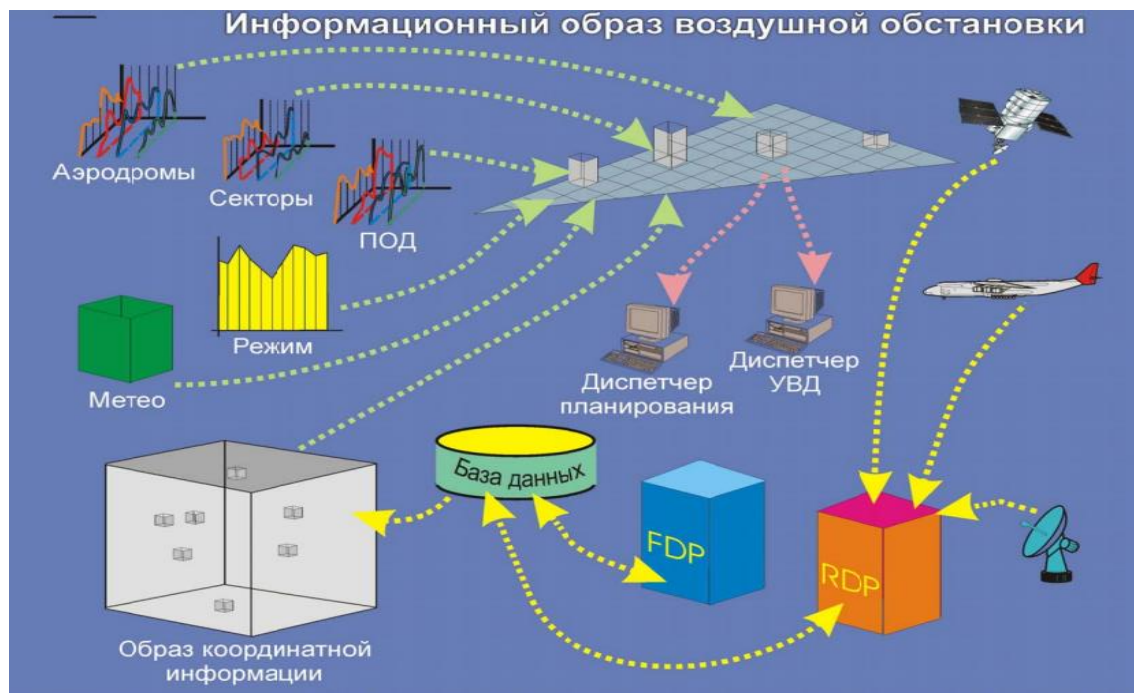


Рисунок 5 – Схема источников и потребителей данных, формирующих информационный образ воздушной обстановки<sup>1</sup>

Информационный образ позволяет представить накопленные статистические данные в виде совокупности карт загруженности, частоты конфликтов и др. характеристик воздушного пространства, что облегчает интерпретацию информации человеком. Полную информацию о воздушном объекте также можно хранить, используя концепцию объекта полета [Brinley et al., 2020; William, 2022].

#### Экспертная модель

В [Ребров и др., 2007; Баушев и др., 2021] дана классификация экспертных систем, описаны архитектура и назначение входящих в них компонентов, представлены модели приобретения, представления и обработки знаний. Дана характеристика современных инструментальных средств создания экспертных систем.

Экспертная модель может состоять из последовательно-соединенных блоков маршрутов, загрузки и конфликтов, а также блока поддержки принятия решений при оптимизации плана полетов. Все три блока выполняют роли фильтров и сужают множество допустимых плановых траекторий, используя заданную систему правил и информационный образ воздушной обстановки. Первый – выбирает траектории, проходящие по маршрутам с длиной пути не более максимально допустимой. Второй сужает множество допустимых плановых траекторий с учетом загрузки секторов воздушного пространства, третий – по данным о конфликтах траекторий. На основе информационного

образа и базы знаний эксперт рекомендаций формирует диспетчеру рекомендации по планированию воздушного движения.

Поступающие на вход модели заявки на полеты ВС обрабатываются последовательно путем перераспределения загрузки с использованием информационного образа воздушной обстановки (рис. 6).

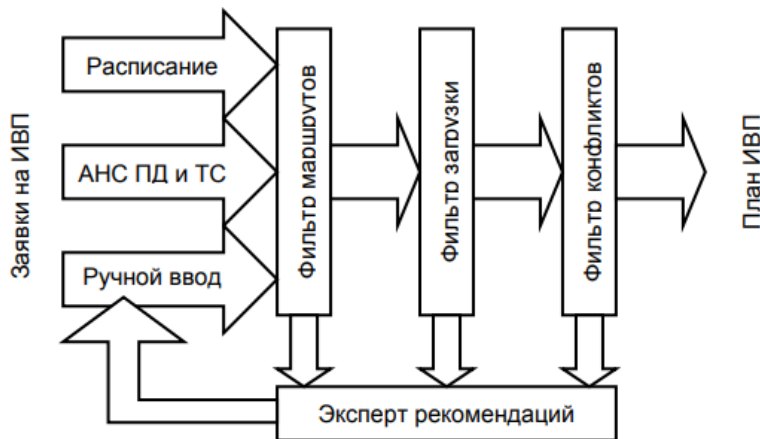


Рисунок 6 – Процесс обработки планов полетов<sup>1</sup>

#### Модель развития воздушной обстановки

Модель развития воздушной обстановки описывает движение ВС по точным траекториям с учетом времени полета. Она направлена на создание единой общемировой системы организации воздушного движения и хранит информацию о настоящем, будущих и прошедших местоположениях ВС, что упрощает автоматизацию процессов организации воздушного движения. В соответствии с программой «Единое европейское небо» (SESAR) четырехмерная (согласованная/целевая) траектория является основной составляющей концепции перспективной системы ОрВД. Четырехмерная траектория формируется на этапе планирования полета и существует до его завершения. В течение всего времени существования четырехмерная траектория ВС может корректироваться пользователями воздушного пространства с учетом ограничений и других параметров воздушной обстановки.

В [Кулида и др., 2023] предложено представление дискретной четырехмерной траектории в виде последовательности четырехмерных координат  $Tr_{4D} = (P_1, P_2, \dots, P_N)$ ,  $P_i = (x_i, y_i, z_i, t_i)$ . Здесь  $i$  – номер контрольной точки траектории,  $x_i$  – широта;  $y_i$  – долгота;  $z_i$  – высота;  $t_i$  – время. В [Chaimatanan et al., 2014] предложено при решении задачи стратегического планирования учитывать неопределенность положения ВС в горизонтальной плоскости в виде ограниченного пространства вдоль траектории с установленным радиусом. В [Chaimatanan et al., 2015] дополнительно учитывается неопределенность по высоте полета и времени. Таким образом, неопределенность координат ВС описывается цилиндрической областью.

Конфликт траекторий возникает, если в некоторых точках  $P = (x_P, y_P, z_P, t_P)$  и  $Q = (x_Q, y_Q, z_Q, t_Q)$ , на этих траекториях выполняются следующие условия:

$$\begin{aligned} \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2} &< N_h^r \\ |z_P - z_Q| &< N_v^r \\ |t_P - t_Q| &< 2t_E \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

здесь  $N_h^r$  и  $N_v^r$  – минимумы эшелонирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно;  $t_E$  – максимальная ошибка во времени.

### Модель потенциалов

Еще одним из представлений транспортной системы является модель потенциалов, определяющая зависимость интенсивности потока ВС  $\lambda_{ij}$  от числа вылетов  $Q_i$  (взлетно-посадочных операций (ВПО)/час) в район  $i$ , посадок  $D_j$  ВПО/час в районе  $j$  («сток») и стоимости перелета между этими районами  $c_{ij}$  (руб.) [Советов и др., 2016].

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} &= k \frac{Q_i D_j}{c_{ij}^2} \quad i=1 \dots N, j=1 \dots M \\ \sum_{i=1}^N \lambda_{ij} &= D_j \\ \sum_{j=1}^M \lambda_{ij} &= Q_i \end{aligned} \quad , \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент соответствия,  $\frac{\text{руб}^2}{\text{ВПО}/\text{час}}$ ,  $N$  – количество зон отправлений,  $M$  – количество зон прибытий.  $Q_i$  и  $D_i$  – зависят от населения и товарооборота соответствующего региона, а также даты (упрощенно: месяца и дня недели) и времени.

Модель потенциалов удобно использовать для прогнозирования изменения воздушной обстановки и оценки области воздушного пространства, на которой целесообразно совершенствовать способы планирования воздушного движения.

В настоящее время в областях воздушного пространства между  $Q_i$  и  $D_j$  сохранить заданный уровень безопасности полетов возможно, только формируя траектории, приводящие к повышенному расходу топлива. Данную модель удобно применять для определения маршрутов полетов, снижающих интенсивности движения ВС в перегруженных секторах.

### Энтропийная модель

Энтропийные модели [Wilson, 1967; Wilson., 1969] основаны на принципе максимума взвешенной энтропии [Belis et al., 1968] дескриптивной системы и исходят из вероятностного описания поведения ВС в авиационной транспортной сети. Энтропийная модель, как и модель потенциалов, разработана на основе физических процессов [Советов и др., 2016] и позволяет учитывать случайные факторы, влияющие на сценарий изменения воздушной обстановки.

Функция распределения вероятности  $\alpha_{ij}$  является экспоненциальной:

$$\alpha_{ij} = e^{-\gamma c_{ij}}, \forall i = 1, \dots, N, \forall j = 1, \dots, M, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – параметр расселения;  $c_{ij}$  – средние затраты на передвижение.

Плановые траектории ВС задаются с использованием (3). Равновесие системы ОрВД находится за счет максимизации энтропии.

Другие модели представления воздушной обстановки

В [Чеха, 2004] предложена модель суточного планирования полетов и её практическая реализация, учитывающая отклонения реальных траекторий от плановых. В [Печенежский, 2023] указано, что основными проблемами планирования полетов являются низкая координация взаимодействия, дублирование функций и сложность информационного обмена между участвующими сторонами:

1) прогнозирование воздушных потоков усложняется отклонением реальных траекторий ВС от плановых;

2) обоснована низкая эффективность деконфликтизации траекторий на этапе предтактического планирования из-за большого количества отменяемых планов полетов;

3) на примере аэропорта Домодедово показана низкая дисциплина выдерживания временных слотов.

В [Голицова и др., 2021] обоснована необходимость применения гидродинамической модели атмосферы для оперативного предоставления метеорологической информации в радиусе аэродромной зоны. Данная модель является реализацией численного решения системы уравнений гидротермодинамики, описывающих изменение состояния атмосферы во времени и пространстве по заданному начальному состоянию и внешним воздействиям, характеризующим влияние внешней среды на процессы в атмосфере.

Оценка необходимости совершенствования существующих моделей

В настоящее время известны следующие модели воздушной обстановки: сетевые, вероятностные, динамики загрузки, экспертные, развития воздушной обстановки, потенциалов, энтропийные. Данные модели удобно использовать для решения задач прогнозирования интенсивности воздушного движения, вычисления кратчайших маршрутов, формирования порядка вылетов и прилетов ВС. Использование существующих моделей воздушного движения при высокоинтенсивном воздушном движении приводит к существенному повышению среднего расхода топлива. В связи с чем необходимо их совершенствовать с целью минимизации расхода топлива при высокоинтенсивном воздушном движении, при сохранении существующего уровня безопасности полетов.

## Results (Результаты)

Исходя из проведенного анализа, укрупненно можно выделить следующие модели воздушного движения (таб. 1).

Таблица 1 – Основные модели воздушного движения

Тип модели	Краткое описание	Преимущества	Недостатки
Сетевая	На планарный гиперграф $G(v_i, r_{ij})$ , отображаются существующие воздушные трассы (вершины $v_i$ – навигационные пункты, точки пересечения трасс, аэродромы, ребра $r_{ij}$ – участки трасс). Ребра $r_{ij}$ взвешены показателями пропускной способности, длины, расхода топлива ВС, либо другими характеристиками.	Наглядно описываются ключевые характеристики участков $r_{ij}$ воздушных трасс, необходимые для планирования маршрута движения ВС. В том числе: загруженность, экономичность, длина, опасность движения (например, из-за плохих метеорологических условий).	Не содержит данных о координатах, параметрах движения и плановых траекториях ВС. Используется только для планирования траекторий.
Вероятностная	Представляет заявки на вылет/посадку $\eta_i=(\Xi, Tr)$ в виде пуассоновских потоков с интенсивностями $\lambda_j$ , накапливаемых в буфере с $N$ разделными секциями $A=\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{end}\}$ для хранения и обрабатываемых с различной скоростью в $M$ каналах. Здесь $\Xi$ – вектор характеристик ВС, включающий приоритет ВС $Pr$ и уникальный идентификатор ВС $id$ ; $Tr$ включает времена вылета $t_{выл}$ , посадки $t_{пос}$ . Заявки обслуживаются с учетом заявленного времени вылета/посадки $t_i$ и приоритета $Pr$ одним из следующих способов: заявки сначала сортируются по приоритету $Pr$ , после чего заявки одного приоритета обрабатываются по заявленному времени; заявки сортируются по времени, в случае, если разница времен двух одинаковых операций (вылет/прилет) из заявок меньше заданного порога – обрабатываются в порядке приоритета; устанавливается определенная	Позволяет минимизировать среднее время обслуживания ВС $t_{обс}$ за счет оптимизации порядка ВС в очередях на вылет/посадку.	Не полностью учитывает стандартные маршруты вылета/прилета по приборам и метеорологическую информацию, что позволило бы дополнительно уменьшить среднее время обслуживания ВС $t_{обс}$ .

	последовательность обработки заявок из буфера, зависящая от секторов, в которых они находились, например, ЧЗС1/ЧЗС2/ЧЗС3 (ЧЗС№ – число обрабатываемых заявок из сектора №).		
Динамики загрузки	Содержит информационный образ воздушной обстановки, состоящий из гистограмм почасовой загрузки аэродромов $\lambda_{\text{аэр}}(t)$ , секторов $\lambda_{\text{сек}}(t)$ и пунктов обязательного донесения $\lambda_{\text{под}}(t)$ , прогнозируемой метеорологической обстановки $V(t, x, y, h)$ , где $V=(B, \alpha, T, P, D)$ , где $t$ – время, $x, y, h$ – координаты, $B$ – скорость ветра, $\alpha$ – направление ветра, $T$ – температура, $P$ – давление, $D$ – характеристика осадков. Данный информационный образ позволяет спрогнозировать динамику потенциала способности обслуживания воздушного движения.	Позволяет планировать воздушное движение с учетом прогнозируемой динамики воздушной обстановки, а также быстрее обеспечивать потребителей информации о воздушной обстановке за счет отсутствия необходимости самостоятельно запрашивать и сводить данные от разных систем.	Не учитывает расположение воздушных трасс, из-за чего необходимо дополнительно получать аэронавигационные данные от других систем. Что снижает скорость обновления информации и может привести к нарушению целостности данных.
Экспертная	Состоит из трех последовательно соединенных блоков Б1, Б2, Б3, выполняющих собственные функции. Каждый блок содержит базу знаний $BЗ=\{Pr_i, \text{ при } i = 1, \dots, N_{Pr}\}$ , содержащую введенные правила формирования $Pr_i$ маршрутов/плановых траекторий/рекомендаций диспетчеру, и связан с информационным образом воздушной обстановки ИО. Первый блок предназначен для формирования маршрута ВС по аэронавигационной информации и заданным точкам вылета и прилета $Tr_p=B1(AHI, p_0, p_{\text{end}})$ . Второй блок предназначен для вычисления плановых траекторий $Tr_{p,t}$ с учетом маршрута и данных о загрузке воздушного пространства ЗВП= $\{\lambda_i, \text{ при } i=1, \dots, N\}$ $Tr_{p,t}=B2(Tr_p)$ . Третий блок предназначен для деконфликтизации плановых траекторий $Tr_{p,t}=B3(Tr_{p,t})$ .	Позволяет перерассчитать плановые траектории ВС таким образом, чтобы сгладить загрузку секторов воздушного пространства и уменьшить число авиационных конфликтов.	Не учитывает приоритеты ВС и времена их обслуживания, из-за чего уменьшается безопасность и стоимость полетов.
Развития воздушной обстановки	Содержит информацию о текущем, предыдущих и прогнозируемых будущих состояниях воздушного	Позволяет прогнозировать различные сценарии	Не содержит статистической информации о

	<p>пространства <math>S_{ВП}</math> и метеорологической обстановке <math>V</math> <math>M=\{S_{ВП}(t), V(t,x,y,h)\}</math>. Представляет собой совокупность реализованных и плановых траекторий ВС <math>S_{ВП} = \{Tr_i, \text{ где } i=1, \dots, N\}</math>. Каждой траектории могут быть сопоставлены альтернативные сценарии изменения траекторий <math>Tr_{ij}^*</math> с сопоставленной вероятностью <math>p_{ij}</math> движения по этой траектории (<math>Tr_{ij}^*</math>, <math>p_{ij}</math>), движение по которым может быть реализовано в случае непредвиденных изменений воздушной обстановки.</p>	<p>изменения состояния воздушной <math>S_{ВП}(t)</math> и метеорологической <math>V(t,x,y,h)</math> обстановки, что упрощает выработку диспетчерских рекомендаций и расчет плановых траекторий ВС <math>Tr_i</math>. Позволяет снизить вероятность возникновения опасных сближений ВС при внеплановых изменениях воздушной обстановки.</p>	<p>динамике воздушной обстановки с привязкой ко времени, дате и т.п., выраженной, например, в виде гистограмм почасовой загрузки аэродромов <math>\lambda_{\text{аэр}}(t)</math>, секторов <math>\lambda_{\text{сек}}(t)</math> и пунктов обязательного донесения <math>\lambda_{\text{под}}(t)</math>, что увеличивает число потенциальных опасных сближений ВС.</p>
Потенциалов	<p>Представляет интенсивность <math>\lambda_{ij}</math> транспортных потоков между двумя регионами <math>i</math> и <math>j</math> как величину, пропорциональную произведению числа отправок <math>Q_i</math> на число прибытий <math>D_j</math>, и обратно пропорциональную квадрату затрат <math>c_{ij}</math> на перемещение между данными регионами.</p>	<p>Позволяет минимизировать вероятность возникновения непредсказуемых скачков интенсивностей потоков ВС между аэродромами, за счет чего уменьшается вероятность возникновения авиационных происшествий <math>p_{\text{АП}}</math>.</p>	<p>Не позволяет достигнуть высокой точности прогноза интенсивностей транспортных потоков ВС.</p>
Энтропийная	<p>Вводится экспоненциальная функция распределения вероятности <math>\alpha_{ij}</math> на перемещение между аэродромами <math>i</math> и <math>j</math>, зависящая от средних затрат на перемещение <math>c_{ij}</math> между ними, а также от параметра распределения, связанного с прогнозируемым числом перевозимых пассажиров и грузов между <math>i</math> и <math>j</math>. Используется гипотеза о независимом движении ВС при достижении равновесного состояния системы.</p>	<p>Позволяет прогнозировать интенсивности потоков ВС между аэродромами, при отсутствии информации о случайных факторах, от которых они зависят.</p>	

Из выделенных моделей синтезирована стохастическая открытая сетевая модель транспортной системы, представленная ориентированным графом  $G_{ВП}(V_{КТ}, E_M)$ , вершинами которого  $V_{КТ}=(x_{КТ}, y_{КТ})$  являются аэродромы и контрольные точки, являющиеся пересечениями маршрутов. Ребрам графа  $E_M=(V_{КТi}, V_{КТj})$  сопоставлено множество допустимых коридоров движения ВО, определяемых в виде  $d((x_{ВО}-x_o), (y_{ВО}-y_o), (h_{ВО}-h_o)) \leq d_{max}$ , где  $(x_o, y_o, h_o)$  – ближайшая точка на участке маршрута, проходящего между вершинами  $V_{КТi}$  и  $V_{КТj}$ ;  $d_{min}(c_1, c_2)$  – минимально допустимый показатель безопасности, вычисляемый по наименьшим нормам эшелонирования  $\min(\langle m_{T1}, m_{B1} \rangle(x_1, y_1, h_1), \langle m_{T2}, m_{B2} \rangle(x_2, y_2, h_2))$ , зависящим от координат точек и отличающимся в различных областях пространства, где  $c_i = (x_i, y_i, h_i, t_i)$  – 4D-точка.

На графе  $G_{ВП}$  задан набор маршрутов  $S_M=(V_{КТN1}, \dots, V_{КТNend})$  и набор ВО определенного типа, перемещающихся по ним с установленной вероятностью  $P_{S_{Mi}}(T_{ВО})$ . Каждая вершина графа, соответствующая аэродрому, является отдельной моделью  $A_i$ . Но на более высоком уровне абстракции представляется конечной точкой заданного набора путей, способной поглощать и создавать смешанный пуассоновский поток ВО различных типов, максимально-допустимые значения интенсивностей которых взаимозависимы. Взаимные зависимости максимально допустимых значений интенсивностей потоков ВО различных типов описываются многомерной поверхностью  $\lambda_{max} = F(\lambda_{maxTBO1}, \dots, \lambda_{maxTBO N})$ . Вершины графа, соответствующие пересечениям маршрутов, представляются в виде векторов, элементы которых способны пропускать потоки ВО заданной интенсивности на эшелонах, сопоставленных их порядковым номерам  $V_{КТi}=[V_{КТi1}, \dots, V_{КТiend}]$ .

Отличия предложенной модели представления транспортной системы от известной заключаются в том, что:

1. Вершины графа, соответствующие пересечениям маршрутов, пропускают потоки ВО с учетом эшелонов движения, в связи с чем представляются в виде векторов;

2. Вершины графа, соответствующие аэродромам, пропускают потоки ВО с учетом их типов, учитывая зависимости между максимально-допустимыми интенсивностями потоков определенных типов ВО, математически описываемыми в виде многомерной поверхности;

3. Не учитываются ограничения на минимально-допустимые расстояния между ВО, поскольку с целью минимизации вычислительной сложности алгоритма, на первом этапе проводится грубое перераспределение потоков ВО, а оптимизация 4D-траекторий на втором.

Каждому ВО в зависимости от его типа и маршрута движения однозначно сопоставляется известный профиль траектории, обеспечивающий движение с минимальным расходом топлива, за счет выбора наиболее выгодных параметров движения для каждого этапа полета. По случайным временам начала движения ВО, имеющим Пуассоновское распределение, и профилям траекторий имитируются начальные плановые 4D-траектории ВО (поток заявок).

Модель воздушной обстановки  $M = \{G_{ВП}(V_{КТ}, E_M), S_{aэр}, S_M, S_{тр}, S_x, \langle V, \gamma \rangle(x, y, t), S_{ин}, S_{огр}\}$ , где  $S_{aэр} = \{A_i\}$  – множество аэродромов;  $S_M$  – множество маршрутов

(воздушных трасс);  $S_{\text{тр}} = \{Tr_{\text{твс}_i}\}$  – множество 4D-траекторий с привязкой к типу ВС;  $S_x = \{(X_i, D_i(X_i))\}$  – множество наблюдаемых параметров движения ВО  $X_i$  (информация наблюдения) и сопоставленную им достоверность наблюдаемых параметров движения ВО  $D_i(X_i)$ ;  $\langle V, \gamma \rangle(x, y, t)$  – сила и направление ветра, в зависимости от координат;  $S_{\text{ин}} = \{H_i\}$  – множество характеристик источников информации наблюдения, где  $H_i$  – множество характеристик  $i$ -го источника: координаты, диаграмма направленности, точность получаемой информации и вероятность получения недостоверной информации [Криворучко и др., 2023].

$A_i = \{S_{\text{ВПП}}, G_{\text{РД}}, S_{\text{SID}}, S_{\text{STAR}}, S_{\text{ТС}}\}$  –  $i$ -й аэропорт, где  $S_{\text{ВПП}}$  – множество характеристик ВПП,  $G_{\text{РД}}$  – граф, характеризующий структуру расположения ВПП, РД, мест стоянок и мест проведения ключевых операций подготовки ВО к вылету и сопоставленные каждому элементу графа области и пространства допустимых состояний объектов заданных типов  $T_{\text{об}}$ , при нахождении в данной области,  $S_{\text{SID}}$  – множество SIDов,  $S_{\text{STAR}}$  – множество STARов,  $S_{\text{ТС}}$  – множество транспортных средств на аэродроме.

Данная модель включает следующие ограничения:

$S_{\text{огр}} = \{E_{\text{огр}}(x, y, h)\}$  – множество зон ограничений воздушного пространства, через которые не могут проходить 4D-траектории.

Каждой 4D-траектории сопоставлен тип ВО  $T_{\text{ВО}} = \{v_r(h), h(v_r), h, v_h, Q(v_r, h)\}$ , имеющий следующие характеристики  $v_r(h)$  – максимально-допустимая горизонтальная скорость, зависящая от высоты,  $h(v_r)$  – максимально-допустимая высота, зависящая от горизонтальной скорости,  $h, v_h$  – максимально допустимая вертикальная скорость,  $Q(v_r, h)$  – расход топлива, зависящий от горизонтальной скорости и высоты. Данные характеристики накладывают ограничения на профиль траектории.



Рисунок 7 – Схема стохастической открытой сетевой модели воздушной обстановки

После построения модели системы необходимо обосновать показатели качества системы и критерии их оценки. Краткий перечень существующих показателей и критериев качества обеспечения воздушного движения приведен в документах ИКАО.

### Conclusion (Заключение)

Настоящая статья является первой частью обзора существующих систем планирования использования воздушного пространства. В ней проведен обзор существующих моделей воздушного движения: сетевых, вероятностных, динамики загрузки, экспертных, развития воздушной обстановки, потенциалов, энтропийных. Выявлены преимущества и недостатки данных моделей, а также предложена их классификация, исходя из физического смысла и полноты группы. Цель исследования достигнута. Следующим шагом является обзор существующих методов и алгоритмов планирования использования воздушного пространства и формализация задачи повышения качества планирования воздушного движения.

## Библиографический список

- Баушев С. В.* О разработке экспертных систем как инструмента поддержки принятия решения руководителем / С. В. Баушев, Т. Л. Ткаченко // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 7(15). С. 24-52. EDN FHEIPW.
- Бочаров П. П.* Теория вероятностей. Математическая статистика / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. Moscow, 2005. 296 с. EDN MVAAZL.
- Голицева Н. С.* Обоснование необходимости грамотного учёта метеоинформации при планировании и выполнении полётов воздушных судов / Н. С. Голицева, В. Д. Будзинский // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. № 11-2(113). С. 21-25. DOI 10.23670/IRJ.2021.113.11.039. EDN IOMEBA.
- Криворучко Ю.Т.* Перспективные направления развития радиотехнических систем ближней навигации / Ю.Т. Криворучко, В.М. Король, А.Ю. Княжский, Ю.Г. Шатраков // Радионавигация и время: труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. №13(21). С. 17-26.
- Кулида Е. Л.* Методы решения задач планирования и регулирования потоков воздушного движения. Ч. 1. Стратегическое планирование четырехмерных траекторий / Е. Л. Кулида, В. Г. Лебедев // Проблемы управления. 2023. № 1. С. 3-14. DOI 10.25728/ru.2023.1.1. EDN IPSSWG.
- Печенежский В. К.* Особенности организации планирования использования воздушного пространства в РФ на примере Московской воздушной зоны / В. К. Печенежский, Е. К. Чувицкая // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2023. Т. 26, № 6. С. 47-57. DOI 10.26467/2079-0619-2023-26-6-47-57. EDN VJOFJZ.
- Ребров В. А.* Модель сбора и обработки заявок на полеты в задаче планирования авиарейсов / В. А. Ребров, Л. Е. Рудельсон, М. А. Черникова // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 97-111. EDN IACVDP.
- Советов Б. Я.* Гравитационная и энтропийная модели потоков при территориальном планировании развития транспортной системы / Б. Я. Советов, А. В. Сикерин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2016. № 8. С. 21-25. EDN WZQKOH.
- Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации». 2011. 121 с.
- Чеха В. А.* Имитационная модель суточного планирования воздушного движения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2004. № 5. С. 100-104. EDN OTURRH.
- AhmadBeygi S.* An integer programming approach to generating airline crew pairings / S. AhmadBeygi, A. Cohn, M. Weir // Computers & Operations Research. 2009. № 4(36). P. 1284-1298.
- Airline crew scheduling / C. Barnhart, A. M. Cohn, E. L. Johnson, D. Klabjan, G. L. Nemhauser, P. H. Vance // Handbook of Transportation Science. Boston, MA: Springer. 2003. P. 517–560.
- Antunes D.* A robust pairing model for airline crew scheduling / D. Antunes, V. Vaze, A. P. Antunes // Transportation Science. 2019. № 6(53). P. 1751–1771.
- Barnhart C.* Airline schedule planning: Accomplishments and opportunities / C. Barnhart, A. Cohn // Manufacturing & Service Operations Management. 2004. № 6(1). P. 3–22.
- Barnhart C.* An approximate model and solution approach for the long-haul crew pairing problem / C. Barnhart, R. G. Shenoi // Transportation Science. 1998. № 32(3). P. 221–231.
- Belis M.* A quantitative-qualitative measure of information in cybernetic systems / M. Belis, S. Guiasu // IEEE Transactions on Information Theory. 1968. № 14. P. 593–594.
- Brinley D.* Rule-Based Data Quality Management of Flight Information / D. Brinley and Sh. Krishna // LS Technologies. 2020.
- Chaimatanan S.* Aircraft 4D Trajectories Planning under Uncertainties / S. Chaimatanan, D. Delahaye, M. A. Mongeau // Proceedings of 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2015). 2015. P. 51–58.

*Chaimatanan S.* Hybrid Metaheuristic Optimization Algorithm for Strategic Planning of 4D Aircraft Trajectories at the Continental Scale / *S. Chaimatanan, D. Delahaye, M. A. Mongeau* // *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 2014. № 4(9). P. 46–61.

*Daskin M. S.* An Llagrangian relaxation approach to assigning aircraft to routes in hub and spoke networks / *M. S. Daskin, N. D. Panayotopoulos* // *Transportation Science*. 1989. № 23(2). P. 91–99.

Flight string models for aircraft fleetling and routing / *C. Barnhart, N. L. Boland, L. W. Clarke, E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, R. G. Sheno* // *Transportation Science*. 1998. № 3(32). P. 208–220.

*William D.* Flight Object Management Capability: Foundation for Flight Information Management Strategy // 2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 2022. P. 1-7. DOI 10.1109/ICNS54818.2022.9771490

*Wilson A. G.* A statistical theory of spatial distribution models // *Transportation Research*. 1967. № 1. P. 253–270.

*Wilson A. G.* Entropy maximizing models in the theory of trip distributions, mode split and route split // *J. of Transportation and Economic Policy*. 1969. № 3. P. 108–126.

*Zhe Liang.* Airline planning and scheduling: Models and solution methodologies / *Liang Zhe, Chou Chun-An, Chaovalitwongse Wanpracha* // *Frontiers of Engineering Management*. 2020. № 7(4). P. 1-26.

## References

*Ahmad-Beygi S., Cohn A, Weir M.* (2009). An integer programming approach to generating airline crew pairings. *Computers & Operations Research*. 4(36): 1284-1298.

*Antunes D., Vaze V., Antunes A.P.* (2019). A robust pairing model for airline crew scheduling. *Transportation Science*. 6(53): 1751–1771.

*Barnhart C., Boland N. L., Clarke L. W., Johnson E. L., Nemhauser G. L., Sheno R. G.* (1998). Flight string models for aircraft fleetling and routing. *Transportation Science*. 3(32):208–220.

*Barnhart C., Cohn A.* (2004). Airline schedule planning: Accomplishments and opportunities. *Manufacturing & Service Operations Management*. 6(1): 3–22.

*Barnhart C., Cohn A. M., Johnson E. L., Klabjan D., Nemhauser G. L., Vance P. H.* (2003). Airline crew scheduling. *Handbook of Transportation Science*. 517–560.

*Barnhart C., Sheno R. G.* (1998). An approximate model and solution approach for the long-haul crew pairing problem. *Transportation Science*. 32(3): 221–231.

*Baushev S. V., Tkachenko T. L.* (2021). On the development of expert systems as a tool to support decision-making by the manager. *Radio navigation and time: works of the North-West Regional Center of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern*. 7 (15): 24-52. (In Russian)

*Belis M., Guiasu S.* (1968). A quantitative-qualitative measure of information in cybernetic systems. *IEEE Transactions on Information Theory*. (14): 593–594.

*Bocharov P. P., Pechinkin A. V.* (2005). Probability Theory. Mathematical Statistics. Moscow, 2005. 296 p. EDN MVAAZL. (In Russian)

*Brinley D., Sh. Krishna.* (2020). Rule-Based Data Quality Management of Flight Information. *LS Technologies*. 2020.

*Chaimatanan S., Delahaye D., Mongeau M. A.* (2014). Hybrid Metaheuristic Optimization Algorithm for Strategic Planning of 4D Aircraft Trajectories at the Continental Scale. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. 4(9): 46–61.

*Chaimatanan S., Delahaye D., Mongeau M. A.* (2015). Aircraft 4D Trajectories Planning under Uncertainties. *Proceedings of 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI 2015)*: 51–58.

*Chekha V. A.* (2004). Simulation model of daily air traffic planning. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*. (5): 100-104. (In Russian)

*Daskin M. S., Panayotopoulos N. D.* (1989). An Llagrangian relaxation approach to assigning aircraft to routes in hub and spoke networks. *Transportation Science*. 23(2): 91–99

Federal aviation regulations "Air traffic management in the Russian Federation". 2011. 121 p. (In Russian)

- Golivtsova N. S., Budzinsky V. D. (2021). Justification of the Need for Competent Accounting of Meteorological Information When Planning and Performing Aircraft Flights. *International Research Journal*. 11-2 (113): 21-25. (In Russian)
- Krivoruchko Yu.T., Korol V.M., Knyazhsky A.Yu., Shatrakov Yu.G. (2023). Promising directions of development of short-range radio engineering systems of navigation. *Radio navigation and time: works of the North-West Regional Center of the Almaz-Antey Air and Space Defense Concern*. 13 (21): 17-26. (In Russian)
- Kulida E. L. Lebedev V. G. (2023). Methods for Solving Problems of Planning and Regulating Air Traffic Flows. Part 1. Strategic Planning of Four-Dimensional Trajectories. *Problems of Management*. (1): 3-14. (In Russian)
- Pechenezhsky, V. K., Chuvikovskaya E. K. (2023). Features of the organization of airspace use planning in the Russian Federation on the example of the Moscow air zone. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 26(6): 47-57. (In Russian)
- Rebrov, V. A., Rudelson L. E., Chernikova M. A. (2007). Model of Collection and Processing of Flight Requests in the Problem of Flight Planning. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Control Theory and Systems*. (3): 97-111. (In Russian)
- Sovetov B. Ya., Sikerin A. V. (2016). Gravitational and entropy models of flows in territorial planning of transport system development. *Bulletin of ETU LETI*. (8): 21-25. (In Russian)
- William D. (2022). Flight Object Management Capability: Foundation for Flight Information Management Strategy / 2022 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). 1-7.
- Wilson A. G. (1967). A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*. 1: 253–270.
- Wilson A. G. (1969). Entropy maximizing models in the theory of trip distributions, mode split and route split. *J. of Transportation and Economic Policy*. 3: 108–126.
- Zhe Liang, Chou Chun-An, Chaovalitwongse Wanpracha. (2020). Airline planning and scheduling: Models and solution methodologies. *Frontiers of Engineering Management*. 7(4): 1-26.