

**УДК 351.814.33**

**ББК 39.57**

**СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА ВЫЛЕТАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ  
СУДОВ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ОЧЕРЕДИ НА ВЫЛЕТ**

**Александр Юрьевич Княжский**

**кандидат технических наук**

**научный сотрудник АО «Ордена Трудового Красного Знамени**

**Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»**

**Санкт-Петербург, Россия**

**[knjagskij@mail.ru](mailto:knjagskij@mail.ru)**

**Александр Петрович Плясовских**

**доктор технических наук**

**главный конструктор научно-технического центра организации**

**воздушного движения (НТЦ ОрВД) АО «Ордена Трудового Красного**

**Знамени Всероссийский научно-исследовательский**

**институт радиоаппаратуры»**

**Санкт-Петербург, Россия**

**[vniira@yandex.ru](mailto:vniira@yandex.ru)**

**Александр Роальдович Бестугин**

**доктор технических наук, профессор**

**Директор института радиотехники, электроники и связи**

**Санкт-Петербургский государственный университет**

**аэрокосмического приборостроения**

**Санкт-Петербург, Россия**

**[fresguar@mail.ru](mailto:fresguar@mail.ru)**

В аэропортах с интенсивным воздушным движением из-за загруженности взлетно-посадочных полос часто возникают длительные задержки вылетов воздушных судов. Известен алгоритм оптимизации потока вылетающих воздушных судов по критерию минимума занятия взлетно-посадочной полосы, позволяющий снизить среднюю задержку воздушных судов и повысить пропускную способность взлетно-посадочной полосы. В работе проанализировано влияние алгоритма оптимизации на расход топлива и оценивается экономическая выгода от его использования. Результаты моделирования показали целесообразность оптимизации при достаточно высокой интенсивности потока.

**Ключевые слова:** управление воздушным движением, пропускная способность, взлетно-посадочная полоса, очередь, Пуассоновский поток, оптимизация.

**UDK 351.814.33**

**ВВК 39.57**

**REDUCTION OF FUEL CONSUMPTION OF OUTBOARD AIRCRAFT DUE  
TO DEPARTURE QUEUE OPTIMIZATION**

**Aleksandr Jur'evich Knjazhskij**

**Candidate of Technical Sciences**

**Research staff member, All-Russian scientific Research Institute of Radio**

**Equipment awarded with the Order of Red Banner**

**Saint Petersburg, Russia**

**knjagskij@mail.ru**

**Aleksandr Petrovich Pljasovskih**

**Doctor of Technical Sciences**

**Chief designer, ATM Scientific Technical Center, All-Russian scientific  
Research Institute of Radio Equipment awarded with the Order of Red Banner**

**Saint Petersburg, Russia**

**vniira@yandex.ru**

**Aleksandr Roal'dovich Bestugin**

**Doctor of Technical Sciences, Professor**

**Director of the Institute of Radio Engineering, Electronics and  
Communications**

**Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation**

**St. Petersburg, Russia**

**fresguap@mail.ru**

At busy airports aircraft departures are often delayed for a long time because of runway congestion. There is a known algorithm for optimizing the flow of outbound aircraft by the criterion of minimal runway-occupancy time which allows the average aircraft delay to be reduced and the runway capacity to be increased. In the paper the influence of the optimization algorithm on fuel consumption is analyzed and the economic benefit of its use is estimated. The modelling results showed optimization usefulness provided that the traffic is of high intensity.

**Key words:** air traffic control, capacity, runway, queue, Poisson flow, optimization.

### **Введение**

Воздушные суда (ВС) по своей массе делятся на три весовые категории: легкие, средние и тяжелые. Чем больше масса ВС, тем более сильные возмущения воздуха остаются после его пролета. Такие возмущения называются спутным следом ВС. Спутный след усиливается при взлете и посадке. Для обеспечения безопасности воздушного движения диспетчер в

соответствии с федеральными авиационными правилами выдерживает временные интервалы между вылетающими ВС [Приказ от 31 июля 2009 г. № 128, 2009]. Длительность интервалов зависит от весовых категорий вылетающих друг за другом ВС.

В наиболее загруженных аэропортах задержка ВС на вылет может достигать 30-40 мин. Поскольку очередь из задержанных ВС может содержать суда различной весовой категории, имеет смысл устанавливать порядок вылетов, при котором временной интервал занятия взлетно-посадочной полосы (ВПП) будет минимальным. Необходимость выбора оптимального порядка вылетающих ВС подтверждается требованием глобального аэронавигационного плана о повышении пропускной способности ВПП за счет оптимизированного эшелонирования с учетом турбулентности в спутном следе [Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг., 2016].

В работе анализируется влияние упорядочивания очереди из вылетающих ВС на зависимости средних задержек ВС от интенсивности потока вылетов. Упорядочивание производится по критерию минимума времени занятия ВПП. Зависимости средних задержек оцениваются отдельно легких, средних и тяжелых ВС. По полученным задержкам вычисляется снижение расхода топлива и получаемая за счет этого экономическая выгода.

#### Описание способа упорядочивания очереди

Зависимость минимальных временных интервалов между соседними вылетающими ВС в соответствии с [Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг., 2016] приведена в таблице 1. ВС разделяются по массе: легкие (Л) – менее 7000 кг, средние (С) – более 7000 кг и менее 136000 кг, тяжелые (Т) – более 136000 кг.

Таблица 1 – Минимальные временные интервалы между вылетающими ВС, в зависимости от их весовых категорий

1-й \ 2-й	Л	С	Т
Л	1	1	1
С	3	1	1
Т	3	2	2

Например, при последовательности вылетов: Т С Л Т С Л время обслуживания очереди составляет 12 мин = 2 + 3 + 1 + 2 + 3 + 1.

После оптимизации очередь ВС будет расположена в порядке: Л Л Т С С Т, в таком случае время обслуживания составит: 7 мин = 1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 1.

В данном примере оптимизация очереди сократила задержку более чем на 41%. В простейшем случае найти оптимальный порядок очереди можно методом перебора. В случае большой длины очереди возможно проводить «кусочную» оптимизацию, разбивая очередь на части равной длины. После чего проводить отдельно оптимизацию каждой части очереди.

### Определение расхода топлива

Поток вылетающих ВС можно представить суммой трех Пуассоновских потоков с ВС, одинаковых для каждого потока весовых категорий. Интенсивности потоков:  $\lambda_{л}=0.3\lambda_{общ}$ ,  $\lambda_{с}=0.4\lambda_{общ}$ ,  $\lambda_{т} =0.3\lambda_{общ}$ , где  $\lambda_{л}$  – интенсивность вылетов легких ВС,  $\lambda_{с}$  – интенсивность вылетов средних ВС,  $\lambda_{т}$  – интенсивность вылетов тяжелых ВС. Суммарная интенсивность  $\lambda_{общ}$  принимала значения от 12 до 36.6 ВС/час. Путем моделирования были получены зависимости средних задержек ВС от интенсивности потока (рис. 1 и рис. 2).

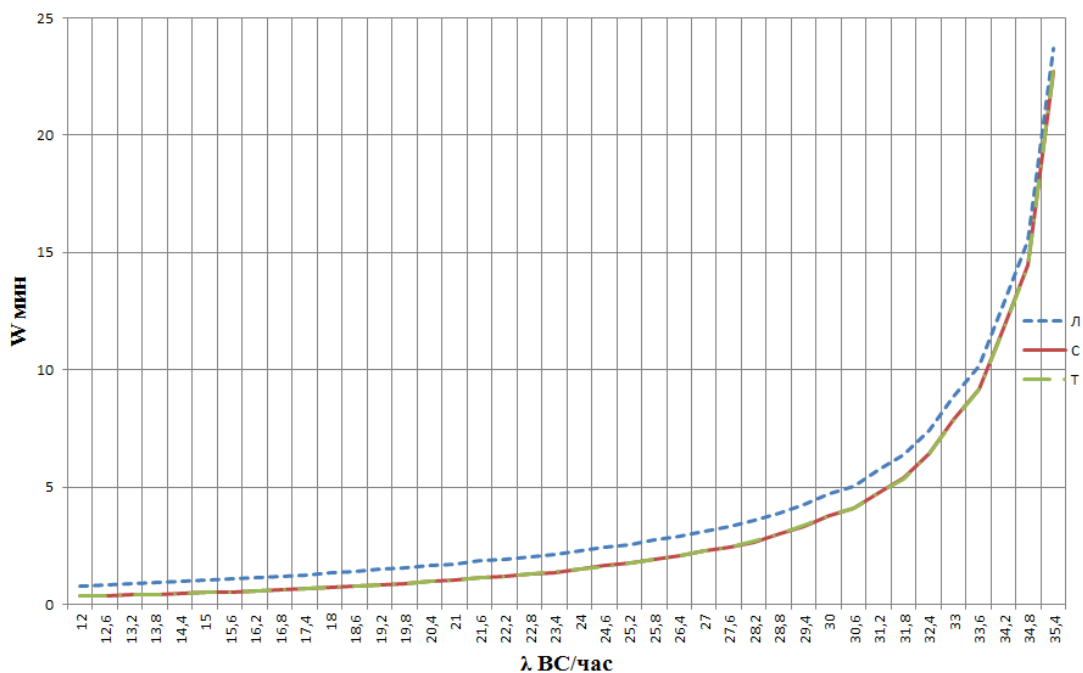


Рисунок 1 – Зависимость средней задержки вылета ВС от интенсивности потока при неоптимизированном порядке вылетов

Из рисунка 1 видно, что при неоптимизированном порядке вылетов средняя задержка тяжелых и средних ВС меньше чем легких. Это связано с тем, что по правилам эшелонирования перед вылетом средних и тяжелых ВС разрешается выдерживать меньшую задержку, чем перед вылетом легких (Таблица 1).

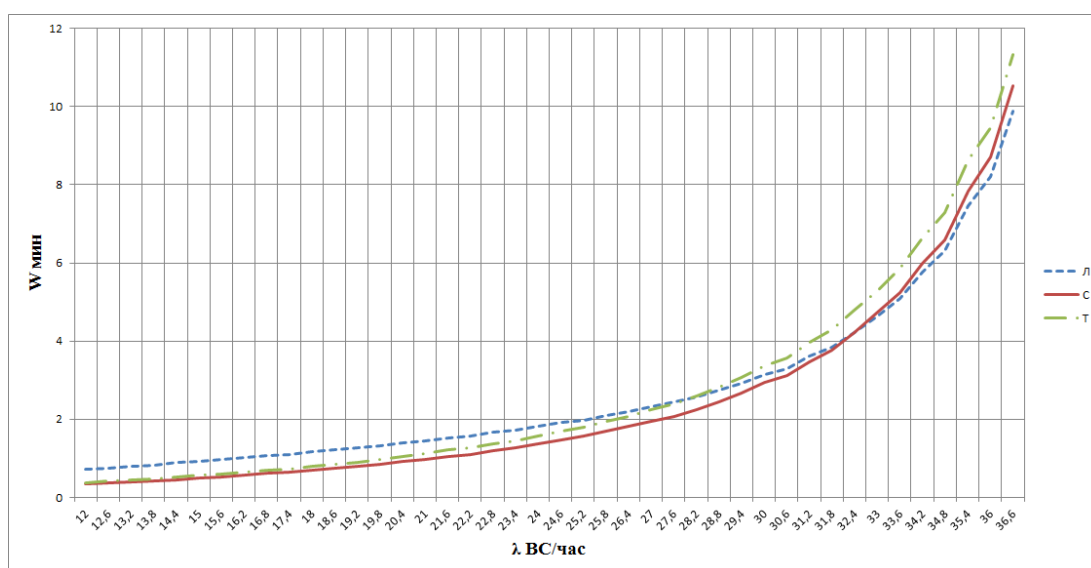


Рисунок 2 – Зависимость средней задержки вылета ВС от интенсивности потока при оптимизированном порядке вылетов

Из рисунков 1 и 2 видно, что при неоптимизированном порядке вылетов средняя задержка тяжелых и средних ВС меньше чем легких. После оптимизации при интенсивности потока вылетающих ВС  $\lambda_{\text{общ}} > 28.2$  ВС/час средняя задержка тяжелых ВС становится больше чем легких и средних.

Количество сэкономленного топлива за счет оптимизации очереди рассчитывалось при предположении, что расход одного ВС соответствующей весовой категории в режиме холостого хода составляет: тяжелый – 0.28 т/час, средний – 0.12 т/час, легкий – 0.1 т/час. Зависимости снижения средней задержки ВС по их весовым категориям приведены на рисунке 3. На рисунке 4 показана зависимость количества сэкономленного в сутки топлива от интенсивности вылетов.

Дополнительный расход топлива одного ВС определенной весовой категории, возникший в результате задержки вылета, равняется

$$Q_{BCi} = 0.04 \cdot W_i \cdot \beta_i, \quad (1)$$

где  $W_i$  – задержка,  $\beta_i$  – расход топлива,  $i$  – индекс, обозначающий принадлежность параметра к весовой категории ВС: 1 – легкие, 2 – средние, 3 – тяжелые.

Дополнительный расход топлива, вызванный задержками всех ВС в течение суток, рассчитывался по формуле

$$Q_{\text{общ}} = 24 \sum_{i=1}^3 \lambda_i Q_{BCi}, \quad (2)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность потока ВС, множитель 24 обозначает количество часов в сутках.

Поскольку тяжелые ВС имеют больший расход топлива, чем легкие и средние, и при низкой интенсивности потока после оптимизации тяжелые ВС пропускают вперед легкие и средние, оптимизация порядка вылетов по критерию минимума времени занятия ВПП негативно сказывается на расходе топлива. При интенсивности вылетов  $\lambda > 22.5$  ВС/час расход топлива за счет упорядочивания очереди задержанных ВС снижается.

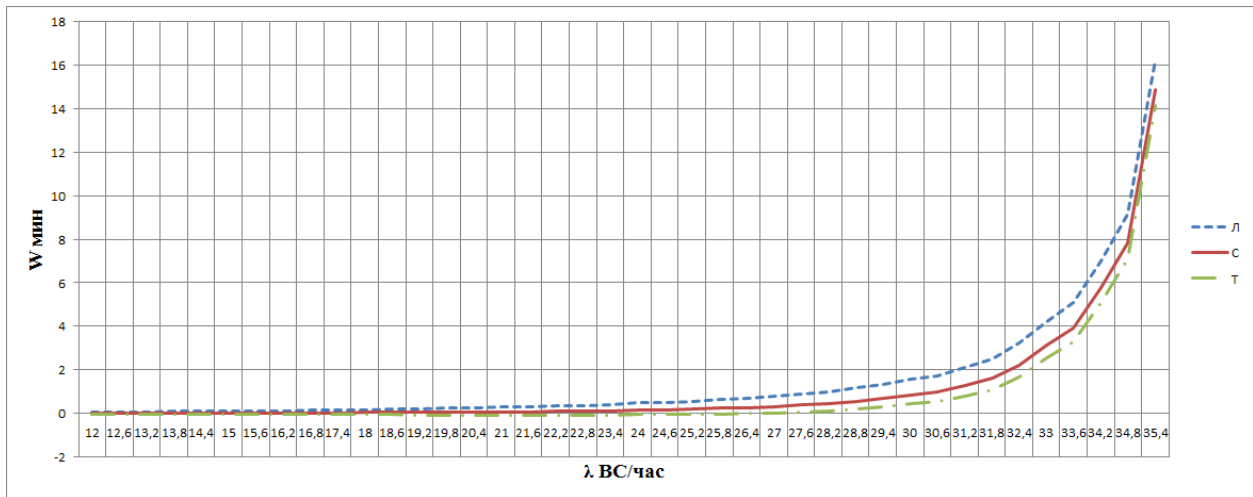


Рисунок 3 – Зависимости снижения средней задержки ВС по их весовым категориям

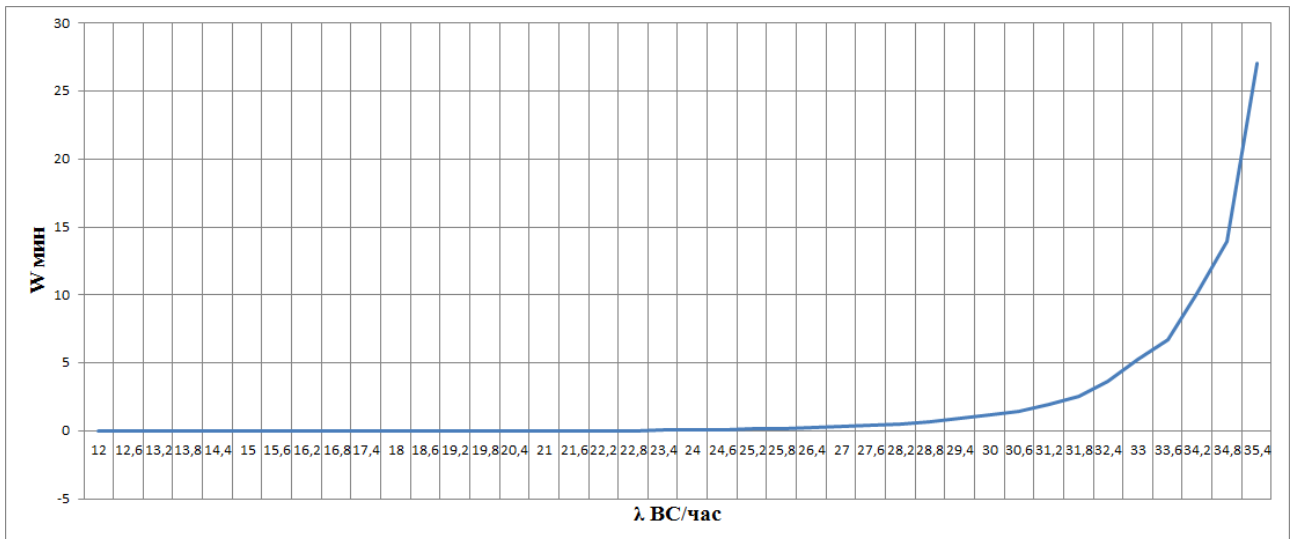


Рисунок 4 – Снижение расхода топлива за счет оптимизации очереди

По результатам исследования предлагается в систему поддержки принятия решений диспетчера включить два режима автоматического упорядочивания очереди ВС, оптимизирующих очередь по критериям минимума времени занятия ВПП (максимальной пропускной способности ВПП) или минимума расхода топлива. Режим упорядочивания выбирается диспетчером. В обоих случаях оптимизацию можно проводить методом перебора.



## **Заключение**

В работе получены зависимости средних задержек ВС легкой, средней и тяжелой весовых категорий и общего расход топлива от интенсивности потока вылетающих ВС до и после упорядочивания очереди по критерию минимума времени занятия ВПП. При предположении о том, что поток вылетов ВС является Пуассоновским, упорядочивание очереди целесообразно проводить при общей интенсивности вылетов выше  $\lambda_{\text{общ}} > 38$  ВС/час. Моделирование показало возможность экономии более 20 тонн топлива в день за счет выбора порядка ВС, оптимального по критерию минимума времени занятия ВПП.

## **Библиографический список**

1. Приказ от 31 июля 2009 г. N 128 "Об утверждении федеральных авиационных правил "подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации" (в ред. Приказов Минтранса РФ от 21.12.2009 N 242, от 22.11.2010 N 263), пункт 9.17.3.
2. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. Издание пятое, Международная организация гражданской авиации, Монреаль, Канада, 2016 г. Doc 9750-AN/963.

## **References**

1. Order of July 31, 2009 N 128 "Concerning the federal aviation regulations "Flight preparation and operation in the RF civil aviation" (ed. by the RF Mintrans Orders of 21.12.2009 N 242, of 22.11.2010 N 263), paragraph 9.17.3. (In Russian)
2. Global Air Navigation Plan for 2016–2030. 5<sup>th</sup> edition, International Civil Aviation Organization, Montreal, Canada, 2016. Doc 9750-AN/963. (In Russian)