

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА УЗЛОВОГО АЭРОПОРТА

П. А. Правдина, В. А. Романенко

Рассмотрена задача моделирования процессов наземного обслуживания воздушных судов (ВС) и их загрузки в одном из крупнейших отечественных аэропортов в случае формирования на его базе полноценного авиатранспортного пассажирского пересадочного центра – узлового аэропорта (хаба). В качестве инструмента решения задачи использована разработанная и реализованная на базе программного обеспечения AnyLogic Professional имитационная статистическая дискретно-событийная модель. Модельный входящий поток заявок на обслуживание обладает всеми специфическими свойствами потоков ВС узлового аэропорта, выявленными в результате детального анализа расписания одного из ведущих мировых авиахабов. Вероятностные распределения параметров технологических операций модельного графика обслуживания ВС построены на базе обширного статистического материала, предоставленного рядом российских аэропортов. Результаты моделирования позволяют оценить влияние предполагаемой трансформации рассматриваемого аэропорта в полноценный хаб на показатели качества наземного обслуживания ВС в этом аэропорту и определить необходимую хабу численность технологических ресурсов.

Ключевые слова: имитационная модель; вероятностное распределение; авиатранспортный хаб; наземное обслуживание; воздушное судно; технологический график.

Эффективное функционирование системы воздушного транспорта для Российской Федерации имеет особое значение, так как оно напрямую влияет на развитие экономики страны, рост уровня жизни населения, повышение транспортной доступности отдалённых районов. Перед отечественными авиапредприятиями стоит задача поиска, освоения и внедрения новых бизнес-моделей, которые обеспечили бы успех их деятельности. Одним из примеров таких бизнес-моделей для аэропортов является система «втулка-спицы» (англ. «hub-and-spoke»), широко распространившаяся и применяемая на практике в течение последних нескольких десятилетий за рубежом. В этой системе «спицы» – авиалинии, соединяющие вспомогательные аэропорты (окончания «спиц») со «втулкой» – узловым аэропортом. Узловой аэропорт (хаб) – это, как правило, крупный аэропорт, имеющий в расписании воздушного движения большую долю стыковочных рейсов и используемый одной или несколькими авиакомпаниями как

пункт пересадки пассажиров [1]. Формируя пересадочный центр на базе выбранного аэропорта, авиакомпания получает целый ряд конкурентных преимуществ: расширение маршрутной сети, повышение эффективности использования парка ВС, привлечение большего числа пассажиров и повышение коммерческой загрузки, и, как следствие, прирост прибыли от перевозочной деятельности. Однако работа по схеме хаба служит источником трудностей для аэропорта. «Волновая» структура расписания, обуславливающая появление кратковременных всплесков интенсивности потоков воздушных судов (ВС), ставит аэропорт перед необходимостью повышения пропускной способности его комплексов. Несмотря на сложности, российскими авиакомпаниями неоднократно предпринимались попытки создания хабов на базе отечественных аэропортов. Задача формирования системы хабов в Российской Федерации путём развития многоуровневой узловой сети авиаперевозок признана на государственном уровне

[2]. Таким образом, тематика статьи вполне актуальна.

Предполагается возможность формирования на базе отечественного аэропорта, близкого по своим характеристикам к крупнейшим аэропортам Российской Федерации, полноценной системы трансферных перевозок «втулка-спицы». Трансформация аэропорта в хаб неизбежно будет означать для него существенный рост нагрузок на производственные комплексы, чреватый снижением показателей безопасности и качества аэропортового обслуживания. Рассматриваются две взаимосвязанные задачи, первая из которых состоит в оценке изменения уровня качества наземного обслуживания ВС при переходе аэропорта к работе по схеме хаба. Вторая задача, вытекающая из первой, состоит в определении численности аэропортовых средств наземного обслуживания, которые дополнительно потребуются аэропорту при его переходе к хабовой схеме работы. На роль показателей качества обслуживания ВС в аэропорту выбраны время наземной стоянки ВС в аэропорту и вероятность превышения планового времени стоянки, установленного технологическим графиком наземного обслуживания ВС, фактическим временем стоянки. Поскольку технологические процессы наземного обслуживания ВС отличаются, с одной стороны, разнообразием, а с другой – стохастичностью, то релевантным методом решения поставленных задач является использование имитационной модели.

Имитационное моделирование предполагает многократное воспроизведение (прогон) на ЭВМ процесса функционирования ис-

следуемой системы с сохранением его логической структуры и последовательности протекания во времени и с учётом воздействия случайных факторов [3]. Так как основная деятельность аэропорта состоит в отработке технологических процессов обслуживания рейсов, включающих определённый набор операций, чьи состав, длительность и трудоёмкость зависят от параметров рейса, то в качестве единичного прогона модели принимается процесс обслуживания одного рейса. Поскольку особенности графиков оборота ВС, следующих через хаб, таковы, что большинство рейсов в хабе являются либо транзитными, либо обратными, то рассматривается технологический график обслуживания рейсов именно этих категорий.

Изучение технологической документации наземного обслуживания ВС транзитных и обратных рейсов в российских аэропортах [4] позволило выделить ряд технологических операций, включённых в модельный график, являющийся универсальным для всех типов ВС (рис. 1): приёмка ВС на место стоянки (МС), остановка двигателей, установка упорных колодок, заземление ВС, подключение наземного источника питания, открытие дверей и люков (ПРИБ); постановка трапов (ПТ); высадка пассажиров и доставка их в аэровокзал (ВЫС); выгрузка багажа (ВЫГР); заправка топливных баков ВС (ЗАПР); уборка салонов (УБ); доставка из аэровокзала и посадка в ВС пассажиров (ПОС); погрузка багажа (ПОГР); работы по транзитному техническому обслуживанию ВС (ТО); уборка трапов (УТ); работы по выпуску ВС с МС (ОТПР).

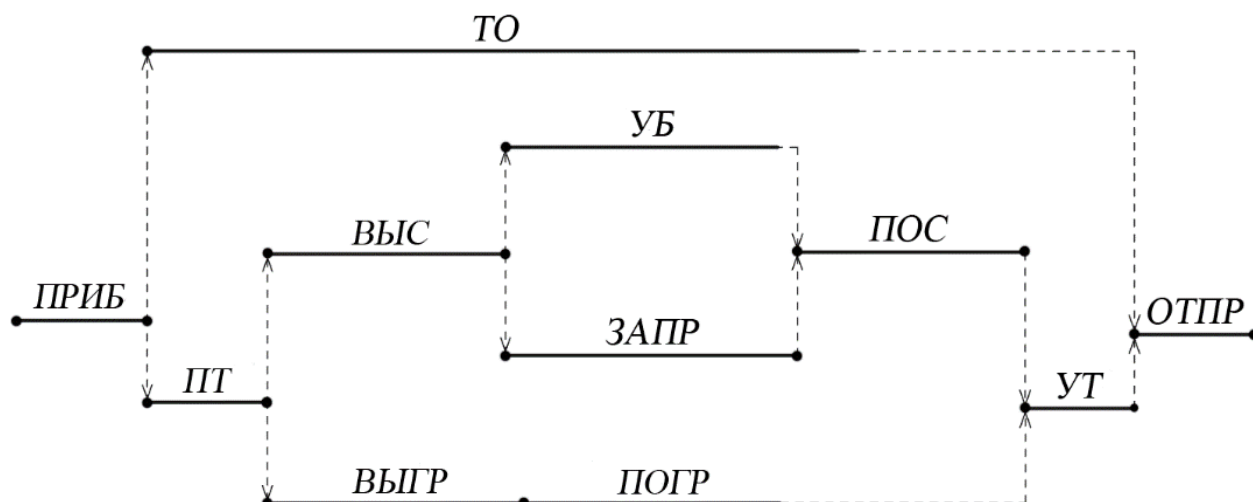


Рис. 1. Модельный технологический график наземного обслуживания ВС

Продолжительности выполнения технологических операций считаются случайными величинами, для которых известны законы распределения и параметры этих законов. Согласно несколько модифицированным данным [1], для описания распределений времени выполнения операций успешно могут быть применены гамма-закон и закон равномерного распределения.

Выражение для плотности вероятностей гамма-распределения имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, x \leq s, \\ \frac{\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} (x-s)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-s)}{\beta}}, x > s, \end{cases} \quad (1)$$

где α – параметр формы, β – параметр масштаба, s – параметр сдвига (порог), $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера.

Выражение плотности вероятностей равномерного распределения на некотором интервале $[a; b]$ имеет вид

$$f(x) = \begin{cases} 0, x < a, \\ \frac{1}{b-a}, a \leq x \leq b, \\ 0, x > b. \end{cases} \quad (2)$$

В таблице 1 приведены операции модельного графика, продолжительности выполнения которых подчиняются гамма-распределению (1) со значениями параметров, зависящими от пассажироместимости ВС. По этой характеристике все ВС здесь разбиты на 3 категории: к категории 1 относятся ВС пассажироместимостью менее 155 мест, к категории 3 – ВС пассажироместимостью более 255 мест, остальные ВС относятся к категории 2. Параметры гамма-распределения, полученные по результатам обработки статистики ряда российских аэропортов, для соответствующих технологических операций приведены в таблице 1, где $\bar{\mu}$ – среднее время выполнения операции.

Таблица 1

**Характеристики гамма-распределения длительности технологических операций
модельного графика**

Операция	Параметры распределения	Категория ВС		
		1	2	3
Приёмка ВС на МС	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	0,50; 5,41; 0,00	0,75; 3,39; 0,00	-
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	2,73	2,55	1,31
Высадка пассажиров и доставка их в аэровокзал	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	5,18; 1,35; 4,03	2,91; 1,51; 3,52	1,42; 2,70; 1,57
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	11,02	7,91	5,40
Выгрузка багажа	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	3,75; 2,95; 1,99	3,35; 3,17; 0,33	-
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	13,05	10,95	9,19
Уборка салонов	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	9,12; 2,73; 0,00	3,26; 3,32; 5,99	1,80; 4,03; 5,36
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	24,90	16,81	12,61
Доставка пассажиров из аэровокзала и посадка пассажиров	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	5,99; 2,83; 0,00	4,42; 3,45; 0,00	3,21; 3,56; 0,00
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	16,96	15,28	11,42
Погрузка багажа	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	4,77; 3,32; 1,10	4,19; 3,57; 0,00	-
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	16,95	14,95	13,21
Работы по оперативному техническому обслужи- ванию ВС	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	1,73; 17,32; 36,00	4,80; 7,17; 11,20	1,43; 4,37; 6,21
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	65,97	45,62	12,45
Работы по выпуску ВС с МС	$\alpha; \beta;$ $s, \text{ мин}$	5,00; 1,44; 1,64	3,59; 1,52; 2,00	-
	$\bar{\mu}, \text{ мин}$	8,76	7,39	5,74

Прочерки в ячейках таблицы 1 соответствуют тем операциям обслуживания ВС категории 3, для которых небольшой объём статистики позволяет определить лишь среднее время выполнения, но является недостаточным для надёжного определения сглаживающего закона распределения этой случайной величины. Для операций постановки и уборки трапов ввиду незначительности влияния на их продолжительность случайных факторов приняты детерминированные значения длительности их выполнения: по 2 минуты для всех категорий ВС.

В модели на продолжительность операции заправки топливных баков ВС влияют такие параметры, как объём дозаправки ВС топливом и производительность аэродромных топливозаправщиков (АТЗ). Объём дозаправки ВС топливом определяется в предположении, что в транзитном аэропорту ВС дозаправляется на 50–80% от полного объёма топливных баков [1], и, таким образом, можно считать, что доля дозаправки полного объёма баков ВС является случайной величиной, распределённой согласно равномерному закону (2) на интервале $[0,5; 0,8]$. Полный объём топливных баков ВС задаётся равным $150,0 \text{ м}^3$ для ВС категории 1, $40,7 \text{ м}^3$ – для ВС категории 2, $15,8 \text{ м}^3$ – для ВС категории 3. Принята следующая производительность АТЗ при заправке ВС различных категорий: $2,4 \text{ м}^3/\text{мин}$ для ВС 1 категории, $1,2 \text{ м}^3/\text{мин}$ для ВС 2 категории, $1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$ для ВС 3 категории.

Типы используемых технологических ресурсов и их численность, необходимая для выполнения соответствующей операции на ВС определенной категории, сведены в таблицу 2.

Отдельной детальной проработки потребовал вопрос построения модели потока ВС, поступающих на обслуживание в хаб. Поток ВС в хабе обладают ярко выраженными особенностями, отличающими их от потоков «обычных» аэропортов. Для моделирования поступления ВС в аэропорт проанализирована структура расписания крупного зарубежного хаба – аэропорта г. Мюнхен, который в течение последних двух десятков лет целенаправленно развивался как крупный узловой аэропорт и который схож с крупнейшими российскими аэропортами по годовому пассажиропотоку и средней суточной интенсивности прилётов-вылетов ВС. Использованные данные по прибытиям и отправкам около 10400 рейсов в течение 14 суток (3–9 и 21–27 января 2024 г.) собраны с помощью публичного веб-сервиса Flightradar.24 [5]. Для каждых суток определены частоты прилётов и вылетов ВС, позволившие сформировать временные зависимости интенсивности потоков ВС хаба [6]. Построенные графики (рис. 2) наглядно демонстрируют главные особенности расписания хаба: значительные колебания интенсивности потоков ВС, отличающиеся суточной и недельной цикличностью.

Таблица 2

Численность используемых технологических ресурсов по типам на операциях в зависимости от категории ВС

Тип технологических ресурсов	Операция	Число ресурсов по категориям ВС		
		1	2	3
МС ВС	ПРИБ – занятие, ОТПР – освобождение	1	1	1
Трап	ПТ – занятие, УТ – освобождение	2	1	1
Перронный автобус	ВЫС, ПОС	4	2	2
Багажный тягач	ВЫГР, ПОГР	3	2	1
Заправщик	ЗАПР	2	1	1
Бригада уборщиков	УБ	1	1	1
Бригада ТО	ТО	1	1	1

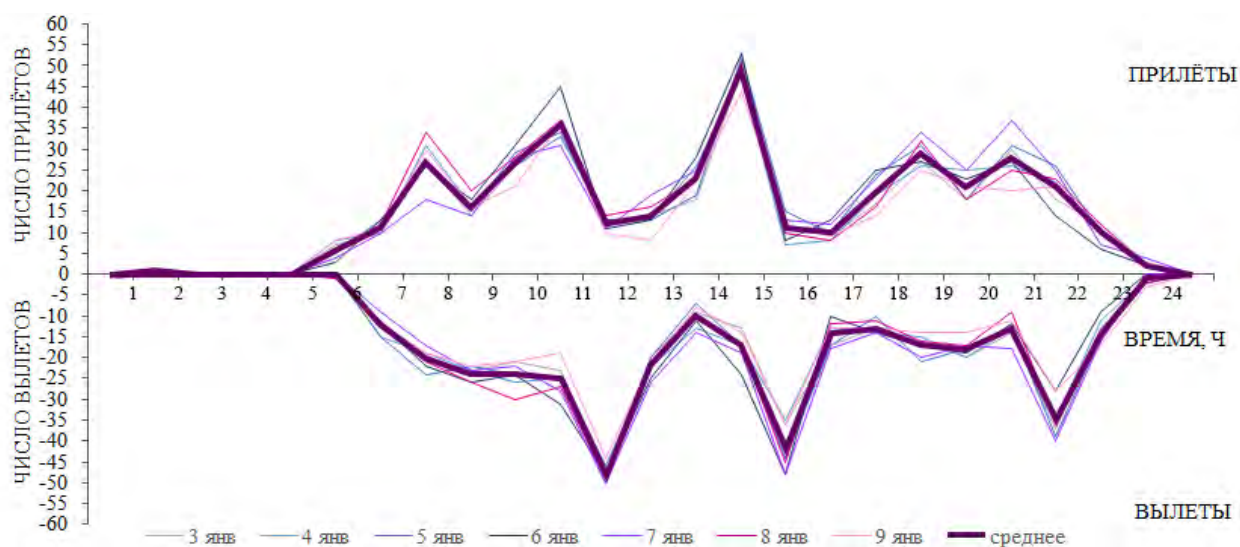


Рис. 2. Модельная часовая интенсивность прилётов-вылетов в хабе

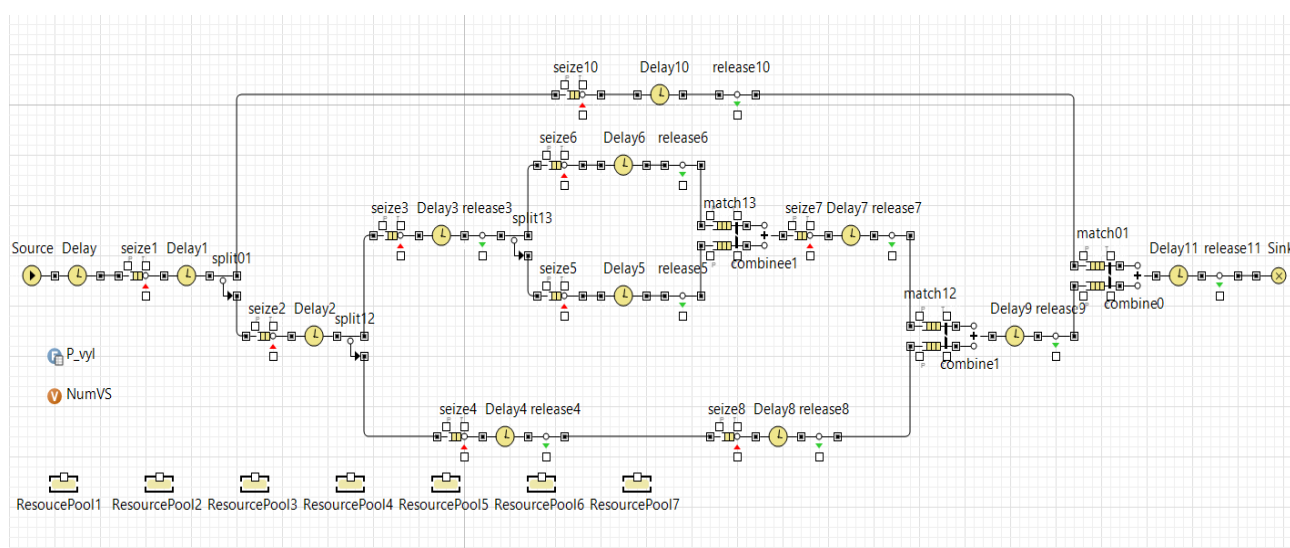


Рис. 3. Фрагмент копии экрана имитационной модели

Поскольку распределения поступающих на обслуживание ВС по категориям в европейских и российских аэропортах различаются, то для формирования модельного распределения использована статистика крупнейшего отечественного аэропорта – международного аэропорта Шереметьево (г. Москва), близкого по своим показателям к мировым хамам [7]. Доли различных категорий в общем потоке прилетающих ВС следующие: категория 1 – 16,5%, категория 2 – 68,0%, категория 3 – 15,5%.

Разработана имитационная модель производственного процесса аэропорта, включающая операции модельного графика наземного обслуживания ВС (рис. 3). Модель реализована на базе программного обеспечения для имитационного моделирования AnyLogic Professional версии 6.4.1.

Модель включает следующие блоки [8]: единственный блок типа Source генерирует заявки (ВС); блоки типа Delay задерживают заявки на заданный период времени, имитируя обслуживание на каждой операции; блоки типа ResourcePool задают набор ресурсов, которые занимаются и освобождаются заявками в ходе их обслуживания с помощью блоков типа Seize и Release, соответственно; блоки типа Split для каждой поступающей в блок заявки-оригинала создают заданное число новых заявок-копий; блоки типа Match выполняют синхронизацию двух потоков заявок путём нахождения пар заявок, удовлетворяющих заданному критерию соответствия; блоки типа Combine «дожидаются» поступления двух заявок, а затем создают новую заявку и направляет её далее. Единственный в модели блок типа Sink уничтожает поступающие заявки. В нём осуществляется сбор статистики.

Сформированная имитационная модель позволяет получить детальное и разностороннее описание поведения рассматриваемой системы в различных условиях. Рассмотрим, как повлияет переход модельного аэропорта от «традиционной» схемы работы к хабовой на необходимую численность технологических ресурсов различных типов, уровень их загрузки и временные характеристики пребывания ВС в аэропорту.

Введём следующие обозначения:

T_i – фактическое время обслуживания в аэропорту выполняющего транзитный или обратный рейс ВС i -й категории, $i = 1, \dots, 3$;

t_i – плановое время обслуживания в аэропорту выполняющего транзитный или обратный рейс ВС i -й категории, $i = 1, \dots, 3$. Под плановым понимается время обслуживания в аэропорту, определяемое технологическим графиком ВС i -й категории;

$P(T_i \leq t_i)$ – вероятность того, что плановое время наземного обслуживания ВС i -й категории не будет превышено фактическим временем;

p_i – заданная вероятность того, что плановое время наземного обслуживания ВС i -й категории не будет превышено фактическим временем. Величина p_i должна задаваться достаточно высокой для того, чтобы обеспечить высокую надёжность выполнения требований по регулярности и безопасности полётов.

Примем, что технологических ресурсов всех типов должно быть достаточно для того, чтобы выполнялось условие надёжности [3]:

$$P(T_i \leq t_i) > p_i. \quad (3)$$

Для моделирования «традиционной» схемы работы аэропорта примем, что поток поступающих в аэропорт ВС простейший, с постоянной интенсивностью около 15 ВС/ч, что соответствует средней интенсивности потока прилетающих (и вылетающих) ВС в модельном хабе (рис. 2).

По результатам обработки технологических графиков наземного обслуживания ВС в ряде российских аэропортов примем следующие плановые продолжительности по категориям ВС: $t_1 = 125$ мин, $t_2 = 90$ мин, $t_3 = 60$ мин. Надёжность для всех категорий ВС примем равной $p_1 = p_2 = p_3 = p = 0,95$.

Имитационное моделирование для потока ВС, поступающих на обслуживание в

аэропорт, численностью около 1 млн, позволило получить минимально необходимые численности средств, задействованных в наземном обслуживании ВС, необходимых для выполнения условия (3) для «традиционного» аэропорта (рис. 4), при этом, загрузка технологических ресурсов в случае работы аэропорта по «обычной» схеме, выраженная как коэффициенты занятости средств, довольно высока.

Полученная для «традиционного» аэропорта численность технологических ресурсов совершенно недостаточна для обслуживания «хабового» потока ВС, приводимого на рис. 2 и имеющего такую же среднюю интенсивность, как поток «традиционного» аэропорта. В этом случае среднее время обслуживания ВС увеличится на 15–20 минут, а вероятность $P(T_i \leq t_i)$ не будет превышать 0,5–0,7 для разных категорий, что абсолютно неприемлемо с точки зрения обеспечения регулярности полётов.

Проведённая повторно серия имитационных экспериментов для потока ВС хаба (рис. 2) позволила получить минимальную численность средств различных типов, необходимых для выполнения условия (3) для узлового аэропорта. Результаты приводятся на рис. 4. Хаб по сравнению с «традиционным» аэропортом потребует примерно в 1,5–2 раза больше средств обслуживания ВС, при этом их средняя загрузка соответственно снизится.

Вероятностные распределения времени наземного обслуживания ВС каждой из трёх категорий в хабе при полученной минимальной численности средств, обеспечивающих выполнение условия (3), представлены на рисунке 5. Заметим, что среднее время обслуживания существенно меньше планового.

Таким образом, по результатам имитационного моделирования установлено, что имеющееся в распоряжении «обычного» аэропорта, не рассчитанного на обслуживание большого числа почти одновременно прилетающих и вылетающих ВС, количество технологических ресурсов оказалось недостаточным при переходе аэропорта к работе по схеме хаба. Это означает, что принятию решения о переходе аэропорта к хабовой схеме должен предшествовать детальный технико-экономический анализ, инструментом проведения которого может стать описанная в статье имитационная модель.

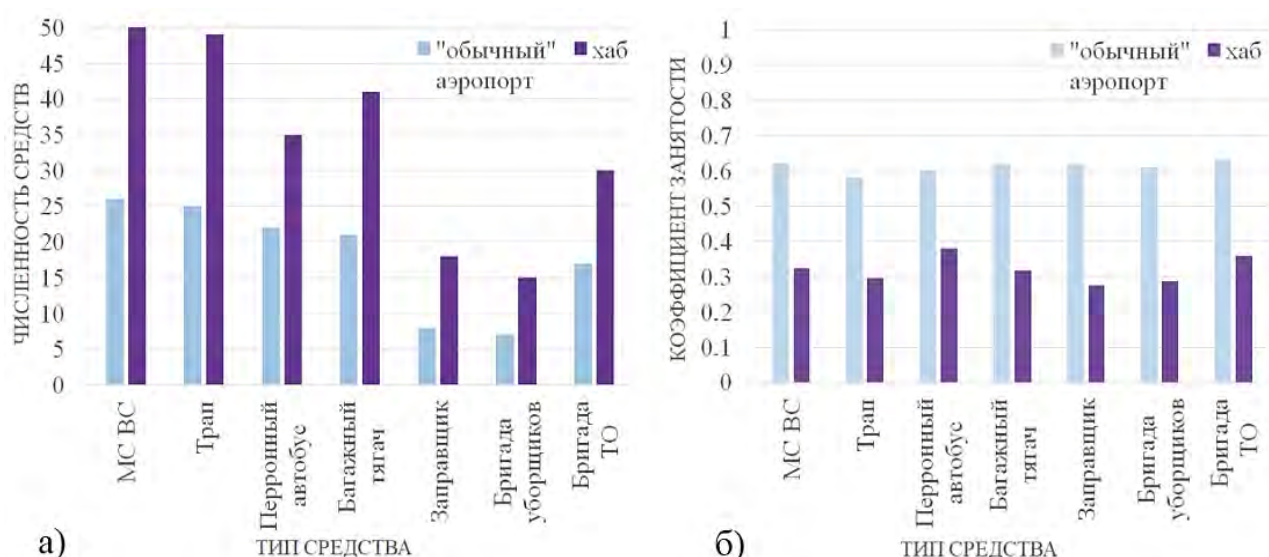


Рис. 4. Сравнение результатов имитационного моделирования для «традиционного» аэропорта и аэропорта-хаба: а) минимально необходимой численности средств обслуживания ВС; б) коэффициентов загрузки средств обслуживания ВС

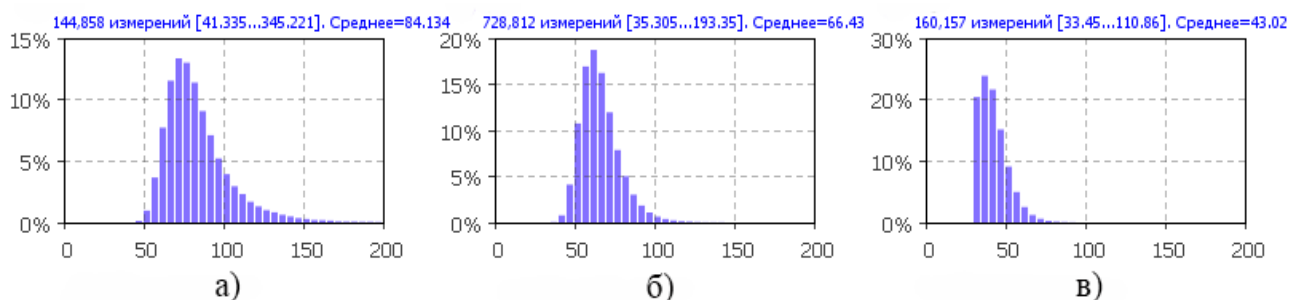


Рис. 5. Распределения времени наземного обслуживания ВС различных категорий: а) категория 1; б) категория 2; в) категория 3

Литература

1. Романенко В. А. Моделирование производственных процессов узловых аэропортов. М.: Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co, 2012. 283 с.
2. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. с прогнозом на период до 2035 г. – Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Кельтон В. Д., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб.: Питер, 2004. 847 с.
4. Далецкий С. В., Деркач О. Я., Петров А. Н. Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт. 2002. 216 с.
5. Munich Airport (MUC/EDDM) / Arrivals, Departures & Routes / Flightradar.24 [Electronic resource]. URL: <https://www.flightradar24.com/data/airports/muc> (accessed: 28.01.2024).
6. Правдина П. А. Анализ структуры расписания движения самолётов международных узловых аэропортов // LXXIV молодёжная научная конференция, посвящённая 90-летию со дня рождения первого космонавта земли Ю. А. Гагарина: тез. докл. Самара: Самарский университет, 2024. С. 254–256.
7. Moscow Sheremetyevo International Airport (SVO/UUEE) / Arrivals, Departures & Routes / Flightradar.24 [Electronic resource] URL: <https://www.flightradar24.com/data/airports/svo> (accessed: 27.11.2024).
8. Документация AnyLogic [Электронный ресурс]. URL: <https://anylogic.help/ru/> (дата обращения: 07.02.2025).

SIMULATION MODELING OF THE PRODUCTION PROCESS OF A HUB AIRPORT

P. A. Pravdina, V. A. Romanenko

The article considers the problem of modeling the processes of ground handling of aircraft (VS) and their loading at one of the largest domestic airports in the event of the formation of a full-fledged air transport passenger transfer center (hub) on its basis. An imitation statistical discrete event model developed and implemented on the basis of AnyLogic Professional software is used as a tool for solving the problem. The model incoming flow of service requests has all the specific properties of the air flows of a hub airport, identified as a result of a detailed analysis of the schedule of one of the world's leading air hubs. The probability distributions of the parameters of technological operations of the model aircraft maintenance schedule are based on extensive statistical material provided by a number of Russian airports. The simulation results make it possible to assess the impact of the proposed transformation of the airport in question into a full-fledged hub on the quality of aircraft ground handling at this airport, as well as determine the number of technological resources required by the hub.

Key words: simulation model; probability distribution; air transport hub; ground handling; aircraft; technological schedule.

Статья поступила в редакцию 22.05.2025 г.