

ОРГАНИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОТОКОВ ПРИБЫВАЮЩИХ ПАССАЖИРОВ В АЭРОПОРТАХ

Палагин Ю.И., Мочалов А.И.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

Аннотация. Процесс обслуживания потока прибывающих авиапассажиров рассматривается как многофазный процесс, включающий наряду с обычными внутриаэропортовыми операциями фазы вывоза автомобильным и железнодорожным транспортом. Предлагается методика выбора параметров на отдельных фазах обслуживания, использующая аналитические методы и имитационное вероятностное моделирование с помощью разработанной информационно-логистической системы «AirportTransLogistics». Показывается возможность коррекции с помощью имитационных моделей выбранных параметров обслуживания с целью повышения качества обслуживания на различных фазах.

Ключевые слова. Аэропорты, пассажиропотоки, внутриаэропортовое обслуживание, вывозящий транспорт, оценка качества и выбор параметров, имитационное моделирование, программное обеспечение.

MODELING OF MULTIMODAL PROCESSES OF SERVICING THE FLOWS OF ARRIVING PASSENGERS AT AIRPORTS

Palagin Y.I., Mochalov A.I.

Federal state-funded educational institution of higher education «Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov»

Abstract. We consider arrival passenger service as multiphase multimodal process, including both airport operations and departure operations by avto- and railway city transport. It is proposed the methodology based on both analytic formulas of queueing theory and random simulator «AirportTransLogistics». The examples are described.

Keywords. Airports, passenger flows, airport operations, city motor and railway transport, quality estimations, random simulators, software.

ВВЕДЕНИЕ

Транспортно-логистический процесс (ТЛ-процесс) обслуживания авиапассажиров является многофазным процессом массового обслуживания, включающим как последовательные внутриаэропортовые операции, так и процессы в примыкающих пересадочных пунктах, а также задействованный городской транспорт. Для получения оценок и всестороннего контроля качества обслуживания пассажиропотока на различных фазах обычно применяемых аналитических формул теории массового обслуживания оказывается недостаточно [1-10 и др.]. Необходимо дополнять расчетные данные результатами

ГРНТИ 73.37.61

© Палагин Ю.И., Мочалов А.И., 2024

Палагин Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор кафедры №30 ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, Санкт-Петербург.

Мочалов Александр Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры №30 ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, Санкт-Петербург.

Контактные данные для связи с авторами (Палагин Ю.И.): e-mail: palaginyi@spbguga.ru.

имитационного моделирования. В настоящей статье мы предлагаем методику выбора параметров обслуживания на различных фазах с использованием как базовых оценок, получаемых аналитическими методами, так и методом имитационного статистического моделирования для проверки и уточнения выбранных параметров. Имитационное моделирование проводится на базе модифицированного программного комплекса AirportTransLogistics [1,2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

ОПИСАНИЕ ВХОДНОГО ПОТОКА, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Мы здесь рассматриваем процесс обслуживания потока прибывающих в аэропорт пассажирских воздушных судов (ВС). Основной характеристикой, описывающей входной поток является его интенсивность λ_{BC} [ВС/час]. При имитационном моделировании эта характеристика позволяет определять моменты прибытия ВС в аэропорт. Эта характеристика дополняется рядом параметров, описывающих его структуру [1,2], дополненной следующими характеристиками потока: количеством m типов ВС, пассажироместимостью $ПВМ_{BCi}$ (по i -ым типам), долей каждого тип, а P_i (в процентах) в общем потоке, коэффициентом $K_{зан}$ использования (заполнения) пассажироместимости ВС.

По этим данным рассчитывается средняя пассажирская загрузка $n_{пас}$ воздушного судна потока

$$n_{пас} = \sum_{i=1}^m p_i K_{зан} ПВМ_{BCi} \quad (1)$$

и интенсивность потока прибывающих авиапассажиров

$$\lambda_{пас} [\text{пас/мин}] = \lambda_{BC} n_{пас} / 60 \quad (2)$$

В рассматриваемых численных примерах входной поток ВС имел интенсивность $\lambda_{BC} = 20 \text{ суд/час}$. Параметры структуры потока равны: $m = 3$ – три типа ВС, их пассажироместимости, соответственно, - $ПВМ_{BC1} = 400 \text{ пас.}$ (доля $p_1 = 60 \%$), $ПВМ_{BC2} = 150 \text{ пас.}$ (доля $p_2 = 30 \%$) и $ПВМ_{BC3} = 200 \text{ пас.}$ (доля $p_3 = 10 \%$). Воздушные суда заполнены на $K_{зан} = 80.00 \%$ от их пассажироместимости. Значения параметров входного потока, рассчитанные по формулам (1), (2) следующие: средняя загрузка $BC n_{пас} = 260 \text{ пас.}$, интенсивность пассажиропотока прибытия $\lambda_{пас} = 108 \text{ пас/мин.}$

ПАРАМЕТРЫ ПЕРРОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Перрон АП с точки зрения теории массового обслуживания представляет обслуживающий аппарат по обслуживанию входного потока прибывающих ВС. Перронное обслуживание характеризуется количеством перронов $N_{пер}$ и временем обслуживания ВС на перроне. Среднее время обслуживания может быть вычислено по формуле (2)

$$T_{перОбсл} = t_0 + (\Delta t_1 + \Delta t_2) n_{пас} + t_1. \quad (3)$$

Здесь t_0 - интервал задержки выхода пассажиров, Δt_1 , Δt_2 - такты выхода на перрон и посадки в перронный автобус, t_1 - время после выхода последнего пассажира и освобождения перрона. В том случае, если перрон используется также для посадки авиапассажиров обратного рейса ВС, параметр t_1 включает также и время обслуживания отправляемого рейса.

Интенсивность обслуживания ВС на перроне равна

$$\mu_{перОбсл} [\text{ВС/час}] = 1 / T_{перОбсл}$$

и условие того, что система массового обслуживания справляется с обслуживанием потока ВС [3]

$$\lambda_{\text{вс}} < N_{\text{пер}} * \mu_{\text{перОбсл}}, \quad (4)$$

позволяет определить минимальное количество перронов

$$N_{\text{перmin}} = \lceil \lambda_{\text{вс}} / \mu_{\text{перОбсл}} \rceil.$$

Неравенство (4) обеспечивает возможность обслуживания входного потока. Это условие исключает неограниченный рост очереди прибывающих ВС в ожидании обслуживания. Здесь и далее квадратные скобки означают округление в большую сторону.

При расчетах принято время обслуживания ВС на перроне $T_{\text{перОбсл}} = 0.6$ час. Интенсивность перронного обслуживания составила $\mu_{\text{перОбсл}} = 1.66$ ВС/час,

а минимальное количество перронов для обслуживания потока ВС равно $N_{\text{перmin}} = 16$ перронов.

Характеристики парка перронных автобусов, используемых далее при расчетах, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Пример характеристик перронного автопарка

Тип ТС	Пассажировместимость, пас	Кол-во
1	120	9
2	100	10
3	70	8
4	65	4
5	30	2

Транспортные средства (ТС – перронные и городские автобусы, электрички), используемые здесь, осуществляют вывоз пассажиров круговыми рейсами. Основной параметр, характеризующий рейсы - время кругового рейса (цикла) каждого состоит из 4-ех элементов

$$T_{\text{цАвт}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (5)$$

– времени стоянки t_1 при посадке (перроны, автобусная остановка «Аэропорт», железнодорожная платформа), времени t_2 проезда по направлению от места посадки в АП в конечную точку рейса (аэровокзальный комплекс АВК, пункт высадки в метро, железнодорожный вокзал), времени t_3 высадки пассажиров и времени t_4 проезда в обратном направлении.

Расчет провозной способности и других параметров парка ТС будем выполнять исходя из времени одного кругорейса. За время $T_{\text{цАвт}}$ перронный автопарк может вывести из перронов (провозная способность перронного парка)

$$П [пас] = K_{\text{зан}} \sum_i ПВМ_i n_i = K_{\text{зан}} ПВМ_{\text{ср}} N_{\text{автс}} \quad (6)$$

пассажиров, где $K_{\text{зан}}$ - коэффициент использования пассажировместимости автобуса, $ПВМ_i$ - пассажировместимость автобуса i -ого типа, n_i - количество единиц по каждому типу (табл.1), $N_{\text{автс}} = \sum_i n_i$ - суммарное кол-во единиц в парке. Средняя пассажировместимость автобусного парка определяется формулой

$$ПВМ_{\text{ср}} = \sum_i ПВМ_i n_i / N_{\text{автс}} \quad (7)$$

Условие того, что автопарк справляется с вывозом пассажиров из перронов имеет вид

$$\lambda_{\text{пас}} T_{\text{цАвт}} < K_{\text{зан}} ПВМ_{\text{ср}} N_{\text{автс}} = ПС, \quad (8)$$

т.е. провозная способность (ПС) используемого парка должна быть не менее входного потока, поступающего за время кругорейса. Подбор состава перронного автопарка будем проводить из условия определенного превышения

$$ПС = \kappa_{пр} \lambda_{пас} T_{цАвт} \quad (9)$$

над входным пассажиропотоком с коэффициентом превышения $\kappa_{пр} > 1$. Далее проверка достаточности автопарка и выбор коэффициента превышения будет подбираться и корректироваться по результатам имитационного моделирования. При невыполнении условия (8), используемый парк ТС не будет справляться с вывозом пассажиров с перронов.

При расчетах время кругорейса перронного автобуса составило 14 мин.

Парку табл.1 соответствуют следующие параметры: общее число ТС 33авт, средняя пассажировместимость парка при 90%-ной загрузке 89пас.; провозная способность перронного парка $ПС = 2960$ пас (за время кругорейса). Входной пассажиропоток, пребывающий на перроны, за это время составил 1731пас. Коэффициент превышения составляет величину $\kappa_{пр} = 2960 / 1517 = 1.95$ раза.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУНКТОВ ВЫДАЧИ БАГАЖА

Примем, что за каждым рейсом закрепляется один модуль выдачи багажа (ПВБ). Модуль может состоять из одного или двух багажных транспортеров. С точки зрения теории массового обслуживания модуль является обслуживающим аппаратом, обслуживающим входной поток воздушных судов. Среднее значение времени обслуживания пропорционально среднему количеству пассажиров

$$T_{БагОбсл} = t_0 + \Delta t_1 n_{пас} K_{заб} + \Delta t_2, \quad (10)$$

где t_0 - промежуток времени между приземлением ВС и моментом начала выдачи багажа, Δt_1 - такт забора пассажирами единиц багажа, $K_{доп}$ – коэффициент для расчета дополнительного увеличения времени забора всего багажа рейса; t_2 - время окончания обслуживания после забора последней единицы багажа рейса. Интенсивность багажного обслуживания всех пассажиров рейса и минимальное количество ПВБ, необходимое для обслуживания потока ВС определяются формулами

$$\mu_{БагОбсл} = 1 / T_{БагОбсл}, N_{ПВБmin} = [\lambda_{вс} / \mu_{БагОбсл}] \quad (11)$$

В рассматриваемых далее примерах время обслуживания в ПВБ составило $T_{БагОбсл} = 20$ мин. Этому значению соответствуют интенсивность обслуживания $\mu_{БагОбсл} = 3$ ВС/час и минимальное количество пунктов выдачи $N_{ПВБmin} = 9$.

ПАРАМЕТРЫ ГОРОДСКОГО АВТОБУСНОГО ПАРКА

Примем, что парк содержит m типов автобусов различной пассажировместимости. Автобусы осуществляют вывоз авиапассажиров по линии «Аэровокзал – город (метро)». Пример городского автопарка, использованного нами при расчетах приведен в табл.2.

Таблица 2

Пример характеристик городского автобусного парка

Тип ТС	Пассажировместимость, пас	Кол-во
1	70	8
2	56	8
3	115	8
4	80	8

Обслуживание осуществляется по городским маршрутам круговыми рейсами с временем цикла $T_{цАвтМ}$. Подбор провозной способности городского транспорт осуществлялся по тем же формулам (8), (9) с учетом того, что пассажиропоток разделяется по двум направлениям - городской автотранспорт и железная дорога. В формуле (9) общую интенсивность пассажиропотока $\lambda_{пас}$ необходимо заменить на величину $p_{авт}\lambda_{пас}$, где $p_{авт}$ – доля общего пассажиропотока, вывозимого из АП автобусами.

В примере время кругорейса городского автобуса принято $T_{цАвтМ} = 30 \text{ мин}$. Характеристикам парка (табл.2) соответствуют следующие значения параметров: количество единиц транспорта $N_{автс} = 30$, средняя пассажировместимость $ПВМ_{ср} = 80 \text{ пас}$ при заполнении 90%. Провозная способность городского автопарка составляет (с учетом планируемого заполнения 90%) величину 2160 пас (за кругорейс). За время кругорейса входной поток, прибывающий на остановку автобуса, составил 1300 авиапассажиров (с учетом того, что только 40% вывозится автобусами).

При невыполнении условия (8) (с учетом доли потока, вывозимого городскими автобусами) на остановке АП будут накапливаться неограниченно нарастающие очереди. В примере превышение провозной способности над минимально необходимой составило величину $\kappa_{пр} = 2160 / 1300 = 1.66 \text{ раза}$. Такт подачи автобусов на остановку «Аэропорт» составил 60 сек.

ПАРАМЕТРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПАРКА ПО ЛИНИИ АП- ВОКЗАЛ

Примем, что парк электричек содержит m типов поездов (составов). Каждый состав i - ого типа содержит m_i одинаковых вагонов. Пассажировместимость каждого вагона $ПВМ_{ВАГi}$. Пассажировместимость состава каждого типа

$$ПВМ_{СОСТi} = ПВМ_{ВАГi} m_i.$$

Типы состава отличаются друг от друга количеством вагонов и (или) их пассажировместимостью. Все вагоны, входящие в состав одного типа одинаковы. Количество составов каждого типа n_i . Расчетный коэффициент заполнения вагонов $K_{ВАГ}$. (табл.3) приведен пример параметров железнодорожного парка использованного далее для расчетов.

Таблица 3

Пример характеристик железнодорожного парка

Тип состава	ПВМ вагона, пас	Кол-во вагонов	Кол-во составов
1	60	6	4
2	60	8	4

Время цикла (кругового рейса) каждого поезда, связывающего платформу «Железнодорожный вокзал» и «Аэропорт», состоит также из 4-ех элементов, аналогичных кругорейсам автобуса. Время кругорейса поезда $T_{ц\text{сост}} = 40 \text{ мин.}$ Провозная способность парка составила 3360 пас за кругорейс при 90% заполнении вагонов.

За это время подлежащий вывозу входной поток авиапассажиров составил (с учетом того, что 40% потока вывозится из АП автобусами) величину 2600 пас. Эта величина означает минимальную провозную способность требуемого железнодорожного парка. При невыполнении условия (8) на железнодорожной платформе «Аэропорт» будут накапливаться неограниченно нарастающие с течением времени очереди. Такт подачи поездов на линию «АП – железнодорожный вокзал» равен 5 мин.

ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «AirportTransLogistics»

Детальный анализ качества обслуживания на различных фазах, проверка достаточности парка используемых транспортных средств осуществляется методом имитационного моделирования. Нами были разработаны имитационная вероятностная модель многофазного мультимодального процесса обслуживания прибывающего потока авиапассажиров и ее реализующая информационно-логистическая система (ИЛС) имитационного вероятностного моделирования «AirportTransLogistics».

Структуры данных о параметрах, характеризующих состояние каждого из элементов ТЛ-процесса, приведены в [1,2]. В частности, отдельный массив содержит данные о временных характеристиках перемещения каждого из прибывающих пассажиров на каждой фазе.

С помощью ИЛС «AirportTransLogistics» моделировался процесс обслуживания пассажиров для потока ВС, с характеристиками, приведенными выше в п.1 и на рисунке 1.

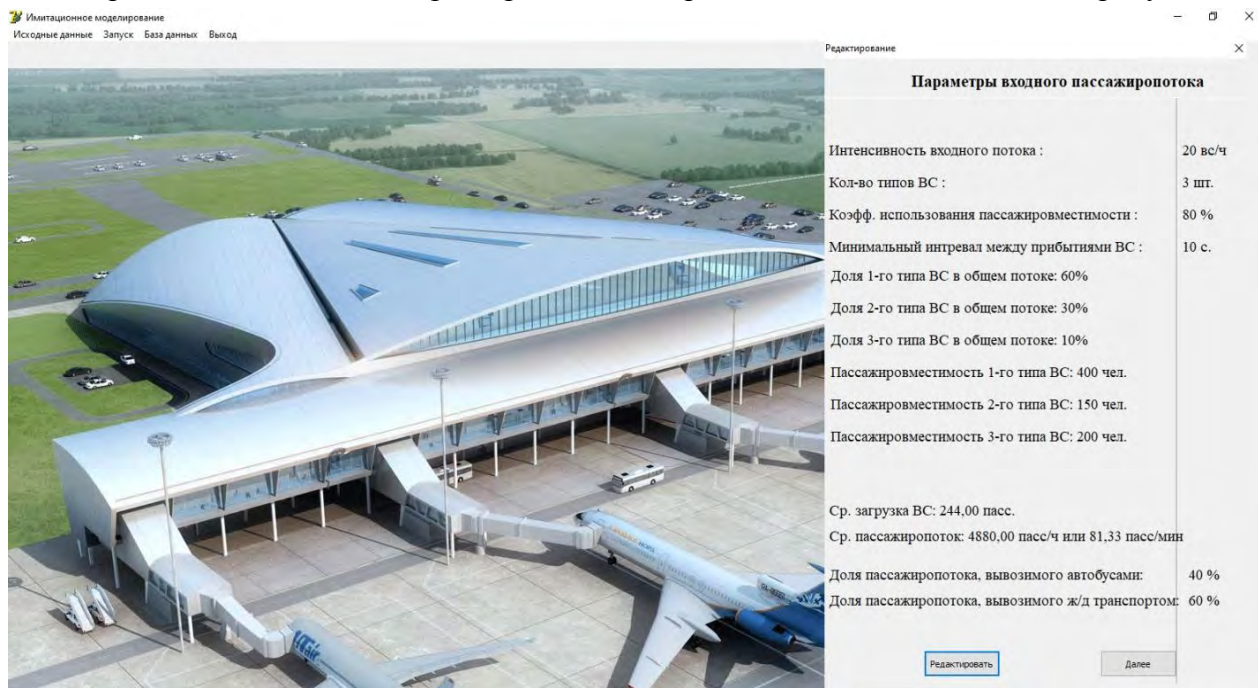


Рис. 1 - Входная экранная форма ИЛС задания параметров аэропортового комплекса

Входной поток ВС моделировался как пуассоновский поток стандартными методами [3]. Тип ВС разыгрывался в момент прибытия ВС как дискретная случайная величина с заданными вероятностями по каждому типу. Этот процесс воспроизводил расписание прибытия ВС. Разыгрывалось, как это и принято в методе Монте-Карло, несколько реализаций входного потока. Время моделирования $T_r = 8 \text{ час}$, шаг дискретизации по времени – 1 сек. Например, для первой реализации (по результатам моделирования) за время T_r в воздушное пространство АП прибыло 152 ВС. Всего воздушные суда доставили пассажиров на перроны аэропорта 37.3 тысяч пассажиров (т пас), из них отбывают из АП автобусами 14.9 т пас, электричками 22.4 т пас.

Характеристики обслуживания на перронах. При наличии 18 перронов в аэропортовом комплексе и провозной способности перронного парка со значением 2664 пас моделирование показало отсутствие наличия очередей воздушных судов в воздушном пространстве АП - 0 ВС. На перронах накапливались значительные регулярно возникающие очереди в ожидании автобусов. Наблюдалось несколько пиковых значений 100, 125 и 186 пас. Время пребывания пассажиров на перронах достигало 6.2 мин. Таким образом, выбранные характеристики перронного парка оказываются недостаточными.

В описанной модели было принято, что под каждый рейс ВС выделялся один пункт выдачи багажа. Максимальное значение очереди на одном пункте выдачи багажа составило 28 человек. Максимальное количество пассажиров, скопившихся в зале выдачи багажа – 1045 пас. Максимальное время пребывания пассажиров в зале выдачи багажа составило 13.45 мин. Уменьшение очередей в зале и пунктах выдачи багажа может быть достигнуто увеличением количества пунктов выдачи, закрепленных за рейсами.

Характеристики обслуживания городским автобусным парком. Посадка прибывших авиапассажиров на городской транспорт (автобусы и электрички) осуществляется в порядке их прибытия на пункт посадки. Характеристиками качества обслуживания являются очереди и время ожидания посадки на автобусной остановке и железнодорожной платформе. С целью оптимизации подбирались минимальная провозная способность вывозящего транспорта, обеспечивающая приемлемое качество обслуживания.

Для параметров автобусного парка с провозной способностью 1605 пас. (минус 8 единиц от данных табл.3, 26 ед. транспорта, превышение над потоком 1.3) максимальная очередь достигла 172 пас. Максимальное время ожидания посадки составило 3 мин. Если добавить в автобусный парк две единицы транспорта (коэффициент превышения потока 1.42) максимальная очередь на остановке составила 86 пас, а максимальное время ожидания 1.5 мин (рис. 2).

Эти характеристики могут оцениваться как неприемлемые. Для автобусного парка с параметрами (табл.2) и с провозной способностью, превышающей в 1.66 раз входной поток, максимальная очередь на остановке «Аэропорт» составила 25 пассажиров. Максимальное время ожидания посадки уменьшилось до 0.4 мин.

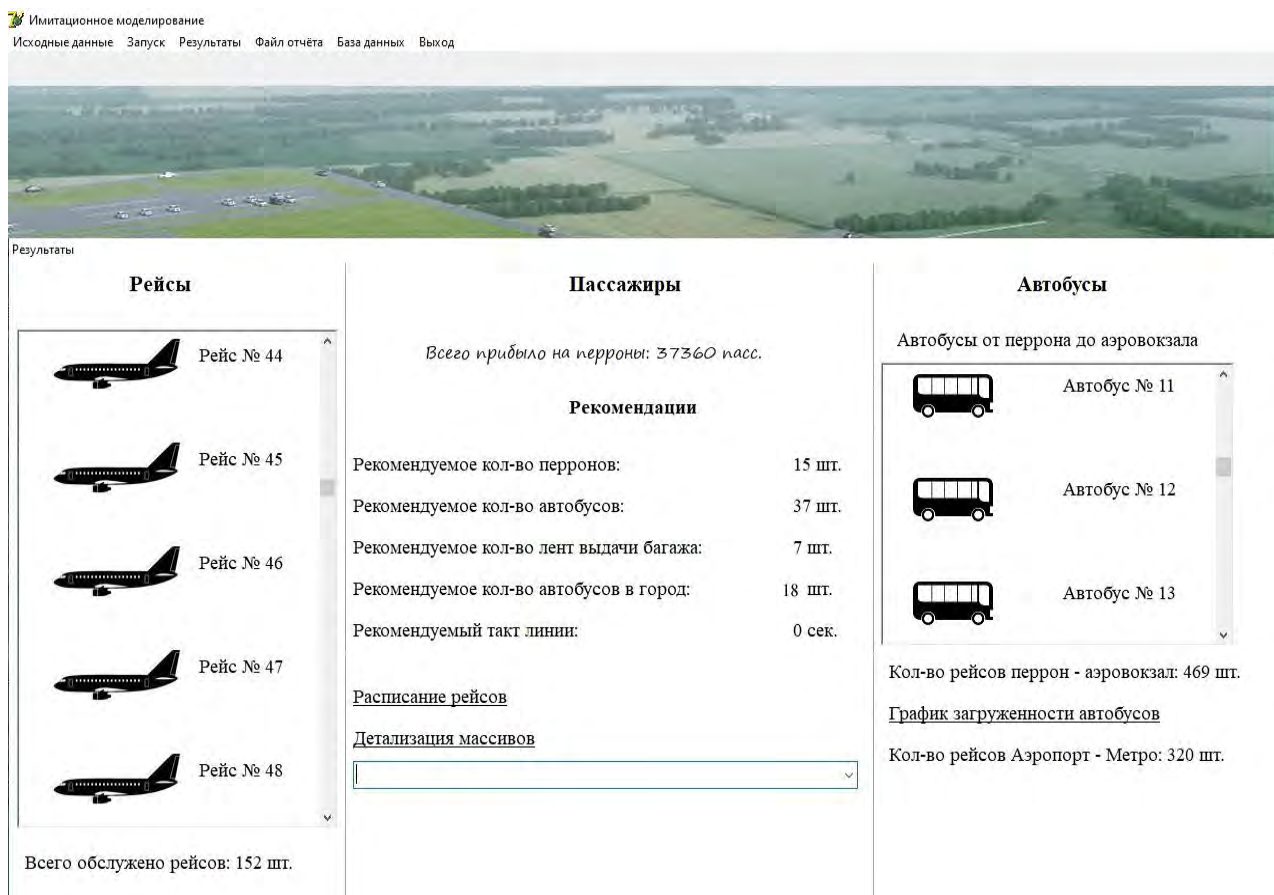


Рис. 2 - Выходная экранная форма ИЛС параметров аэропортового комплекса, полученных в процессе моделирования.

Характеристики обслуживания железнодорожным парком. Для состава железнодорожного парка с провозной способностью 3360 пас. (превышение входного потока 1.3) максимальная очередь составила 662пас. на платформе, а максимальное время ожидания посадки – 10 мин. Если увеличить парк до 8 единиц электричек каждого типа, его провозная способность увеличится до значения 6696 пас. Это значение превышает входной пассажиропоток в 2.58 раза. Как показало моделирование, в этом случае максимальное время пребывания составит 0.6 мин, а максимальная очередь на железнодорожной платформе уменьшится до 115 авиапассажиров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системный подход к оценке качества обслуживания потоков авиапассажиров предполагает необходимость рассматривать этот процесс как многофазный, включающий на отдельных фазах не только традиционные внутри аэропортовые технологические операции, но и вывоз пассажиров городским автомобильным и железнодорожным транспортом. Аэропорты становятся мультимодальными транспортно-пассажирским узлами.

Стандартная техника подбора параметров обслуживания на отдельных фазах оказывается недостаточной. Для более детального анализа и обеспечения требуемого качества обслуживания необходимым является использование вероятностных имитационных моделей.

В настоящей статье мы предлагаем методику, математическое описание и модифицированный программный продукт для расчета и выбора оптимальных параметров системы обслуживания пребывающего потока авиапассажиров с момента посадки ВС и выхода пассажира на перрон до момента доставки на ближайшие пункты пересадки (железнодорожную станцию и метро). Методика имитационного моделирования и разработанная программа позволяют получать данные по сквозному обслуживанию на каждой фазе и прохождению каждого пассажира через контрольные точки. В результате сбора обширной статистики, охватывающей десятки тысяч пассажиров, появляется возможность определять и количественно оценивать характеристики обслуживания и правильность выбора параметров обслуживания в их взаимной связи на каждой фазе.

Для многофазного процесса обслуживания возникают эффекты взаимного влияния фаз. Последующие фазы могут оказывать дополнительное негативное влияние на качество обслуживания на предыдущих фазах. Имитационное моделирование показало, что недостаток транспорта (например, аэропортового) приводит к увеличению времени обслуживания на перроне, что в свою очередь создает дополнительные очереди воздушных судов при посадке.

Рассмотренная здесь методика дает возможность провести доработку и коррекцию выбранных параметров обслуживания на различных фазах. Коррекция параметров, как показывают примеры, позволяет контролировать и добиваться снижения очередей и времени ожидания авиапассажиров на всех фазах, начиная с моментов выхода на перроны вплоть до посадки на вывозящий автомобильный и железнодорожный транспорт. Оптимизация перронного обслуживания пассажиров приводит к уменьшению очередей прибывающих ВС в воздушном пространстве аэропорта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Палагин Ю.И., Глинский В.А., Мочалов А.И. Интермодальные транспортно-логистические процессы. Экспедирование, технологии, оптимизация. - СПб.: Издательство «Политехника», 2019. – 366 с.
2. Палагин Ю.И., Мочалов А.И., Сенокосов Д.Г. Вероятностное имитационное моделирование мультимодальных транспортно-логистических процессов в аэропортах / Транспорт: наука, техника, управление //М., ВИНТИ. 2018, № 2. С. 24-32.
3. Романенко В. А. Системы и сети массового обслуживания: В.А. Романенко. – Самара: 2021. – 68 с.: ил.
4. Лукинский В.С., Лукинский В.В., Плетнева Н.Г. Логистика и управление цепями поставок: учебник и практикум для академического бакалавриата. – М.: Юрайт, 2016. – 359с.
5. Куренков П.В., Стеблецов Д.Е. Моделирование процессов в терминально-логистическом центре контрейлерных перевозок «Белый Раст»// - М.: Бюллетень транспортной информации. – 2015.

6. Майоров Н. Н. Моделирование процессов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: ГУАП, 2011. — 165 с.
7. Майоров Н.Н. Метод оценки пропускной способности аэровокзального комплекса с помощью имитационного моделирования / В.А. Фетисов, Н.Н. Майоров // Информационно-управляющие системы. –2014. –№ 6 (73). С. 82–86.
8. Тецлав И.А. Методы и средства управления системой обслуживания пассажиров в аэропорту в условиях неопределенности. Канд. диссерт, СПб, ГУГА, 2023.
9. Пестерев Е.В., Тецлав И. А., Информационная система принятия решений при обслуживании пассажиров в аэровокзале. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. -2016, №3(12), с.121-134.
10. Berg, R. Strategies and new business models in intermodal hinterland transport / Berg, van den, R. - Eindhoven: TechnischeUniversiteit Eindhoven, 2015. – 206 p.