

УДК 629.735.015:681.3

## МОДЕЛЬ ОПЕРАЦИЙ ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ АЭРОДРОМА

И.Ю. АГАФОНОВА, Л.Е. РУДЕЛЬСОН, А.И. СТЕПАНОВА

Рассмотрены процедуры взлета и посадки потока ВС нескольких категорий. Предложен подход к построению модели расчета пропускной способности аэродрома. Проведена декомпозиция модели и исследован один из ее элементов – режим захода на посадку. Проведена оценка временного интервала для этого режима и получены ограничения на минимально допустимые расстояния между ВС в потоке.

**Ключевые слова:** аэродромные операции, модель потока ВС, режим работы аэродрома, декомпозиция и ограничения модели, целевая функция.

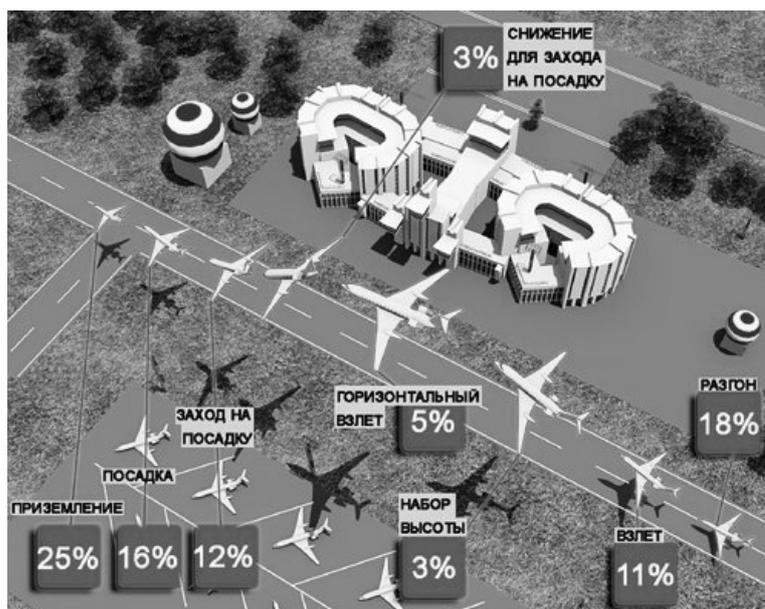
### Введение

В течение последнего десятилетия объем воздушных перевозок существенно возрос и в пиковые периоды стал превышать пропускную способность в значительном количестве аэродромов. Так прогноз авиaperезовозок для Московского аэроузла до 2015 г. показал ежегодный прирост авиапассажиров в 6%. В связи с этим проблема увеличения пропускной способности аэродромов становится ключевой в развитии индустрии авиaperезовозок.

В аспекте поставленной задачи следует отметить, что не существует единой утвержденной методики расчета пропускной способности аэродрома, а есть лишь рекомендации Федеральной аэронавигационной службы. В разработке таких документов настоятельно заинтересованы авиaperезовозчики. Так в предложениях авиaperедприятий отрасли по новым законодательным актам предлагается «утвердить методики расчета нормативов пропускной способности аэродромов и перечень организаций, учреждений, имеющих право давать независимое экспертное заключение по расчету вышеуказанных нормативов».

Очевидно, что для разработки таких методик и, тем более, для выработки мотивированных рекомендаций по увеличению пропускной способности аэродрома необходимо привлечение методов математического моделирования и построение адекватной модели функционирования аэродрома. При этом вместе увязываются такие характеристики, как пропускная способность используемой взлетно-посадочной полосы (ВПП) и пропускная способность района аэродрома. Важным этапом разработки такой модели является определение минимальных интервалов между воздушными судами (ВС) в аэродромной зоне в целом и на посадочной прямой в частности.

Этап посадки является наиболее ответственной фазой полета (рис. 1). Он занимает в среднем около 15% времени выполнения рейса, однако статистика мирового авиационного сообщества показывает, что на его



**Рис. 1.** Статистика летных происшествий на различных этапах выполнения полетов

долю приходится гораздо более высокий процент летных происшествий. Наряду с мероприятиями по совершенствованию техники пилотирования и повышения качества технических средств обеспечения полетов возникает актуальная научная задача диспетчерского обеспечения безопасной посадки потока самолетов при ограничениях на экономичность и регулярность воздушного движения.

Задача организации воздушного движения на любом аэродроме состоит в обеспечении требуемого уровня безопасности операций (взлетов и посадок) при ограничениях на экономичность и регулярность полетов. Повышение пропускной способности позволяет повысить показатели рентабельности, однако повышает и вероятность летного происшествия. Упомянем два аспекта этой комплексной проблемы: организационный, связанный с технологией диспетчерского обслуживания, и физический, определяемый динамикой полета реактивных ВС.

Существующие нормы для интервалов между операциями на ВПП, регламентированные документами гражданской авиации (ГА) в виде инструкций по производству полетов на данном аэродроме, основаны на очевидном требовании: для выполнения операции полоса должна быть свободна. В каждом конкретном случае рассматривается время, необходимое пилоту для заключительной фазы полета от высоты принятия решения (ВПР) до момента освобождения полосы, которое рассчитывается из летно-технических характеристик для каждого типа ВС в предположении «худшего случая», т.е. в расчете на максимальную продолжительность фазы. Реальные условия обслуживания, как правило, происходят в менее напряженном режиме, и диспетчеры способны обеспечить требуемый уровень безопасности при более высокой интенсивности операций. Однако инструкции запрещают такие действия.

Физический аспект проблемы состоит в обеспечении вихревой безопасности полетов. Ее суть заключается в механическом воздействии струйно-вихревого следа самолета на окружающую среду. След может оказаться опасным для наземных объектов и летательных аппаратов (ЛА), попадающих в него. Попадание ВС в вихревой след может привести к неконтролируемому крену и потере управляемости.

Вихревой след зависит от компоновки ВС, полетного веса и режима обтекания. Под действием сил различной природы он опускается ниже траектории самолета на 150–300 м и более, а также смещается в горизонтальном направлении из-за ветра и влияния земли. В зависимости от состояния атмосферы длина вихревого следа может составлять от нескольких километров до десятков километров.

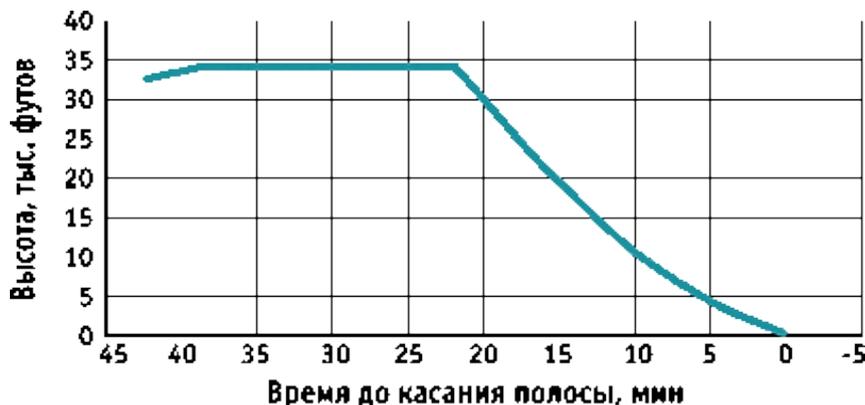
В настоящее время на практике действуют правила ИКАО, которые связывают минимальные расстояния между летящими в одном направлении ВС (продольное эшелонирование) с их непопаданием в вихревые следы. Согласно этим правилам, минимальные расстояния определяются типами самолетов и составляют, например, 4 морские мили для тяжелого самолета, летящего по трассе за тяжелым самолетом, и 6 морских миль для легкого самолета, следующего за тяжелым. При взлете и посадке на одну ВПП или на параллельные близко расположенные ВПП допустимый временной интервал составляет 2–3 мин. Расстояние между ВС, приземляющимися на аэродромы ГА, как правило, составляет 5 км.

## **1. Эксперименты по управлению потоком приземляющихся ВС**

Каждый борт при наличии информации о метеоусловиях и других характеристиках аэродрома назначения может заблаговременно рассчитать “четырёхмерный” профиль полета и доложить результаты диспетчерам, которые обеспечат рациональное управление посадкой. О таких экспериментах известно из периодической печати и документов Евроконтроля [1].

В стокгольмском аэропорту Арланда самолет Boeing 737-600 авиакомпании SAS выполнил заход на посадку по так называемому зеленому коридору, после того как установленная на нем бортовая система самолетовождения соединилась с наземным центром и передала ему «четырёхмерную» траекторию снижения (рис. 2). Название «заход на посадку по зеленому коридору»

ру», призванное подчеркнуть экономию топлива, снижение выбросов вредных веществ в атмосферу и уровней шума, предложила группа специалистов, участвующих в испытаниях системы организации движения с использованием «четырёхмерной» траектории прибытия ВС (три пространственных измерения плюс время). Самолет вылетел из аэропорта Люли в Северной Швеции и совершил коммерческий рейс с посадкой по траектории, сформированной примерно за час до прибытия в Арланду. Это был первый из сотен полетов, которые выполнялись в рамках оценки системы, известной сегодня как AMAN/DMAN.



**Рис. 2.** Доклад о планируемом «четырёхмерном» профиле полета, отправленный вычислительной системой самолетовождения самолета Boeing-737 авиакомпании SAS перед началом снижения

Приведенная на рисунке «четырёхмерная» траектория полета, рассчитанная вычислительной системой самолетовождения, предполагает заход на посадку по «зеленому коридору» с непрерывным снижением с высоты крейсерского полета при работе двигателя на малом газе. Траектория начинается примерно за 22 мин до касания полосы. Она была отправлена диспетчерам УВД до начала снижения.

Получив предлагаемую «четырёхмерную» траекторию за час до прибытия самолета, диспетчеры Арланды перестроили поток прибывающих лайнеров таким образом, чтобы обеспечить самолету Boeing-737 авиакомпании SAS непрерывное снижение. Обмен данными о траектории полета с наземными службами управления воздушным движением (УВД) позволяет также освободить наземные радиолокаторы от необходимости вывода самолета в нужную для нормальной посадки точку при малых высотах полета. В обычных условиях самолет вынужден маневрировать в горизонтальном полете с большими тягами двигателей или уходить в зону ожидания. Это увеличивает вредное воздействие на окружающую среду.

При заходе на посадку по «зеленому коридору» самолет может дольше оставаться на высоте крейсерского полета, прежде чем приступить к снижению по более крутой по сравнению с



**Рис. 3.** Изменение высоты вдоль траектории снижения по «зеленому коридору»

обычной траектории (рис. 2, 3). При работе двигателей на режиме малого газа это приводит к уменьшению расхода топлива с 250 кг до 500 кг при каждом заходе на посадку.

Показанная на рисунке траектория захода на посадку круче обычной. Прибытие в точно рассчитанный момент времени позволяет выполнять непрерывное снижение на режиме малого газа, практически без участков горизонтального полета на малых высотах.

Ожидается, что заходы на посадку по «четырёхмерным» траекториям позволят увеличить пропускную способность аэродромов на 30-40%. Именно этим объясняется интерес к испытаниям со стороны европейских и американских компаний. Например, в Арланде, имеющей всего одну взлетно-посадочную полосу, суммарное число взлетов и посадок самолетов можно будет увеличить с 45 до 60 в час.

Эксперименты в области самолетовождения, ограничивающиеся применением известных методов расчета траекторий на этапе снижения и посадки, подчеркивают необходимость разработки математических моделей движения потоков ВС. Только на их основе можно говорить о минимизации интервалов между выполняемыми аэродромными операциями.

## 2. Постановка задачи

Рассматривается «стационарный» режим работы аэродрома, имеющего одну функционирующую ВПП. Стационарность понимается как периодичность изменения состояния аэродрома. В качестве периода  $T$  могут быть выбраны одни сутки, неделя или месяц. Будем полагать, что такой периодичностью обладают все зависящие от времени параметры случайных процессов, протекающих в аэродромах.

Обслуживаемые ВС разбиты по своим параметрам на  $K$  классов.

Поток прибывающих ВС может быть смоделирован неоднородным пуассоновским потоком с интенсивностью  $\lambda_k(t)$ , заданной на временном полуинтервале  $[0, T)$ . Под прибытием здесь понимается не момент времени посадки ВС, а тот момент, когда диспетчер аэродромного пункта УВД принял данное ВС для сопровождения.

Далее потоки прибывающих ВС сливаются в один поток с установлением очередности по времени прибытия (без дополнительных приоритетов) и проходят через своеобразную «линию задержки» (модель диспетчерского управления потоком ВС, заходящих на посадку), устанавливаются новые интервалы между ВС. Временные интервалы в этом объединенном и трансформированном потоке случайны и ограничены снизу величинами, зависящими от категорий  $n$ -го и  $(n+1)$ -го ВС в очереди. Это связано с тем, что существует некоторое множество характерных времен  $\{\tau\}$ , определяющих «занятость» ВПП:  $\tau_{i,j}^{mn}$  – минимальный временной интервал между моментами начала захода на посадку ВС  $i$ -го и  $j$ -го классов;  $\tau_{i,j}^{BB}$  – минимальный временной интервал между начальными моментами взлета ВС  $i$ -го и  $j$ -го классов;  $\tau_{i,j}^{Bn}$  и  $\tau_{i,j}^{nB}$  – минимальные интервалы между взлетом и посадкой различных ВС.

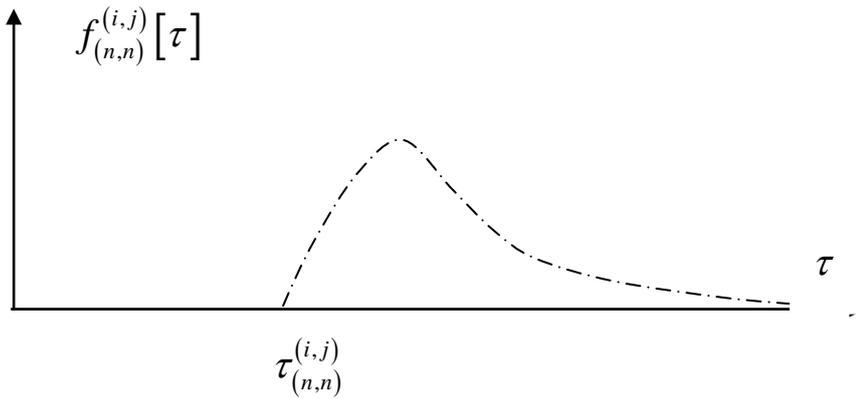
С целью увеличения безопасности (учитывая человеческий фактор) диспетчер может увеличивать эти интервалы. Таким образом, эти минимальные интервалы (в интерпретации диспетчера) – случайные величины, описываемые некоторыми распределениями  $f_{(n,n)}^{(i,j)}[\tau]$  такими, что  $f_{(n,n)}^{(i,j)}[\tau] \equiv 0$  при  $\tau \leq \tau_{\min}$ . Например,  $f_{(n,n)}^{(i,j)}[\tau] \equiv 0$  при  $\tau \leq \tau_{i,j}^{mn}$ .

Возможный вид такого распределения представлен на рис. 4.

Формируя поток ВС для захода на посадку, диспетчерская служба может задержать ВС на время  $\Delta_k$  (здесь  $k$  определяет класс рассматриваемого ВС). Такая задержка штрафует (дополнительный расход топлива) с весовым коэффициентом  $c_k$ .

Число ВС, находящихся на обслуживании в аэродроме, ограничено величиной  $D$ , превышение которой нежелательно (штрафуется).

Поток взлетающих ВС является неким неоднородным потоком с интенсивностью  $\mu_k(t)$ .



За обслуживание каждого ВС аэродром получает прибыль в размере  $q_k$  в зависимости от класса обслуженного ВС.

Целевой функцией аэродрома является приведенная прибыль, рассчитываемая как разность между прибылью, получаемой за обслуживание ВС, и  $\chi$ -й долей потерь всех ВС за период наблюдения  $T$  из-за вынужденного ожидания.

**Рис. 4.** Примерный вид распределения реальных интервалов между ВС, задаваемых диспетчером

Требуется определить пропускную способность аэродрома  $R$  (в предположении полной загрузки ВС), работающего в оптимальном режиме. Варьируются параметры входных –  $\{\lambda_k(t)\}$  и выходных –  $\{\mu_k(t)\}$  потоков.

### 3. Спецификация задачи

Входной поток ВС описывается  $K$ -мерным неоднородным пуассоновским потоком:

$$\xi(\omega, t) = \{\xi_1(\omega, t), \xi_2(\omega, t), \dots, \xi_k(\omega, t)\}; \quad t \in [0, T), \omega \in \Omega,$$

где  $\omega$  – элементарное событие, соответствующее одной из возможных реализаций трафика входа ВС в зону аэродрома;  $k$ -я компонента процесса описывается следующим распределением:

$$P_{\xi_k} = P[\omega : \xi_k(\omega) = n, t \in [t, t + \delta t]] = \begin{cases} 1 - \lambda_k(t) \cdot \delta t & \text{при } n = 0; \\ \lambda_k(t) \cdot \delta t & \text{при } n = 1; \\ 0 & \text{при } n \geq 2. \end{cases}$$

Выходной поток взлетающих ВС описывается  $K$ -мерным случайным процессом:

$$\psi(\omega, t) = \{\psi_1(\omega, t), \psi_2(\omega, t), \dots, \psi_k(\omega, t)\}; \quad t \in [0, T), \omega \in \Omega.$$

Пороговые временные интервалы между взлетами и посадками задаются квадратными матрицами размерности  $K \times K$ :

$$\|\tau_{i,j}^{n,n}\|; \|\tau_{i,j}^{B,B}\|; \|\tau_{i,j}^{B,n}\|; \|\tau_{i,j}^{n,B}\|; \quad i, j = \overline{1, K}.$$

Значения элементов приведенных матриц рассчитывается из вспомогательной модели.

Минимальные временные интервалы, задаваемые диспетчером, определяются матрицами, элементы которых есть распределения плотности вероятности интервалов:

$$\|f_{i,j}^{n,n}(\tau)\|; \|f_{i,j}^{B,B}(\tau)\|; \|f_{i,j}^{B,n}(\tau)\|; \|f_{i,j}^{n,B}(\tau)\|; \quad i, j = \overline{1, K}.$$

Вид функций распределения постулируется по согласованию с экспертами либо находится из статистики наблюдений [2].

При этом обязательно выполняется условие вида

$$f_{(n,n)}^{(i,j)}[\tau] \equiv 0 \quad \text{при} \quad \tau \leq \tau_{i,j}^{nn}.$$

Критерий оптимальности функционирования аэродрома  $M$ , функционально зависящий как от интенсивности прилета –  $\lambda(t)$ , так и вылета  $\mu(t)$  ВС, определяется как среднее значение случайной суммы

$$\langle M[\lambda(t), \mu(t)] \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^K [v_i(d_i - r_i) - \chi \cdot \Delta_i^\Sigma \cdot c_i] \right\rangle,$$

где  $v_i = v_i(\lambda, \mu)$  – случайное число ВС  $i$ -го класса, принятых аэродромом за время  $T$ ;  $d_i$  – отчисление авиакомпанией за обслуживание одного ВС  $i$ -го класса;  $r_i$  – стоимость реальных затрат на обслуживание одного ВС  $i$ -го класса;  $\Delta_i^\Sigma = \Delta_i^\Sigma(\lambda, \mu)$  – случайное время ожидания всех ВС  $i$ -го класса в зоне ожидания;  $\chi$  – степень «давления» авиакомпаний на руководство аэродрома с целью уменьшения потерь, связанных с ожиданием;  $c_i$  – удельный расход горючего ВС  $i$ -го класса за единицу времени при ожидании.

Решение оптимизационной задачи символически можно записать в виде

$$\{\lambda^{opt}(t), \mu^{opt}(t)\} = \arg \max_{\lambda, \mu} \langle M[\lambda(t), \mu(t)] \rangle.$$

Пропускная способность аэродрома  $R$  определяется при этом соотношением

$$R = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^K N_i \cdot \langle v_i(\lambda^{opt}, \mu^{opt}) \rangle,$$

где  $N_i$  – максимальное количество пассажиров, перевозимых ВС  $i$ -го класса.

#### 4. Декомпозиция и основные приближения модели

Анализ задачи на основе [3] показал, что искомую модель расчета пропускной способности аэродрома можно представить в виде композиции ряда моделей (рис. 5).

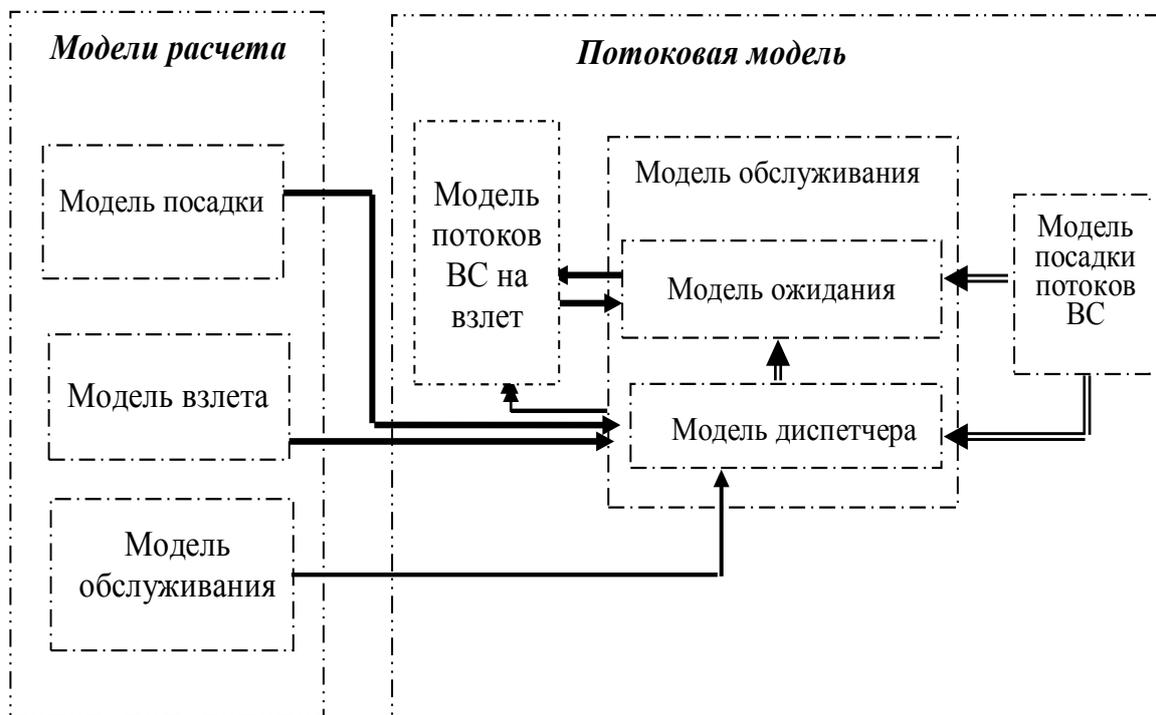


Рис. 5. Декомпозиция модели расчета пропускной способности аэродрома

Схема взаимосвязи этих составляющих представлена в табл. 1.

Таблица 1

Модель	Входные параметры	Выходные параметры
Модель посадки ВС	Параметры ВС, потребные характеристики аэродрома, ограничения на интервалы движения, связанные с турбулентностью	Длительность временного интервала, определяющего «занятость» ВПП: $\ \tau_{i,j}^{n,n}\ ; \ \tau_{i,j}^{n,B}\ $
Модель взлета ВС	Параметры ВС, потребные характеристики аэродрома, ограничения на интервалы движения, связанные с турбулентностью	Длительность временного интервала, определяющего «занятость» ВПП: $\ \tau_{i,j}^{B,B}\ ; \ \tau_{i,j}^{B,n}\ $
Модель обслуживания ВС на аэродроме	Временные характеристики обслуживания ВС	Длительность минимального временного интервала между посадкой ВС и его взлетом - $\tau_k^0$
Модель входящих потоков ВС	Статистические данные об интенсивности входных потоков ВС	Параметры входных потоков и соответствующие распределения: $\{\lambda_k(t)\};$ $\xi(\omega,t) = \{\xi_1(\omega,t), \xi_2(\omega,t), \dots, \xi_k(\omega,t)\}$
Модель диспетчера *)	Минимальные безопасные временные интервалы, параметры входных и выходных потоков: $\ \tau_{i,j}^{n,n}\ ; \ \tau_{i,j}^{n,B}\ ;$ $\ \tau_{i,j}^{B,B}\ ; \ \tau_{i,j}^{B,n}\ ; \tau_k^0;$ $\{\lambda_k(t)\}; \{\mu_k(t)\}$	Интервалы задержки ВС в буфере ожидания - $\Delta_i$
Модель буфера *)	Характеристики входных и выходных потоков ВС, интервалы задержки ВС в буфере ожидания - $\Delta_i$	Характеристики потока ВС, заходящих на посадку
Модель потока ВС на взлет *)	Интервалы задержки ВС в буфере ожидания - $\Delta_i$ , минимальные безопасные временные интервалы, параметры входных и выходных потоков: $\ \tau_{i,j}^{n,n}\ ; \ \tau_{i,j}^{n,B}\ ;$ $\ \tau_{i,j}^{B,B}\ ; \ \tau_{i,j}^{B,n}\ ; \tau_k^0;$ $\{\lambda_k(t)\}$	Характеристики потока ВС, совершающих взлет $\{\mu_k(t)\}$

Примечание: помеченные \*) модели являются существенно самосогласованными и при агрегировании должны рассматриваться совместно.

Группа модели расчета временных интервалов позволяет оценить минимальные потребные интервалы времени для выполнения процедур, определяющих скорость обслуживания в очереди. Это взаимно независимые модели, выходные параметры которых необходимы для построения потоковой модели.

### **Заключение**

В работе проведен предварительный анализ проблемы расчета пропускной способности аэродрома. Предложена структура модели расчета и рассмотрены некоторые ее элементы.

Проанализирован этап движения ВС на участке от высоты принятия решения до поворота на рулежную дорожку. Предложено разбить этот участок на два: движение по глиссаде и по ВПП от ее порога до используемой рулежной дорожки. На первом участке целесообразен подход математического моделирования, на втором – обработка статистических данных наблюдений. Анализ показал существенное различие среднего времени занятости полосы и гарантированного времени посадки, за которое все ВС данного класса освободят ВПП.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Документ Евроконтроля DLM-0607-001-02-00, 2007. Этап определения проекта SESAR (Исследование организации воздушного движения в едином Европейском небе).
2. Кузнецов В.Л. Кинетический подход к описанию эволюции неопределенности состояния воздушного судна в задаче расчета риска катастроф // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Прикладная математика. Информатика. - 2006. - № 105.
3. Методика оценки и обоснование нормативов загруженности диспетчеров и пропускной способности секторов УВД. - М.: ГосНИИ «Аэронавигация», 2003.

### **MODEL OF TAKEOFF AND LANDING OPERATIONS FOR CALCULATING OF AERODROME CAPACITY**

**Agafonova I.Yu., Rudelson L.E., Stepanova A.I.**

The procedures for takeoff and landing of aircraft flow are discussed. An approach to the construction of a model for calculation of aerodrome capacity is proposed. Decomposition of model is conducted and one of its elements – the approach mode is investigated. The estimation of the time interval for this mode and limitations on the minimum distances between aircraft in the stream are shown.

**Keywords:** airdrome operations, flow model aircraft, operation mode of airdrome, decomposition and limitations of the model, objective function.

### **Сведения об авторах**

**Агафонова Инна Юрьевна**, окончила УВАУ ГА (2004), аспирантка МГТУ ГА, автор 1 научной работы, область научных интересов – компьютерная поддержка планирования и обслуживания полетов.

**Рудельсон Лев Ефимович**, 1944 г.р., окончил МЭИ (1968), доктор технических наук, профессор кафедры вычислительных машин, комплексов, систем и сетей МГТУ ГА, автор более 170 научных работ, область научных интересов – программное обеспечение автоматизированных систем организации воздушного движения.

**Степанова Александра Илгизовна**, окончила МГТУ ГА (2012), аспирантка МГТУ ГА, автор 2 научных работ, область научных интересов – методы планирования использования воздушного пространства и управления воздушным движением.