

УДК 351.814.33

DOI 10.51955/2312-1327\_2023\_3\_30

## ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ АЭРОДРОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННОГО МЕНЕДЖЕРА ПРИБЫТИЯ/ОТПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ (AMAN/DMAN)

*Александр Юрьевич Княжский,  
orcid.org/0000-0001-7901-2861,  
кандидат технических наук  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения,  
ул. Большая Морская, д. 67  
Санкт-Петербург, 190000, Россия  
knjagskij@mail.ru*

*Александр Петрович Плясовских,  
orcid.org/0000-0003-2250-8852,  
доктор технических наук  
АО «ВНИИРА»,  
пр. Обуховской обороны, д. 120  
Санкт-Петербург, 192012, Россия  
vniira@yandex.ru*

*Александр Владимирович Тарасенко,  
orcid.org/0000-0002-7160-523X,  
АО «ВНИИРА»,  
пр. Обуховской обороны, д. 120  
Санкт-Петербург, 192012, Россия  
tarasenkoalvlad66@mail.ru*

**Аннотация.** В статье предложен метод повышения пропускной способности аэродрома и снижения средней задержки прибывающих/отправляющихся воздушных судов за счет оптимизации очереди из них, с учетом заданных минимально допустимых временных интервалов между воздушными судами, зависящих от их весовых категорий этапов движения (взлет/посадка). Проведен анализ эффективности данного метода, для оценки которой использовался поток событий (вылетов и прилетов), имеющий Пуассоновское распределение. Оценены зависимости средних задержек вылетов и прилетов от интенсивностей потоков вылетов и прилетов и потенциальная возможность возрастания пропускной способности аэродрома при использовании данного метода. Проведено сравнение эффективности системы управления вылетами при абсолютном приоритете у прилетающих ВС и одинаковом приоритете у прилетающих и вылетающих ВС. Показано, что интегрированный менеджер прибытия/отправления с одинаковым приоритетом у вылетающих и прилетающих ВС имеет большую эффективность, чем при абсолютном приоритете у прилетающих ВС.

**Ключевые слова:** AMAN, DMAN, управление воздушным движением, вылеты, прилеты, АС УВД, пропускная способность.

# INCREASING AIRFIELD CAPACITY WITH THE INTEGRATED AIRCRAFT ARRIVAL/DEPARTURE MANAGER (AMAN/DMAN)

*Alexander Yu. Knyazhsky,  
orcid.org/0000-0001-7901-2861,  
Candidate of Technical Sciences  
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
67, Bolshaya Morskaya st.  
Saint-Petersburg, 190000, Russia  
knjagskij@mail.ru*

*Alexander P. Plyasovskih,  
orcid.org/0000-0003-2250-8852,  
Doctor of Technical Sciences  
JSC VNIIRA,  
120, Obukhovskoy Oborony Avenue  
Saint-Petersburg, 192012, Russia  
vniira@yandex.ru*

*Alexander V. Tarasenko,  
orcid.org/0000-0002-7160-523X,  
JSC VNIIRA,  
120, Obukhovskoy Oborony Avenue  
Saint-Petersburg, 192012, Russia  
tarasenkoalvlad66@mail.ru*

**Abstract.** The article proposes a method for increasing the capacity of an aerodrome and reducing the average delay of arriving / departing aircraft by optimizing the queue of them, taking into account the specified minimum allowable time intervals between aircraft, depending on their weight categories of movement stages (take-off landing). An analysis of the effectiveness of this method was carried out, for the evaluation of which a stream of events (departures and arrivals) with a Poisson distribution was used. The dependences of the average delays of departures and arrivals on the flow intensity of departures and arrivals are estimated as well as the potential for increasing the aerodrome capacity by this method. The effectiveness of the departure control system was compared in terms of absolute priority for arriving aircraft and in terms of the equal priority for arriving and departing aircraft. It is shown that an integrated arrival/departure manager with the equal priority for departing and arriving aircraft is more efficient than with absolute priority for arriving aircraft.

**Key words:** AMAN, DMAN, air traffic control, departures, arrivals, ATC AS, capacity.

## **Introduction (Введение)**

Ключевыми показателями эффективности работы аэродрома являются его пропускная способность и предсказуемость времени вылета/прилета [Manual on Global..., 2009]. Под предсказуемостью понимается процент вылетов по расписанию и полетов со своевременным прибытием, а также средняя продолжительность задержки при вылете и общее количество минут превышения фактического времени прибытия. Снижение времени задержки рейсов уменьшает расход топлива, увеличивая экономическую прибыль от перевозок, и снижает объем выбросов углекислого газа в атмосферу. С целью увеличения пропускной способности ВПП предлагается разработать интегрированный менеджер прилетов и вылетов воздушных судов

(AMAN/DMAN), который позволит оптимизировать очередь из вылетающих и прилетающих воздушных судов (ВС) по критерию минимума времени занятия ВПП. Поставим задачу разработать метод повышения пропускной способности аэродрома за счет оптимизации очереди вылетающих ВС по данному критерию, определить увеличение пропускной способности ВПП и снижение средней задержки рейсов в зависимости от интенсивности потока вылетающих ВС за счет использования предлагаемого метода.

Длина минимального интервала вылета между двумя соседними ВС в очереди на вылет с одной ВПП зависит от их весовых категорий и порядка вылета друг за другом [Федеральные авиационные правила ..., 2010]. Поэтому время обслуживания всей очереди ВС зависит от порядка вылета ВС. Чем меньше время обслуживания очереди, тем меньше средняя задержка ВС и время занятости ВПП. Оптимизация проводится за счет выбора порядка ВС с минимальным временем занятости ВПП. Снижение времени занятости ВПП повышает пропускную способность ВПП.

Обзор научно-технической литературы показал, что результаты исследования являются уникальными. В настоящее время в России системы ОрВД не проводят оптимизации очереди вылетающих ВС с учетом турбулентности в спутном следе. Евроконтроль проводил исследования по оптимизации потока вылетающих ВС, показавших целесообразность решения данной задачи [Dubouchet et al., 1999; Magill, 1999]. Для оценки эффективности оптимизации порядка вылетов ВС использовался имитатор воздушного движения в аэропорту Цюриха. Но возрастание пропускной способности ВПП и снижение средней задержки вылетающих ВС за счет оптимизации порядка вылетов ВС в открытых источниках не опубликованы. Необходимость оптимизации потока ВС подтверждается пунктом глобального аэронавигационного плана, который устанавливает требование повысить пропускную способность ВПП за счет оптимизированного эшелонирования с учетом турбулентности в спутном следе [Глобальный аэронавигационный..., 2016].

Испытания инструмента планирования вылетов (DFM) в Соединенных Штатах Америки показали хорошие результаты. В местах проведения испытаний степень выдерживания назначенного времени вылета увеличилась с 68 до 75 %, что является достаточно хорошим результатом.

### **Materials and methods (Материалы и методы)**

Материал исследования: процессы управления взлетами и посадками воздушных судов.

Методы исследования: методы теории автоматического управления, системного анализа и теории случайных процессов, методы оптимизации.

### **Discussion (Дискуссия)**

Известна общая трактовка опасности столкновения, которая выражает взаимосвязь между стандартами эшелонирования, пределами скорости и ускорения, точностью наблюдения, задержками связи, частотой выборки,

жесткостью маневров и частотой вмешательства [Holt et al., 1970]. Известна система упорядочивания потоков прилетающих ВС [Васильев, 2020]. В [Theory..., 2009] представлена теория производительности для обнаружения конфликтов в управлении воздушным движением, которая определяет, как диспетчеры адаптируют решения, чтобы компенсировать ограничения окружающей среды.

Известен принцип совместного функционирования AMAN/DMAN с приоритетом у AMAN [Arrival Manager..., 2010], состоящий из следующих шагов:

1) AMAN вычисляет расчетные (рекомендуемые) времена прибытия ВС и передает их диспетчеру на утверждение;

2) На основе утвержденных времен прибытия ВС AMAN формируют временные слоты занятия ВПП прилетающими ВС и передают их в DMAN;

3) DMAN вычисляет расчетные (рекомендуемые) времена вылетов ВС и передает на автоматизированное рабочее место диспетчера, через которое диспетчер может их откорректировать.

Известен принцип работы и состав передаваемых данных AMAN [Arrival Manager..., 2010].

Входные данные AMAN: плановая информация, информация наблюдения, аэронавигационная информация, весовые и скоростные характеристики ВС из BADA, метеоинформация, критерии оптимизации, диспетчерские вводы данных о занятости ВПП.

Выходные данные AMAN: расчетные (рекомендуемые) времена прибытия ВС; временные слоты занятости ВПП прилетающими ВС.

Принцип работы AMAN:

1. ВС при достижении заданного расстояния (150-200 морских миль) от аэропорта захватывается на сопровождение. Данное расстояние принято называть горизонтом AMAN.

2. С учетом плановой информации и информации наблюдения система AMAN вычисляет прогнозируемое время прибытия, захваченного на сопровождение ВС.

3. Проводят оптимизацию расчетных (рекомендуемых) времен прибытия ВС по критерию минимума времени занятия ВПП.

4. Система AMAN передает расчетные времена прибытия авиадиспетчеру, который учитывает их при определении последовательности посадок ВС (подтверждая расчетные времена или изменяя их).

5. Расчетные времена прибытия передают на борт ВС и в другие системы, например, DMAN.

Известен принцип работы DMAN и состав передаваемых данных DMAN [Dubouchet et al., 1999; Княжский и др., 2019; Княжский и др., 2021].

Входные данные DMAN: план полетов и сообщения от служб аэропорта о прохождении ВС ключевых этапов подготовки к вылету, например, об уборке колодок, завершении буксировки или прохождения противообледенительной процедуры.

Выходные данные DMAN: рекомендованные времена уборки колодок (MOBT), занятия исполнительного старта (MTOT) и, при необходимости, времена других ключевых моментов подготовки ВС к вылету. Окончательное решение о времени вылета ВС принимается диспетчером.

Принцип работы DMAN:

1. На основе плановой информации и готовности ВС к вылету вычисляют прогнозируемые времена вылетов ВС.

2. По прогнозируемым временам вылетов ВС с учетом минимально допустимых временных интервалов между вылетающими ВС вычисляют прогнозируемые очереди из ВС на вылет в течение заданного ближайшего интервала времени.

3. Вычисляют оптимальный по заданному критерию порядок ВС в очереди.

4. В соответствии с вычисленным порядком пересчитывают расчетные времена вылетов ВС.

5. Расчетные времена вылетов передают авиадиспетчеру, который учитывает их при определении последовательности вылетов ВС (подтверждая расчетные времена или изменяя их).

6. Расчетные времена вылетов передают на борт ВС и в другие системы, например, DMAN.

Известен метод полного перебора [Thomas et al., 2001], с использованием которого можно найти оптимальный порядок очереди по заданному критерию. Данный метод использовался в AMAN, DMAN и интегрированном AMAN/DMAN для определения порядка вылетов и прилетов ВС с наименьшим суммарным временем занятия ВПП.

В работе [Dubouchet et al., 1999] проведено моделирование воздушного движения с использованием AMAN и DMAN в аэропорту Осло-Гардермуэн. Показано, что возможно значительное сокращение времени задержки в воздухе, расхода топлива и выбросов углерода. Суммарное количество задержек при прибытии в воздухе можно снизить на 41% (почти 2 часа в день для данного аэропорта) с помощью незначительных задержек вылетов ВС, реализуемых в DMAN. Это соответствует потенциальному среднесуточному сокращению сжигаемого топлива на 3,4 тонны и выбросов парниковых газов на 10,7 тонны. С увеличением плотности трафика можно ожидать, по крайней мере, пропорционально большей отдачи.

Отличие интегрированного AMAN/DMAN от аналогов в том, что оптимизация очереди проводится совместно для прилетающих и вылетающих ВС, без предоставления абсолютного приоритета прилетающим ВС. В известных способах оптимизация очереди проводится отдельно для вылетающих и прилетающих ВС. При этом свободные временные слоты для вылетов и прилетов назначает диспетчер вручную или абсолютный приоритет имеют прилетающие ВС. За счет этого предложенный способ позволяет получить большую эффективность оптимизации.

Известные способы не описаны в открытых источниках с достаточной для реализации степенью детализации. Их описание приведено на уровне

концепций и обобщенных шагов. В настоящей статье также разработаны способы реализации концепций AMAN и DMAN.

Интегрированный AMAN\DMAN методом перебора всех возможных вариантов очередей ВС на каждой ВПП с учетом минимально допустимых времен задержек, определенных в инструкции по производству полетов в районе аэродрома, вычисляет такой порядок ВС в очередях, который занимает меньше всего суммарного времени занятия ВПП. На выходе интегрированного AMAN\DMAN формируется количество выходных потоков ВС  $\lambda_{\text{вых}}$ , равное числу ВПП.

Принцип функционирования интегрированного AMAN/DMAN, в случае работы по одной ВПП, состоит из следующих шагов:

1) Пошагово перебирают плановые времена прилетов и вылетов ВС и оценивают количество и порядок ВС в очереди в анализируемый плановый момент времени;

2) Методом перебора в соответствии с таблицей минимально допустимых временных интервалов между ВС, определенных в инструкции по производству полетов в районе аэродрома, вычисляют оптимальный порядок ВС в очереди по критерию минимума времени занятия ВПП;

3) Изменяют времена вылетов/прилетов ВС в соответствии с вычисленным оптимальным порядком.

Принцип работы интегрированного AMAN/DMAN в случае работы по нескольким ВПП в режиме смешанных взлетов и посадок состоит из следующих шагов:

1) Пошагово перебирают плановые времена прилетов и вылетов ВС в общем потоке;

2) Отдельно по каждой ВПП оценивают «вероятную очередь» ВС в анализируемый плановый момент времени, которая может возникнуть в случае добавления в нее анализируемого ВС;

3) Методом перебора в соответствии с таблицей минимально допустимых временных интервалов между ВС, определенных в инструкции по производству полетов в районе аэродрома, отдельно по каждой ВПП, вычисляют оптимальные порядки ВС в «вероятных очередях» по критерию минимума времени занятия ВПП;

4) Из «вероятных очередей» выбирают очередь, занимающую наименьшее суммарное время занятия ВПП (с добавленным в нее анализируемым ВС);

5) В выбранной очереди изменяют времена вылетов/прилетов ВС в соответствии с вычисленным оптимальным порядком.

Принцип работы интегрированного AMAN/DMAN показан на рис. 1

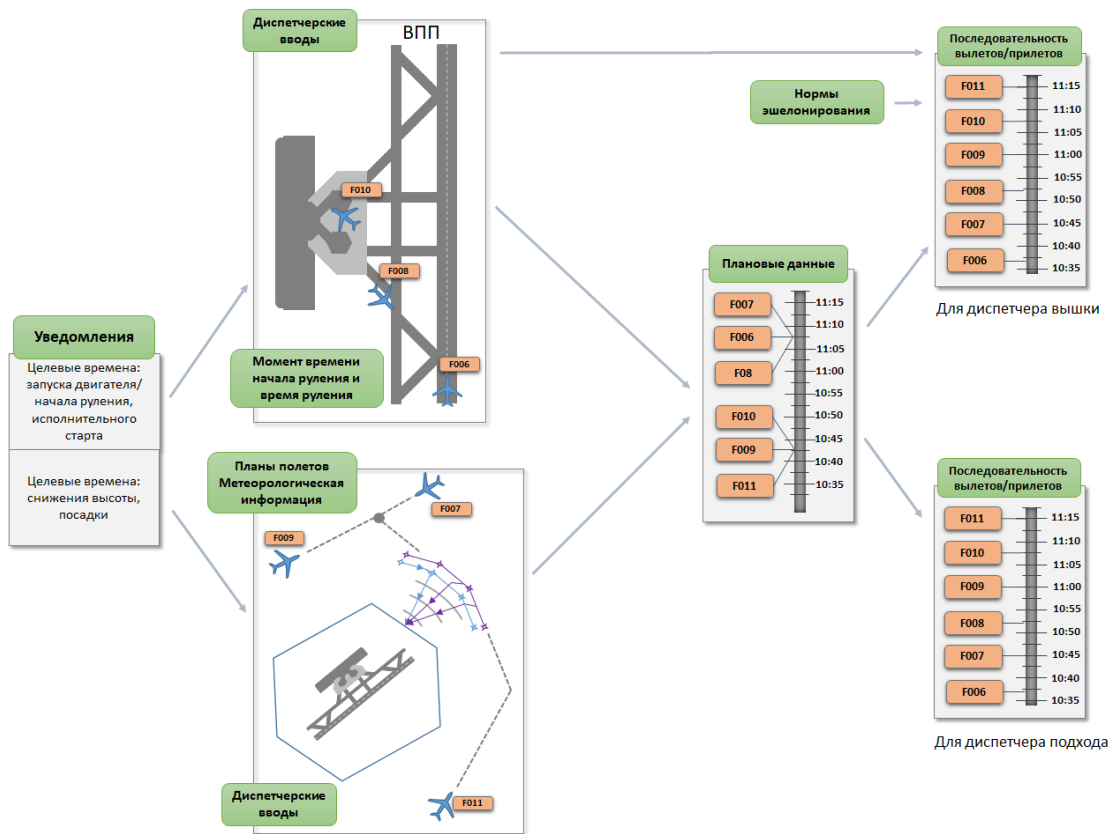


Рисунок 1 – Принцип работы интегрированного AMAN/DMAN

Для определения оптимального порядка вылетов/прилетов ВС необходимо знать минимально допустимые временные интервалы между прилетающими/вылетающими ВС, которые зависят от их весовых категорий и архитектуры аэродрома. Данные интервалы определяются для каждого аэродрома отдельно в соответствии с [Федеральные авиационные правила ..., 2010; Doc 4444..., 2016; Аэродромы. Том I ..., 2004] и прописываются в инструкции по производству полетов в районе аэродрома. В соответствии с [Федеральные авиационные правила ..., 2010; Doc 4444, 2016; Аэродромы. Том I ..., 2004] были рассчитаны усредненные минимальные временные интервалы, которые могут использоваться на аэродроме.

Определение минимальных временных интервалов между прилетающими/вылетающими ВС.

При аэродромном диспетчерском обслуживании минимальные интервалы продольного эшелонирования при полетах ВС по правилам полета по приборам с использованием системы наблюдения обслуживания воздушного движения устанавливаются не менее 5 км, а при следовании за ВС массой 136 тонн и более – не менее 10 км [Федеральные авиационные правила ..., 2010].

Минимально допустимые интервалы времени между смежными взлетно-посадочными операциями ВС устанавливаются аэродромом исходя из условий обеспечения безопасности полетов на нем по методике расчета технической возможности аэропортов [Методика расчета ..., 2020]. При этом минимальный

временной интервал между взлетом и посадкой воздушных судов при полетах с одной ВПП и параллельных ВПП, расстояние между осями которых менее 1000 м, не может быть менее 45 с [Федеральные авиационные правила ..., 2010].

ВС разделяются по массе: легкие (Л) – менее 7000 кг, средние (С) – более 7000 кг и менее 136000 кг, тяжелые (Т) – более 136000 кг.

К ВС, производящим посадку вслед за тяжелым или средним ВС, применяются следующие минимумы временных интервалов:

а) Средние воздушные суда, следующие за тяжелыми воздушными судами – 2 мин;

б) Легкие воздушные суда, следующие за тяжелыми или средними воздушными судами – 3 мин [Doc 4444..., 2016].

Временные интервалы работы ВПП в режимах «взлет-посадка» и «посадка-взлет» определяются в инструкции по производству полетов в районе аэродрома. При отсутствии инструкции, для проведения обобщенных расчетов, нормы эшелонирования возможно взять из ФАП ОрВД, в котором указано, что в режимах «взлет-посадка» и «посадка-взлет» используются интервалы: 3 мин и 1 мин соответственно.

Приведем пример сводной таблицы минимально допустимых временных интервалов между взлетающими и идущими на посадку ВС, определенной на основе [Федеральные авиационные правила ..., 2010; Doc 4444, 2016].

Таблица 1 – Интервалы времени в минутах между двумя взлетно-посадочными операциями на одной ВПП, указанные в регламентирующих документах

1ВС \ 2ВС	ТП	СП	ЛП	ТВ	СВ	ЛВ
ТП	1	2	3	1	1	1
СП	1	1	3	1	1	1
ЛП	1	1	1	1	1	1
ТВ	3	3	3	1	2	2
СВ	3	3	3	1	1	2
ЛВ	3	3	3	1	1	1

Здесь введены следующие условные обозначения: \*П – прилетающие ВС; \*В – вылетающие ВС; Т\* – тяжелые ВС; С\* – средние ВС; Л\* – легкие ВС.

В [Аэродромы. Том I ..., 2004] указано, что маркировка прицельной точки посадки начинается на расстоянии от порога ВПП, равном расстоянию не менее указанного в соответствующей колонке таблицы 5-1 данного документа.

Например, если длина ВПП – 3 км, расстояние между торцом ВПП и точкой ухода на второй круг (МАРt) – 1 км. При располагаемой посадочной дистанции 2600 м и более начало маркировки прицельной точки посадки находится в 300 м от порога ВПП.

Для определения изначально безопасного слота времени, необходимого для выполнения процедуры взлёта  $T_V$  или посадки  $T_{П}$ , дадим определение этого времени:

$$T_V = \Delta t_{\text{взл}} + \Delta t_{\text{инт}}, \quad (1)$$



где

$$\Delta t_{\text{взл}} = T_{\text{факт}} - T_{\text{исп}}; \Delta t_{\text{инт}} = t_{\text{инт}} - \Delta t_{\text{взл}};$$
$$\Delta t_{\text{инт}} = 0, \text{ при } t_{\text{инт}} \leq \Delta t_{\text{пос}}.$$

$$T_{\text{П}} = \Delta t_{\text{пос}} + \Delta t_{\text{инт}}, \quad (2)$$

где  $\Delta t_{\text{пос}} = T_{\text{осв}} - T_{\text{впр}}$

Для сокращения времени использования ВПП время занятия исполнительного старта и ожидания разрешения вылета не принимается в расчет, так как процедуры будут выполняться в процессе освобождения ВПП после посадки прилетающим судном или выполнения процедуры взлета вылетающим.

$T_{\text{факт}}$  – время освобождения ВПП после взлета (конец процедуры взлет);  $T_{\text{исп}}$  – время получения разрешения на взлет на исполнительном старте (начало процедуры взлет);  $T_{\text{осв}}$  – время освобождения ВПП после посадки (конец процедуры посадка);  $T_{\text{впр}}$  – время пролета ВС точки ВПР – получение разрешения посадки (начало процедуры посадка);  $\Delta t_{\text{взл}}$  – время, затраченное на выполнение взлета;  $\Delta t_{\text{пос}}$  – время, затраченное на выполнение посадки;  $\Delta t_{\text{инт}}$  – минимальный безопасный интервал, после которого возможно выполнение следующей процедуры;  $t_{\text{инт}}$  – безопасный интервал после выполнения процедуры взлета (посадки) в различной последовательности взятый из таблицы 1:

$$\Delta t_{\text{взл}} = \Delta t_{\text{разб}} + \Delta t_{\text{отр}}$$
$$\Delta t_{\text{пос}} = \Delta t_{\text{план}} + \Delta t_{\text{осв}}, \quad (3)$$

где:

$\Delta t_{\text{разб}}$  – время, затраченное на разбег до отрыва и набора высоты взлетающим ВС;  $\Delta t_{\text{отр}}$  – время, затраченное взлетающим ВС для полета от точки отрыва до торца ВПП;  $\Delta t_{\text{план}}$  – время, необходимое приземляющемуся ВС для движения от точки ВПР до точки касания на ВПП;  $\Delta t_{\text{осв}}$  – время, необходимое приземлившемуся ВС для пробега и освобождения ВПП.

Рассчитаем временные слоты, необходимые для выполнения процедур Взлёта (В) и Посадки (П) в различных вариантах их последовательности и с учётом максимальной взлетной массы.

Располагаемая дистанция для взлета от начала ВПП – 2900 м, для посадки – 2600 м (при расчёте начала маркировки прицельной точки посадки в 300 м от порога ВПП и при условии пробега после посадки всей дистанции). Дистанция пробега при сруливании с ВПП – 100 м.

По данным из BADA, усредненным с расчетом, что за  $V_{\text{исп}}$  (скорость на исполнительном старте в начале разбега) принимается 5 узлов, средняя скорость разбега на участке от исполнительного старта до точки отрыва + от точки отрыва до пролета торца ВПП:

– для тяжелых ВС  $\approx 87$  узлов (с учетом скорости В-747) или 45 м/с;  $V_{\text{факт}} \approx 168-169$  узлов (здесь и дальше указана скорость пролёта торца ВПП на высоте не выше 500 футов);

– для средних ВС  $\approx 78$  узлов (с учетом скорости D-328) или 40 м/с;  $V_{\text{факт}} \approx 152$  узлов;

– для легких ВС  $\approx 58$  узлов (с учетом скорости ВЕ-20) или 30 м/с  $V_{\text{факт}} \approx 112$ .

Средняя скорость посадки на участке от точки принятия решения до точки касания на ВПП

- для тяжелых ВС – 156 узлов (с учетом скорости В-747) или 80 м/с;
- для средних ВС – 126 узлов (с учетом скорости ТУ-134) или 65 м/с;
- для легких ВС – 96 узлов или 49 м/с.

Средняя скорость при пробеге после посадки:

– для тяжёлых ВС – 44 м/сек (скорость касания с ВПП  $\approx 270$  км/час; скорость сруливания с ВПП  $\approx 40$  км/час);

– для средних ВС – 37 м/сек (скорость касания с ВПП  $\approx 220$  км/час; скорость сруливания с ВПП  $\approx 45$  км/час);

– для легких ВС – 29 м/сек (скорость касания с ВПП  $\approx 160$  км/час; скорость сруливания с ВПП  $\approx 40$  км/час).

В результате выполненных расчетов получены следующие временные слоты (время, затраченное на выполнение операции + безопасный интервал времени, после которого будет начата следующая операция) для безопасного выполнения операций взлётов и посадок на ВПП в разной их последовательности.

Таблица 2 – Интервалы времени в минутах между двумя взлетно-посадочными операциями на одной ВПП

1ВС \ 2ВС	ТП	СП	ЛП	ТВ	СВ	ЛВ
ТП	(1,25)	(2)	(3)	(1,25)	(1,25)	(1,25)
СП	(1,38)	(1,38)	(3)	(1,38)	(1,38)	(1,38)
ЛП	(2,05)	(2,05)	(2,05)	(2,05)	(2,05)	(2,05)
ТВ	(3)	(3)	(3)	(1,04)	(2)	(2)
СВ	(3)	(3)	(3)	(1,12)	(1,12)	(2)
ЛВ	(3)	(3)	(3)	(1,37)	(1,37)	(1,37)

Расчёты проводились с учётом использования всей длины ВПП при взлётах и посадках. В реальных условиях ВС при выполнении взлёта и пробега после посадки не будут использовать всю длину ВПП (особенно лёгкие ВС) и времена  $\Delta t_{\text{взл}}$  и  $\Delta t_{\text{пос}}$  значительно сократятся и, соответственно, сократятся временные слоты для безопасного выполнения операций взлётов/посадок. Их значения приблизятся к опубликованным минимальным безопасным интервалам.

Приведем пример оптимизации очереди ВС в соответствии с таблицей 2, включающей по 2 вылетающих и прилетающих ВС средней весовой категории и по одному прилетающему и вылетающему ВС тяжелой весовой категории:

Не оптимизированный порядок ВС:

ТВ СВ СВ ТП СП СП

Суммарное время занятия ВПП:  $2 + 1.12 + 3 + 2 + 1.38 = 9$  мин 50 сек.

Оптимизированный по критерию минимального времени занятия ВПП порядок ВС:

СП СП ТП СВ СВ ТВ

Суммарное время занятия ВПП:  $1.38 + 1.25 + 1.25 + 1.12 + 1.12 = 6$  мин 12 сек.

В приведенном примере очереди ВС интегрированный АМАН/ДМАН снизил время занятия ВПП приблизительно на 59%. Повысить эффективность метода можно, учитывая при оптимизации очереди скорости ВС.

### Результаты

Моделировались потоки с  $\omega_1=0.05$ ,  $\omega_2=0.3$ ,  $\omega_3=0.15$ ,  $\omega_4=0.05$ ,  $\omega_5=0.3$ ,  $\omega_6=0.15$ .  $\lambda_{вх}$  принимала значения от 18 до 42 ВС/час. Коэффициенты  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ , соответствуют вылетающим легким, средним и тяжелым ВС,  $\omega_4$ ,  $\omega_5$ ,  $\omega_6$  – прилетающим. Время моделирования бралось равным 1.000.000 мин. Адекватность модели проверялась сравнением зависимостей средних задержек от интенсивности при фиксированном времени обслуживания, полученных путем моделирования, с зависимостями, рассчитанными аналитически.

Графики зависимости средней задержки ВС от интенсивности суммарного потока прилетов/вылетов в случае, когда потоки прилетов и вылетов имеют одинаковую интенсивность, приведены на рис. 2. Здесь синим цветом обозначена зависимость средних времен задержки вылета от интенсивности вылетов для наихудшего по критерию минимума времени занятия ВПП потока ВС, красным – для оптимизированного с использованием интегрированного АМАН/ДМАН, серым – для наиболее вероятного неоптимизированного потока ВС, относительно которого считается эффективность оптимизации.

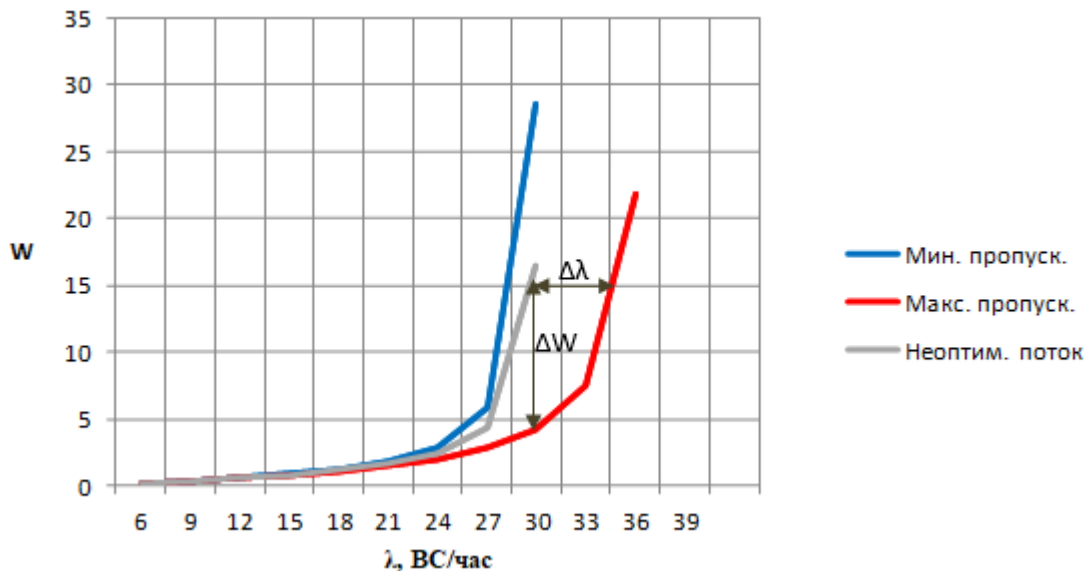


Рисунок 2 – Графики зависимости средней задержки ВС от интенсивности суммарного потока прилетов/вылетов (при  $\omega_1=0.05$ ,  $\omega_2=0.3$ ,  $\omega_3=0.15$ ,  $\omega_4=0.05$ ,  $\omega_5=0.3$ ,  $\omega_6=0.15$ )

Моделирование показало, что при одинаковой интенсивности потоков прилетающих и вылетающих ВС (при  $\omega_1=0.05$ ,  $\omega_2=0.3$ ,  $\omega_3=0.15$ ,  $\omega_4=0.05$ ,  $\omega_5=0.3$ ,  $\omega_6=0.15$ ) использование интегрированного АМАН/ДМАН позволяет повысить пропускную способность ВПП с 29 ВС/час до 35 ВС/час и снизить среднюю задержку вылетов/прилетов ВС на максимальной допустимой интенсивности на 11 мин.

При интенсивности потоков  $\omega_1=0$ ,  $\omega_2=0.4$ ,  $\omega_3=0.1$ ,  $\omega_4=0$ ,  $\omega_5=0.4$ ,  $\omega_6=0.1$  результаты достаточно близки к полученным при интенсивностях потоков  $\omega_1=0.05$ ,  $\omega_2=0.3$ ,  $\omega_3=0.15$ ,  $\omega_4=0.05$ ,  $\omega_5=0.3$ ,  $\omega_6=0.15$ , что также подтверждает целесообразность использования интегрированного АМАН\ДМАН.

Также интегрированный АМАН\ДМАН показал большую эффективность оптимизации, чем совместный АМАН и ДМАН с абсолютным приоритетом у АМАН. При максимальной интенсивности потока ВС и наиболее часто встречающемся составе по весовым категориям ВС, средняя задержка при использовании интегрированного АМАН/ДМАН меньше приблизительно на 4 мин, чем при использовании совместного АМАН и ДМАН с абсолютным приоритетом у АМАН.

Проведено моделирование работы интегрированного АМАН/ДМАН при следующем соотношении весовых категорий ВС: Л – 0%, С – 80%, Т – 20%. Данные взяты из летнего расписания полетов.

Особенностью рассматриваемого аэродрома является пересекающееся расположение ВПП. Одна ВПП работает только на взлет, другая – только на посадку. При оптимизации очереди необходимо учитывать возможность возникновения конфликтов в области пересечения ВПП.

Конфликт на пересечении ВПП возникает в случае, если тяжелое ВС взлетает от начала любой из ВПП и одновременно на другую ВПП выполняется посадка другого ВС любого типа. А также если для вылета ВС любой категории

используется ВПП 02, а на ВПП 06 заходит на посадку другое ВС любой весовой категории.

Оптимизация проводилась следующим образом:

1) В соответствии со сборником аэронавигационной информации выбирался режим работы ВПП на взлет/посадку;

2) При взлете/прилете очередного ВС вычислялся порядок ВС в очередях отдельно на каждой ВПП;

3) Методом полного перебора выбирался порядок ВС очереди, при котором ВПП занята меньше всего времени;

4) С учетом весовой категории ВС и времен взлета/посадки оценивался факт и время конфликта их траекторий;

5) В случае конфликта ВС в точке пересечения ВПП, время взлета вылетающего ВС задерживалось на минимально необходимый для бесконфликтного движения интервал времени.

Результаты моделирования работы интегрированного AMAN/DMAN приведены на рис. 3.

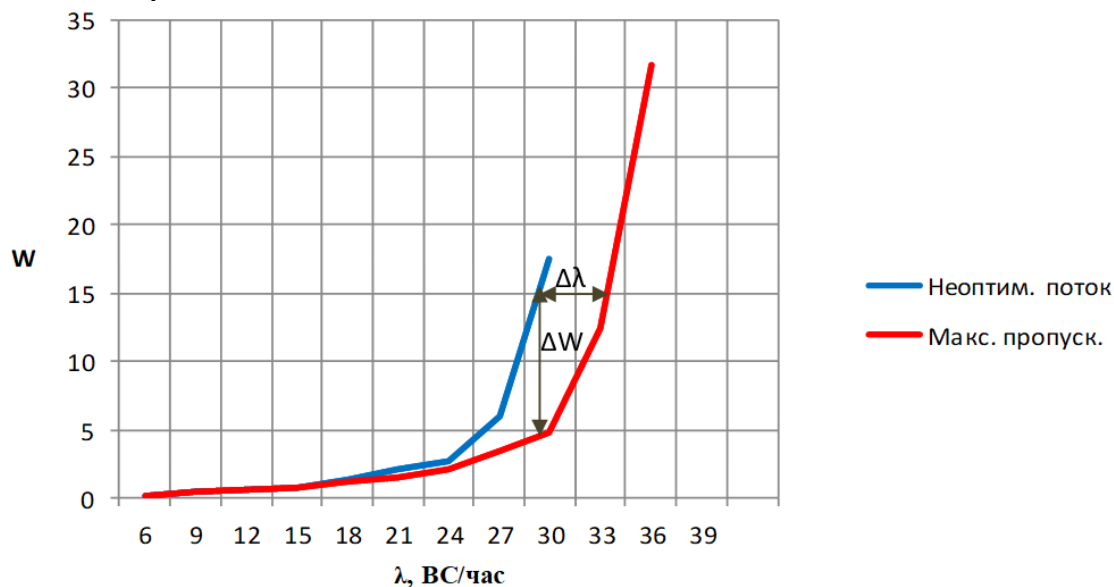


Рисунок 3 – Графики зависимости средней задержки ВС от интенсивности суммарного потока прилетов/вылетов (при  $\omega_1=0$ ,  $\omega_2=0.4$ ,  $\omega_3=0.1$ ,  $\omega_4=0$ ,  $\omega_5=0.4$ ,  $\omega_6=0.1$ )

Результаты моделирования показали, что наличие пересекающихся ВПП незначительно снижает эффективность оптимизации потока вылетающих и прилетающих ВС, и подтвердили целесообразность использования интегрированного AMAN/DMAN при таком расположении ВПП.

### Conclusion (Заключение)

Предложенный метод повышения пропускной способности аэродрома и снижения средней задержки вылетов и прилетов за счет оптимизации очереди вылетающих и прилетающих ВС, при рассмотренных условиях, позволяет повысить пропускную способность ВПП с 29 ВС/час до 35 ВС/час, а также снизить среднюю задержку ВС при максимально-допустимой интенсивности

потока прилетов/вылетов на 11 мин. При максимальной интенсивности потока ВС и наиболее часто встречающемся составе по весовым категориям ВС, средняя задержка при использовании интегрированного AMAN/DMAN меньше приблизительно на 4 мин, чем при использовании совместного AMAN и DMAN с абсолютным приоритетом у AMAN.

### Библиографический список

- Аэродромы. Том I: Проектирование и эксплуатация аэродромов. Приложение 14 к Конвенции о международной гражданской авиации. Издание четвертое. Международная организация гражданской авиации, 2004. 270 с.
- Васильев А. В.* М-система упорядочивания потоков AMAN (ARRIVAL MANAGEMENT) // Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов: Материалы научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2020. С. 74.
- Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. Издание пятое. Международная организация гражданской авиации, 2016. 151 с.
- Княжский А. Ю.* К вопросу оптимизации потока вылетающих воздушных судов на взлетно-посадочной полосе / А. Ю. Княжский, А. П. Плясовских // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации : сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2021. С. 135-141. EDN TTRHVN
- Княжский А. Ю.* Потенциальная возможность увеличения пропускной способности взлетно-посадочной полосы с использованием менеджера вылетов воздушных судов (DMAN) / А. Ю. Княжский, А. П. Плясовских // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 1(22). С. 96-103. EDN DWAYPA
- Методика расчета технической возможности аэропортов // Минтранс России, 2020. 35 с.
- Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» // Минтранс России, 2010. 30 с.
- Arrival Manager. Implementation Guidelines and Lessons Learned. Edition Number: 0.1 Edition date: 17 December 2010. Brussels: EUROCONTROL. 2010. 106 p.
- Doc 4444. Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения Издание шестнадцатое. Международная организация гражданской авиации. 2016. 506 с.
- Dubouchet E.* DOC 98-70-18 (Volume 5 of 10) PHARE Advanced Tools Departure Manager. Final Report PHARE/CENA/PAT-6.8.7.3.4/FR; 0.3 / E. Dubouchet, G. Mavoian, E. Page. Brussels: EUROCONTROL. 1999. 44 p.
- Holt J. M.* Separation theory in air traffic control system design / J. M. Holt, G. R. Marner // Proceedings of the IEEE. 1970. Vol. 58. № 3. pp. 369-376.
- Magill A.* Departure Manager Feasibility Report. Brussels: EUROCONTROL, 1999. 34 p.
- Manual on Global Performance of the Air Navigation System (Doc 9883). 1st Edition / International Civil Aviation Organization, 2009. 190 p.
- Theory and Model of Conflict Detection in Air Traffic Control: Incorporating Environmental Constraints / S. Loft, S. Bolland, M. Humphreys, A. A. Neal // Journal of Experimental Psychology Applied. 2009. № 15(2). p. 106-124
- Thomas H.* Introduction to Algorithms / H. Thomas, Cormen [et al.] // MIT Press, 2001. P. 1292.

### References

Aerodromes. Volume I: Design and operation of aerodromes. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Fourth edition. International Civil Aviation Organization. 2004. 270 p. (in Russian)

Arrival manager. Implementation Guidelines and Lessons Learned. Edition Number: 0.1 Edition date: 17 December 2010. Brussels: EUROCONTROL. 2010. 106 p.

Doc 4444. Procedures for Air Navigation Services. Air traffic management Sixteenth Edition. International Civil Aviation Organization. 2016. 506 p. (in Russian)

*Dubouchet E., Mavoian G., Page E.* (1999). DOC 98-70-18 (Volume 5 of 10) PHARE Advanced Tools Departure Manager. Final Report PHARE/CENA/PAT-6.8.7.3.4/FR; 0.3. *EUROCONTROL*. 1999. 44 p.

Federal aviation rules "Preparation and performance of flights in the civil aviation of the Russian Federation". Ministry of Transport of Russia, 2010. 30 p. (in Russian)

Global Air Navigation Plan 2016-2030 Fifth edition. International Civil Aviation Organization. 2016. 151 p.

*Holt J. M., Marner G. R.* (1970). Separation theory in air traffic control system design. *Proceedings of the IEEE*. 58(3): 369-376.

*Knyazhsky A. Yu., Plyasovskikh A. P.* (2019). Potential possibility of increasing the capacity of the runway using the aircraft departure manager (DMAN). *Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*. 1(22): 96-103. (in Russian)

*Knyazhsky A. Yu., Plyasovskikh A. P.* (2021). On the issue of optimizing the flow of departing aircraft on the runway. *Actual problems and prospects for the development of civil aviation: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Irkutsk, October 14–15, 2021*. Irkutsk: Irkutsk Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation". 2: 135-141. (in Russian)

*Loft S., Bolland S., Humphreys M., Neal A. A.* (2009). Theory and Model of Conflict Detection in Air Traffic Control: Incorporating Environmental Constraints. *Journal of Experimental Psychology Applied*. 15(2): 106-24.

*Magill A.* (1999). Departure Manager Feasibility Report. Brussels: *EUROCONTROL*, 1999. 34 p.

Manual on Global Performance of the Air Navigation System (Doc 9883), 1st Edition. International Civil Aviation Organization. 2009. 190 p.

Methodology for calculating the technical capability of airports. *Ministry of Transport of Russia*, 2020. 35 p. (in Russian)

*Thomas H., Cormen et al.* (2001). Introduction to Algorithms. *MIT Press*. 2001. P. 1292.

*Vasiliev V.* (2020). Modern trends in the use of airspace and promising flight support systems. *Materials of the scientific-practical conference of teachers, listeners and students*. Moscow: IP Ar Media, 2020. P. 74. (in Russian)