

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОПОРТОВ, КАК БЕЗРИСКОВАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА

Н.С. Харьков, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке
Ф.А. Пащенко, канд. техн. наук, член-корреспондент РАН, генеральный директор
Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект»
(Россия, г. Санкт-Петербург)

DOI:10.24412/2500-1000-2024-12-3-239-247

Аннотация. Статья посвящена применению имитационного моделирования для анализа и оптимизации процессов аэропорта. Платформа AnyLogic, включающая методы дискретно-событийного моделирования, агентного моделирования и системной динамики, позволяет более эффективно управлять пассажиропотоками. Благодаря существующим подходам имитационного моделирования возможно создать комплексные модели для оптимизации таких процессов, как регистрация пассажиров, координация наземных служб и управление движением воздушных судов. Примеры из международной практики показали, что имитационное моделирование способствует снижению времени ожидания на 15% и увеличению пропускной способности на 20% без значительных изменений инфраструктуры. В статье приводится анализ влияния продолжительности входного досмотра на образование очередей в аэропорту. Результаты исследований показали, что увеличение продолжительности досмотра приводит к росту количества пассажиров в очереди и изменению характера её образования. Моделирование показало, что для значительного снижения очередей на досмотр при заданных условиях рекомендуется поддерживать среднее время входного досмотра пассажиров не более 0,25 мин. Результаты исследования подчеркивают значимость имитационного моделирования для принятия решений, улучшения качества обслуживания, позволяя оперативно реагировать на изменения пассажиропотока и оптимизировать работу служб аэропорта.

Ключевые слова: имитационное моделирование аэропорта, пассажиропоток, AnyLogic, модель аэропорта, аэропорт.

Пассажирские перевозки – важная часть международной и, в частности, государственной инфраструктуры [1]. На территории Российской Федерации расположено множество гражданских аэродромов различных категорий по годовому объему перевозок, что требует индивидуального подхода к прогнозу пассажиропотока и оптимизации процессов управления аэропортом [2, 3].

Имитационное моделирование стало ключевым инструментом в авиационной индустрии для анализа и оптимизации сложных систем, таких как аэропорты. Идеальная платформа для имитационного моделирования - программное обеспечение AnyLogic, предоставляющее мощный набор инструментов для многопараметрического моделирования различных задач в аэропортах, включая управление пассажиропотоками, оптимизацию работы взлетно-посадочных полос и координацию наземных служб.

Аэропорты – сложные системы, множество процессов которого должны работать скоординированно для обеспечения бесперебойного функционирования инфраструктуры. Процессы включают в себя управление пассажиропотоками, логистику багажного обслуживания, диспетчеризацию рейсов, работу служб безопасности и техническое обслуживание самолетов. Имитационное моделирование позволяет исследовать и оптимизировать эти процессы, выявляя узкие места и прогнозируя влияние изменений на всю систему аэропорта.

Имитационное моделирование в аэропортах используется для [4]:

- оптимизации маршрутов пассажиров в терминалах и минимизации времени ожидания и очередей;

- планирования и координации движения самолетов на взлетно-посадочных полосах и рулежных дорожках для сокращения задержек в расписании;

- улучшения работы наземных служб по обслуживанию самолетов;
- управления логистикой;
- прогнозирования последствий изменения расписания рейсов.

Для наиболее точного моделирования реального аэропорта необходимо учитывать специфику ключевых методов моделирования в AnyLogic. Программное обеспечение AnyLogic предоставляет три ключевых метода моделирования: дискретно-событийное моделирование (DES), агентное моделирование (ABM) и системную динамику (SD). Каждый из методов используется для моделирования различных аспектов работы аэропорта, что позволяет создать интегрированную модель для решения комплексных задач.

Дискретно-событийное моделирование (DES). Дискретно-событийное моделирование фокусируется на последовательных операциях и событиях, таких как регистрация пассажиров, проверка безопасности и обработка багажа. Метод позволяет оценивать производительность аэропорта на уровне отдельных операций и выявлять узкие места, которые могут приводить к задержкам или неэффективности.

Агентное моделирование (ABM). Агентное моделирование используется для моделирования взаимодействий между пассажирами, сотрудниками аэропорта и техническими службами [5]. Каждый агент (например, пассажир или сотрудник) имеет свое поведение и может взаимодействовать с другими агентами и средой. ABM используется для изучения сложных сценариев, таких как распределение пассажиропотоков по терминалам или реакции на чрезвычайные ситуации [6].

Системная динамика (SD). Системная динамика применяется для моделирования долгосрочных тенденций и стратегических решений, таких как увеличение числа рейсов, изменения в инфраструктуре или новые правила безопасности. SD позволяет анализировать влияние стратегических решений на развитие аэропорта и оценивать потребность в ресурсах.

Имитационное моделирование уже активно применяется в аэропортах по всему миру для решения разнообразных задач, от планирования инфраструктуры до оптимизации процессов обслуживания пассажиров и самоле-

тов [7]. Рассмотрим несколько примеров из практики.

Аэропорт Хитроу (Лондон), один из самых загруженных международных аэропортов, активно использует имитационное моделирование для оптимизации пассажиропотоков. В частности, создана модель, определяющая влияние различных сценариев на работу зоны регистрации и досмотра пассажиров. Моделирование позволило улучшить управление очередями в пиковые периоды, что позволило сократить время ожидания пассажиров в среднем на 15%. Использование агентного моделирования также позволило учитывать индивидуальное поведение пассажиров и их предпочтения при выборе маршрутов внутри терминала.

Аэропорт Чанги (Сингапур) стоит в ряду самых передовых в мире по использованию технологий для повышения эффективности работы. В рамках проекта по увеличению пропускной способности аэропорта было разработано дискретно-событийное имитационное моделирование движения самолетов на взлетно-посадочных полосах и рулежных дорожках. Перед аэропортом стояла цель минимизировать задержки рейсов и улучшить координацию между наземными службами и диспетчерскими службами. Моделирование позволило выявить наиболее эффективные стратегии распределения воздушного трафика, что привело к увеличению пропускной способности на 20% без необходимости значительного расширения инфраструктуры.

В аэропорту Лос-Анджелеса (США) имитационное моделирование использовалось для оптимизации работы наземных служб, включая заправку, техническое обслуживание и логистику багажа. С использованием AnyLogic была создана модель, позволяющая протестировать различные сценарии распределения ресурсов и оценить их влияние на время обслуживания самолетов. В результате аэропорту удалось сократить время обслуживания на стоянке в среднем на 10%, что привело к снижению общих задержек и, как следствие, повышению эффективности работы аэропорта.

Аэропорт Дубая (ОАЭ) использовал имитационное моделирование для планирования и оптимизации работы терминалов в условиях увеличивающегося пассажиропотока. В осно-

ве модели заложен метод агентного моделирования, учитывающий поведение пассажиров при прохождении процедур регистрации, досмотра и посадки на рейсы. Модель обеспечила более точный прогноз времени обслуживания пассажиров и выявила узкие места в пиковые периоды. По итогам моделирования были предложены изменения в организации работы терминалов, что помогло увеличить пропускную способность аэропорта и улучшить качество обслуживания пассажиров.

Безопасность пассажиров – один из ключевых приоритетов для любого аэропорта. В аэропорту Франкфурта (Германия) проведено агентное имитационное моделирование для анализа эффективности процесса эвакуации в случае чрезвычайных ситуаций. Модели включали различные сценарии, такие как пожар, террористическая угроза или техногенная катастрофа. Агентное моделирование позволило учитывать поведение пассажиров в условиях стресса и взаимодействие с персоналом аэропорта. Результаты моделирования позволили оптимизировать планы эвакуации и сократить время на безопасную эвакуацию пассажиров в среднем на 12%.

Аэропорт Хартсфилд-Джексон (США), крупнейший в мире по пассажиропотоку, использует имитационное моделирование для оптимизации логистики операций по транспорту багажа. Моделирование включало в себя весь цикл транспорта багажа – от момента его сдачи пассажиром до погрузки на самолет. Система AnyLogic позволила создать точную модель работы багажных конвейеров и распределительных пунктов, что дало возможность оптимизировать маршрут и уменьшить задержки при обработке багажа. В результате удалось снизить процент потерянного багажа на 5%, а также повысить общую производительность системы обработки багажа на 10%.

Имитационное моделирование Аэропорта

На результат имитационного моделирования оказывает влияние широкий диапазон факторов: от геометрии пространства, по которому перемещаются агенты, и параметров агентов до внешних факторов, влияющих на модель извне [8].

Для имитационного моделирования аэропорта выбран метод агентного моделирования, позволяющий воссоздать характер поведения пассажиров и персонала, а также процесс транспорта багажа улетающих и прибывающих пассажиров [9, 10].

Построенная модель позволяет варьировать влияющие на пассажиропоток параметры:

- количество пассажиров и сотрудников аэропорта, вероятность наличия у пассажиров багажа и упаковки пассажирами багажа;

- вероятность и продолжительность посещения пассажирами уборных;

- прохождение пассажирами входного досмотра, ожидания регистрации на рейс и непосредственно регистрация на рейс, ожидание получения багажа и продолжительность его получения.

Для наиболее точной имитации поведения пассажиров и сотрудников аэропорта, а также режима транспорта багажа необходимо разработать логическую блок-схему имитационной модели аэропорта (рис. 1). Вышеприведенные варьируемые параметры имитационной модели заданы при помощи следующих основных логических блоков:

- pedSource и source, использующиеся для появления в системе агентов (пассажиров, сотрудников и багажа);

- pedSink и sink, определяемые выход из системы агентов (пассажиров, сотрудников и багажа);

- split, необходимый для разделения агента на двух различных агентов (отделение траектории движения багажа от пассажира);

- combine, применяемый для слияния двух агентов в одного (получение пассажиром багажа);

- delay, pedService и pedWait, используемые для имитации процесса оказания услуги агенту и процесса ожидания агента;

- pedGoTo, определяющий передвижение агента в необходимое место или пространство;

- queue, имитирующий очередь агентов, ожидающих приема следующим блоком в схеме.

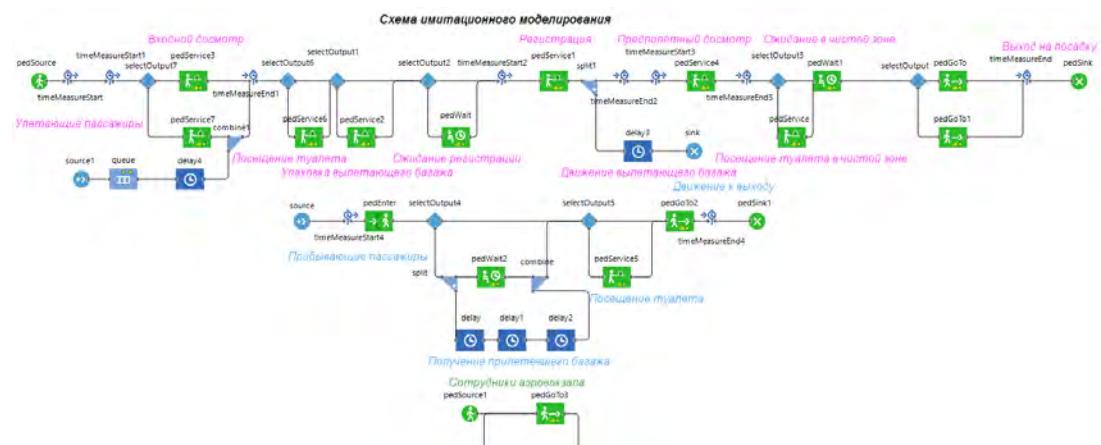


Рис. 1. Схема имитационной модели аэропорта

Для визуализации процесса моделирования, а также для исключения возможности ошибок, связанных с выходом агентов из допустимой для них зоны, создан двухмерный

вид модели аэровокзала (рис. 2). Для количественного отображения плотности пассажиропотока на двухмерном виде модели применена карта плотности пассажиропотока.

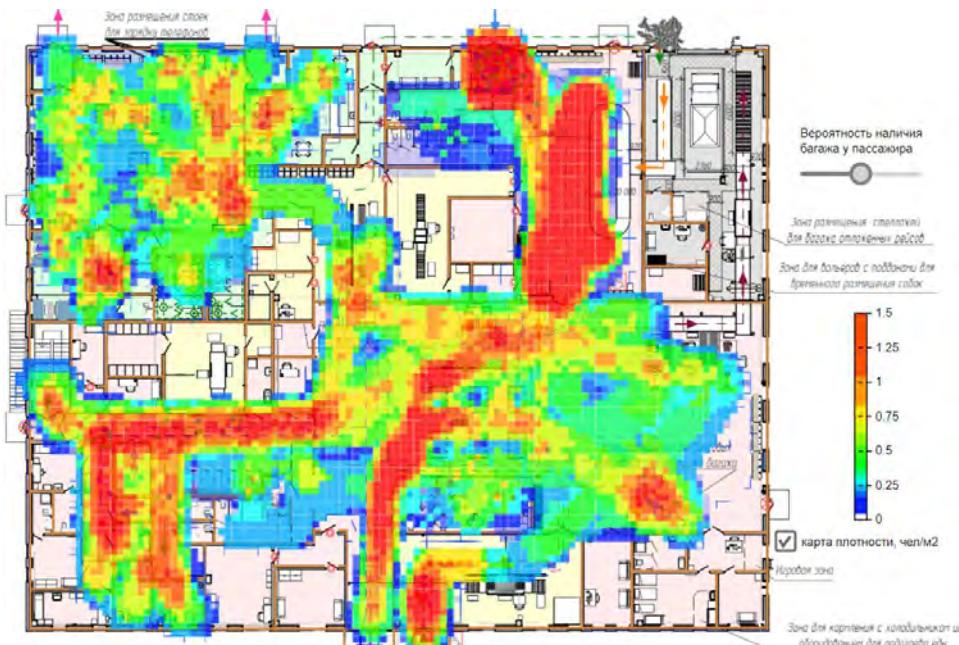


Рис. 2. Двухмерный вид модели аэровокзала с включенной картой плотности пассажиропотока

Для большей наглядности процесса моделирования создан трехмерный вид имитационной модели аэровокзала, открывающий возможность более детально исследовать процессы перемещения пассажиров, сотруд-

ников аэропорта и багажа с различных рабочих мест (рис. 3). Особое удобство трехмерный вид модели представляет для многоуровневых имитационных моделей.

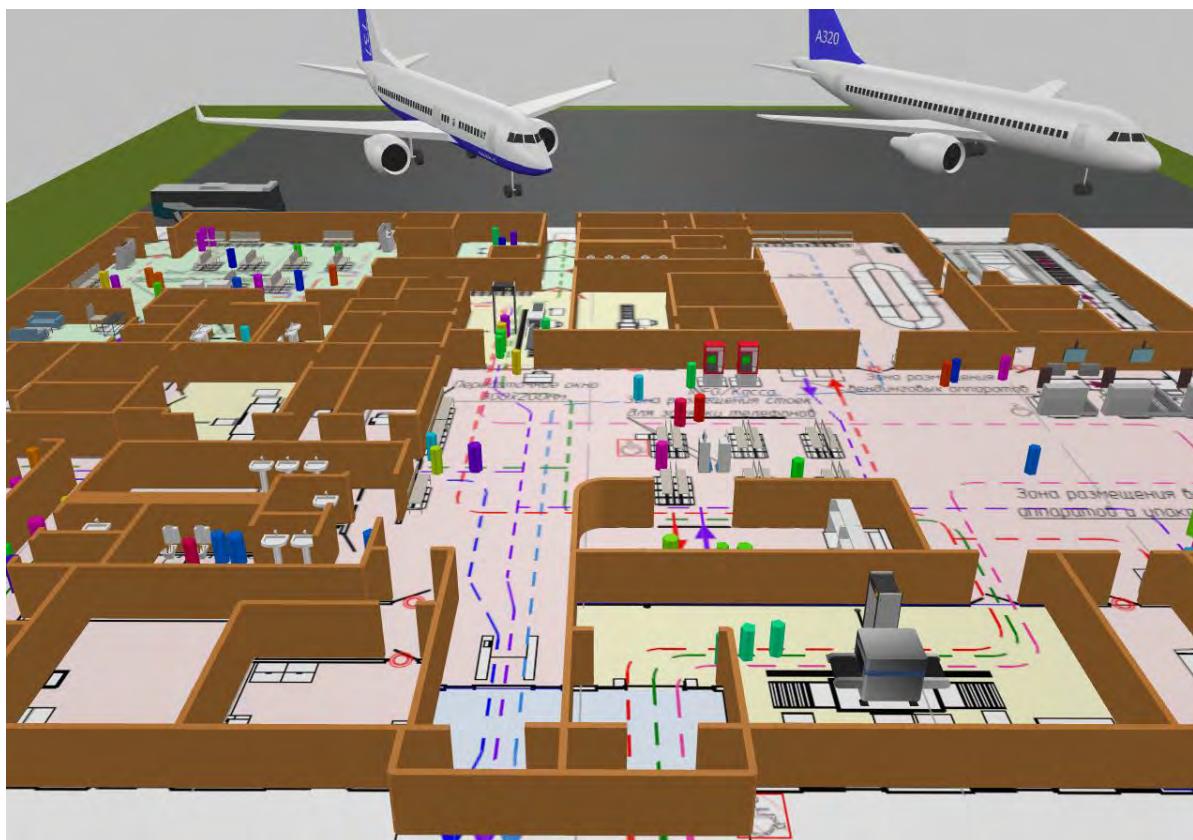


Рис. 3. Трехмерный вид модели аэровокзала

С целью определения характера изменения пассажиропотока задано варьирование следующих входных параметров имитационной модели аэропорта: минимальной продолжи-

тельности входного досмотра, средней продолжительности входного досмотра, максимальной продолжительности входного досмотра (табл. 1).

Таблица 1. Варьируемые параметры имитационного моделирования

Шаг моделирования	1 (Благоприятный прогноз)	2	3	4	5 (Неблагоприятный прогноз)
Минимальная продолжительность входного досмотра, мин	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
Средняя продолжительность входного досмотра $t_{вх.д.}$, мин	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Максимальная продолжительность входного досмотра, мин	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50

По результатам имитационного моделирования аэропорта построен график зависимости количества человек в очереди на входной

досмотр от средней продолжительности входного досмотра $t_{вх.д.}$ (рис. 4).

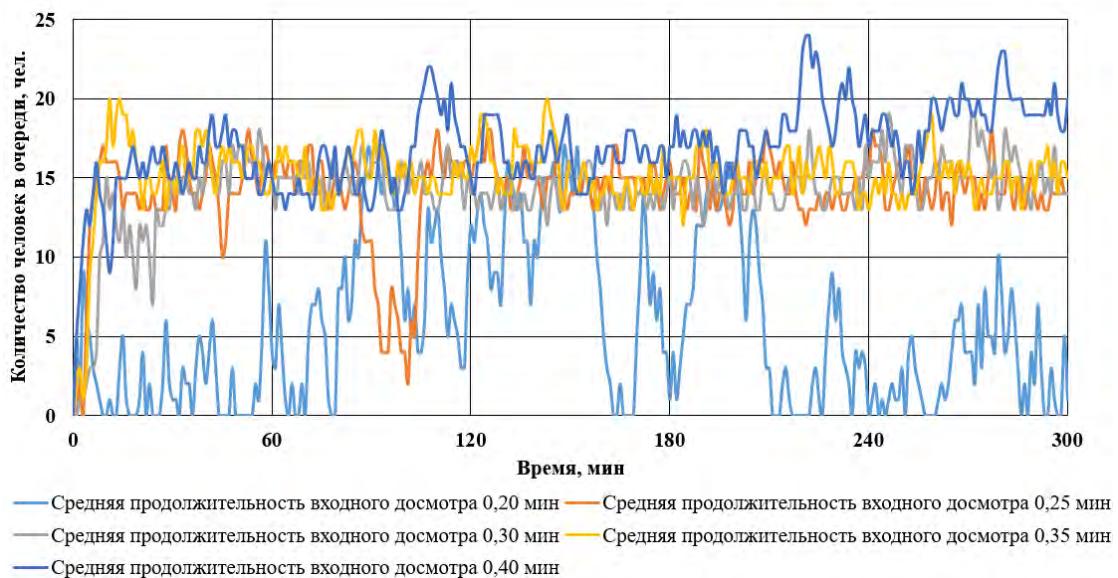


Рис. 4. График зависимости количества человек в очереди на входной досмотр от продолжительности входного досмотра

В связи с явным, но недостаточно стабильным, изменением характера образования очередей на входной досмотр при вариации продолжительности входного досмотра, принято

решение провести полиномиальную интерполяцию 6 степени для получившихся графиков (рис. 5).

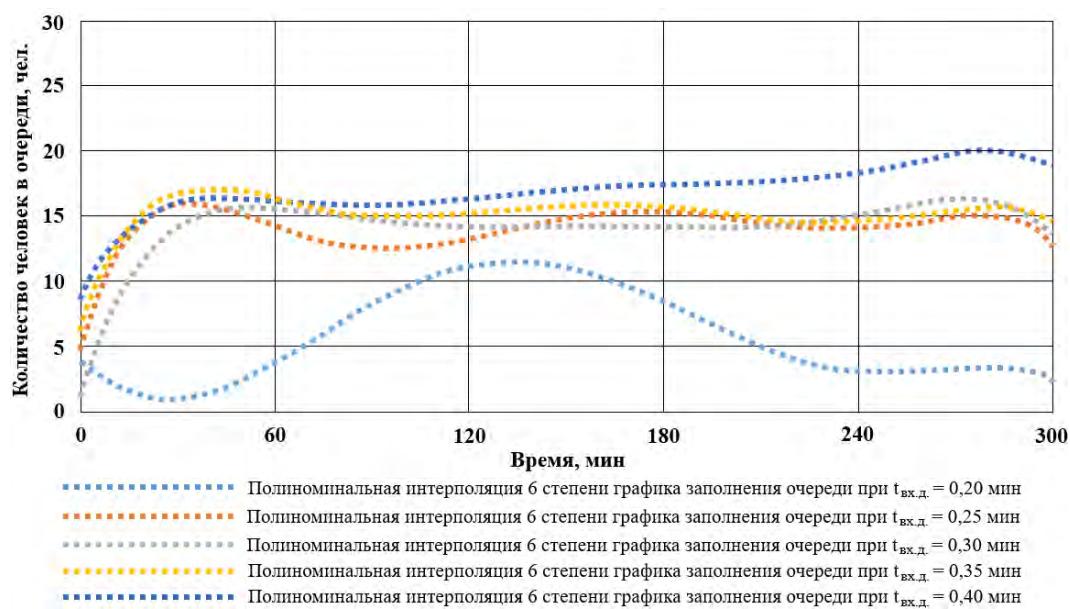


Рис. 5. Полиномиальная интерполяция зависимостей количества человек в очереди на входной досмотр от продолжительности входного досмотра

По результатам моделирования, видно, что увеличение продолжительности входного досмотра приводит не только к увеличению количества человек в очереди, но и к изменению характера её образования:

- при увеличении средней продолжительности входного досмотра с 0,2 мин до 0,3 мин наблюдается выплаживание графиков зависимости, что связано с приближением значе-

ния интенсивности прибытия пассажиров в аэропорт к значению скорости обслуживания пассажиров на входном досмотре;

- при дальнейшем увеличении продолжительности входного досмотра с 0,3 мин до 0,4 мин наблюдается возрастание неравномерности образования очереди и возрастание количества человек в очереди, что в свою очередь указывает на превышение значения

интенсивности прибытия пассажиров в аэропорт над значением скорости входного досмотра пассажиров.

Для наиболее точного определения влияния продолжительности входного досмотра на характер образования очереди на прохожде-

ние входного досмотра проанализировано изменение средней продолжительности прохождения очереди входного досмотра одним человеком при заданных шагах моделирования (табл. 2).

Таблица 2. Сводная таблица результатов моделирования

Шаг моделирования	1 (Благоприятный прогноз)	2	3	4	5 (Неблагоприятный прогноз)
Средняя продолжительность входного досмотра, мин	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
Средняя продолжительность прохождения очереди входного досмотра одним человеком, мин	2,45	7,28	21,14	22,81	23,36

По результатам анализа изменения средней продолжительности прохождения очереди входного досмотра одним человеком при за-

данных шагах моделирования построен график зависимости рассматриваемых величин (рис. 6).

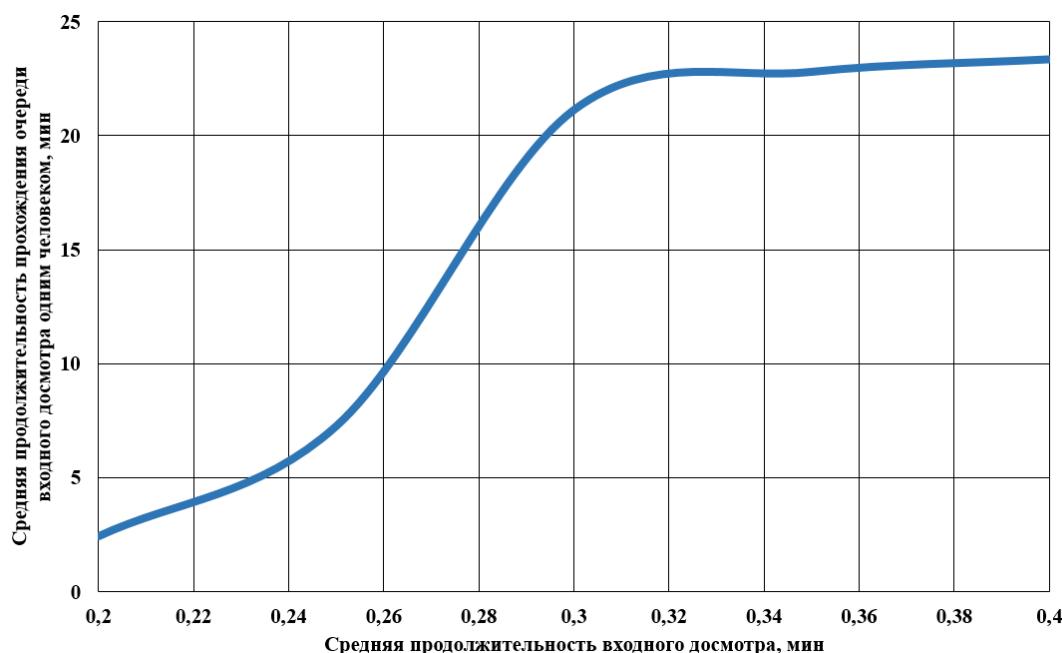


Рис. 6. График зависимости средней продолжительности прохождения очереди входного досмотра одним человеком от средней продолжительности входного досмотра пассажиров

Согласно графику, подтверждается предыдущее предположение о характере образования очереди при изменении средней продолжительности входного досмотра пассажиров аэропорта.

Выходы

В ходе исследования построена имитационная модель аэропорта, на примере которой определено влияние продолжительности входного досмотра на характер образования очереди на входной досмотр, а также построены графики зависимости количества человек

в очереди на входной досмотр от продолжительности входного досмотра (рис. 1-5).

По результатам моделирования выявлено, что увеличение средней продолжительности входного досмотра значительно влияет не только на увеличение размеров и продолжительности прохождения очередей, но и на характер образования очереди входного досмотра:

- увеличение средней продолжительности входного досмотра с 0,2 мин до 0,3 мин привело к более плавному изменению размеров

очередей, а дальнейшее увеличение с 0,3 мин до 0,4 мин привело не только к возрастанию количества человек в очереди, но и к возрастанию неравномерности образования очереди;

- Построенный график зависимости средней продолжительности прохождения очереди входного досмотра одним человеком от средней продолжительности входного досмотра пассажиров показал, что для заданных условий при достижении значения средней продолжительности входного досмотра 0,3 мин значение интенсивности прибытия пассажиров в аэропорт приблизилось к значению скорости обслуживания пассажиров на входном досмотре (табл. 2, рис. 6).

Результаты исследования подтверждают необходимость использования имитационного моделирования с целью анализа, прогноза и

оптимизации процесса управления пассажиропотоком в аэропортах.

Решением для вышеперечисленных мер повышения эффективности работы аэропорта могут служить системы видеоаналитики, совместная работа которых с имитационной моделью аэропорта позволит наиболее точно давать исходные данные модели и корректировать их в режиме реального времени для мгновенного изменения состояния системы и предложению сценариев по управлению пассажиропотоком. Помимо прочего для увеличения скорости прохождения пассажирами необходимых для допуска к полёту операций и повышения степени эффективности работы аэропорта существует возможность применять автоматические системы обслуживания пассажиров.

Библиографический список

1. Выскребенцев И.С. Анализ факторов, влияющих на прогнозирование пассажиропотока и спрос на пассажирские перевозки // Московский экономический журнал. – 2020. – № 12. DOI: 10.24411/2413-046X-2020-10885.
2. Богданова Т.В., Субботин Н.Н. Концентрация пассажиропотоков и грузопотоков в российских аэропортах // Вестник университета. – 2017. – № 7-8. – С. 84-90.
3. Палагин Ю.И., Мочалов А.И., Тимонин А.В. Математическое моделирование и расчет характеристик трехмодальных транспортно-терминальных сетей // Прикладная информатика. – 2013. – Т. 2. № 44. – С. 32-41.
4. Яркова О.Н. Имитационное моделирование системы обслуживания пассажиров вылетающих рейсов на примере аэропорта «Оренбург» // Прикладная информатика. – 2016. – Т. 11. № 4. – С. 64.
5. Майоров Н.Н., Фетисов В.А. Метод оценки пропускной способности аэровокзального комплекса с помощью имитационного моделирования // Моделирование систем и процессов. – 2014. – № 6.
6. Аненко С.А., Рассказова М.Н. Разработка имитационной модели распределения пассажиропотоков на примере аэропорта // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 18-28. – DOI: 10.25206/2311-4908-2021-8-2-18-28.
7. Тишуков Д.Ю., Батурина Н.Ю. Имитационное моделирование обслуживания пассажиров в аэропорту // Молодой исследователь Дона. – 2024. – Т. 9, Вып. 3. – С. 69-74.
8. Mota M., Boosten G., Bock N., Jimenez E., Pinho J. Simulation-based turnaround evaluation for Lelystad Airport // Journal of Air Transport Management. – 2017. – Vol. 64, Part A. – P. 21-32. – DOI: 10.1016/j.jairtraman.2017.06.021.
9. Cavada J., Cortes C., Rey P.A simulation approach to modelling baggage handling systems at an international airport // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2017. – № 75. – С. 146-164. – DOI: 10.1016/j.simpat.2017.01.006.
10. Fonseca P., Casanovas J., Ferran X. Passenger flow simulation in a hub airport: An application to the Barcelona International Airport // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2014. – № 44. – С. 78-94. – DOI: 10.1016/j.simpat.2014.03.008.

AIRPORT SIMULATION AS A RISK-FREE EXPERIMENTAL ENVIRONMENT

N.S. Kharkov, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director General for Science

F.A. Pashchenko, Candidate of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, General Director

**Lenaeroproekt Design, Survey and Research Institute of Air Transport
(Russia, Saint Petersburg)**

Abstract. The article is devoted to the application of simulation modeling for the analysis and optimization of airport processes. The AnyLogic platform, which includes methods of discrete event modeling, agent-based modeling, and system dynamics, allows for more efficient passenger traffic management. Thanks to existing simulation approaches, it is possible to create comprehensive models to optimize processes such as passenger registration, ground services coordination, and aircraft traffic management. Examples from international practice have shown that simulation reduces waiting times by 15% and increases throughput by 20% without significant infrastructure changes. The article provides an analysis of the impact of the length of the entrance inspection on the formation of queues at the airport. The research results have shown that an increase in the length of the inspection leads to an increase in the number of passengers in the queue and a change in the nature of its formation. The simulation showed that in order to significantly reduce the queues for screening under the given conditions, it is recommended to maintain the average time of entrance inspection of passengers no more than 0.25 minutes. The results of the study emphasize the importance of simulation modeling for decision-making, improving the quality of service, allowing you to quickly respond to changes in passenger traffic and optimize the operation of airport services.

Keywords: airport simulation, passenger traffic, AnyLogic, airport model, airport.