

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-3-26-35

## Определение характеристик конечных участков стандартных маршрутов прибытия с помощью аппарата системы массового обслуживания

**В.Б. Малыгин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

**Аннотация:** В статье решается задача определения вероятностных характеристик участков стандартных маршрутов прибытия, определяющих порядок построения очереди на посадку типа «веер» и «тромбон», с учетом интенсивности потока движения воздушных судов и размера возникающей очереди. Данная задача тесно связана с эффективностью использования воздушного пространства, а также с предельными значениями характеристик безопасности полетов. Применение аппарата системы массового обслуживания позволяет оптимизировать элементы структуры воздушного пространства на объективной основе, а в случае рассмотрения обратной задачи установить предельные значения характеристик потока воздушного движения. Особую значимость характеристики схем типа «веер» и «тромбон» приобретают в аэроузле, где в относительно небольшом объеме воздушного пространства, независимо друг от друга функционируют несколько аэродромов. Так происходит в московском аэроузле, поэтому именно этот узел принят в качестве практического примера. Как базовая модель в данной задаче рассматривается система массового обслуживания с очередями ограниченного размера, где вероятностным способом производится поиск оптимального количества каналов обслуживания в стационарном потоке воздушного движения. Такая модель определяет суть схемы типа «тромбон» или «веер», где количество каналов обслуживания соответствует количеству эшелонов на дуге веера или на участке горизонтального полета тромбона. На настоящий момент количество таких эшелонов, как правило, соответствует количеству стандартных маршрутов прибытия, участвующих в формировании тромбона (веера), что с практической точки зрения является избыточным. Задача использования математического аппарата системы массового обслуживания состоит в определении оптимального количества эшелонов – каналов обслуживания модели при установлении требуемой вероятности ее отказа. В качестве математической модели системы массового обслуживания применена схема типа «тромбон», а в приведенном примере представлена структура воздушного пространства с применением схемы типа «веер» в качестве регулятора очереди воздушных судов на посадку. Все расчеты произведены для определенной интенсивности потока воздушного движения на конкретный аэродром с учетом полноценного применения режимов постоянного снижения и набора (CDO, CCO). В результате решения задачи получено значение оптимального количества эшелонов на схеме типа «тромбон» или «веер», а также показана зависимость количества каналов обслуживания (эшелонов на тромбоне или веере) от значения заданной вероятности отказа системы массового обслуживания. Предлагаемый подход к организации структуры воздушного пространства имеет перспективы внедрения.

**Ключевые слова:** система массового обслуживания, стандартные маршруты прибытия (вылета), характеристики потока прибытия, схемы организации очереди прибывающих воздушных судов.

**Для цитирования:** Малыгин В.Б. Определение характеристик конечных участков стандартных маршрутов прибытия с помощью аппарата системы массового обслуживания // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 3. С. 26–35. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-3-26-35

## Characterization of the terminal area of standard arrival routes using the queueing system

**V.B. Malygin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

**Abstract:** The article solves the problem of determining the probabilistic characteristics of the STARs legs which specify a sequencing technique of “point merge” and “trombone”-type considering the intensity of the air traffic flow and the formation of a queue. This task is closely related to the airspace efficiency, as well as to the limit values of flight safety performance.

An application of the queueing system makes it possible to optimize the elements of the airspace structure on an objective basis, and in the event of considering the inverse problem to establish limit values for the air traffic flow characteristics. The characteristics of the “point merge” and “trombone”-type schemes become of prime importance in the air hub, where several airfields function of each other in a relatively small volume of airspace – as it happens in the Moscow air hub, so it is the given hub that is taken as a practical example. In this problem the basic model is the queueing system with limited-size queues where the optimal number of service channels in a stationary air traffic flow is determined in a probabilistic way. The stated model encapsulates the essence of the “trombone” or “point merge”-type scheme, where the number of service channels corresponds to the number of flight levels on the arc of the “point merge” or on the horizontal flight segment of the “trombone”. Now, the number of such flight levels, as a rule, corresponds to the number of standard arrival routes involved in the formation of a “trombone” (“point merge”), which, from a practical point of view, is excessive. The task of using the mathematical apparatus of the queueing system is to determine the optimal number of flight levels – service channels of the model while establishing the required probability of its failure. As a mathematical model of the queueing system, the “trombone”-type scheme is used, and in the mentioned above example, the structure of the airspace is presented using the “point merge”-type scheme as a regulator of the aircraft sequence for landing. All the computations are performed for the certain intensity of air traffic flow for a specified airfield, considering the full-scale application of continuous descent operations and continuous climb operations (CDO, CCO). As a result of solving the problem, the value for the optimal number of flight levels on the “trombone” or “point merge”-type scheme was obtained, and the dependence of the number of service channels (flight levels on the “trombone” or “point merge”) on the value of the given probability of the queueing system failure was shown. The proposed approach to the airspace structure formation has prospects for implementation.

**Key words:** queueing system, standard routes of arrival (departure), characteristics of the arrival flow, schemes for arriving aircraft queue discipline.

**For citation:** Malygin, V.B. (2022). Characterization of the terminal area of standard arrival routes using the queueing system. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 3, pp. 26–35. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-3-26-35

## Введение

В данной работе предметом исследования является определение оптимального и достаточного количества эшелонов (высот) участка горизонтального полета схемы регулирования очереди захода на посадку прибывающих воздушных судов типа «тромбон» ( $T$ ) или «веер» ( $B$ ). В настоящее время количество таких эшелонов определяется числом стандартных маршрутов прибытия, приходящихся на эти схемы, однако такой подход не имеет объективного обоснования, а также способствует сокращению стандартных маршрутов прибытия, т. к. схемы регулирования очереди  $T$  и  $B$  могут занимать значительный объем воздушного пространства района аэродрома [1].

В свою очередь ограничение количества стандартных маршрутов прибытия либо их слияние в целях сокращения пространства для схем типа  $T$  и  $B$  отрицательно влияет на характеристики безопасности полетов (БП), а также на характеристики эффективности использования воздушного пространства, топливной эффективности [2]. В любом случае требуется вмешательство авиадиспетчера для

разрешения конфликтных ситуаций, возникающих в процессе обслуживания воздушного движения (ОВД) на стандартных маршрутах прибытия, включая участки, формирующие схемы типа  $T$  и  $B$ . Целью данной работы является определение достаточного количества эшелонов (высот) на участках горизонтального полета схем регулирования очереди на посадку типа  $T$  и  $B$  в зависимости от характеристик потока прибывающих воздушных судов для конкретного аэродрома.

## Постановка задачи

1. В соответствии с символикой Кендалла входящий поток характеризуется пуассоновским распределением случайной величины поступления заявок на обслуживание ( $M$ ), обслуживание заявок осуществляется функцией ( $G$ ). Количество каналов обслуживания ( $n$ ) и количество мест для ожидания в очереди ( $m$ ) являются искомыми переменными соответственно  $N$  и  $\Omega$ .

2. В силу того что поток воздушных судов с различных направлений на практике сильно зависит от времени суток, сезонности

и подобного, нельзя с определенностью заявить о наличии некой зависимости характеристик загруженности стандартных маршрутов прибытия от направления полета. По этой причине в данной задаче поток прибывающих воздушных судов (ВС) рассматривается как совокупность появлений вероятностных событий входа на схему (заявки на обслуживание) типа  $T$  и  $B$  воздушных судов, заходящих на посадку  $M$ , независимо от направления. Для того чтобы можно было рассматривать поток поступления заявок как пуассоновский, [3] зададим элементарный промежуток времени  $\Delta t$ , в который появление одновременно нескольких заявок считаем невозможным событием.

3. Одной из характеристик схем типа  $T$  или  $B$  [1, 4] является требуемый минимальный интервал ( $L_{\min}$ ) в очереди при выполнении захода на посадку. Данная характеристика зависит от множества факторов. Так, если с одной взлетно-посадочной полосы (ВПП) выполняются и взлеты и посадки, интервал в очереди увеличен по сравнению с организацией вылета и прилета с разных ВПП (не считая независимые заходы). Кроме того, на  $L_{\min}$  существенно влияют погодные условия.

4. Длина участка горизонтального полета схемы типа  $T$  или длина дуги схемы типа  $B - (D)$  определяют характеристику длины допустимой очереди ( $\Omega$ ), что в совокупности с  $L_{\min}$  определяет способность схемы гасить возмущение потока [5, 6] движения ВС.

5. Количество эшелонов (высот) на участке горизонтального полета схемы типа  $T$  или на дуге схемы типа  $B - (N)$  по сути определяет количество каналов обслуживания в интерпретации указанных схем в виде СМО и не может быть меньше одного [7–9].

6. Связать в единый комплекс указанные характеристики становится возможным при помощи установления вероятностного допустимого предела ( $P_{don}^{\tau}$ ), который определяет устойчивость системы к воздействиям среды. Данная зависимость представляет собой характеристику удержания, рассчитываемую исходя из статистических данных по интенсивности воздушного движения. На практике такой аэродром, как Шереметьево, в среднем

имеет 5 часов в сутки интенсивной загрузки ( $\tau$ ) [10, 11]. С учетом наличия оператора в системе управления – авиадиспетчера, возникновение ситуации недостатка каналов обслуживания (эшелонов на схемах типа  $T$  или  $B$ ) может нивелироваться за счет других управляющих возможностей организации потока прибытия, однако «ручное» управление существенно ухудшает характеристики БП. Чтобы исключить ситуацию дефицита эшелонов на схемах прибытия в течение года с учетом того обстоятельства, что такая ситуация рассматривается как случайное событие в течение часа интенсивного движения, воспользуемся формулой

$$P_{don}^n = \frac{1}{365 \times \tau \times P_n}; \quad (1)$$

где  $n$  – количество эшелонов (высот) на входе схемы.

Задача сводится к установлению оптимальных размеров характеристик  $D, N$  в зависимости от меняющихся характеристик  $M, L_{\min}$  с учетом характеристики  $P_{don}^n$ , а также характеристик БП [12, 13].

## Предлагаемый подход к решению задачи

На рис. 1 представлена схема системы массового обслуживания с очередями и с каналами обслуживания типа  $M/G/N/\Omega$   $N \geq 1$  [14, 15]. Каждый предыдущий канал обслуживания (начиная с 1-го) имеет приоритет перед последующим, т. е. при наличии свободной ячейки соответствующего столбца матрицы  $A$  предыдущего канала обслуживание перемещается с текущего на предыдущий канал.

При

$$f_t^n = 0; f_t^{n+1} \downarrow f_t^n; \quad (2)$$

где  $n$  – номер канала обслуживания,

$t = \frac{L_{\min}}{\Delta t}$  – время обслуживания. При  $\Delta t \rightarrow 0$   $t = L_{\min}$ .

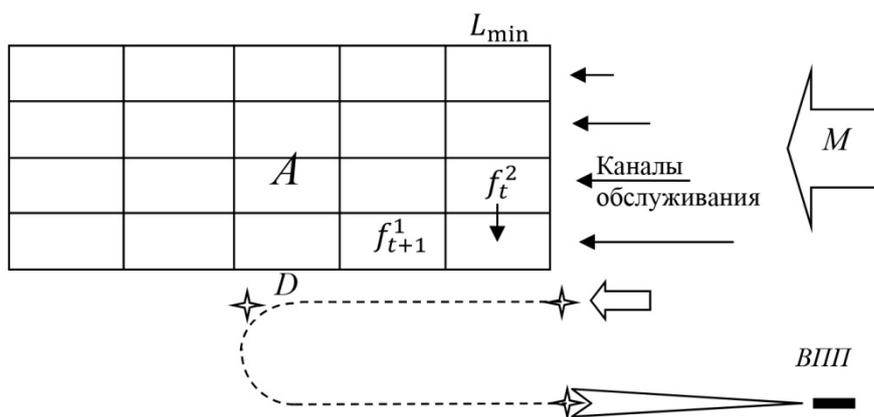


Рис. 1. Схема СМО с очередями и приоритетным использованием каналов обслуживания  
Fig. 1. Queueing system scheme with queues and priority use of service channels

Таблица 1  
Table 1

Значения вероятностей поступления заявок на вход СМО при  $\lambda = 1,6$   
Probability values of received applications for the input of the queueing system at  $\lambda = 1.6$

$k$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$P^k$	0,201896518	0,323034429	0,258427543	0,137828023	0,055131209	0,017641987	0,00470453	0,001075321	0,000215064	3,82336E-05	6,11738E-06	8,89801E-07	1,1864E-07	1,46019E-08	1,66878E-09	1,78004E-10	1,78004E-11

Так, из рис. 1 видно, что при отсутствии заявки на входе СМО в первом канале обслуживания в соответствии с (2) заявка на втором канале принимается первым каналом обслуживания, при этом второй канал обслуживания освобождается. Как отмечалось, поток  $M$  поступления на вход СМО заявок на обслуживание Пуассоновский [16, 14]. Параметр закона Пуассона ( $\lambda$ ) характеризует интенсивность поступления заявок на обслуживание, которое измеряется в количестве заявок, поступающих в течение часа.

Вероятность появления  $k$  заявок на входе СМО обозначим  $P^k$ . В табл. 1 представлены значения вероятностей поступления на вход СМО соответственно от 0 до 16 заявок при  $\lambda = 1,6$ , что с учетом средней скорости потока воздушных судов на входе схем типа  $T$  и  $B$   $W_{cp.} = 450$  км/ч соответствует 60 ВС/ч.

Длину допустимой очереди  $\Omega$  СМО можно представить как отношение  $D$  к  $L_{min}$ ,

также  $\Omega$  может быть выражена через время обслуживания заявки  $t$ :

$$\Omega = t \frac{D}{L_{min}}. \quad (3)$$

На рис. 1 длина допустимой очереди представлена как  $\Omega = \delta \times L_{min}$ , где  $\delta = 5$ .

Вероятность случайного события, которое допускает использование двух каналов обслуживания ( $P_2$ ) при поступлении двух заявок, равна

$$P_2 = P^2 \times \frac{1}{5},$$

где второй множитель является вероятностью занятости первого интервала  $t_1$  канала 1.

Действительно, только в том случае, если обе заявки поступят на вход СМО в пределах  $t_1$ , потребуется два канала обслуживания.

Таблица 2  
Table 2

Характеристики удержания – отказа СМО в течение года (365 сут.)  
Annual characteristics of “retention” – queuing system failure over a year (365 days)

<i>k</i> -й канал	2	3	4	5	6
$\eta_k$	471,630266	251,5361419	100,6144568	32,19662616	0,00470453
$P_{don}^k$	0,002120305	0,003975572	0,00993893	0,031059155	–

Таблица 3  
Table 3

Вероятностная потребность в каналах обслуживания СМО  
Probabilistic need for service channels of the queuing system

<i>k</i> -й канал	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
$P_k$	0,28959418877	0,09267014041	0,01976962995	0,00316314079	0,00040488202	0,00004318742	0,00000394856	0,00000031589	0,00000002246	0,00000000144	0,00000000008	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000

Принципиально нас интересует, где будет находиться заявка на первом канале обслуживания, когда вторая заявка поступит на вход СМО.

В общем случае вероятность возникновения потребности в *n*-м канале обслуживания с учетом (2) можно выразить формулой

$$P_n = \sum_{n=2}^N \left( P^n \times \frac{C_N^n}{8^{(n-1)}} \right). \quad (4)$$

Необходимо отметить, что один канал обслуживания должен быть в любом случае по условию задачи.

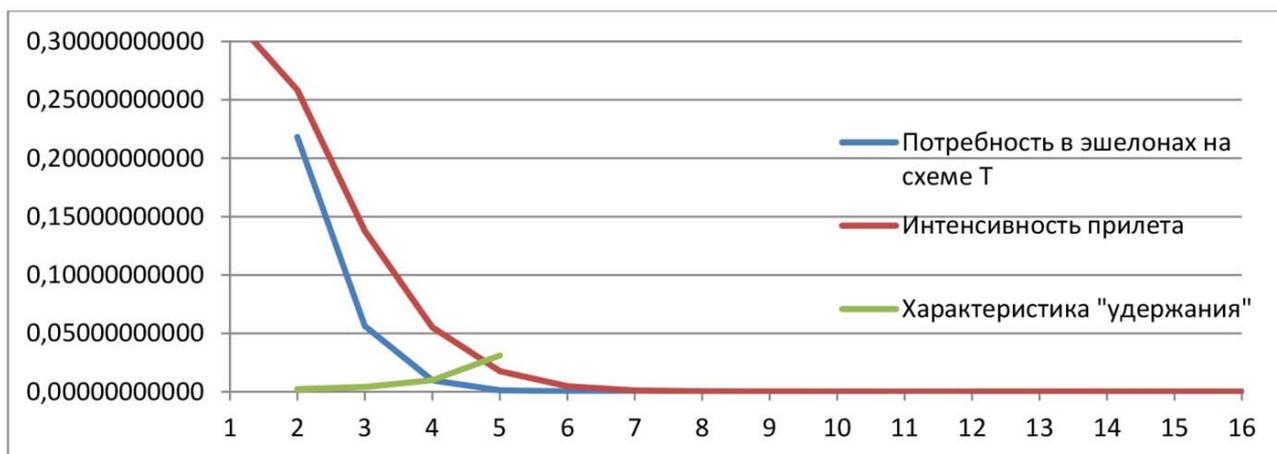
В табл. 2 представлены значения  $P_{don}^k$  для актуального количества каналов СМО.

Из табл. 2 видно, что всего допустимых случаев в году с возникновением ситуации занятости двух каналов обслуживания определяется с учетом  $P^2 = 0,258427543$  (табл. 1) и  $\eta_2 \approx 472$  (табл. 2), соответственно, вероятность возникновения такой ситуации единственный раз в год  $P_{don}^2 = 0,002120305$ . Определять вероятность  $P_{don}^6$  не имеет смысла, т. к. количество допустимых случаев в год с занятостью шести каналов обслуживания  $\eta_6$  стремится к нулю.

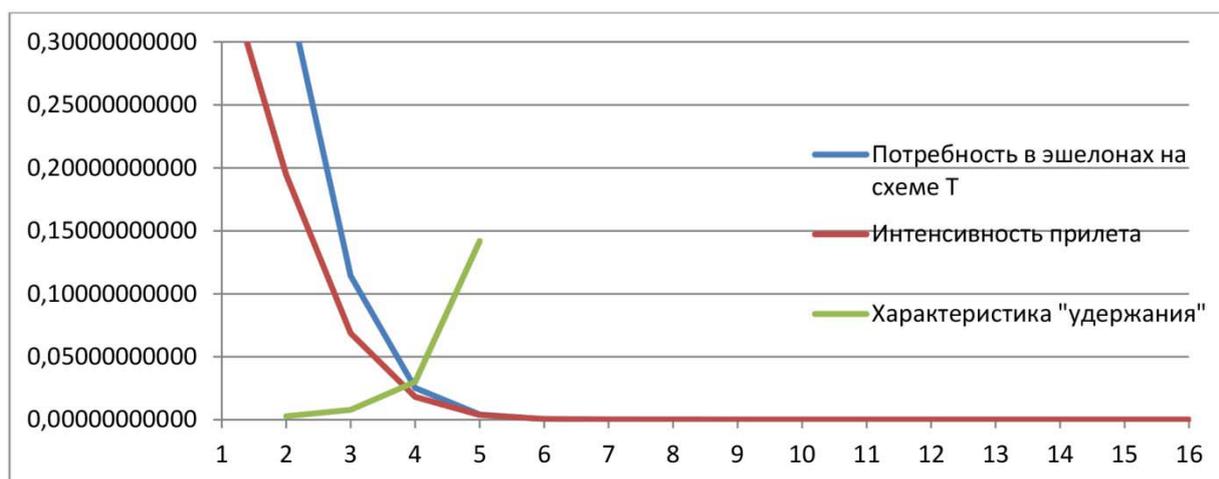
В табл. 3 приведены значения потребности в каналах обслуживания, выраженные в виде вероятностей в зависимости от интенсивности потока прибывающих ВС на основе табл. 1.

Данную модель СМО можно отобразить в виде схемы типа *T* (рис. 1) длиной  $D = 2,5 \times L_{min}$  [16, 17]. С учетом пуассоновского прилетного потока для описанных выше параметров  $W_{cp}$  и  $L_{min}$  примерная интенсивность воздушного движения составит 60 ВС/ч при  $D = 30$  км. При этом на схеме типа *T* достаточно пяти эшелонов входа. Действительно, вероятность наступления потребности в пяти эшелонах на входе схем типа *T* и *B* в течение года  $P_{don}^5 = 0,031059155$  примерно на порядок превышает расчетное значение вероятности  $P_5 = 0,00316314079$  возникновения такой ситуации, исходя из заявленных характеристик потока и схемы. В то же время увеличение длины *D* до 38 км снижает достаточное количество каналов обслуживания СМО (эшелонов (высот) на входе схем типа *T* и *B*) до четырех.

$$P_{don}^4 = 0,00993893; \quad P_4 = 0,00968853784, \\ P_4 < P_{don}^4.$$



**Рис. 2.** Зависимость потребности в эшелонах от часовой ИВД с учетом  $P_{don}^k$   
**Fig. 2.** Dependence of the need for flight levels on the hour intensity of air traffic, considering  $P_{add}^k$



**Рис. 3.** Потребность в каналах обслуживания при ИВД = 40<sub>ВС/ч</sub>,  $D = 12$  км,  $L_{min} = 7$  км.  
**Fig. 3.** The need for service channels at the intensity of air traffic = 40<sub>A/C/hours</sub>,  $D = 12$ km,  $L_{min} = 7$  km.

На рис. 2 представлены графики зависимости потребностей в эшелонах на схеме «тромбон» от интенсивности потока прибытия с учетом характеристик удержания при  $D = 38$  км.

На практике средняя интенсивность прилетного потока, как правило, не превышает 40 ВС/ч. В случае увеличения длины указанной схемы до 55 км при аналогичных параметрах интенсивности прилетного потока достаточно трех эшелонов на входе схемы типа  $T$ . В качестве практического применения данной модели СМО рассмотрим аэродром Шереметьево и Внуково на основе статисти-

ческих данных по прилетному потоку за 2019 год. С учетом наличия нескольких взлетно-посадочных полос на а/д Шереметьево величина  $L_{min}$  может быть уменьшена.

Такая возможность появляется в связи с раздельным назначением режима работы разных ВПП – одна используется на взлет, другая на посадку. За счет этого нет необходимости ждать освобождения ВПП после посадки, соответственно, уменьшается  $L_{min}$  [18, 19]. На рис. 3 представлена графическая зависимость при  $L_{min} = 7$  км; ИВД = 40 ВС/ч;  $D = 12$  км. При этом  $P_{don}^4 = 0,030066$ ;  $P_4 = 0,02524257$ ;  $P_4 < P_{don}^4$ .

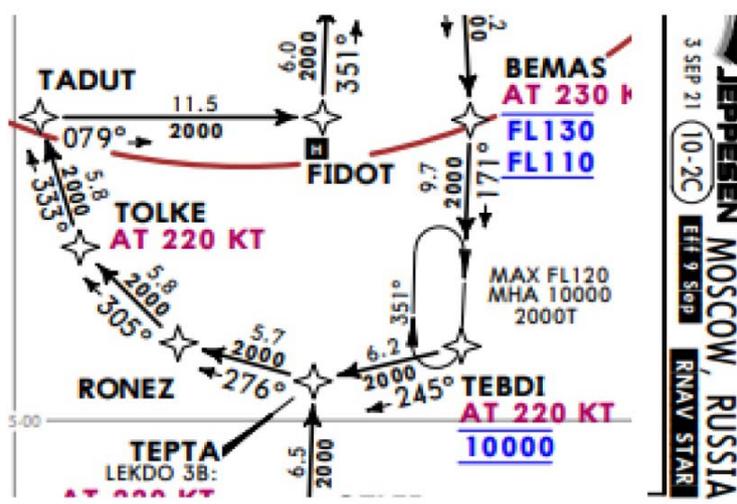


Рис. 4. Схема прибытия DIMGI 3B (источник JEPPESEN, 2022 г.)  
Fig. 4. DIMGI 3B STAR (source – JEPPESEN 2022)

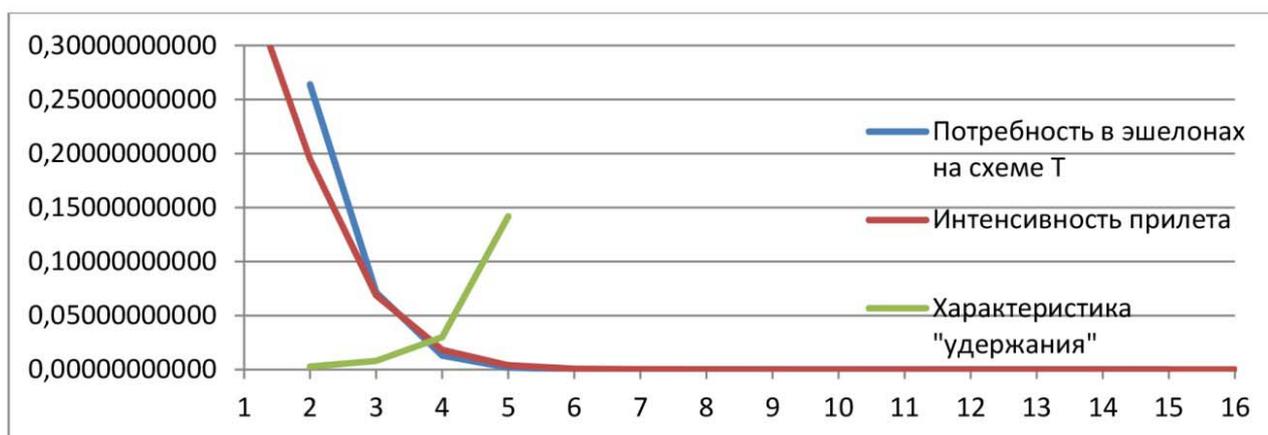


Рис. 5. Потребность в каналах обслуживания при ИВД = 40 ВС/час,  $D = 23,5$  км,  $L_{min} = 12$  км  
Fig. 5. The need for service channels at the intensity of air traffic = 40 A/C/hour,  $D = 23.5$  km,  $L_{min} = 12$  km

Аналогичные характеристики справедливы для схемы типа В. В качестве примера можно выбрать действующие стандартные схемы прибытия BILRU 3B, BEKIP 3B, DIMGI 3B, ROMTA 3B, LEKDO 3B, OLOPI 3B на а/д Внуково аэронавигационной базы JEPPESEN (рис. 5). Все шесть стандартных схем прибытия имеют общие конечные участки, которые и образуют в совокупности схему «веер» с точкой схождения FIDOT.

Дуга веера определяется точками TADUT, TOLKE, RONEZ, TEPTA, TEBDI. Длина дуги равна 23,5 км (5,8 + 5,8 + 5,7 + 6,2). На входе

веера задействованы четыре высоты (7000; 8000; 9000; 10000 футов) на шесть стандартных маршрутов.

Участок снижения (11,5 км) позволяет использовать три высоты на дуге веера с расчетом на градиент снижения  $3,3^0$  [20]. Интенсивность прилетного потока выше среднего в а/п Внуково примем равной 40 ВС/ч, среднее количество часов в сутки подобная ИВД происходит пять раз.

На рис. 5 графически представлены результаты расчетов характеристик веера с использованием аппарата СМО. В результа-

те расчетов можно заключить, что для заявленных условий на дуге веера необходимо организовать четыре эшелона (высоты), как и предусмотрено схемой.

## Выводы

В результате проделанной работы получены объективные характеристики организации прибытия на аэродромы ГА. Использование подобных характеристик при организации воздушного движения позволяет сбалансировать поток движения ВС в структуре воздушного пространства зоны «подхода» и района аэродрома, исключить перегрузки авиадиспетчеров в процессе управления воздушным движением, повысить уровень БП.

Использование аппарата СМО для организации структуры воздушного пространства позволяет четко представлять масштабы проектов по организации воздушного пространства. Так, для уменьшения количества высот на дуге упомянутого веера до трех, необходимо установить ее длину  $D = 60$  км, в противном случае необходимо увеличить участок снижения до 21 км.

Несомненно, внешняя среда испытывает организацию воздушного пространства различными вводными, связанными с погодными, техногенными и другими причинами, однако надежность, а также устойчивость к воздействиям внешней среды структуры воздушного пространства может быть рассчитана на основе упомянутых характеристик.

## Список литературы

1. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Способ упорядочения потока движения ВС по типу «тромбон» с обратным расположением полезной зоны маневрирования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221 (11). С. 144–147.
2. Луговая А.В., Коновалов А.Е. Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87

3. Турков А.Н., Чехов И.А., Нечаев Е.Е. Вероятностный метод определения пропускной способности в системе УВД // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221 (11). С. 148–152.

4. Головкин Н.И., Коротаев И.А. Время задержки сообщения в узле сети при переменной интенсивности входящего потока // Автоматика и вычислительная техника. 1989. № 2. С. 36–39.

5. Таташев А.Г. Система массового обслуживания с переменной интенсивностью входного потока // Автоматика и телемеханика. 1995. № 12. С. 78–84.

6. Головкин Н.И., Коротаев И.А. Системы массового обслуживания со случайно изменяющейся интенсивностью входящего потока // Автоматика и телемеханика. 1990. № 7. С. 80–85.

7. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. И.И. Грушко. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.

8. Prabhu N.U., Zhu Y. Markov-modulated queueing systems // Queueing Systems. 1989. No. 5. Pp. 215–246. DOI: 10.1007/BF01149193

9. Erlang A.K. The theory of probability and telephone conversations // Nyt Tidsskrift for Matematik. B. 1909. Vol. 20. Pp. 33–39.

10. Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х. Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 3. С. 94–114.

11. Головкин Н.И. Исследование моделей систем массового обслуживания в информационных сетях / Н.И. Головкин, В.О. Каретник, В.Е. Танин, И.И. Сафонюк // Сибирский журнал индустриальной математики. 2008. Т. 11, № 2 (34). С. 50–64.

12. Горцев А.М., Назаров А.А., Терпугов А.Ф. Управление и адаптация в системах массового обслуживания / Под ред. А.П. Рыжакова. Томск: Издательство Томского университета, 1978. 207 с.

13. Головкин Н.И., Катрахов В.В., Писаренко Т.А. Краевые задачи в стационарных системах массового обслуживания с диффузионной интенсивностью входного потока //

Дифференциальные уравнения. 2002. Т. 38, № 3. С. 305–312.

14. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Пер. с англ. Е.Г. Коваленко, под ред. И.Н. Коваленко, Р.Д. Когана. М.: Советское радио, 1965. 510 с.

15. Zhu Y. A markov-modulated M/M/1 queue with group arrivals // *Queueing Systems*. 1991. No. 8. Pp. 255–264. DOI: 10.1007/BF02412254

16. Борсоев В.А. Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / В.А. Борсоев, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо, под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.

17. Головкин Н.И., Филинова Н.А. Матричный анализ систем массового обслуживания с конечным накопителем при скачкообразной интенсивности входного потока // *Автоматика и телемеханика*. 2000. № 9. С. 73–83.

18. Обухов Ю.В. Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов / Ю.В. Обухов, А.С. Попов, В.С. Орлов, А.О. Котов [Электронный ресурс] // *Труды МАИ*. 2015. № 81. 27 с. URL: <https://trudymai.ru/upload/iblock/034/034132b656789b882b73f5a5801a15db.pdf?lang=ru&issue=81> (дата обращения: 12.11.2021).

19. Людомир А.В., Орлов В.С. Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве // *Прикладная информатика*. 2014. № 5 (53). С. 89–97.

20. Ozlem S.M. Optimum arrival routes for flight efficiency // *Journal of Power and Energy Engineering*. 2015. No. 3. Pp. 449–452. DOI: 10.4236/jpee.2015.34061

## References

1. Lebedev, G.N. & Malygin, V.B. (2015). *The way of organizing the flow of aircraft by inverse "trombone" type location of the useful manoeuvring area*. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 221 (11), pp. 144–147. (in Russian)

2. Lugovaya, A.V. & Kononov, A.E. (2017). *Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87 (in Russian)

3. Turkov, A.N., Chekhov, I.A. & Nechaev, E.E. (2015). *Probabilistic method determine the capacity of the atc system*. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 221 (11), pp. 148–152. (in Russian)

4. Golovko, N.I. & Korotaev, I.A. (1989). *Message delay time in a network node with variable intensity of incoming flow*. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika*, no. 2, pp. 36–39. (in Russian)

5. Tatashev, A.G. (1995). *A queueing system with varying intensity of the input flow*. *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 12, pp. 78–84. (in Russian)

6. Golovko, N.I. & Korotaev, I.A. (1990). *Queueing systems with randomly varying intensity of incoming flow*. *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 7, pp. 80–85. (in Russian)

7. Kleinrock, L. (1975). *Queueing systems. Volume 1: Theory*. 1st ed. Wiley – Interscience, 417 p.

8. Prabhu, N.U. & Zhu, Y. (1989). *Markov-modulated queueing systems*. *Queueing Systems*, no. 5, pp. 215–246. DOI: 10.1007/BF01149193

9. Erlang, A.K. (1909). *The theory of probability and telephone conversations*. *Nyt Tidsskrift for Matematik. B*, vol. 20, pp. 33–39.

10. Zolotukhin, V.V., Isaev, V.K. & Davidson, B.Kh. (2009). *Some relevant tasks of air traffic control*. *Trudy MFTI*, vol. 1, no. 3, pp. 94–114. (in Russian)

11. Golovko, N.I., Karetnik, V.O., Tanin, V.E. & Safonyuk, I.I. (2008). *Research of queueing systems models in data networks*. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki*, vol. 11, no. 2 (34), pp. 50–64. (in Russian)

12. Gortsev, A.M., Nazarov, A.A. & Terpugov, A.F. (1978). *Management and adaptation in queueing systems*, in Ryzhakov A.P. (Ed.). *Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo universiteta*, 207 p. (in Russian)

13. Golovko, N.I., Katrakhov, V.V. & Pisarenko, T.A. (2002). *Boundary value problems in stationary queuing systems with diffusion intensity of the input flow*. *Differentsialnyye uravneniya*, no. 3, pp. 305–312. (in Russian)

14. Saati, T.L. (1961). *Elements of queueing theory with applications*. McGraw-Hill Book Company, Inc., 423 p.

15. Zhu, Y. (1991). *A markov-modulated M/M/1 queue with group arrivals*. *Queueing Systems*, no. 8, pp. 255–264. DOI: 10.1007/BF02412254

16. Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechaev, E.E., Nikulin, A.O. & Tin Phon Chzho. (2018). *Decision-making in air traffic control tasks. Methods and algorithms*, in Nechaev E.E. (Ed.). Moscow: Radio-tekhnika, 432 p. (in Russian)

17. Golovko, N.I. & Filinova, N.A. (2000). *Matrix analysis of queuing systems with a finite*

*capacitor and stepwise rate of the input flow*. *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 9, pp. 73–83. (in Russian)

18. Obukhov, Yu.V., Popov, A.S., Orlov, V.S. & Kotova, A.O. (2015). *Simulation for safety risk assessment*. *Trudy MAI*, no. 81, 27 p. Available at: <https://trudymai.ru/upload/iblock/034/034132b656789b882b73f5a5801a15db.pdf?lang=ru&issue=81> (accessed: 12.11.2021). (in Russian)

19. Ludomir, A.V. & Orlov, V.S. (2014). *Simulation of dynamical environment in controlled airspace*. *Journal of Applied Informatics*, no. 5 (53), pp. 89–97. (in Russian)

20. Ozlem, S.M. (2015). *Optimum arrival routes for flight efficiency*. *Journal of Power and Energy Engineering*, no. 3, pp. 449–452. DOI: 10.4236/jpee.2015.34061

### Сведения об авторе

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, mbv898@ya.ru.

### Information about the author

Vyacheslav B. Malygin, the Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mbv898@ya.ru.

Поступила в редакцию 28.02.2022  
Принята в печать 24.05.2022

Received 28.02.2022  
Accepted for publication 24.05.2022