УДК 656.7
ББК У9(2)40

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБСЛУЖИВАНИЯ ПАССАЖИРОВ В МЕЖДУНАРОДНОМ АЭРОПОРТУ КУРУМОЧ

© 2009 В. А. Романенко

Самарский государственный аэрокосмический университет

С использованием метода статистического моделирования решена задача оптимизации параметров системы обслуживания вылетающих пассажиров на этапе регистрации в аэровокзале аэропорта. Определены временные характеристики этапа регистрации и пропускная способность системы регистрации, доставляющие минимум затрат рабочего времени и обеспечивающие необходимый уровень комфорта для пассажиров. Получены детальные стохастические портреты функционирования системы обслуживания пассажиров для реальных условий работы Международного аэропорта Курумоч (Самара).

Статистическое моделирование, оптимизация, система массового обслуживания, аэропорт, аэровокзал, регистрация пассажиров.

Важнейшей проблемой, стоящей перед любым предприятием в современных условиях, является повышение уровня доходов. Главный источник доходов для аэропортов - это платежи авиакомпаний, рейсы которых в нём обслуживаются. С одной стороны, аэропорт заинтересован в привлечении возможно большего числа рейсов различных авиакомпаний. С другой стороны, авиакомпании, заинтересованные в росте собственных доходов, стремятся повысить эффективность использования авиапарка, обеспечив приемлемую степень коммерческой загрузки рейсов, выполняемых из данного аэропорта. Возможным способом разрешения указанных проблем является переход аэропорта на работу по системе хаба. Под хабом или узловым аэропортом понимается крупный аэропорт, являющийся центром обширного района транспортного тяготения, предназначенный для обслуживания большого количества трансферных пассажиров. Система рационально состыкованных в крупном хабе транзитных рейсов позволяет пассажиру быстро (за временной промежуток от 30 минут до нескольких часов) пересесть на другой рейс и улететь практически в любую точку мира. Стыковки идут волнами: несколько десятков рейсов прибывают в аэропорт, транзитные пассажиры переходят на другие самолеты, после чего они вылетают в аэропорты назначения. Таких волн в течение суток бывает несколько. К основным достоинствам хаба можно отнести экономию наземного времени пассажира, повышение коэффициента занятости кресел, а также возможность использования на региональных линиях малых экономичных самолетов.

Преобразование аэропорта в хаб ставит перед ним ряд задач, основная из которых - обеспечение высокой пропускной способности системы обслуживания пассажиров в течение непродолжительных интервалов времени прибытия и вылета многих самолетов с трансферными пассажирами. Одним из путей её повышения, не требующим заметных капиталовложений, является оптимизация организационных схем обслуживания пассажиров.

Одним из наиболее важных и трудоемких этапов наземного обслуживания является регистрация билетов и оформление багажа вылетающих пассажиров. В аэропортах РФ наибольшее распространение получили два метода регистрации – свободный и порейсовый.

Свободный метод предполагает обслуживание пассажиров любого из вылетающих рейсов у любой стойки регистрации. Пассажиры самостоятельно распределяются по стойкам, что сводит вероятность возникновения очереди к минимуму. Время начала регистрации на рейс устанавливается, как правило, не менее чем за 4 часа до вылета само-

лета по расписанию, что позволяет пассажиру в удобное для него время приехать в аэропорт. Использование свободного метода регистрации позволяет увеличить пропускную способность аэровокзала, сократив при этом время наземного обслуживания пассажиров и повысив его качество. Однако с его внедрением усложняется учёт и оформление рейсовой документации, возникает необходимость в использовании сложной системы сортировки багажа по рейсам, возникает опасность засылки багажа не по назначению.

Порейсовый метод предусматривает обслуживание пассажиров определённого рейса у одной или нескольких определённых стоек регистрации. Достоинствами метода являются простота технологии обслуживания, отсутствие необходимости сортировки зарегистрированного багажа по рейсам и снижение вероятности его засылки не по назначению. К недостаткам относятся неравномерная загрузка рабочих мест, меньшая в сравнении со свободным методом пропускная способность и более длительное ожидание пассажирами в очереди. В настоящее время порейсовый метод применяется в подавляющем большинстве аэропортов РФ, в том числе в международном аэропорту Курумоч (г.Самара).

Ниже рассматривается актуальная задача оптимизации параметров системы обслуживания вылетающих пассажиров на этапе регистрации на примере международного аэропорта Курумоч, стремящегося, начиная с 2004 года, формировать своё расписание по схеме хаба.

Анализ систем массового обслуживания существенно упрощается в случае, если входящий в систему поток требований является простейшим (стационарным пуассоновским), т.е. удовлетворяет условиям стационарности, ординарности и отсутствия последействия. Это позволяет использовать простые аналитические модели теории массового обслуживания.

Входящим потоком требований в рассматриваемом случае является поток пассажиров одного вылетающего рейса, прибывающих в аэровокзал со стороны города для прохождения предполётных формальностей. Для описания входящего потока введён параметр τ, представляющий собой интервал времени до момента вылета рассматриваемого рейса, связанный с натуральным временем t соотношением

$$\tau = t_B - t,$$

где t_B – время вылета рассматриваемого рейса. Ниже в ряде случаев для удобства наряду с натуральным временем t используется параметр τ.

Результаты исследований, проведённых в аэропорту Курумоч осенью 2005 года, свидетельствуют о том, что время прибытия пассажиров в аэровокзал является случайной величиной, распределенной по гамма-закону. Плотность распределения вероятностей прибытия пассажиров за время t до вылета определяется по формуле

$$f(\tau) = \begin{cases} 0, & \tau \le 45 мин, \\ \dfrac{\beta^{\alpha}(\tau - 45)^{\alpha-1} e^{-\beta(\tau-45)}}{\Gamma(\alpha)}, & \tau > 45 мин, \end{cases} \quad (1)$$

где α, β - параметры распределения, $\alpha = 1{,}5;\quad \beta = 0{,}028$ [1]. График зависимости $f(\tau)$ приведен на рис. 1.

Предполагается, что данному распределению подчиняется время прибытия пассажиров всех внутрироссийских рейсов, вылетающих из аэропорта Курумоч. Как следует из графика, вероятности прибытия пассажиров в различные моменты времени различны, поэтому входящий поток не является стационарным.

Свойство ординарности предполагает, что требования прибывают для обслуживания поодиночке. В общем случае поток вылетающих пассажиров не обладает этим свойством, так как часть пассажиров прибывает к месту обслуживания в составе группы или семьи. Однако, как правило, непосредственное обслуживание у стойки регистрации проходит только один из членов группы – её глава, что позволяет рассматривать группу пассажиров в качестве одного требования. Факт прибытия пассажиров группами учитывает коэффициент $k_{гр}$, представляющий со-

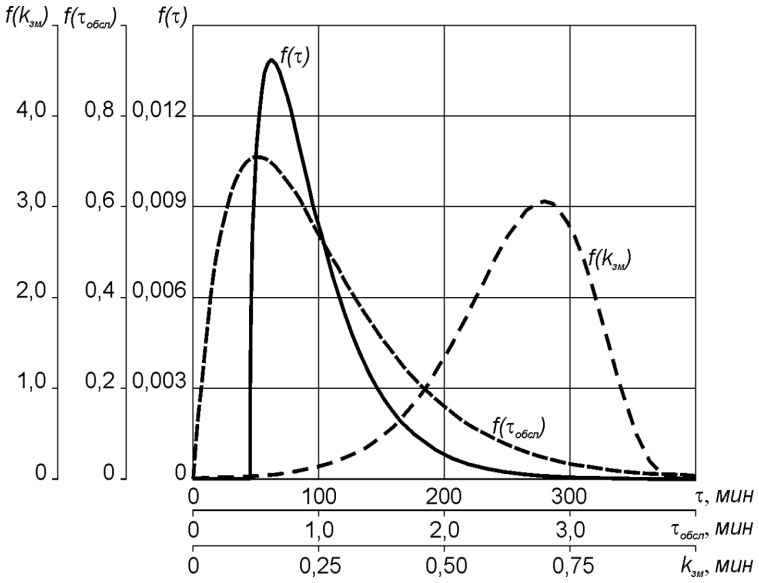


Рис. 1. Плотности распределения случайных величин

бой долю пассажиров, проходящих непосредственное обслуживание у стоек регистрации. По данным наблюдений для аэропорта Курумоч $k_{гр}$=78,6 %. Таким образом, рассматриваемый поток, в котором группа совместно следующих пассажиров принимается за одно требование, может считаться ординарным.

Поток требований называется потоком без последействия, если для любых неперекрывающихся интервалов времени число требований, попадающее на один из участков, не зависит от числа требований, попадающих на другие участки. Для пассажиров одного рейса входящий поток является потоком с последействием, т.к. для любого момента времени возможная численность прибывших для регистрации пассажиров зависит от числа пассажиров, уже прошедших её.

Как следует из приведённых рассуждений, поток пассажиров одного рейса, прибывающих для регистрации в аэровокзал, не является простейшим.

Для полного определения системы массового обслуживания наряду с моделью входящего потока требований необходимо задать дисциплину и механизм обслуживания. В данном случае принимается дисциплина, предусматривающая прямой порядок обслуживания, т.е. обслуживание требований в порядке их поступления. Предполагается, что все требования имеют одинаковый приоритет, что вполне соответствует реальной ситуации в аэропорту Курумоч, где VIP-пассажиры обслуживаются в отдельном терминале и число их незначительно. Предполагается также, что для регистрации пассажиров одного рейса могут выделяться как одна, так и несколько стоек регистрации. В последнем случае система обслуживания относится к многоканальному типу. В соответствии с принятой в аэропорту технологией для обслуживания пассажиров рейса, выполняемого самолетом Ту-134, могут выделяться две стойки регистрации, для Ту-154 – три стойки. В рамках рассматриваемой здесь модели системы массового обслуживания каждая стойка получает собственный порядковый номер. Предполагается, что стойки обслуживают пассажиров с одинаковой интенсивностью.

Допустимо наличие очереди, причём до начала регистрации пассажиры рейса образуют общую очередь в зоне ожидания регистрации, которая затем, после объявления регистрации, распадается в операционной зоне на несколько меньших очередей, каждая перед «своей» стойкой. При этом входящее в операционную зону требование выбирает стойку с наименьшей очередью. В случае наличия нескольких стоек с равной длиной очереди либо нескольких свободных стоек вновь прибывший пассажир выбирает стойку с наи-

меньшим порядковым номером. Данная схема представляется вполне логичной, она соответствует ситуации, при которой пассажиры выбирают места обслуживания, расположенные по мере удаления от входа в зону регистрации.

Исследование процессов обслуживания пассажиров в аэропорту Курумоч выявило наличие небольшого числа опоздавших, т.е. прибывших на регистрацию после её окончания. Для них предусмотрена платная регистрация. Ниже под опоздавшими понимаются, во-первых, пассажиры, прибывшие в аэровокзал после окончания регистрации, во-вторых, ожидающие в очереди пассажиры, обслуживание которых началось после окончания регистрации. Если момент окончания регистрации наступает в течение обслуживания очередного пассажира, регистрация продолжается до окончания обслуживания этого требования (требование «дообслуживается»).

Обработка результатов проведённых в аэропорту Курумоч наблюдений показала, что длительности обслуживания каждого требования $t_{обсл}$ являются независимыми случайными величинами, подчинёнными распределению Эрланга, для которого плотность распределения определяется по формуле (рис. 1):

$$f\left(t_{обсл}\right)=\begin{cases}\xi\dfrac{\left(\xi t_{обсл}\right)^{l-1}}{(l-1)!}e^{-\xi t_{обсл}}, & t_{обсл}>0,\\ 0, & t_{обсл}\le 0,\end{cases} \tag{2}$$

где l, ξ - параметры распределения, причём параметр ξ должен быть неотрицательным числом ($\xi>0$), а l – целым положительным числом ($l=1,2,\ldots$). В рассматриваемом случае $l=2$; $\xi=1{,}93$ [1].

Наряду с временем прибытия в аэровокзал и продолжительностью обслуживания пассажира случайными величинами являются коэффициенты занятости мест $k_{зм}$ для рассматриваемого рейса. Анализ результатов выполнения значительного числа (около 120) рейсов различных авиакомпаний из аэропорта Курумоч в течение летнего периода 2005 года позволил установить, что распределение близко к гамма-закону (рис. 1):

$$f\left(k_{зм}\right)=\begin{cases}0, & k_{зм}\le 0,\\ \dfrac{\beta^{\alpha}\left(1-k_{зм}\right)^{\alpha-1}e^{-\beta\left(1-k_{зм}\right)}}{\Gamma(\alpha)}, & 0<k_{зм}\le 1,\end{cases} \tag{3}$$

где $\alpha=6{,}5$; $\beta=18{,}2$ [1].

Моменты начала и окончания регистрации пассажиров рейса и, следовательно, её продолжительность зависят от категории рейса (транзитный или первоначальный) и пассажировместимости самолёта, выполняющего рейс. Учитывая, что регистрация пассажиров транзитного рейса требует меньшего времени, чем первоначального, ниже рассматривается процесс регистрации пассажиров первоначальных рейсов.

Для повышения пропускной способности системы обслуживания пассажиров в аэровокзале желательно, чтобы время, затраченное системой на регистрацию пассажиров вылетающего рейса, было минимальным. При этом должны соблюдаться требования к качеству и удобству обслуживания пассажиров, используемые в работе аэропортов. Необходимо, в частности, чтобы время ожидания пассажиром обслуживания в очереди перед стойкой регистрации было не слишком велико. Кроме того, число опоздавших на регистрацию пассажиров, вероятность появления которых всегда существует, должно быть достаточно малым.

Таким образом, задача оптимизации параметров системы обслуживания вылетающих пассажиров на этапе регистрации может быть сформулирована следующим образом. Необходимо определить значения числа стоек регистрации S, моментов времени начала t_H и окончания регистрации t_K вылетающих пассажиров самолета пассажировместимостью N, обеспечивающих минимум суммарных затрат рабочего времени:

$$T_{\Sigma}=S\left(t_K-t_H\right)\longrightarrow\min .$$

Принимаются следующие ограничения:

1) регистрация должна заканчиваться не менее чем за 30 минут до вылета самолёта по

расписанию – $\tau_K \le 30 мин$, что связано с необходимостью выполнения технологического графика подготовки самолёта к вылету;

2) допустимое число опоздавших пассажиров – не более 1% от пассажировместимости самолёта;

3) расчётное время ожидания в очереди у стойки после объявления регистрации – 15 мин, что позволяет обеспечить достаточно высокое качество обслуживания пассажиров;

4) учитывая случайный характер потока пассажиров и процесса их обслуживания, невозможно исключить ситуации, при которых фактическое время ожидания пассажиром в очереди оказывается продолжительнее расчётного времени. Однако система обслуживания должна обеспечивать заданный достаточно низкий уровень вероятности возникновения таких ситуаций. В связи с этим вводится допустимая вероятность того, что расчётное время ожидания в очереди у стойки будет превышено фактическим временем ожидания, значение которой принимается равным 0,1.

Для решения поставленной оптимизационной задачи используется метод «сканирования по сетке», предусматривающий перебор с некоторым шагом значений S, t_H, t_K и определение для каждого набора исходных данных показателей эффективности системы обслуживания пассажиров. Для поиска этих показателей не могут быть использованы имеющиеся аналитические модели теории массового обслуживания по следующим причинам:

1) входящий поток требований не является простейшим, он носит ярко выраженный нестационарный характер и обладает последействием;

2) в течение некоторых интервалов времени пропускная способность системы может быть недостаточной, что приведёт к накоплению очереди;

3) в течение процесса моделирования количество аппаратов обслуживания будет меняться, что вызовет формирование переходного процесса, игнорируемого аналитическими моделями;

4) некоторые особенности механизма обслуживания не могут быть учтены в рамках аналитических моделей.

Следовательно, единственным методом решения поставленной задачи является статистическое моделирование (метод Монте-Карло), схема применения которого состоит в следующем [2]. Характеристику системы обслуживания, которую нужно вычислить (число или функцию), представляют в виде вероятностной характеристики случайного процесса. Далее строят его реализацию в зависимости от соответствующего набора независимых случайных величин. Эксперимент проводится M раз, где M – фиксированное заранее или выбираемое в процессе испытаний число. В каждой реализации используются новые случайные числа. По закону больших чисел в результате приближённо определяется величина искомой характеристики, причём точность оценки тем выше, чем больше число проведённых испытаний M.

В рассматриваемой модели системы обслуживания пассажиров случайными величинами, как было показано выше, являются:

- коэффициент занятости кресел рассматриваемого рейса ($k_{зм}$);

- время прибытия пассажира в аэровокзал ($t_{вх}$ или $\tau_{вх}$);

- длительность обслуживания одного требования у стойки регистрации ($t_{обсл}$).

Для их получения используется функция генерации псевдослучайных чисел программного обеспечения ПК. Она позволяет получить x – равномерно распределённое случайное число в пределах от 0 до 1. Это случайное число принимается в качестве значения интегральной функции распределения для искомой реализации случайной величины y, подчиняющейся определённому (не равномерному) закону распределения: $x = F(y)$. Знание функциональной зависимости $F(y)$ позволяет найти величину y, в качестве которой может выступать $k_{зм}$, $t_{вх}$ (либо $\tau_{вх}$), $t_{обсл}$.

Оценке подлежат следующие значения, необходимые для решения оптимизационной задачи:

- среднее число опоздавших пассажиров по окончании регистрации $n_{оп}$;

- максимальная доля пассажиров, время ожидания в очереди у стойки которых превышает расчётное время ожидания (15 мин) $P_{ожс}^{\max}$.

Моделирующий алгоритм в общих чертах выглядит следующим образом. Работа системы обслуживания моделируется на интервале времени $[0;t_B]$ продолжительностью 350 мин, в течение которого существует реальная вероятность поступления требований. Правая граница интервала соответствует моменту вылета рейса по расписанию ($t_B = 350 мин$). В течение интервала времени $[0;t_H]$ происходит накопление требований без их обслуживания; обслуживание требований системой из S аппаратов выполняется на интервале времени $[t_H;t_K]$; в течение интервала $[t_K;t_B]$ происходит «дообслуживание» и накопление опоздавших требований.

Предварительно в каждом испытании в соответствии с законом распределения (3) разыгрывается величина коэффициента занятости мест $k_{ЗМ\,i}$ и определяется соответствующее ей число пассажиров:

$$n_{пас\,i} = k_{ЗМ\,i} N,\ \ i = 1 \div M,$$

где i – номер реализации случайного процесса (испытания), N – пассажировместимость самолёта, выполняющего рассматриваемый рейс, $n_{пас\,i}$ - число пассажиров (входящих требований) в i-м испытании.

Для найденного $n_{пас\,i}$ многократно разыгрываются величины: $t_{вхij}$ - времени входа j-го требования в i-м испытании и $t_{обслij}$ - длительности обслуживания j-го требования при i-м испытании ($j = 1 \div n_{пас\,i}$). Используются законы распределения (1) и (2) соответственно. Первый из накопленных таким образом массивов упорядочивается по возрастанию с целью получения последовательности из следующих друг за другом моментов времени прибытия требований. (Далее под $t_{вхij}$ понимаются элементы упорядоченного по возрастанию массива).

Для первого требования (j = 1) реализуется следующий алгоритм. Если требование входит до объявления начала регистрации ($t_{вхi1} < t_H$), его обслуживание начинается с началом регистрации после некоторого ожидания ($t_{HOi1} = t_H$). В случае, если первое требование поступает уже после начала регистрации ($t_H \le t_{вхi1} < t_K$), его обслуживание начинается немедленно ($t_{HOi1} = t_{вхi1}$).

Для всех последующих требований ($1 < j \le n_{пасi}$) алгоритм несколько иной. Если к моменту поступления очередного (j-го) требования обслуживание всех предыдущих требований уже завершилось ($t_{вхij} \ge t_{OOij-1}$), то это требование начинает обслуживаться в момент поступления ($t_{HOij} = t_{вхij}$). В противном случае поступившее требование вынуждено ожидать окончания обслуживания всех предыдущих требований, в том числе поступившего непосредственно перед ним ($t_{HOij} = t_{OOij-1}$).

Если поступившее требование встаёт в очередь ($t_{HOij} \ne t_{вхij}$), то число требований, находящихся в очереди ($n_{ожi}$), увеличивается на единицу. В ситуации, когда обслуживанием занимаются несколько стоек, размер очереди определяется отдельно для каждой из них. При этом новое требование выбирает стойку с наименьшей очередью, если размеры очереди одинаковы, то выбирается стойка с наименьшим порядковым номером.

Время окончания обслуживания (t_{OOij}) определяется по формуле

$$t_{OOij} = t_{HOij} + t_{обслij}.$$

Как было отмечено выше, имеет смысл характеризовать продолжительность ожидания пассажира двумя величинами:

1) временем ожидания обслуживания в аэровокзале от момента прибытия до момента начала обслуживания $t^*_{ожij} = t_{HOij} - t_{вхij}$;

2) длительностью ожидания в очереди непосредственно перед стойкой регистрации:

$$t_{ожij} = \begin{cases} t_{HOij} - t_H, & t_{HOij} \neq t_{вхij}, \\ 0, & t_{HOij} = t_{вхij}. \end{cases}$$

Обработка накопленных массивов $t_{вхi}, t_{HOi}, t_{OOi}$, выполняемая после каждого (i-го) испытания, позволяет получить зависимость от времени числа пассажиров, находящихся в системе $n_{ожi}(t)$, а также число опоздавших пассажиров $n_{оп i}$ на момент вылета.

По завершении всех M испытаний определяются средние значения следующих величин:

1) среднее число опоздавших пассажиров:

$$n_{оп} = \frac{\sum_{i=1}^{M} n_{оп i}}{M};$$

2) среднее число пассажиров, ожидающих обслуживания и обслуживаемых:

$$n_{ож}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{M} n_{ожi}(t)}{M};$$

3) наибольшее среднее число пассажиров, ожидающих обслуживания и обслуживаемых:

$$n_{ож}^{\max} = \max_t [n_{ож}(t)].$$

Существование этой величины обусловлено неравномерностью потока прибывающих пассажиров по времени;

4) среднее время ожидания в очереди перед стойкой регистрации:

$$t_{ож}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{M} t_{ожi}(t)}{M},$$

где $t_{ожi}(t)$ - время ожидания в очереди перед стойкой регистрации, соответствующее i-му эксперименту.

Эта величина может быть интерпретирована как вероятная длительность ожидания у стойки требования, вошедшего в систему в момент времени t. Так как в ходе реализации вычислительного эксперимента вероятность появления требования строго в момент времени t ничтожно мала, то зафиксировать величину $t_{ожi}(t)$, наблюдая за единственным требованием, невозможно. Поэтому для её определения используется усреднение на некотором интервале времени Δt:

$$t_{ожi}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n^*} t_{ожij}}{n^*},$$

где n^* - число требований, время входа в систему которых попадает в диапазон, заданный условием

$$t - \frac{\Delta t}{2} < t_{вхij} \leq t + \frac{\Delta t}{2}; \qquad (4)$$

$t_{ожij}$ - длительность ожидания у стойки каждого из требований, для которых выполняется условие (4);

5) наибольшее среднее время ожидания в очереди перед стойкой регистрации:

$$t_{ож}^{\max} = \max_t [t_{ож}(t)].$$

Наряду со средними значениями определяются следующие величины, зависящие от времени, представляющие собой средние доли от общего числа требований:

1. Доля требований, для которых продолжительность ожидания в очереди перед стойкой попадает в заданный интервал $t_1 \leq t_{ожij} < t_2$:

$$P_{t_1 - t_2}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{M} n^*_{t_1 - t_2 i}(t)}{\sum_{i=1}^{M} n_i^*(t)},$$

где $n^*_{t_1 - t_2 i}(t)$ - число пассажиров в i-м испытании, для которых продолжительность ожи-

дания в очереди у стойки составляет величину $t_1 \le t_{ожij} < t_2$, $n^*_i(t)$ - общее число пассажиров в *i*-м испытании.

В числе $n^*_{t_1-t_2 i}(t)$ и $n^*_{t_1-t_2 i}(t)$ оказываются только те пассажиры, для которых выполняется условие (4).

2. Доля пассажиров, время ожидания для которых превышает расчётное время ожидания у стойки, равное, как было указано выше, пятнадцати минутам:

$$P_{t>15}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{M} n^*_{t>15i}(t)}{\sum_{i=1}^{M} n^*_i(t)},$$

где $n^*_{t>15i}(t)$ - число пассажиров в *i*-м испытании, для которых выполняется условие $t_{ожij} > 15мин$, а также условие (4).

Используемая в решении оптимизационной задачи максимальная доля пассажиров, время ожидания в очереди у стойки которых превышает расчётное время ожидания, $P^{\max}_{ож}$ находится как

$$P^{\max}_{ож} = \max_t [P_{t>15}(t)].$$

3. Доля опоздавших пассажиров, к которым отнесены пассажиры, не прибывшие вовремя или не прошедшие регистрацию вследствие ожидания в очереди:

$$P_{ОП}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{M} n^*_{ОП_i}(t)}{\sum_{i=1}^{M} n^*_i(t)},$$

где $n^*_{ОП\,i}(t)$ - число опоздавших пассажиров *i*-го испытания, для которых выполняется условие (4).

При достаточно большом *M* перечисленные средние доли могут быть приняты в качестве оценок вероятностей времени обслуживания, превышения заданного времени ожидания и опоздания.

Представляет интерес оценка степени загрузки работой стоек. Каждая из *S* стоек занята обслуживанием пассажиров одного рейса в течение некоторого интервала времени $T_{раб_s}$, длительность которого в общем случае превышает объявленную продолжительность регистрации:

$$T_{раб_s} \ge (t_K - t_H), \quad s = 1 \div S.$$

Дело в том, что в соответствии с принятой в рассматриваемой модели схемой происходит «дообслуживание» требований. Это означает, что в случае наличия у стойки обслуживаемого требования в момент объявления окончания регистрации, его обслуживание не прерывается, а доводится до конца. Следующие за ним требования к обслуживанию не принимаются и считаются опоздавшими. Таким образом, продолжительность регистрации каждой стойкой $T_{раб_s}$ представляет собой случайную величину.

С другой стороны, стойка занята обслуживанием пассажиров не непрерывно в течение $T_{раб_s}$. В моменты отсутствия пассажиров стойка бездействует. Вводится показатель $T_{обсл\,s}$ - время, в течение которого стойка занята работой по непосредственному обслуживанию пассажиров. $T_{обсл\,s}$ – случайная величина, связанная с $T_{раб_s}$ соотношением $T_{обсл\,s} \le T_{рабs}$.

В результате *M* испытаний определяются наборы величин $T_{обсл\,s\,i}$, $T_{раб_{si}}$ для $s = 1 \div S, \quad i = 1 \div M$, знание которых позволяет определить средние значения характеристик занятости стоек:

1) средняя продолжительность регистрации стойкой:

$$T^{ср}_{раб\,S} = \frac{\sum_{i=1}^{M} T_{раб\,Si}}{M};$$

2) среднее время, в течение которого стойка занята работой по непосредственному обслуживанию пассажиров:

$$T_{обслS}^{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{M} T_{обслSi}}{M};$$

3) средний коэффициент занятости s-ой стойки:

$$k_{3S} = \frac{T_{обслS}^{ср}}{T_{рабS}^{ср}};$$

4) средний коэффициент занятости системы:

$$k_{З} = \frac{\sum_{s=1}^{S} T_{обслs}^{ср}}{\sum_{s=1}^{S} T_{рабs}^{ср}}.$$

Решению поставленной оптимизационной задачи должно предшествовать определение числа испытаний M, обеспечивающего необходимую точность результатов моделирования. Использован метод, предполагающий проведение ряда экспериментов с различным количеством M. Постоянными для каждого эксперимента принимались следующие величины:

- пассажировместимость самолёта N=76 пас;
- используемое количество стоек S=1;
- время от начала регистрации до вылета $\tau_{Н} = 110\ мин$;
- время от окончания регистрации до вылета $\tau_{К} = 50\ мин$.

Проводились эксперименты с числом испытаний от 50 до 150000. Оценка точности осуществлялась для следующих параметров:

- наибольшее среднее число пассажиров, ожидающих обслуживания и обслуживаемых, $n_{ож}^{\max}$;
- среднее число опоздавших пассажиров $n_{оп}$;
- максимальная доля пассажиров, время ожидания которых превышает 15 минут, $P_{ож}^{\max}$;
- среднее время занятости стойки непосредственным обслуживанием

$$T_{обсл\,1}^{сред} = \frac{\sum_{i=1}^{M} T_{обсл1i}}{M}.$$

Для каждого из параметров определялась погрешность относительно эксперимента с наибольшим числом испытаний:

$$\Delta_{X} = \left| \frac{X_{M} - X_{M\max}}{X_{M\max}} \right| \cdot 100\%,$$

где X_{M} – величина оцениваемого параметра, полученная в эксперименте с M испытаниями; $X_{M\max}$ - величина оцениваемого параметра в эксперименте с наибольшим количеством испытаний: $X_{M\max} = 150000$.

Результаты моделирования процесса регистрации пассажиров с различным числом испытаний приведены в таблице 1.

На основании анализа результатов можно сделать вывод о том, что проведение 5000 испытаний позволяет обеспечить погрешность определения всех перечисленных выше средних значений, не превышающую 3%.

Наряду со средними значениями производилась оценка погрешности определения вероятностных характеристик распределения такой случайной величины, как время занятости стойки непосредственным обслуживанием пассажиров $T_{обсл1}$. Результаты некоторых экспериментов в виде полигонов относительных частот для $T_{обсл1}$, построенных на интервалах, равных одной минуте, приведены на рис. 2 (здесь m – величина групповой частоты). Очевидно, довольно малое число испытаний, достаточное при нахождении средних значений, не может обеспечить удовлетворительную точность в определении вероятностных характеристик распределения.

Таким образом, проведённый анализ позволил установить необходимое число испытаний для каждого эксперимента в количестве 50000. Эта величина позволяет обес-

Таблица 1. Результаты моделирования процесса регистрации пассажиров

M	$n_{ож}^{max}$, пас	$n_{оп}$, пас	$P_{ож}^{max}$	$T_{обсл1}$, мин	$\Delta n_{ож}^{max}$,%	$\Delta n_{оп}$,%	$\Delta P_{ож}^{max}$,%	$\Delta T_{обсл1}$,%
50	11.24	1.60	0.161	37.82	0.71	12.57	16.80	0.50
500	11.14	1.83	0.176	36.97	1.59	0.00	9.17	2.73
5000	11.31	1.82	0.195	37.92	0.09	0.55	0.79	0.22
10000	11.37	1.81	0.191	37.98	0.44	1.09	1.64	0.08
20000	11.36	1.83	0.194	38.02	0.35	0.00	0.05	0.03
30000	11.33	1.84	0.196	37.97	0.09	0.55	1.00	0.10
40000	11.31	1.81	0.199	37.93	0.09	1.09	2.70	0.19
50000	11.31	1.83	0.192	37.96	0.09	0.00	0.91	0.14
100000	11.31	1.83	0.192	37.95	0.09	0.00	0.96	0.14
150000	11.32	1.83	0.194	38.01				

печить ошибку по каждому из оцениваемых параметров в достаточных для решения оптимизационной задачи пределах.

Оптимизационная задача решалась для двух величин пассажировместимости N: 76 и 180 пассажиров, отвечающих возможным вариантам компоновки салонов самолётов Ту-134 и Ту-154 соответственно. Для первого варианта пассажировместимости рассматривались возможности использования одной и двух стоек регистрации; для второго варианта – от одной до четырёх стоек. Оказалось, что использование одной стойки для регистрации пассажиров большего самолёта не позволяет обеспечить выполнение ограничений по числу опоздавших пассажиров ни при каком сочетании времени начала и окончания регистрации. Основные результаты оптимизации приведены в таблице 2.

Как следует из результатов, для обеих пассажировместимостей оптимальным является использование двух стоек. В этом случае величина суммарных затрат времени на регистрацию T_{Σ} минимальна. С увеличением числа стоек сокращается продолжительность регистрации $(\tau_H - \tau_K)$, однако возрастает длина очереди и длительность ожидания пассажира в аэровокзале. Средний коэффициент занятости стоек непосредственным обслуживанием по времени колеблется в пределах 55-62 %. Увеличение числа стоек при-

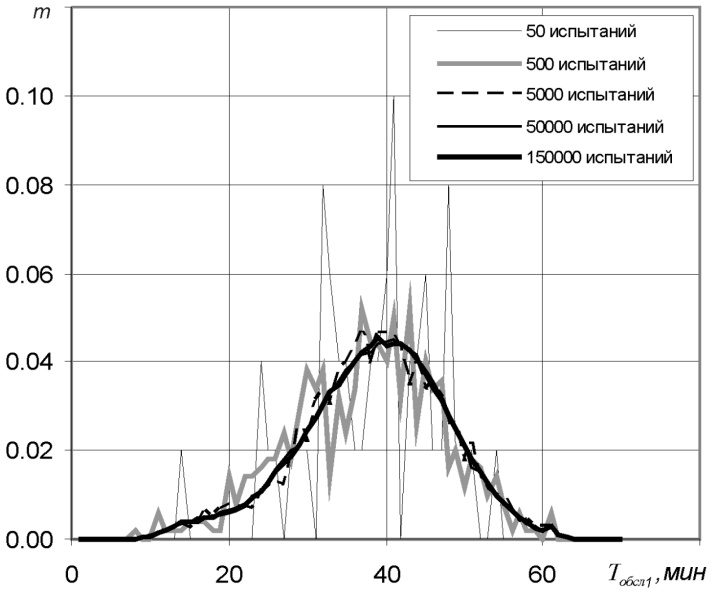


Рис. 2. Полигон относительных частот для $T_{обсл1}$

Таблица 2. Результаты оптимизации параметров системы обслуживания пассажиров

Число стоек, S	$\tau_н$, *мин*	$\tau_к$, *мин*	$\tau_н - \tau_к$, *мин*	T_Σ, *мин*	$n_{ож}^{max}$, *пас*	Номер стойки, s	$T_{обсл\,S}^{ср}$, *мин*	$T_{раб\,S}^{ср}$, *мин*	$k_{з\,S}$	$k_з^{ср}$
76 пассажиров, 1 – 2 стойки										
1	116,6	46,5	70,1	70,1	9,55	1	39,25	70,69	0,55	0,55
2	82,0	47,2	34,8	69,6	21,06	1	21,90	35,09	0,62	0,56
						2	17,34	34,99	0,49	
180 пассажиров, 2 – 4 стойки										
2	121,0	47,0	74,0	148,0	20,45	1	52,11	75,20	0,69	0,62
						2	40,20	74,67	0,54	
3	102,4	47,3	55,1	165,3	31,46	1	38,35	55,76	0,69	0,55
						2	30,46	55,72	0,55	
						3	23,59	55,60	0,42	
4	88,7	47,4	41,3	165,2	42,78	1	29,79	41,91	0,71	0,55
						2	24,75	41,84	0,59	
						3	20,40	41,71	0,49	
						4	17,41	41,67	0,42	

водит к большей неравномерности в их загрузке, причём стойки с наименьшими порядковыми номерами загружены работой в наибольшей степени. Это объясняется характером поведения пассажиров, обращающихся для обслуживания к ближайшим свободным стойкам. Отметим, что для меньшего самолёта использование одной стойки позволяет вдвое сократить длину очереди при незначительном увеличении суммарных затрат времени на регистрацию.

Процесс накопления и обслуживания пассажиров проиллюстрирован рис. 3. Здесь приведены графики числа обслуживаемых и ожидающих обслуживания пассажиров самолёта большой пассажировместимости (*N=180*) в зависимости от времени для оптимального сочетания τ_H и τ_K.

Графические зависимости показателей качества обслуживания пассажиров от параметров оптимизации (времени начала и окончания регистрации) для *N=180* и *S=2* приведены на рис. 4 и 5. Штриховыми линиями отображены величины ограничений по числу опоздавших пассажиров (1 %) и вероятности превышения расчетного времени ожидания у стойки (0,1). В наибольшей степени влияние времени окончания регистрации сказывается на числе опоздавших пассажиров и в наименьшей - на очереди. Лишь в тех случаях, когда регистрация заканчивается очень рано, наличие большого числа необслуженных (опоздавших) пассажиров влияет на характеристики очереди.

На рис. 6 приведены графики полигонов относительных частот (m_T) времени обслуживания $T_{обсл\,S}$ для каждой из стоек в случае использования двух, трёх и четырёх стоек. Значительный разброс значений, возрастающий с уменьшением числа стоек, объясняется, в первую очередь, большим разбросом коэффициентов занятости кресел.

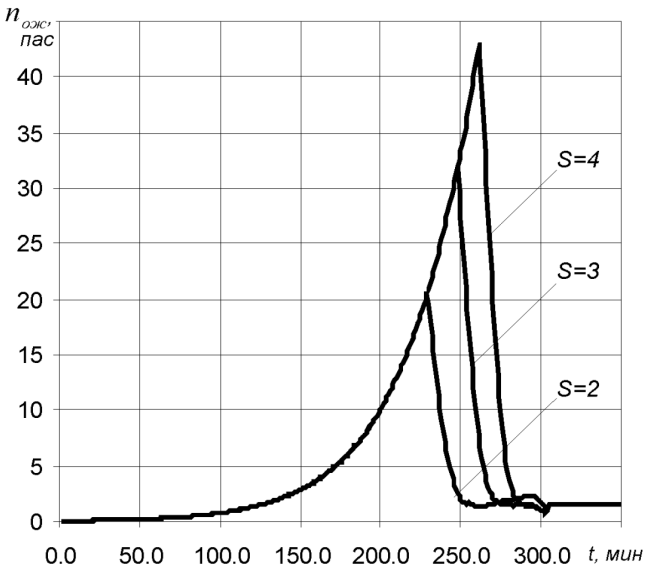


Рис. 3. Число ожидающих пассажиров

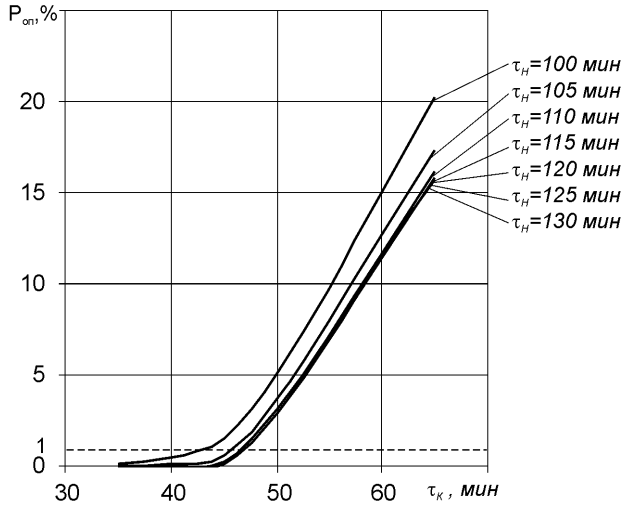


Рис. 4. Доля опоздавших пассажиров

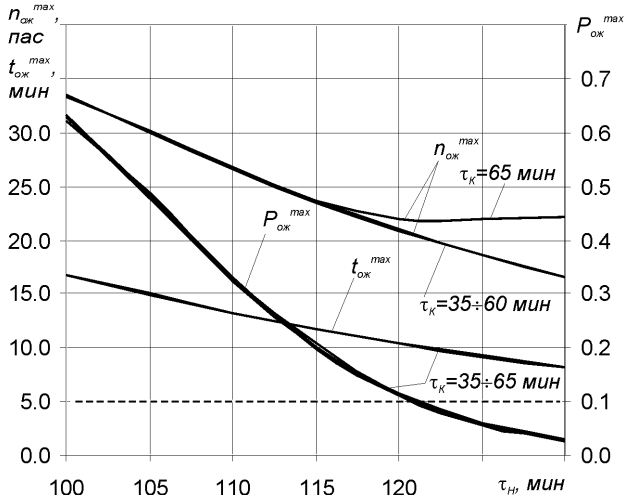


Рис. 5. Характеристики очереди

Графики, характеризующие разброс значений времени работы $T_{раб\,S}$ для S=2 и 4, приведены на рис. 7. Для большей выразительности по оси абсцисс отложены величины отклонений времени работы от объявленной продолжительности регистрации: $T_{раб\,S} - (\tau_H - \tau_K)$. С увеличением порядкового номера стойки наряду со снижением загрузки уменьшается разброс времени работы.

Рассмотренная оптимизационная задача решалась с применением ПЭВМ, оснащённой процессором Pentium IV с тактовой частотой 2-2,5 ГГц. Затраты машинного времени на один эксперимент, предполагающий проведение 50000 испытаний, составили около 10 мин.

Применение метода статистического моделирования позволило не только решить поставленную задачу оптимизации, но и получить весьма полную и детальную картину процесса обслуживания.

Следует отметить, что рассмотренная процедура регистрации является, бесспорно, важной, но лишь одной из ряда фаз обслуживания пассажиров. Дальнейшие исследования при некоторой модификации описанной выше методики и имеющегося программного обеспечения позволят решить задачу оптимизации параметров многофазовой системы обслуживания пассажиров в аэровокзале с учётом всех её особенностей.

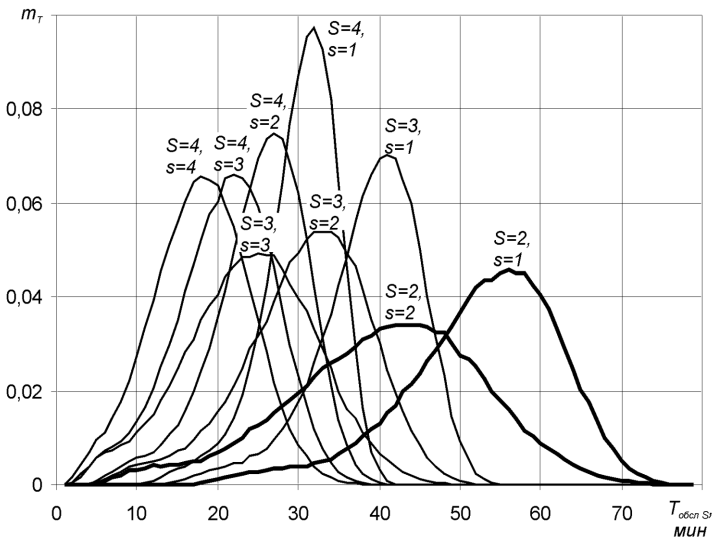


Рис. 6. Распределение времени обслуживания

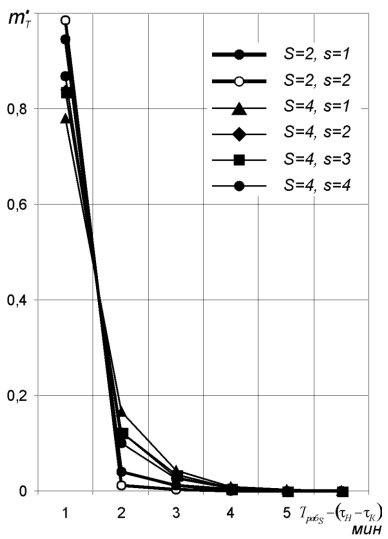


Рис. 7. Распределение времени работы

Библиографический список

1. Романенко В. А. Исследование процессов обслуживания пассажиров в международном аэропорту Курумоч //Вестник СГАУ № 3 (11). – Самара, 2006. - С. 35-43.

2. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. - М.: Наука, 1987.

References

1. Romanenko, V. A. Analysis of passenger service processes at the international Kurumotch airport // SSAU Vestnik No. 3(11) - Samara, 2006. - pp. 35-43.

2. Gnedenko, B. V., Kovalenko I. N. Introduction to the mass service theory. - Moscow: Nauka, 1987.

STATISTICAL MODELING OF THE PROCESS OF SERVING THE LEAVING PASSENGERS AT THE INTERNATIONAL KURUMOTCH AIRPORT

2009 V. A. Romanenko

Samara State Aerospace University

The task of optimizing the parameters of the system of serving leaving passengers at the check-in stage in the airport building has been solved by using the method of statistical modeling. Time characteristics of the check-in stage and the capacity of the check-in system which minimize time losses and provide the proper level of comfort for passengers have been determined. Detailed stochastic portraits of passenger service system functioning for the actual conditions of operation of the International Kurumotch airport (Samara) have been obtained.

Statistical modeling, optimization, mass service system, airport, air terminal, passenger check-in.

Информация об авторе

Романенко Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры организации и управления перевозками на транспорте, Самарский государственный аэрокосмический университет; e-mail: vla_rom@mail.ru. Область научных интересов: оптимизация и моделирование системы обслуживания перевозок узлового аэропорта.

Romanenko, Vladimir Alexandrovitch, Candidate of Technical Sciences, associate professor, associate professor of the department of transportation organization and management, Samara State Aerospace University, e-mail: vla_rom@mail.ru. Area of research: optimization and modeling of airport transportation servicing system.