



САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ
Высшая школа приватизации
и предпринимательства

В.А. Романенко



**Математические модели
функционирования аэропортов
в условиях современного
авиатранспортного рынка**

МОНОГРАФИЯ

НЕГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
САМАРСКИЙ ИНСТИТУТ – ВЫСШАЯ ШКОЛА ПРИВАТИЗАЦИИ
И ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА

В. А. Романенко

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭРОПОРТОВ
В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО
АВИАТРАНСПОРТНОГО РЫНКА**

Монография

Самара 2010

УДК 656.7:338; 656.7:658

ББК 65.37

Р 69

Рецензенты:

зав. кафедрой организации и управления перевозками на транспорте Самарского государственного аэрокосмического университета, доктор технических наук, профессор Б. А. Титов;

зав. кафедрой математических методов в экономике Самарского государственного аэрокосмического университета, доктор экономических наук, профессор М. И. Гераскин;

генеральный директор ОАО «Международный аэропорт Курумоч», кандидат экономических наук Л. С. Шварц.

Романенко, В. А.

Р 69 Математические модели функционирования аэропортов в условиях современного авиатранспортного рынка : монография / В. А. Романенко. – Самара : ООО «Издательство Ас Гард», 2010. – 244 с. ISBN 978-5-917-15-056-7

В книге описываются математические модели и методы имитационного моделирования процессов функционирования аэропортов в конкурентной среде современного авиатранспортного рынка. На обширном фактическом материале обобщен современный международный и российский опыт использования прогрессивных методов организации аэропортового производства. Особое внимание уделено узловым аэропортам, т.е. аэропортам со значительной долей трансферных перевозок и скоординированным расписанием. Проанализированы основные свойства потоков самолетов и пассажиров узловых аэропортов. Рассмотрены вероятностные модели процессов наземного обслуживания перевозок в аэропорту. С использованием полученных моделей предложена методика решения задач синтеза производственных комплексов узловых аэропортов с оптимальными характеристиками на базе имитационного компьютерного моделирования.

Книга адресована специалистам в областях имитационного моделирования сложных систем, организации авиатранспортного производства, аэропортового бизнеса и технологий, а также всем интересующимся данными вопросами. Рекомендуется в качестве учебного пособия студентам высших учебных заведений, обучающимся по соответствующим специальностям.

© Романенко В. А., 2010

© Самарский институт – Высшая школа
приватизации и предпринимательства, 2010

ISBN 978-5-917-15-056-7

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. УЗЛОВЫЕ АЭРОПОРТЫ – ПРОДУКТ АВИАТРАНСПОРТНОГО РЫНКА.....	11
1.1. Сеть аэропортов РФ – компонент национальной и глобальной авиатранспортных систем.....	11
1.2. Классификация и показатели эффективности узловых аэропортов.....	37
1.3. Мировой опыт формирования системы перевозок с использованием узловых аэропортов.....	50
1.4. Российский опыт формирования системы перевозок с использованием узловых аэропортов.....	77
2. МОДЕЛИ ПОТОКОВ ТРЕБОВАНИЙ, ОБСЛУЖИВАЕМЫХ УЗЛОВЫМ АЭРОПОРТОМ.....	92
2.1. Волновой принцип организации расписания узлового аэропорта.....	92
2.2. Модели оценки привлекательности трансферных авиасвязей и согласованности расписания узлового аэропорта.....	102
2.3. Статистический анализ потока самолетов узлового аэропорта.....	113
2.4. Вероятностная модель потока самолетов узлового аэропорта.....	128
2.5. Модель потока пассажиров аэропорта.....	137

3. МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НАЗЕМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК В АЭРОПОРТУ.....	146
3.1. Процессы наземного обслуживания перевозок в аэропорту.....	146
3.2. Количественные показатели уровня качества наземного обслуживания перевозок в аэропорту.....	161
3.3. Вероятностные модели технологических операций наземного обслуживания перевозок в аэропорту.....	164
4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВЫХ АЭРОПОРТОВ.....	181
4.1. Верификация статистических моделей, полученных на основе данных ИС аэропорта...	181
4.2. Оптимизация параметров технологических операций методом имитационного моделирования.....	191
4.3. Оптимизация численности средств обслуживания перевозок узлового аэропорта методами теории массового обслуживания.....	209
4.4. Оптимизация численности средств обслуживания перевозок узлового аэропорта методом имитационного моделирования.....	220
4.5. Комплексная оптимизация численности средств обслуживания перевозок узлового аэропорта.....	226
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	236

ВВЕДЕНИЕ

Формирование эффективной национальной аэропортовой сети, служащей основой для стабильного роста авиаперевозок, особенно важно для России, где воздушный транспорт выполняет важные социально-политические и экономические функции, обусловленные географическими особенностями и масштабами страны, обеспечивает необходимую транспортную доступность и связность регионов государства, являясь во многих районах Европейского Севера, Сибири и Дальнего Востока единственным видом транспорта, связывающим эти территории с другими частями РФ.

Экономическую роль воздушного транспорта иллюстрируют следующие факты. Реализация продукции более 25% российских компаний зависит от воздушного транспорта [1]. В настоящее время 1 р. дохода гражданской авиации генерирует дополнительный оборот более 3 р. в смежных отраслях, таких как авиастроение, авиатопливообеспечение, туризм, сфера обслуживания и т.д. В 2007 г. финансовый оборот предприятий гражданской авиации РФ составил около 450 млрд р., при этом налоговые поступления превысили 45 млрд р. в год.

Российские предприятия авиатранспортной отрасли – авиакомпании и аэропорты, действующие в рыночной среде, поставлены перед необходимостью освоения новых бизнес-моделей, обеспечивающих эффективное функционирование как в периоды устойчивого роста перевозок, так и в кризисных условиях. Одной из таких моделей, широко практикуемой зарубежными авиапредприятиями, является совместная деятельность авиакомпании и аэропорта по осуществлению перевозок в соответствии с системой «hub-and-spoke» (перевод с англ. – «ось-спицы» или «втулка-спицы»).

В документации Международной организации гражданской авиации (ИКАО) сказано, что «hub-and-spoke system», или «hubbing» – это «система узлового и вспомогательных аэропортов, т.е. эксплуатационная система, в которой рейсы из различных , прибывают в общий пункт, а затем убывают из него в рамках короткого периода времени; таким образом перевозки, осуществляемые из любого конкретного пункта, могут быть стыкованы с рейсами, отправляющимися в различные другие пункты» [2].

Общим пунктом, «втулкой» системы «втулка-спицы» является узловой аэропорт – хаб (от англ. hub). «Спицами» (англ. spokes) служат авиалинии, связывающие хаб с периферийными по отношению к нему аэропортами, называемыми также вспомогательными или вторичными. Основой системы функционирования системы «втулка-спицы» является т.н. веерное расписание, предполагающее организацию массовых стыковок большого количества рейсов в ограниченный промежуток времени, с тем чтобы обеспечить пассажирам возможность незамедлительной пересадки на другие направления. Рейс, включенный в систему веерного расписания, называется стыковочным.

Узловой аэропорт – это, как правило, крупный аэропорт, который имеет высокий процент стыковочных рейсов. При этом авиаперевозчики, эксплуатирующие узловой аэропорт, координируют расписание рейсов с целью достижения наиболее удобных стыковок для трансфера пассажиров, груза и почты. Под трансфером понимается пересадка пассажиров, перегрузка багажа или груза на стыковочный рейс той же или другой авиакомпании, при условии, что продолжительность пребывания пассажира или груза в аэропорту трансфера или в населенном пункте, где расположен аэропорт, не превышает установленного срока (для пассажира, как правило, не более 24 ч).

Для эффективной работы и развития узлового аэропорта очень желательным является базирование в нем крупного авиаперевозчика или альянса авиаперевозчиков, который и выстраивает вокруг него свою маршрутную сеть типа «втулка-спицы» (англ. hub-and-spoke network). Ее альтернативой является сеть «из пункта в пункт» (англ. point-to-point), предполагающая выполнение перевозок напрямую между парами пунктов, без использования

узловых аэропортов. Каждая из двух сетей имеет свои преимущества и недостатки, отражающиеся на всех участниках авиатранспортного процесса.

Система «втулка-спицы» позволяет авиакомпании, сконцентрировав транспортные потоки в едином центре, не расширяя имеющегося авиапарка, обеспечить связи между значительно большим числом пунктов по сравнению с системой «из пункта в пункт». Авиаперевозчик получает возможность более эффективно перераспределить воздушные суда (ВС) по линиям, использовать на региональных линиях экономичные ВС малых классов, повысить частоту выполнения и коммерческую загрузку рейсов. Узловому аэропорту обеспечивается повышение уровней потоков ВС, а также пассажиро- и грузопотоков. Все это служит источником роста коммерческих результатов работы как авиакомпании, так и аэропорта. Пассажирам становятся доступными не только аэропорты, окружающие хаб, но и значительно более отдаленные пункты, с которыми хаб связан дальними авиалиниями. Практически благодаря глобальной системе узловых аэропортов пассажир получает возможность перевозки между любыми двумя средними или даже малыми аэропортами на Земном Шаре, без необходимости длительного ожидания.

Основными недостатками системы «втулка-спицы» являются: для авиакомпании – необходимость разработки и тщательного соблюдения веерного расписания, предполагающего организацию стыковок; для пассажира, следующего из одного периферийного аэропорта в другой, – неизбежность более или менее утомительного ожидания пересадки в узловом аэропорту; для аэропорта – повышенные требования к пропускной способности его комплексов с целью обслуживания перевозок в течение коротких «пиковых» интервалов массовых пересадок пассажиров, перегрузки багажа и грузов. Как правило, в остальное время работы узлового аэропорта его пропускная способность является избыточной.

Стремление авиаперевозчиков повысить привлекательность трансферной перевозки для пассажиров, уменьшив время ожидания в аэропорту пересадки, вынуждает их планировать прилеты рейсов из периферийных аэропортов в хаб почти в одно и то же время. Узловой аэропорт должен обеспечить возможность почти

одновременного приема всех прилетающих самолетов, быстрого обслуживания, пересадки пассажиров и перегрузки грузов, а затем такого же почти одновременного вылета всех обслуженных самолетов. Таких циклов или «волн» прилетов-вылетов в узловом аэропорту в течение суток может быть несколько. Подобная «волновая» структура, являющаяся особенностью веерного расписания, приводит к ярко выраженной неравномерности потоков рейсов, пассажиров, багажа, грузов в узловом аэропорту. Все это требует внедрения в нем наиболее прогрессивных организационных схем и технологий обслуживания перевозок, использования высокопроизводительного аэродромного и терминального оборудования, техники и средств обслуживания, широкого использования информационных систем.

За последние годы рядом российских авиакомпаний и аэропортов были предприняты шаги по организации системы перевозок «втулка-спицы». Необходимость формирования сети узловых аэропортов в Российской Федерации признана на государственном уровне [3]. Однако в области теоретических разработок, связанных с анализом функционирования авиационных хабов как особого типа аэропортов и решением задач оптимизации их параметров и процессов, наблюдаются явные пробелы. Отсутствуют или недоступны обобщающие работы по данной тематике. В некоторой степени восполнить эти пробелы и призвана настоящая работа. Отметим, что в ней главное внимание уделяется пассажирским узловым аэропортам – как наиболее распространенному их типу.

В первой главе монографии дано развернутое описание узловых аэропортов как важного компонента мировой авиатранспортной отрасли. Приведены основные характеристики, классификация и отличительные черты узловых аэропортов, позволяющие считать их особым видом аэропортов. Рассмотрен российский пример работы аэропорта и авиакомпании по схеме «втулка-спицы», заслуживающий детального изучения.

Решению о выборе аэропортом узловой модели функционирования, приводящему к значительным капиталовложениям, должны предшествовать исследования возможных путей повышения пропускной способности его комплексов. Инструментом таких исследований является математическая модель производ-

ственного процесса аэропорта. В рамках этой модели аэропорт может рассматриваться как сложная стохастическая система массового обслуживания (СМО), в которую поступают потоки ВС, пассажиров, багажа, грузов, почты и др. Создание такой модели предполагает знание характеристик поступающих потоков.

Аналізу входящих в хаб потоков посвящена вторая глава монографии. В соответствии с блочным принципом моделирования в общей модели аэропорта выделен ряд моделей, описывающих различные поступающие на обслуживание потоки. Основной из таких потоков – поток рейсов, определяющий характеристики всех остальных потоков. На примерах зарубежного и отечественного узловых аэропортов показано, что на длительных интервалах времени поток прибывающих в хаб рейсов может считаться нестационарным пуассоновским. Сформирована вероятностная модель такого потока применительно к узловому аэропорту, основанная на использовании кусочно-линейной функции интенсивности. С использованием статистических данных, накопленных в ряде российских аэропортов, в том числе позиционирующих себя в качестве хабов, получена статистическая модель процесса прибытия пассажиров в аэропорт. Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой привлекательности трансферных авиасвязей для пассажиров, позволяющие решать вопросы оптимизации веерного расписания. Перечисленные модели являются составными частями общей модели производственного процесса узлового аэропорта.

В третьей главе сформирована модель технологического графика обслуживания ВС, пассажиров и багажа в аэропорту. С этой целью в производственном процессе аэропорта выделены важнейшие технологические операции, установлены их роль и место в технологическом графике, описаны связи между ними. Построены вероятностные модели технологических операций, входными параметрами для которых являются типы обслуживаемых ВС, категории перевозки и др., а выходными – важнейшие характеристики операций, такие как временная продолжительность, состав и численность персонала и оборудования, потребные для их выполнения и т.п. Исходным для формирования этих моделей стал обширный статистический материал, предоставленный рядом аэропортов, в первую очередь Международным аэропортом Курумоч (г. Самара).

Четвертая глава содержит описание решений ряда задач оптимизации параметров узлового аэропорта на базе полученных ранее моделей. Предварительно, с целью оценки их адекватности, было проведено сравнение статистических данных, полученных в ходе наблюдений в аэропорту, с результатами имитационного моделирования одной из технологических операций – регистрации пассажиров и багажа. Верификация позволила сделать вывод о правомерности использования моделей.

Далее с использованием детальных имитационных моделей были решены задачи поиска оптимальных параметров отдельных технологических операций, результаты которых применимы в практике работы как узловых, так и «обычных» аэропортов.

Рассмотрено решение задач оптимизации численности перронных и аэровокзальных средств обслуживания перевозок на базе математического аппарата теории массового обслуживания с учетом нестационарности входящего потока требований. Такая методика применима только в отношении отдельных технологических операций, либо подсистем аэропорта. Комплексная же оптимизация, предполагающая рассмотрение всех основных операций технологического графика, в силу сложности рассматриваемой системы и ее особенностей, возможна только методами имитационного моделирования. Задачи оптимизации численности средств на всех этапах обслуживания перевозок в узловом аэропорту также рассмотрены в главе 4.

Главный вывод, следующий из представленных в монографии материалов, состоит в том, что анализ и оптимизация работы узловых аэропортов требует разработки комплекса специализированных моделей, учитывающих особенности исследуемых объектов. Очевидно, основным методом решения названных задач является имитационное компьютерное моделирование. В работе все задачи моделирования решены с использованием широкодоступного программного обеспечения на базе языков Pascal и GPSS.

Автор выражает признательность руководству Международного аэропорта Курумоч в лице генерального директора Л.С. Шварца и его сотрудникам за предоставленную информацию, а также профессорам Самарского государственного аэрокосмического университета Б.А. Титову и М.И. Гераськину.

1. УЗЛОВЫЕ АЭРОПОРТЫ – ПРОДУКТ АВИАТРАНСПОРТНОГО РЫНКА

1.1. Сеть аэропортов РФ – компонент национальной и глобальной авиатранспортных систем

Состояние и тенденции развития глобальной авиатранспортной системы. Деятельность аэропортовой сети РФ, являющейся неотъемлемым элементом российской и мировой авиатранспортных систем, в полной мере испытывает влияние процессов, протекающих в этих системах, и господствующих в них тенденций.

Глобальная система воздушных перевозок в целом демонстрирует устойчивость к воздействию таких негативных факторов, как экономические и политические кризисы, колебания цен на авиатопливо и авиатехнику, военные конфликты, террористические атаки и т.п. Подтверждением тому служит характер кризиса мировой пассажирооборота за предшествующие финансово-экономическому кризису годы, для наглядности совмещенной на рис. 1.1.1 с интервалами кризисов [4].

Крупнейший спад в авиатранспортной отрасли, вызванный событиями 11 сентября 2001 г., по уровню производственных показателей был успешно преодолен уже к 2004 г. Тогда, в отличие от двух предыдущих лет, авиакомпаниями-членами ИАТА было зафиксировано не снижение, а 15% рост совокупных объемов пассажирских перевозок.

Еще не оправившись от событий 2001 г., авиаперевозчики через три года столкнулись с четырехкратным ростом цен

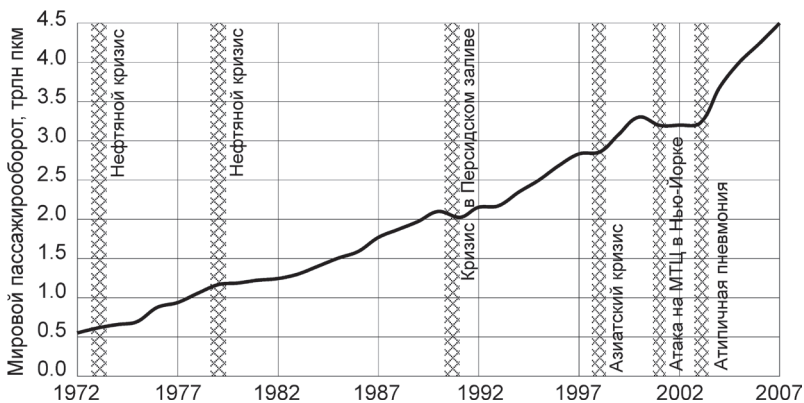


Рис. 1.1.1. Пассажиuroоборот авиакомпаний – членов Международной ассоциации воздушного транспорта (ИАТА)

на авиаГСМ, вызвавшим банкротство целого ряда авиакомпаний, в том числе таких гигантов, как *Delta Airlines* и *Northwest Airlines* (соответственно третья и четвертая по числу перевезенных пассажиров авиакомпании в США и в мире). Вопреки этому в тех же США – стране, лидирующей по всем показателям деятельности авиатранспорта, в 2005 г. число перевезенных пассажиров увеличилось на 7.1%, достигнув 738.6 млн чел., а объем пассажирооборота возрос на 8%, составив 1400 млрд пкм [5].

Несмотря на довольно высокий уровень характеристик производственной деятельности мирового авиатранспорта, его экономические показатели были не столь позитивны. Период 2001-2006 гг. характеризовался отрицательным уровнем прибыли сообщества авиакомпаний. Только в 2007 г. авиаперевозчики вышли на положительные значения по этому показателю [6].

Глобальный финансово-экономический кризис 2008 г. явился наиболее серьезным испытанием для мировой авиатранспортной отрасли за последние несколько десятков лет. Его негативное влияние выразилось в сокращении объемов авиаперевозок, снижении прибыльности, банкротствах перевозчиков. Крупнейшие авиакомпании, реагируя на кризис, были вынуждены снижать тарифы и сокращать свои провозные мощности, что привело к

распродаже устаревших самолетов и сокращению рабочих мест. Снижение объемов авиаперевозок в 2009 г. стало крупнейшим за всю послевоенную историю мировой гражданской авиации. По данным ИАТА спрос на пассажирские перевозки в 2009 г. сократился на 3.5%, на грузоперевозки – на 10.1%. К началу 2010 г. доходы авиакомпаний начали постепенно восстанавливаться благодаря растущему спросу, однако они по-прежнему остаются на 5-10% ниже уровня 2008 г. [7]

Тем не менее, эксперты таких авторитетных членов мировой авиатранспортной системы, как корпорации *Boeing* и *Airbus* [8], а также Федеральной авиационной администрации США (FAA) [9] демонстрируют осторожный оптимизм, считая, что низшая точка кризиса пройдена весной 2009 г. Кратко- и среднесрочные прогнозы противоречивы, однако большинство специалистов уверены, что после 2010 г. объемы авиаперевозок в мире начнут расти. Правда, при этом прогнозы не столь радужны, как ранее. Так, число отправок пассажиров по всему миру, прогнозируемое FAA на 2010 г., снизится на 14.3% по сравнению с прогнозами предыдущего (2009) года, а соответствующая цифра для 2025 г. на 15% меньше. Пассажирооборот к 2025 г. может упасть еще ниже – по сравнению с прогнозом 2009 г. он окажется меньше на 18.3%. Учитывая определенную устойчивость мировой авиатранспортной отрасли, остается надеяться, что после временного спада темпы роста восстановятся.

Рост уровня спроса на авиаперевозки требует непрерывного развития и совершенствования мировой аэропортовой системы, повышения ее пропускной способности. Формирование глобальной системы узловых аэропортов является одним из направлений такого развития.

Непосредственное отражение в деятельности мировой аэропортовой сети находят эволюционные изменения всей авиатранспортной системы, обусловленные воздействием комплекса разнородных факторов – политических, экономических, социальных, демографических, технических, экологических и др., как внутренних, так и внешних по отношению к этой системе. Наиболее существенными для аэропортов являются следующие основные тенденции, характерные для современного мирового воздушного транспорта.

1. Расширение и углубление процессов либерализации и дерегулирования рынков воздушных перевозок, состоящих в снижении роли государственных и международных органов в регулировании деятельности воздушного транспорта. Первые шаги к дерегулированию были сделаны в США в конце 70-х гг. прошлого века. До этого рынок авиаперевозок США жестко регулировался. FAA США определяла маршруты, контролировала расписание и цены на перевозки каждой авиакомпании. Начиная с 1977 г. под влиянием резкого роста цен на нефть и экономического спада руководством США последовательно принимались законодательные акты, направленные на устранение ограничений на внутренние и международные маршруты, объемы перевозок, частоту полетов, расписание, тарифы, услуги авиатранспорта. В странах Европы шаги по дерегулированию воздушных перевозок предпринимаются начиная с 1987 г. Авиакомпании Евросоюза получили неограниченный доступ ко всем маршрутам внутри региона и право каботажного – коммерческих перевозок внутри территории других стран Объединенной Европы. Этот процесс в различной степени затрагивает все регионы мира. На международном уровне политика дерегулирования проявляется в форме заключения двусторонних соглашений об «открытом небе», предоставляющих широкие коммерческие права авиакомпаниям обеих сторон [10]. По состоянию на июль 2007 г. было заключено 131 соглашение об открытом небе с участием 91 страны мира; из них 77 соглашений были подписаны США [11].

В условиях дерегулирования в руках государства остаются вопросы международных отношений в области гражданской авиации, слияния авиапредприятий, поддержания безопасности на воздушном транспорте, а также поддержки авиакомпаний, выполняющих перевозки в отдаленные и малонаселенные районы.

Результаты либерализации и дерегулирования оцениваются неоднозначно, но в целом положительно. К главным последствиям влияния дерегулирования на авиатранспортную отрасль относят:

- трансформацию сети авиалиний с образованием системы узловых аэропортов;
- приватизацию авиакомпаний, снижение доли государства во владении авиакомпаниями и аэропортами;

- беспрецедентное усиление конкуренции между авиакомпаниями, приводящей к банкротствам «слабых» игроков рынка;
- снижение общего уровня авиатарифов, формирование разветвленных систем скидок и поощрения клиентов;
- создание благоприятных условий для роста объемов перевозок;
- интенсивное расширение и внедрение компьютерных систем резервирования;
- расширение сотрудничества между авиакомпаниями в форме заключения коммерческих соглашений о совместном использовании кодов (код-шеринг) и взаимном признании перевозочной документации (интерлайн), позволяющих развивать трансферные перевозки через узловые аэропорты.

2. Глобализация, наглядной формой проявления которой является формирование глобальных альянсов авиаперевозчиков и присоединение к ним все новых авиакомпаний. Основная цель создания альянсов – сокращение издержек, привлечение пассажиров широкой сетью маршрутов и совместная конкурентная борьба с другими альянсами. Альянсы позволяют их членам создать густую частотную сеть маршрутов, формируемую на базе узловых аэропортов по принципу «hub-end-spoke». Альянсы дают возможность привлечь пассажиров удобством и малым временем стыковок в узловых аэропортах, использованием совмещенных программ для часто летающих пассажиров различных членов альянса, системой специальных тарифов, единым брэндом и стандартами качества обслуживания. По мнению участников различных глобальных альянсов, за счет объединения им удастся увеличить доходы на 5-7% [12]. В настоящее время существуют 3 глобальных альянса, на которые приходится около 56% объема мировых регулярных перевозок. Это *Star Alliance* (дата создания – май 1997 г.), *oneworld* (февраль 1999 г.), *SkyTeam* (июнь 2000 г.). Членом последнего является *Аэрофлот*.

Другим проявлением глобализации является создание крупных транснациональных авиакомпаний по примеру *AirFrance* и *KLM*, слившихся путем обмена акциями в мае 2004 г., образовав европейскую авиационную группу под названием *AirFrance-KLM*.

3. Специализация бизнеса авиаперевозчиков. В условиях современного рынка перевозок все резче становится различима дифференциация авиакомпаний по видам выбираемых ими бизнес-моделей [13].

Крупными авиакомпаниями, как правило, используется сетевая бизнес-модель. Она прежде всего предполагает наличие широкой сети маршрутов, полеты по которым выполняются магистральными авиалайнерами с высокой частотой. Модель требует использования узлового аэропорта, позволяющего обеспечивать быструю пересадку большого числа трансферных пассажиров, и расписания полетов, рассчитанного на организацию стыковок.

Авиакомпаниями меньшего масштаба, обслуживающими рынок малого объема, зачастую выбирается бизнес-модель регионального (фидерного) перевозчика. В этом случае авиакомпания, используя парк региональных самолетов, обеспечивает подвоз из населенных пунктов обслуживаемого региона в узловой аэропорт пассажиров, пересаживающихся на рейсы сетевой авиакомпании. Такое взаимодействие оказывается выгодным обоим партнерам – как региональной, так и сетевой авиакомпаниям, между которыми часто заключается соглашение типа «код-шеринг». В настоящее время в США более 90% рейсов региональных самолетов выполняются между хабами и региональными аэропортами.

Одной из наиболее эффективных в современных условиях признана бизнес-модель низкокзатратных (бюджетных или low-cost) авиакомпаний. Для таких авиакомпаний характерны значительно более низкие, чем у традиционных авиакомпаний, тарифы; пониженный уровень сервиса пассажиров; полеты на линиях со значительным и стабильным пассажиропотоком; покупка услуг по техобслуживанию и ремонту ВС у специализированных организаций при отсутствии собственных технических подразделений; широкая продажа перевозок через Интернет. Заметная особенность бюджетных авиакомпаний это – рейсы между периферийными аэропортами, отличающиеся низкой стоимостью услуг, что обуславливает отсутствие значительного трансферного пассажиропотока.

Выделяют также бизнес-модели чартерных, грузовых, бизнес (VIP)-авиакомпаний и некоторые другие.

4. Активное внедрение информационных сетевых технологий, охватывающих такие области авиабизнеса, как продажа электронных авиабилетов через Интернет, использование международных сетевых платежных систем для оплаты услуг авиаперевозки, расширение и углубление возможностей компьютерных систем бронирования и глобальных распределительных систем, интенсивное внедрение информационных систем в аэропортовом бизнесе и технологиях и другие направления.

В настоящее время зарубежные бюджетные перевозчики до 100% авиабилетов реализуют через Интернет. 1 июня 2008 г. в соответствии с решением ИАТА прекратились продажи бумажных билетов на международных авиалиниях [14, 15]. В секторе внутренних перевозок также происходит переход на использование электронных билетов. Этот процесс носит глобальный характер, хотя его быстрота в разных регионах мира различна. По оценкам ИАТА переход на электронную форму билетов позволит авиакомпаниям и продавцам перевозок сэкономить не менее 3 млрд долл. ежегодно за счет сокращения стоимости обработки билетов. Оплата перевозок осуществляется также через Интернет с использованием пластиковых карт таких систем, как *American Express, Diners Club, UATP, JCB* и др.

Внедрение информационных технологий по всей перевозочной цепочке позволило автоматизировать ряд аэропортовых операций по обслуживанию пассажиров и багажа. Использование стоек самостоятельной регистрации на рейс снижает затраты времени (на международных рейсах в среднем на 2 мин) и средств (на 4 долл.), сокращает очереди и повышает эффективность использования внутреннего пространства аэровокзала. Использование штрих-кодов на посадочных талонах позволяет пассажирам проходить регистрацию онлайн через Интернет и прибывать в аэропорт уже с распечатанным на принтере посадочным талоном. Широкое применение радиочипов на багажных бирках позволит значительно сократить количество утерянного багажа [16].

Разработкой и продвижением информационных технологий активно занимаются компании-владельцы глобальных распределительных систем, таких как, например, *Sabre* и *Amadeus*. В настоящее время функции этих систем не ограничиваются

продажами и бронированием перевозок, они также позволяют решать задачи управления отправлениями в аэропортах, поддержки программ часто летающих пассажиров, управления доходами и тарифами, оптимизации интерлайнных и трансферных продаж и др. [17]

В последнее время качественный скачок произошел в области аэропортовых информационных систем, которые используются как для управления технологическими процессами в аэропортах, так и для поддержки инженерной инфраструктуры аэропортовых комплексов [18].

5. Совершенствование летно-технических и коммерческих характеристик авиапарка, обслуживаемого аэропортами. Влияние характеристик эксплуатируемых ВС на аэропортовую систему носит взаимный характер: увеличивающиеся пассажировместимость, размеры, масса, аэронавигационные возможности современных ВС повышают требования ко всем подсистемам аэропортов, но объективные ограничения пропускной способности этих подсистем служат одним из сдерживающих обстоятельств в развитии авиатехники.

За рубежом гражданское авиастроение, наряду с традиционными его центрами – США и Западной Европой, развивается в таких странах как Канада, Бразилия, Китай, Япония и др. Интенсивно расширяется международная интеграция.

Зарубежный рынок производства магистральных авиалайнеров в настоящий момент практически поровну разделен между двумя компаниями – *Boeing*, основное производство которой размещено в США, и западноевропейской *Airbus Industries*. В 2007 г. объем поставок самолетов компании *Boeing* составил 441 ВС, компании *Airbus Industries* – 453 ВС [4].

В зарубежном секторе производства региональных самолетов основными изготовителями авиатехники являются компании *Bombardier* (Канада), *Embraer* (Бразилия), *ATR* (Западная Европа) и ряд др.

В 2008 г. всеми мировыми фирмами-авиапроизводителями было поставлено заказчикам в общей сложности более 1100 самолетов, что позволяет считать этот год весьма удачным для них. Краткосрочные прогнозы, при всей противоречивости, утвержда-

ют, что в связи с кризисом следует ожидать снижения заказов на авиатехнику. При этом, однако, на период 2009-2013 гг. предсказывается совокупная потребность мирового сообщества авиакомпаний в 7300 единиц новой авиатехники.

Откликом авиапроизводителей на общемировые тенденции и проблемы являются разработки ВС нового поколения, таких как самолеты А-350,-380, *Boeing-737NG*, -777, -787 «*Dreamliner*». В этих самолетах реализованы прогрессивные инженерные решения, обеспечивающие снижение воздействия экологически вредных факторов, таких как шум, выбросы вредных веществ; повышение надежности авиатехники; снижение эксплуатационных расходов, предполагающее использование экономичных авиадвигателей и передовых решений в области аэродинамики и конструкции ВС.

Знаковым событием для мировой авиатранспортной отрасли и аэропортовой системы стал ввод в эксплуатацию самолетов нового поколения А-380 и *Boeing-777*. Эти самолеты явились воплощением различных стратегических подходов к проблеме формирования сети авиалиний. Выполнивший первый коммерческий рейс в октябре 2007 г. крупнейший пассажирский самолет А-380 предназначен для реализации концепции «*hub-and-spoke*». Самолет имеет пассажироместимость до 840 чел. и дальность беспосадочного полета более 15000 км, что делает его незаменимым при обслуживании авиалиний с напряженными пассажиропотоками между крупнейшими мировыми узловыми аэропортами.

Десятилетием ранее компания *Boeing* начала продажи самолета *Boeing-777*, предназначенного для прямых перевозок пассажиров по схеме «*point-to-point*», минуя хабы. Развитием этого направления является активно разрабатываемый в настоящее время самолет *Boeing-787*, впитавший наиболее передовые технические решения.

Несмотря на различия в назначении эти самолеты пользуются спросом у авиаперевозчиков. За время, прошедшее с начала поставок, авиакомпаниями было приобретено более 700 самолетов *Boeing-777* (с 1995 г.), портфель твердых заказов на А-380 составляет около 200 единиц.

Показатели деятельности воздушного транспорта России (1991-2008 гг.)

Показатели	Годы																	
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Пассажирские перевозки																		
Пассажи- рооборот, млрд пкм	150.4	117.6	83.9	72.4	71.7	64.5	61.5	55.5	53.4	53.4	60.6	64.7	71.1	83.0	85.4	93.9	111.0	122.6
МВЛ	43.5	30.0	28.5	26.0	28.3	28.4	27.7	25.9	22.6	25.8	29.3	32.2	35.5	43.7	45.7	50.9	61.8	69.9
Перевезе- но пасс., млн чел.	86.0	61.2	39.8	32.8	31.0	27.0	25.1	22.3	21.5	21.8	25.1	26.5	29.4	33.8	35.0	38.0	45.1	49.8
МВЛ	16.2	10.7	9.3	8.5	9.3	9.4	9.1	8.4	7.1	8.4	10.0	11.1	12.3	14.9	15.9	17.3	20.9	23.6
Грузовые перевозки																		
Гру- зооборот, млн ткм	2392	1770	1621	1450	1585	2052	2496	1981	2257	2515	2616	2662	2735	3002		2927	3424	3691
МВЛ	483	489	669	793	897	1400	1785	1440	1637	1722	1722	1815	1812	2135		2152	2598	2914
Переве- зено	811.0	722.6	555.0	444.0	436.9	566.1	605.1	468.1	493.8	546.6	612.4	627.2	620.9	654.9	624.0	640.3	732.1	779.3
МВЛ т	80.9	87.7	128.3	168.9	178.9	333.6	377.0	288.2	289.1	301.1	344.5	364.6	341.3	384.1	365.0	384.7	461.6	519.9

Табл. 1.1.2.

Динамика изменения аэропортовой сети России (1992-2003 гг.)

	Годы											
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Общее количество аэропор- тов	1302	1169	1011	876	849	756	639	579	533	496	451	423
В том числе с аэродромами:												
класса А ($L \geq 3200$ м)	14	14	14	15	18	18	18	18	18	18	17	18
класса Б ($2600 \leq L < 3200$ м)	13	14	14	14	16	18	20	25	25	25	25	25
класса В ($1800 \leq L < 2600$ м) (в том числе с ГВПШ)	71 (3)	72 (3)	74 (3)	78 (3)	84 (3)	83 (3)	81 (1)	84 (1)	84 (1)	84 (1)	84 (1)	80 (1)
класса Г ($1300 \leq L < 1800$ м) (в том числе с ГВПШ)	136 (58)	137 (56)	137 (56)	126 (49)	127 (48)	122 (44)	117 (44)	109 (41)	107 (43)	108 (42)	105 (40)	96 (38)
класса Д ($1000 \leq L < 1300$ м) (в том числе с ГВПШ)	131 (72)	128 (69)	114 (68)	114 (61)	114 (61)	102 (50)	92 (41)	77 (43)	64 (31)	61 (31)	58 (27)	54 (25)
класса Е ($500 \leq L < 1000$ м) (в том числе с ГВПШ)	937 (851)	804 (720)	658 (597)	529 (454)	490 (424)	413 (354)	311 (261)	266 (216)	235 (187)	200 (157)	162 (130)	150 (117)

В результате повышения стоимости перевозок снизилась доступность гражданской авиации для широкого круга пользователей. По некоторым оценкам услугами авиации к 2005 г. пользовались около 3% населения РФ [19].

Последним годом явного спада в авиаперевозках стал 2000 г., за которым последовал ускоренный рост вплоть до кризисной осени 2008 г. Оздоровление экономики и повышение доходов населения привели к тому, что уже в 2005 г. показатель пассажирооборота превысил уровень 1993 г. – года, в котором была осуществлена либерализация цен на авиаперевозки. В 2007-2008 гг. в гражданской авиации России наблюдался беспрецедентный рост объемов авиаперевозок, чему способствовали меры государства, направленные на повышение в отрасли эффективности управления и регулирования. Динамично развивались как международные, так и внутренние перевозки пассажиров, грузов и почты.

По мнению руководства ФАВТ РФ важным направлением является развитие процессов интеграции и консолидации авиаперевозчиков, поскольку это повышает эффективность авиаперевозок, расширяет инвестиционные возможности авиакомпаний, повышает уровень безопасности полетов. Если в 1994 г. в России действовало 393 авиакомпании, то сегодня их число составляет 178 [1]. При этом 5 ведущих авиакомпаний перевозят 52% пассажиров от общего объема, на 15 крупнейших компаний приходится 77%, а 35 авиакомпаний перевозят более 95% пассажиров. В 2007 г. на российском рынке авиаперевозок появилась и начала развиваться первая российская low-cost компания *Sky Express*.

Вместе с положительными изменениями в состоянии авиаперевозок остается ряд проблемных факторов, негативно влияющих на деятельность перевозчиков. Высокой остается стоимость перевозок, одной из главных причин чего является высокая цена авиатоплива. Доля затрат на авиаГСМ в себестоимости российских авиаперевозок превышает мировой уровень. Даже после падения в 2008 г. мировых цен на нефть, вызванного глобальным кризисом, снижение цен на авиатопливо в российских аэропортах не было пропорциональным. Высокие цены на авиаГСМ явились одной из причин сбоев в работе авиатранспорта и банкротств среды российских авиакомпаний летом и осенью 2008 г.

Уменьшается удельный вес внутренних воздушных перевозок в пассажирообороте гражданской авиации РФ. В настоящее время он не превышает 45%, что значительно ниже аналогичного показателя, например, для США (около 75%). Доля же местного (внутрирегионального) пассажирооборота едва превышает 1% и продолжает сокращаться [20].

Настораживает опережающий рост перевозок иностранными авиакомпаниями из аэропортов России. Если объемы отправок рейсами российских авиакомпаний за период 2000-2006 гг. возросли в 1.6 раза, то для иностранных авиакомпаний аналогичный показатель возрос в 2.1 раза.

Отсутствие оптимальной сети авиамаршрутов приводит к повышению стоимости перевозок, снижению уровня комфорта для пассажиров и, как следствие, снижению конкурентоспособности авиатранспортного комплекса РФ. Главное проявление влияния этого фактора – рост доли перевозок через аэропорты МАУ: с 2001 по 2006 гг. для внутрироссийских пассажирских перевозок она возросла с 58% до 67%, для международных пассажирских перевозок – с 71% до 76%.

Перечисленные проблемы зазвучали с особой остротой в условиях глобального финансово-экономического кризиса, который отразился на российской авиатранспортной отрасли не менее болезненно, чем на мировой. Авиакомпании РФ потеряли за первые шесть месяцев 2009 г. около 20% пассажиров. Нынешнее (осень 2009 г.) состояние российских авиaperевозчиков характеризуется следующим образом: «Снизилась доходность, рентабельность, финансовая устойчивость. Появились перебои в производственной деятельности. Ряд авиакомпаний были признаны банкротами, некоторые скатились в предбанкротное состояние. Для многих кредитопользование оказалось на грани доступности, а долговая нагрузка – на пределе подъемности. Начался передел рынка. В секторе регулярных международных перевозок усилилась экспансия зарубежных авиакомпаний» [21].

Реакцией на кризис со стороны российских авиакомпаний стало принятие ими шагов по уменьшению эксплуатационных расходов. В авиакомпаниях происходят изменения в структуре авиaperевозок: сокращаются чартерные программы, пере-

смагиваются частоты выполнения рейсов, больше внимания стало уделяться региональным перевозкам, с учетом спроса производятся оперативные замены типов самолетов, предпринимаются шаги по оптимизации парка ВС [22]. В результате за первое полугодие 2009 г. несколько увеличился коэффициент коммерческой загрузки. Стремясь снизить затраты, авиаперевозчики интенсивно развивают электронные технологии авиапроизводства. По данным ТКП во второй половине 2008 г. 40% проданных в её системе авиабилетов оформлено в электронном виде, а к началу 2010 г. предполагается довести этот показатель до 82% [23]. При снижении уровня авиаподвижности населения наметилась тенденция к увеличению грузовых авиаперевозок.

К середине 2009 г. обвальное снижение показателей по пассажирским перевозкам практически прекратилось. Можно сказать, что при всей сложности ситуации, российской авиатранспортной отрасли в целом удалось выдержать удар глобального кризиса.

Одним из путей «выживания» российских авиакомпаний в кризисных условиях явилось обновление и оптимизация парка ВС.

В условиях предкризисного интенсивного роста спроса на перевозки перед авиакомпаниями с исключительной остротой встал вопрос обновления авиапарка. Во времена спада 1991-2000 гг. авиакомпании могли удовлетворить снизившийся спрос на перевозки, используя большое число самолетов советского производства (на 1991 г. общее число гражданских ВС превышало 5000). При этом число списываемых из-за выработки ресурса и по другим причинам многократно превышало число поставленных в авиакомпании новых ВС. В течение 1996-2000 гг. списание с эксплуатации ВС разных типов составляло ежегодно от 200 до 500 единиц. За тот же период в российские авиакомпании было поставлено 57 магистральных и региональных самолетов отечественного производства, включая 18 самолетов нового поколения – Ил-96, Ту-204/214, Ил-114, Ан-140, Ан-38. За период 2001-2006 гг. общее число произведенных российским авиапромом самолетов составило 96, из которых 42 – «новые» [24]. Поддержание необходимой для удовлетворения спроса численности авиапарка осуществлялось авиакомпаниями не за счет поставок

новой техники, а благодаря поступлению ВС со вторичного рынка (реэкспорт и ВС других ведомств), модернизации, продлению ресурса и т.п. [24]

С ростом перевозок и сокращением числа ВС российские авиакомпании столкнулись с дефицитом располагаемых провозных способностей. По оценкам такой момент наступил в 2005 г. Дефицит усугубляется низкими технико-экономическими характеристиками стареющего авиапарка, в частности, высоким расходом авиатоплива, его несоответствием международным экологическим стандартам, комфорту, качеству самолетовождения.

Исследование, проведенное Объединенной авиастроительной корпорацией (ОАК) в 2007 г., выявило достаточно высокий уровень платежеспособного спроса на поставки российских ВС нового поколения для отечественных и зарубежных пользователей (табл. 1.1.3) [25].

Табл. 1.1.3.

Спрос на ВС нового поколения российского производства

Тип ВС		Ил-96-400	Ту-204/214	Ту-334-100	Ан-148-100В	Superjet-100	Всего
		дальнемагистральный, широкофюзеляжный	среднемагистральный	региональный	региональный	региональный	
2008 г.	Внутр. заказ	1	11	21	9	6	48
	Экспорт	3	5	0	4	0	12
2009 г.	Внутр. заказ	0	30	21	22	30	103
	Экспорт	4	6	0	15	0	25
2010 г.	Внутр. заказ	3	34	25	26	76	164
	Экспорт	5	6	8	16	14	49
2011 г.	Внутр. заказ	3	28	24	14	34	103
	Экспорт	4	3	14	21	59	101
2012 г.	Внутр. заказ	2	22	23	12	0	59
	Экспорт	2	4	5	10	70	91
Всего	Внутр. заказ	9	125	114	83	146	477
	Экспорт	18	24	27	66	143	278

В 2007 г. впервые объем заказов превысил производственные мощности ОАК, доля которых превышает более 90% всех российских мощностей [26]. На первое место вышла необходимость решения проблемы нехватки имеющихся сил и средств для выполнения заказов. С этой целью большинство предприятий ОАК сформировали планы технического перевооружения, обеспечивающие расширение производства. Объем инвестиций в ближайшие годы должен вырасти в несколько раз. Это позволит осуществлять запуск новых продуктов с использованием принципиально новых технологий. Объявлено, что в ближайшей перспективе авиапром освоит серийное производство самолетов *Sukhoi Superjet 100* и Ан-148. Заключаются сделки на их поставку [23].

Тем не менее, российская авиационная промышленность, вынужденная последние 15 лет при отсутствии массовых заказов функционировать в режиме разовых поставок, не способна в ближайшее время полностью удовлетворить запросы авиакомпаний по обновлению авиапарка. Ежегодный объем производства отечественных гражданских региональных и магистральных самолетов не превышает 10 единиц. Так, в 2008 г. российской авиапромышленностью выпущено 9 магистральных самолётов [23].

В этой ситуации российские авиакомпании сделали ставку на эксплуатацию ВС зарубежного производства. В 2007 г. лидерами роста пассажирооборота явились авиакомпании *ВИМ-Авиа*, *Оренбургские авиалинии*, *Трансаэро*, *КД авиа*, обновившие парк ВС конкурентоспособной авиационной техникой зарубежного производства [27]. При этом идет интенсивный вывод из эксплуатации ВС отечественного производства.

В последние годы парк ВС иностранного производства ежегодно увеличивался на 70-80 единиц. За четыре года, с 2004 по 2007 гг., в России парк только магистральных ВС западного производства возрос более чем в три раза – с 62 до 203 единиц. На конец января 2008 г. он уже составлял 213 ВС, которые по компаниям-производителям распределялись следующим образом: 146 шт. (69%) – *Boeing*, 67 шт. (31%) – *Airbus Industries*. При этом наибольшей численностью располагал парк *Boeing-737-500* (44 шт.), за ним следовали *Boeing-737-300* и А-319 (по 29 шт.), А-320 (20 шт.) и т.д. Все ВС

зарубежного производства распределены среди 23 авиакомпаний, причем у трех крупнейших из них сосредоточено порядка 50% парка. К этим авиакомпаниям относятся *Аэрофлот* с 45 зарубежными ВС, а также *Сибирь* (*S7 Airlines*) и *Трансаэро*, у которых на рассматриваемый момент было по 30 зарубежных ВС. Наряду с магистральными самолетами *Boeing* и *Airbus*, российскими авиакомпаниями эксплуатируются такие типы региональных ВС, как *Challenger*, *Embraer*, *ATR* и некоторые другие. За 2008 г. приобретено еще 74 магистральных самолёта иностранного производства.

В настоящее время среди основных можно выделить следующие проблемы развития парка ВС [20].

Высокий удельный вес авиаперевозок на устаревших ВС. На 2008 г. ВС нового поколения российского производства обеспечивают всего около 8% суммарного пассажирооборота, около 46% приходится на иностранные ВС, остальной пассажирооборот выполняется прочими российскими ВС. Средний возраст отечественного магистрального парка достиг 18 лет.

Низкая интенсивность эксплуатации основной части парка ВС. Величина годового налета на среднесписочное ВС распределяется по группам ВС следующим образом:

- нового поколения российского производства – около 2000 ч;
- иностранные – около 3100 ч;
- прочие российские магистральные – около 1200 ч.

Низкая топливная эффективность основной части парка ВС. Распределение удельного расхода авиаГСМ на фактически выполненный производственный пассажирооборот имеет вид:

- ВС нового поколения российского производства – около 50 г/пкм;
- иностранные – около 40 г/пкм;
- прочие российские – около 73 г/пкм.

Значительная доля (в настоящее время – около 71%) парка пассажирских реактивных самолетов не соответствует требованиям ИКАО по эмиссии двигателей.

Приобретение российскими авиакомпаниями иностранных ВС с высокой отработкой ресурса с начала эксплуатации. Только около 30% иностранных ВС имеют возраст менее 10 лет, порядка 12% были выпущены 20 и более лет назад.

Низкие темпы поставки магистральных и региональных пассажирских ВС российского производства, о чем сказано выше.

Высокие таможенные пошлины на ввозимые ВС иностранного производства.

Несмотря на перечисленные проблемы с обновлением авиапарка, представляется очевидным, что в ближайшее время аэропортовая система России должна быть подготовлена к приему и обслуживанию возрастающего числа ВС нового поколения, среди которых доля ВС иностранного производства будет постоянно увеличиваться.

Состояние, проблемы и пути развития аэропортовой системы РФ. Целый ряд проблем авиаперевозчиков вызван несовершенством российской аэропортовой системы, выразительная картина состояния которой приведена в «Концепции развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года», разработанной Минтрансом РФ в 2008 г.

Общесистемный кризис гражданской авиации России привел к сокращению количества отправок пассажиров из аэропортов страны в 3 раза.

Количество действующих аэродромов на территории России с 1992 г. по настоящее время сократилось с 1302 до 351, из которых регулярные авиаперевозки осуществляются только через 260. Только в 2006 г. было выведено из эксплуатации 32 аэродрома. Выбытие аэродромов из реестра в основном происходит за счет региональных и местных аэродромов с грунтовым покрытием. За период с 1992 г. выбыло 826 грунтовых аэродромов, что составляет 87% от общего числа сокращенных аэродромов (см. табл. 1.1.2).

Перераспределение пассажиро- и грузопотоков в направлении аэропортов Москвы «не позволяет Российской Федерации использовать в полной мере транзитно-трансферный потенциал страны, что в свою очередь лишает авиаперевозчиков экономии на затратах за счет построения эффективных маршрутных сетей, авиаперевозчиков и аэропорты дополнительных доходов от трансферных пассажиров» [3].

При потребном среднегодовом объеме финансирования развития существующей сети аэродромов в размере 50.1 млрд р.,

только в отношении действующих на данный момент аэродромов с 1991 г. было недофинансировано около 765 млрд р. С 1991 по 2000 г. финансирование модернизации и развития аэродромов практически не осуществлялось. В период с 2000 по 2006 г. из федерального бюджета были выделены незначительные средства в размере около 30 млрд р., основной объем которых финансировался в рамках подпрограммы «Гражданская авиация» Федеральной целевой программы «Модернизация транспортной системы России (2002- 2010 годы)».

Постоянный дефицит финансирования привел к критическому износу инфраструктуры и, в целом, неудовлетворительному состоянию основных фондов.

Недостаток средств стал причиной того, что планово-предупредительный ремонт элементов аэродромов сводился только к текущему ремонту, который не мог заменить капитальный ремонт и предотвратить некомпенсируемый износ имущества аэродромов. В результате закрытия и вывода из эксплуатации аэродромов около 50 тыс. человек потеряли рабочие места. Имущество и соответствующие земельные участки были утрачены для развития воздушного транспорта.

В связи с развитием авиационной техники, появлением новых современных типов ВС (узко- и широкофюзеляжных с низко расположенными двигателями) основная часть аэродромов с искусственными покрытиями требуют проведения реконструкции.

При частичной приватизации аэропортов имущество аэродромов не включалось в уставный капитал создаваемых акционерных обществ, государственные предприятия на базе имущественного комплекса аэродромов не создавались. Имущество аэродромов становилось бесхозным, теряло свою стоимость.

Не завершен процесс разделения объединенных авиапредприятий с выделением операторов аэропортов в самостоятельные предприятия, который способствует формированию конкурентной среды на рынке воздушных перевозок.

Региональные и местные аэропорты, элементы аэродромов которых, как правило, имеют грунтовые покрытия, с 1992 г. практически не имели государственной поддержки. Конструкции грунтовых аэродромов в значительной мере утратили эксплуата-

ционные качества и испытывают сложности в работе, особенно в период межсезонья.

Ответом на угрожающее состояние аэропортовой сети явилась разработка «Концепции развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года», призванной, как в ней сказано, «определить роль государства в области регулирования аэропортовой деятельности с учетом принципов социальной ответственности государства по обеспечению транспортным обслуживанием населения и экономики».

Концепция предусматривает четыре основных направления развития аэродромной сети. Первым в списке основных направлений названо создание на территории РФ инфраструктуры крупных узловых аэропортов (хабов). Три других направления следующие:

- разработка и внедрение классификации аэродромов (аэропортов) федерального и регионального значения;
- оптимизация модернизации и развития аэродромной инфраструктуры с использованием рыночных механизмов;
- сохранение и развитие авиационных перевозок местного значения и всего сегмента социально значимых авиационных перевозок, включая меры государственной поддержки.

В федеральной аэропортовой сети определена федеральная опорная аэропортовая сеть – минимально необходимая РФ совокупность аэропортов, обеспечивающая:

- связность аэропортовой сети – единство и неразрывность авиационных связей гражданской авиации на всей территории страны с учетом выполнения требований безопасности полетов;
- функциональную эффективность аэропортовой сети;
- интересы в области национальной безопасности страны.

Для формирования федеральной опорной аэропортовой (аэродромной) сети устанавливаются следующие группы аэропортов (аэродромов):

- аэродромы международных узловых аэропортов;
- аэродромы внутрироссийских узловых аэропортов;
- аэродромы неузловых аэропортов, необходимые для связности аэродромной сети;

- аэродромы узловых аэропортов, необходимые для обеспечения безопасности полетов (аэродромы из реестра запасных аэродромов РФ);
- аэродромы аэропортов, включенных в опорную сеть по критериям социальной значимости.

Функциональную основу опорной сети должны составить узловые аэропорты. По результатам НИР Минтранса России «Бизнес-модель построения национальной аэропортовой сети» выявлено 12 потенциальных международных узловых аэропортов, которые обладают наибольшим потенциалом для того, чтобы в перспективе концентрировать и распределять основные международные пассажиро- и грузопотоки страны.

В группу внутрироссийских узловых аэропортов включаются аэропорты, которые имеют авиасвязь с международным узловым аэропортом и уже на данный момент имеют в своей маршрутной сети хотя бы один из периферийно расположенных аэропортов, из которого пассажиру можно совершить авиаперелет в федеральный узловой аэропорт только со стыковкой в данном внутрироссийском узловом аэропорту. По результатам исследований определено 22 внутрироссийских узловых аэропорта.

Вышеуказанные 34 международных и внутрироссийских узловых аэропорта на текущий момент обслуживают 80% всех авиапассажиров в РФ.

Кроме того, в опорную сеть включены 23 аэродрома по критериям связности опорной сети. Аэропорты, обеспечивающие связность сети, должны иметь расстояние до ближайшего такого же аэропорта наиболее близкое к 1000 км (наиболее характерная максимальная дальность полета для региональных ВС 3-го класса), но не более 1000 км.

В опорную сеть также включены 8 аэродромов по критериям социальной значимости (из не вошедших в предыдущие группы: аэродромы, расположенные в городах с населением более 1 млн жителей, аэродромы в крупнейших городах-курортах, центрах федеральных округов) и 64 аэродрома из реестра запасных аэродромов РФ, не вошедших в предыдущие группы.

Таким образом, федеральная опорная аэропортовая сеть РФ формируется из 121 аэропорта (аэродрома).

В качестве основных инструментов, обеспечивающих развитие аэродромной сети, рассматривается расширение государственного финансирования и использование механизмов государственно-частного партнерства. Предполагается дальнейшая поддержка процесса разделения объединенных авиапредприятий с выделением операторов аэропортов в самостоятельные хозяйствующие субъекты с последующим их акционированием. Предусматривается возможность передачи аэродромов и имущества, находящегося в федеральной собственности, оператору аэропорта по договору аренды или концессии. Механизмы государственной поддержки местных и региональных воздушных перевозок и аэропортовой деятельности включают субсидирование из федерального и местных бюджетов авиакомпаний и аэропортов, обеспечивающих социально значимые региональные и местные перевозки, а также создание казенных предприятий-аэропортов в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях.

В Концепции справедливо отмечается, что на изменение уровня авиаподвижности населения влияет «изменение располагаемых доходов населения..., а также изменение тарифов на авиаперевозку, которые в свою очередь определяются величиной затрат авиаперевозчиков». С целью сокращения стоимости авиаперевозок намечена система мер, основными из которых являются:

- реализация политики ввода в эксплуатацию российскими авиакомпаниями высокоэффективных ВС (обновление парка за счет ввода новых конкурентоспособных ВС отечественного производства, при их отсутствии отмена (снижение) пошлин на ввоз авиационной техники и оборудования зарубежного производства);
- возмещение российским авиакомпаниям части затрат за уплату лизинговых платежей за ВС, а также части затрат за уплату процентов по кредитам;
- развитие конкуренции между авиакомпаниями (в том числе либерализация рынка за счет отмены лицензирования на авиалиниях);
- развитие сегмента низкозатратных авиаперевозчиков;

- значительное сокращение затрат авиаперевозчиков за счет ввода электронного авиабилета;
- реализация политики разделения авиаперевозчиков и операторов аэропортов;
- развитие эффективной маршрутной сети основных авиаперевозчиков по принципу «втулка-спица» на основе международных узловых аэропортов и внутрироссийских узловых аэропортов;
- стимулирование снижения и сдерживания роста аэропортовых сборов и ставок за наземное обслуживание авиакомпаний за счет дополнительных доходов операторов аэропортов от неавиационной деятельности;
- сокращение затрат операторов аэропортов за счет отмены пошлин на ввоз аэродромного оборудования, не имеющего аналогов в РФ и другие меры.

Намечены особые меры по развитию внутрироссийских и международных трансферных перевозок, которые включают содействие государства в решении следующих задач:

- оптимизация маршрутных сетей и расписания воздушных перевозок с ориентацией на международные и внутрироссийские узловые аэропорты с целью обеспечения доступности любого аэропорта РФ в соответствии с потребностями населения и экономики;
- организация системы взаимодействия авиаперевозчиков для построения маршрутных сетей на принципах формирования стыковочных волн в международных и внутрироссийских узловых аэропортах;
- содействие процессам укрупнения авиаперевозчиков и развитию механизмов взаимодействия магистральных и региональных авиакомпаний на основе оптимизации маршрутных сетей, в том числе создание альянсов;
- создание условий для обновления парка ВС с коммерчески приемлемыми эксплуатационными характеристиками для определенных видов перевозок (магистральные, региональные, местные) преимущественно отечественного производства.

Для контроля эффективности реализации задач Концепции установлен ряд количественных показателей, среди которых:

1. Коэффициент авиационной подвижности, характеризующий среднее количество авиаперелетов, совершаемых одним жителем страны. В настоящее время величина этого коэффициента для РФ близка к 0.27. Для сравнения ниже приведены величины коэффициента авиационной подвижности для ведущих западных стран: США – 2.5; Великобритания – 1.6; Франция – 1.0; Германия – 0.9.

2. Коэффициент (уровень) доступности перевозок, равный количеству пассажиров, перевезенных на местных авиалиниях. В настоящее время в РФ он составляет 1.7 млн чел.

3. Удельный вес международного трансфера в общем объеме перевозок через аэропорты. На данный момент при отсутствии государственного статистического учета данный показатель по оценкам экспертов в 11 международных узловых аэропортах, потенциальных хабах оценивается в размере 0.45%.

В рамках Концепции рассмотрено 3 сценария развития аэропортов РФ на период с 2008 по 2020 г., соответствующие трем различным вариантам финансирования. Приемлемыми по прогнозируемым результатам являются два сценария – максимальный и базовый.

Максимальный сценарий основан на предположении о финансировании в течение 8-10 лет работ по модернизации и развитию всей существующей аэродромной сети. В случае реализации этого сценария прогнозируется увеличение к 2020 г. коэффициента авиаподвижности населения до уровня близкого к 1. Уменьшения количества аэродромов в реестре не предполагается. С учетом затрат на модернизацию и развитие сети в объеме около 1742 млрд р., в ценах соответствующих лет, данный сценарий видится малореалистичным.

Базовый сценарий основан на предположении о финансировании в течение 8-10 лет работ по строительству и реконструкции 121 аэродрома национальной опорной аэродромной сети. При суммарном объеме финансирования модернизации и развития аэродромной сети около 1131 млрд р. данный сценарий является предпочтительным. К 2020 г. он позволит обеспечить коэффициент

авиаподвижности на уровне 0.62. Количество аэродромов к 2020 г. должно составить 294, что полностью позволит обеспечить функционирование национальной опорной аэродромной сети, а также обеспечить необходимой инфраструктурой региональные и местные авиаперевозки. Другими результатами реализации Концепции должны стать повышение доступности авиаперевозок в РФ с 1.7 млн чел. до 3.3 млн чел.; повышение удельного веса международного трансфера в суммарных отправлениях пассажиров из аэропортов РФ до 20%; обеспечение среднего уровня начисленного износа национальной опорной аэродромной сети РФ не более 38%.

Под влиянием последствий мирового кризиса на российскую экономику представляется вероятным пересмотр положений Концепции. Звучат предложения о сокращении числа хабов. Говорится о восьми или даже двух международных хабах в пределах РФ [28]. Весьма разумным представляется мнение о том, что государство должно поддерживать и развивать усилия по организации хабов на базе только тех аэропортов, которые смогли сохранить и повысить свой уровень в кризисных условиях. Вообще же необходимость использования российской сети узловых аэропортов, которая формируется «естественным» путем, вследствие инициатив авиакомпаний или самих аэропортов, не подвергается сомнению.

1.2. Классификация и показатели эффективности узловых аэропортов

Усилия по организации системы перевозок через базовый аэропорт предпринимались зарубежными авиакомпаниями начиная с середины 50-х гг. прошлого века. Предметом особой гордости авиакомпании *Delta Airlines* (США) является факт формирования еще в 1955 г. системы трансферных перевозок пассажиров через аэропорт г. Атланта. В то время такие попытки носили единичный характер и не получили развития.

Причиной массового перехода ведущих зарубежных авиакомпаний к использованию схемы «hub-and-spoke» послужило применение политики дерегулирования авиатранспортной отрасли. Считается, что одной из первых эту схему разработала, успешно реализовала и продолжает развивать корпорация *FedEx* (США), специализирующаяся на срочной доставке грузов и почты. Начиная с 1970-х гг., эта корпорация использует свой базовый аэропорт в г. Мемфис в качестве грузового хаба для перевозки суточной экспресс-почты в пределах США [29].

Как отмечалось выше, важнейшей особенностью системы перевозок «hub-and-spoke» является наличие большой доли трансферных корреспонденций в узловом аэропорту. Под трансферными корреспонденциями здесь понимаются пассажиры, совершающие пересадку с одного рейса на другой, их перегружаемый багаж, а также грузы и почта, перевозка которых предполагает перевалку с одного ВС на другое в аэропорту трансфера.

Для эффективного использования узловых аэропортов требуется, чтобы самолеты из периферийных аэропортов, связанных авиалиниями с узловым аэропортом, прибывали в него почти одновременно. В данном случае периферийными являются не только

аэропорты регионального и местного значения, но и крупные аэропорты, в том числе узловые, из которых пассажиры совершают пересадку в рассматриваемом узловом аэропорту. Самолеты, прибывшие в узловой аэропорт, синхронно проходят в нем наземное обслуживание, что облегчает трансфер пассажиров и их багажа между этими самолетами, или, как в случае *FedEx*, трансфер грузов и экспресс-почты. После этого самолеты так же почти одновременно вылетают в периферийные аэропорты назначения. Процесс, включающий многочисленные почти одновременные прибытия и отправления рейсов, получил название «комплекс» или «волна».

Авиакомпания, обслуживающая узловые сети авиалиний, выполняет полеты между своим одним или несколькими узловыми аэропортами и совокупностью периферийных аэропортов. Она вынуждена координировать прибытия и отправления рейсов в своем узловом аэропорту, чтобы минимизировать задержки трансферных пассажиров, следующих через него. Такая стратегия авиакомпании нацелена в первую очередь на пассажиров, перемещающихся между такими пунктами отправления и назначения, для которых объем перевозок недостаточен для организации высокочастотных прямых рейсов.

Система трансферных перевозок через узловой аэропорт, как правило, формируется авиакомпанией, для которой этот аэропорт является базовым (или одним из базовых). Часто такие – хабообразующие – авиакомпании доминируют в узловом аэропорту. Их доля в уровне трафика, обслуживаемого аэропортом, преобладает над другими авиакомпаниями. Имеются примеры, когда в качестве хабообразующих выступают не одна, а несколько, как правило, две авиакомпании, использующие один аэропорт в качестве своего хаба. Авиакомпании – члены одного глобального альянса стремятся использовать для стыковки рейсов не просто один и тот же узловой аэропорт, но и производить обслуживание трансферных пассажиров в одном терминале. Крупные авиакомпании и альянсы имеют в распоряжении систему хабов по своим маршрутам. В связи с этим различают [30] два основных типа сетей узловых авиалиний – одно- и многоузловые сети. Сети первого типа основаны на единственном узловом аэропорте, сети второго типа – на нескольких.

Термины «узловой аэропорт» и «хаб», часто используемые как синонимы, не идентичны по смыслу. В современной специальной и популярной литературе понятие «хаб» используется в нескольких значениях, перечисленных ниже.

Во-первых, в США словом «хаб» традиционно обозначается любой большой аэропорт. В частности, FAA США определяет как «хаб» любой американский аэропорт, обслуживающий не менее 0.05% общего пассажиропотока США. В этом смысле к «хабам» в США на 2006 г. относятся 140 аэропортов. В свою очередь они подразделяются на «малые», «средние» и «большие» «хабы». В первую категорию включены аэропорты, обслуживающие от 0.05% до 0.2499% общего пассажиропотока США, во вторую – от 0.25% до 0.9999%, в третью – более 1%. По данным FAA за 2006 г. категория «малых хабов» насчитывает 73 аэропорта, «средних хабов» – 37 аэропортов, «больших хабов» – 30 аэропортов [31]. Зачастую в понятие «хаб» включают любой значительный аэропорт, необязательно находящийся в пределах США. В этом смысле все крупные аэропорты являются «хабами». Список 30 аэропортов, занявших в 2008 г. лидирующие позиции в мировом рейтинге по пассажирообмену, приведен в табл. 1.2.1. Здесь же указано число взлетно-посадочных операций (ВПО), произведенных в аэропорту в 2008 г.

Изменение положения аэропортов в рейтинге отражено на рис. 1.2.1. Последние годы ознаменованы бурным развитием азиатских аэропортов, которые все прочнее занимают ведущие места в общемировом списке. Однако называть их в полном смысле узловыми пока преждевременно, по причине малой доли трансферных корреспонденций по сравнению с американскими и западноевропейскими хабами.

Список аэропортов с наиболее интенсивными грузопотоками значительно отличается от приведенного в табл. 1.2.1. По результатам 2008 г. первые пять мест в нем между аэропортами распределились следующим образом: Мемфис (США) – 3.69 млн т; Чек Лап Кок (Гонконг) – 3.66 млн т; Пудонг (Шанхай, КНР) – 2.60 млн т; Инчон (Сеул, Юж.Корея) – 2.42 млн т; Тед Стивенс (Анкоридж, США) – 2.34 млн т.

Во-вторых, зарубежные источники главным образом популярного и публицистического характера называют «хабами» той

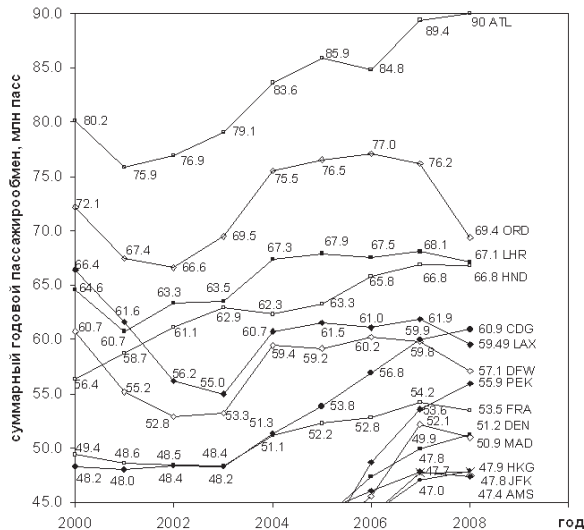


Рис. 1.2.1. Изменение пассажирообмена ведущих аэропортов в 2000-2008 гг.

или иной авиакомпании аэропорты их базирования, вообще не принимая во внимание их масштаб, особенности потоков корреспонденций и расписания [29].

В-третьих, термин «хаб» используется в исходном смысле, обозначая аэропорт с большой долей трансферных корреспонденций, имеющий скоординированное расписание. Далее в работе аэропорты, соответствующие этому значению термина «хаб», называются узловыми аэропортами.

Наконец, в-четвертых, «хаб» используется для обозначения трансферного авиаузла – города или городской агломерации с несколькими близко расположенными аэропортами и развитой транспортной структурой, работающими по обеспечению трансферных авиаперевозок как единая система. Примером «хаба» в таком смысле может служить Лондон, обладающий пятью международными аэропортами, которые стремятся функционировать как целостная система. Далее такого рода «хабы» называются трансферными авиаузлами.

Табл. 1.2.1.

Ведущие мировые аэропорты

Аэропорт (город, страна)	Код ИАТА	Пассажирообмен		Число ВПО	
		Ранг	млн пасс	Ранг	тыс.
им. Харгсфилда-Джексона (Атланта, США)	ATL	1	90.039	1	978.8
О'Хара Международный (Чикаго, США)	ORD	2	69.354	2	881.6
Хитроу (Лондон, Великобритания)	LHR	3	67.056	13	487.5
Ханеда (Токио, Япония)	HND	4	66.755	н/д	н/д
им. Ш.де Голля (Париж, Франция)	CDG	5	60.875	8	559.8
Международный (Лос-Анджелес, США)	LAX	6	59.498	4	622.5
Даллас-Форт-Уорт (США)	DFW	7	57.093	3	656.3
Международный (Пекин, КНР)	PEK	8	55.937	21	431.7
Франкфурт-на-Майне (ФРГ)	FRA	9	53.467	12	485.8
Международный (Денвер, США)	DEN	10	51.245	5	619.5
Баракас (Мадрид, Испания)	MAD	11	50.824	14	469.4
Чек Лап Кок (Гонконг)	HKG	12	47.858	н/д	295.6 ¹
им. Дж.Ф. Кеннеди (Нью-Йорк, США)	JFK	13	47.808	18	441.4
Схипхол (Амстердам, Нидерланды)	AMS	14	47.430	17	446.6
МакКаран (Лас-Вегас, США)	LAS	15	43.209	6	578.9
им. Дж.Буша (Хьюстон, США)	IAH	16	41.709	7	576.1
Скай Харбор (Финикс, США)	PHX	17	39.891	10	502.5
Суварнабхуми (Бангкок, Таиланд)	BKK	18	38.603	н/д	256.1
Чанги (Сингапур)	SIN	19	37.695	н/д	197.8
Дубай (ОАЭ)	DXB	20	37.441	н/д	260.5
Международный (Сан-Франциско, США)	SFO	21	37.235	24	387.7
Международный (Орlando, США)	MCO	22	35.661	н/д	302
Либерти (Ньюарк, США)	EWR	23	35.361	19	434.4
Вейн Кантри (Детройт, США)	DTW	24	35.136	15	462.5
им. Л.да Винчи (Рим, Италия)	FCO	25	35.132	н/д	346.7
Шарлотта-Дуглас (Шарлотта, США)	CLT	26	34.739	9	536.3
им. Ф.Й. Штраусса (Мюнхен, ФРГ)	MUC	27	34.531	20	432.3
Гатвик (Лондон, Великобритания)	LGW	28	34.215	н/д	≈ 250.0
Международный (Майями, США)	MIA	29	34.064	29	371.5
Международный (Миннеаполис – Сент-Пол, США)	MSP	30	34.056	16	450.0

¹ данные 2007 г.

Классификация узловых аэропортов. К настоящему времени в литературе описано несколько систем классификации узловых аэропортов. Документами ИКАО определены типы узловых аэропортов, которые можно сгруппировать по следующим признакам [2].

Классификация хабов по виду обслуживаемых корреспонденций:

1. Пассажирские узловые аэропорты (passenger hub), к которым относится большинство хабов. Далее основное внимание уделено хабам этого типа. Многие узловые аэропорты, при их преимущественно пассажирском характере, располагают значительными мощностями по обслуживанию других видов корреспонденций.

2. Грузовые узловые аэропорты (cargo hub), т.е. аэропорты, где предусмотрены средства для беспрепятственных и быстрых стыковок и перегрузки авиационных грузов.

3. Почтовые узловые аэропорты (postal hub; mail hub), т.е. аэропорты, служащие в качестве транзитного центра для почтовых отправок.

4. Смешанные узловые аэропорты (inter-modal hub; multi-modal hub), т.е. узловые аэропорты, позволяющие осуществлять удобные стыковки или перегрузку корреспонденций с одного вида транспорта на другой.

Классификация по охвату обслуживаемых регионов:

1. Крупные узловые аэропорты (major hub) – крупнейшие аэропорты, обслуживающие несколько авиакомпаний с большим количеством стыковочных рейсов большой протяженности, обычно они расположены центрально относительно густонаселенных районов, порождающих интенсивные транспортные потоки. Несколько наиболее крупных мировых узловых аэропортов получили название мега- или суперузловых аэропортов (mega-hub; super-hub).

В рамках категории крупных узловых аэропортов в свою очередь могут быть выделены две категории. В первой из них базируются авиакомпании, обеспечивающие глобальную сеть с большим выбором направлений перевозок и высокой частотой рейсов. Ряд таких аэропортов принадлежит к разряду мегахабов. В Западной

Европе к ним относятся трансферные авиаузлы Лондона и Парижа, узловые аэропорты Франкфурт-на-Майне, Схипхол (Амстердам), Барахас (Мадрид). В США это узловые аэропорты Атланта, О'Хара (Чикаго), Интернэшнл (Лос-Анджелес) и трансферный авиаузел Нью-Йорка (аэропорты им. Дж. Кеннеди и Ньюарк). В странах Персидского залива и Азиатско-Тихоокеанского региона это аэропорты городов Дубай, Доха, Бангкок, Гонконг, Сеул и Сингапур, в которых при очень высоких общих показателях доля трансферных перевозках пока ниже, чем в западноевропейских или североамериканских хабах.

Узловые аэропорты второй, более низкой категории, предлагают глобальную сеть меньшего охвата или специализируются на обслуживании определенного сегмента авиатранспортного рынка. К ним относятся такие аэропорты, как например, Сан-Франциско, Торонто, Вашингтон в Северной Америке; Копенгаген, Милан (с 1999 по 2008 г.), Мюнхен, Вена, Цюрих в Западной Европе; Куала-Лумпур, Осака, Шанхай, Сидней в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Яркие примеры специализированных хабов представляют аэропорты Швехат (Вена) и Каструп (Копенгаген). Первый из них является узловым аэропортом авиакомпании *Austrian* – национального перевозчика Австрии. Эта авиакомпания эффективно разрабатывает нишу авиарынка, связанную с перевозками между странами Восточной и Западной Европы. Второй – узловой аэропорт *SAS* – объединенной авиакомпании трех скандинавских стран: Швеции, Норвегии и Дании, входящей в глобальный альянс *Star Alliance*. *SAS* и другие члены альянса используют аэропорт Копенгагена в качестве пункта трансфера пассажиров в регионе Скандинавии и Балтийского моря.

2. Региональные узловые аэропорты (*regional hub*) – узловые аэропорты, которые обслуживают регион государства или регион, включающий несколько государств. Сравнительно небольшие аэропорты, предлагающие региональные связи в пределах специализированных рынков, оказались особенно популярными в Западной Европе. К ним относятся, например, аэропорты городов Лион, Прага, Стокгольм и др., имеющие существенную долю пассажиров, совершающих пересадку между местными рейсами и рейсами средней протяженности.

Классификация узловых аэропортов по отношению к системе перевозок «втулка-спицы» авиакомпаний, использующих эти аэропорты:

1. Узловые аэропорты интерлайна (interline hub) – узловые аэропорты, в которых осуществляется стыковка рейсов и посадка трансферных пассажиров между рейсами различных перевозчиков.

2. Узловые аэропорты авиакомпании (on-line hub) – узловые аэропорты, в которых осуществляется стыковка и трансфер между различными рейсами одного перевозчика.

Узловые аэропорты авиакомпаний по функциям, выполняемым в рамках многоузловых сетей, могут быть классифицированы следующим образом [2, 32]:

1. Первичные узловые аэропорты (Primary hubs) – узловые аэропорты, выполняющие функции центра сети авиакомпании. Большинство из них относятся к категории крупных узловых аэропортов.

2. Вторичные узловые аэропорты (Secondary hubs) – вспомогательные узловые аэропорты, создаваемые перевозчиками. Многие региональные аэропорты исполняют функции вторичных хабов авиакомпании. Они играют роль концентратора потоков авиакорреспонденций из малых аэропортов обслуживаемого региона, направляемых в первичный хаб и обратно.

3. «Минихабы» (mini-hub) – малые региональные узловые аэропорты, обслуживающие небольшое число направлений, называемые иногда также «фокус-сити» (focus-city). Здесь следует отметить, что использование для обозначения малого хаба термина «фокус-сити» не вполне корректно. Дело в том, что последнее название, заимствованное из сферы американского авиабизнеса, изначально означает второстепенный аэропорт базирования самолетов авиакомпании. В отличие от основного аэропорта – хаба авиакомпании, в котором она организует систему стыковок рейсов и из которого рейсы выполняются с большой частотой по многим направлениям, в «фокус-сити» расписание, как правило, не координируется, частоты выполнения рейсов значительно ниже, и сами рейсы обслуживаются меньшими региональными самолетами. По этим причинам доля трансфера в «фокус-сити»

незначительна, что не позволяет причислять аэропорты данной категории к хабам.

4. Узловые аэропорты второй страны (*second country hub*) – узловые аэропорты, создаваемые авиаперевозчиком в иностранном государстве и обычно позволяющие ему осуществлять взаимосвязь между различными пунктами в своей стране или различными пунктами третьих стран.

Большая часть перевозчиков, строящих многоузловые сети, являются авиакомпаниями США. Например, хабами авиакомпании *US Airways* являются аэропорты МакКаран (Лас-Вегас), Дуглас (Шарлотта), Филадельфия, Скай-Харбор (Финикс). В качестве «фокус-сити» используются Логан (Бостон), Питтсбург, им. Рейгана (Вашингтон), Форт Лаудердейл. Большинство европейских авиакомпаний имеют единственный хаб, а если и создают многоузловые сети, то посредством использования возможностей альянса или других форм партнерства. Так, первичными хабами авиакомпании *Lufthansa* являются Франкфурт-на-Майне и, с 2002 г., Мюнхен. Вторичный хаб *Lufthansa* – Цюрих, является узловым аэропортом авиакомпании *Swiss*, партнера *Lufthansa* по альянсу *Star Alliance*. В данном случае Цюрих выступает для *Lufthansa* в роли узлового аэропорта второй страны.

Еще одним признаком, используемым в зарубежных работах для классификации узловых аэропортов является ***наличие (или отсутствие) выраженной пространственной направленности сети воздушных перевозок***, формируемой на базе аэропорта. По этому признаку узловые аэропорты разделяются на два типа, для которых в работах [33-35] предложены названия, для первого типа – «направленные» хабы (или «песочные часы») и для второго – «всенаправленные» (или хабы «внутренних районов»).

Направленным считается хаб, расположенный между двумя группами периферийных аэропортов, пассажиры из которых делают в нем пересадку. К этому типу относится целый ряд крупнейших узловых аэропортов США, в которых производятся пересадки пассажиров, перевозимых между аэропортами густонаселенных районов восточного и западного побережий. Это такие аэропорты как Даллас – Форт-Уорт (хабообразующая компания *American Airlines*), О'Хара, (*United Airlines* и *American*

Airlines), Хьюстон (*Continental Airlines*), Миннеаполис-Сент-Пол (*NorthWest*), Денвер (*United Airlines*), Солт-Лейк-Сити (*Delta Airlines*) и др. [36]

Наряду с хабами, специализирующимися на направлении Запад-Восток, ряд ведущих американских аэропортов обеспечивают перевозки в направлении Север-Юг, которые особенно востребованы в восточных штатах США. Кроме того, это перевозки между США и Мексикой, а также странами Карибского бассейна. К аэропортам указанного направления относятся Майами (*American Airlines*), Шарлота-Дуглас (*US Airways*), отчасти Атланта (*Delta*) и ряд других.

Авиакомпании, использующие направленные хабы, строят свою маршрутную сеть таким образом, чтобы полеты начинались в периферийном аэропорту «по одну сторону» от хаба, а заканчивались «по другую сторону» от него (рис. 1.2.2а). Такая схема повышает трансферный потенциал хаба, но приводит к росту расходов на базирование авиапарка в периферийных аэропортах.

Всенаправленным является хаб, в котором производятся стыковки дальних, в том числе международных и региональных рейсов из окружающих хаб аэропортов. Сеть авиалиний не имеет какого-либо преимущественного направления, поэтому хаб называется «всенаправленным» (рис. 1.2.2б). К этому типу относятся многие европейские аэропорты, например, Хитроу (Лондон), им. Ш. де Голля (Париж), Схипхол (Амстердам).

Отмечается, что для обслуживания сети направленного хаба требуется авиапарк, состоящий из самолетов одного или нескольких сходных типов [37]. Для всенаправленного хаба нужен гораздо более разнообразный авиапарк. В настоящее время традиционное четкое различие между американскими направленными и европейскими ненаправленными хабами заметно стирается [29].

Показатели эффективности хаба. Для количественной оценки эффективности функционирования аэропорта в качестве хаба предложен ряд показателей [38], три из которых можно считать наиболее значимыми:

1. **Пассажиروобмен.** Является важной характеристикой любого аэропорта, не только узлового, позволяющей оценить его масштаб. Представляет собой суммарное количество всех прилетающих и

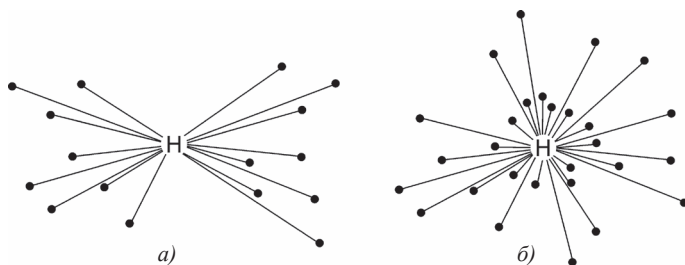


Рис. 1.2.2. Виды хабов:

а) направленный хаб; б) всенаправленный хаб

вылетающих пассажиров, обслуженных аэропортом за определенный промежуток времени, за исключением прямого транзита.

2. Доля трансферных пассажиров в общем пассажирообмене. Важнейший показатель, позволяющий сделать выводы о привлекательности аэропорта для пересадок, эффективности его работы в качестве хаба и возможности его отнесения к этой категории. Величина показателя определяется только с учетом отправленных пассажиров, либо также с учетом прибывших:

$$D = \frac{T}{H + T} \quad \text{или} \quad D = \frac{2T}{H + K + 2T},$$

где D – доля трансферных пассажиров;

T, H, K – число трансферных, первоначальных и конечных пассажиров, обслуженных аэропортом в единицу времени, соответственно.

Наибольшего значения D достигает для американских хабов. Например, аэропорт Атланта характеризуется долей трансфера около 65% [39], у некоторых других аэропортов значение еще выше.

Анализ характера изменения названных параметров за последние годы для нескольких, главным образом европейских аэропортов, приведенных в табл. 1.2.2, позволяет сделать некоторые выводы.

Аэропорт Хельсинки, позиционируемый авиакомпанией *Finnair* в качестве собственного хаба, вряд ли может быть отнесен к аэропортам этой категории по причине низкой доли трансфера.

Непростое положение авиакомпании *Swiss* отражается на состоянии трансферных перевозок в аэропорту Цюрих. Напротив, активная политика авиакомпании *Austrian Airlines* по привлечению трансферных пассажиров сказалась на росте их числа в аэропорту Вены.

Табл. 1.2.2.

**Изменение пассажирообмена
(млн пасс., в числителе) и доли трансферных пассажиров
(%, в знаменателе) узловых аэропортов за 2000-2007 гг.**

Аэропорт (город)	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Солт-Лейк-Сити	н.д. / н.д.	18.8 / 43	18.7 / 46	18.5 / 45	18.4 / 41	н.д. / н.д.	21.7 / 43	н.д. / н.д.
Швехат (Вена)	11.9 / 28	11.9 / 32	12.0 / 35	12.8 / 34	14.8 / 34	15.9 / 34	16.9 / 34	18.8 / 32
Вантаа (Хельсинки)	6.2 / 6	6.1 / 6	5.5 / 6	5.4 / 6	5.7 / 6	5.6 / 6	5.8 / 7	5.7 / 7
Мюнхен	23.1 / 27	23.6 / 29	23.2 / 31	24.2 / 31	26.8 / 33	28.6 / 34	30.8 / 34	34.0 / 35
Франкфурт-на- Майне	49.4 / 50	48.6 / н.д.	48.5 / 53	48.4 / 54	51.1 / 53	52.2 / 54	52.8 / 53	54.2 / 53
Схипхол (Амстердам)	39.3 / 42	39.3 / 41	40.6 / 42	39.8 / 41	42.4 / 42	44.1 / 42	46.0 / 42	47.7 / 41
им. Ш. де Голля (Париж)	48.3 / н.д.	48.0 / н.д.	48.4 / н.д.	48.2 / н.д.	51.3 / 31	53.8 / 32	56.8 / 35	59.9 / 32
Каструп (Копенгаген)	18.1 / 45	18.1 / 46	18.3 / 46	17.7 / 42	19.0 / 37	20.0 / 33	20.9 / 30	21.4 / 27
Клотен (Цюрих)	22.6 / 44	21.0 / 43	17.9 / 38	17.0 / 35	17.2 / 28	17.8 / 30	19.2 / 32	20.7 / 34
Хитроу (Лондон)	64.3 / 31	60.5 / 32	63.0 / 38	63.2 / 37	67.1 / 37	67.7 / 36	67.3 / 35	67.9 / 35
Гатвик (Лондон)	31.9 / 22	31.1 / 20	29.5 / 19	29.9 / 17	31.4 / 17	32.7 / 17	34.1 / 14	35.2 / 13
Стенстед (Лондон)	11.8 / 5	13.6 / 7	16.0 / 10	18.7 / 15	20.9 / 14	22.0 / 12	23.7 / 11	23.8 / 9
Весь аэроузел, Лондон (доля транс- фера)	23	23	27	26	25	24	22	21

В случае лондонского трансферного авиаузла величина доли трансфера приведена как для авиаузла в целом, так и для его крупнейших аэропортов. Некоторое уменьшение доли трансферных пассажиров в аэропорту Хитроу объясняется его перегруженностью, а довольно резкое падение этого показателя в аэропорту Гатвик связано с переносом авиакомпанией *British Airways* стыковочных рейсов в Хитроу. В настоящее время Гатвик активно используется чартерными авиакомпаниями, которые не обслуживаются в Хитроу, а также бюджетными авиакомпаниями. Последними также используется аэропорт Стенстед. Таким образом аэропорты Лондона взаимодополняют друг друга, формируя единый авиаузел [40].

3. Функция хаба. Показатель, характеризующий степень связности хаба с периферийными аэропортами, определяется по следующей формуле:

$$F = \frac{\sum_i C_i}{N_A - 1}, \quad i = 1, \dots, N_A,$$

где N_A – общее число аэропортов сети, включающей хаб;

C_i – переменная, принимающая значение, равное 1, если пассажиры i -го аэропорта используют хаб для пересадки, и – значение, равное 0, если – не используют.

Для корректности анализа рассматриваются только те аэропорты, пассажиропоток между которыми и хабом превышает некоторый заданный уровень. Очевидно, чем больше число аэропортов, пассажиры которых используют хаб для пересадки, тем выше значение функции хаба.

В работе [38] определены значения функции F для 25 ведущих хабов – аэропортов и трансферных аэроузлов, подсчитанные по статистическим данным докризисных месяцев 2001 г. За прошедшее время положение несколько изменилось, однако приведенные значения для 10 хабов, занимавших лидирующее положение по рассматриваемому показателю, позволяют составить общее представление о его уровне: Чикаго – 0.24, Атланта, Лондон, Франкфурт-на-Майне – 0.23, Амстердам – 0.22, Париж – 0.19, Даллас – 0.18, Нью-Йорк, Хьюстон – 0.17, Цюрих – 0.16.

1.3. Мировой опыт формирования системы перевозок с использованием узловых аэропортов

Анализ развития и функционирования зарубежных хабов позволяет выделить совокупность предпосылок объективного характера, наличие которых дает возможность аэропорту рассчитывать на увеличение доли трансферных перевозок [41, 42].

Предпосылки формирования всеерной схемы перевозок:

1. Удобное геополитическое и географическое положение аэропортов. Крупнейшие европейские и азиатские хабы являются либо столицами государств (Лондон, Париж, Мадрид, Амстердам, Токио), либо центрами экономически развитых регионов (Франкфурт-на-Майне, Сингапур). Хабы США – это либо аэропорты крупнейших городов (Нью-Йорк, Лос-Анджелес, Чикаго, Даллас, Атланта), либо пункты пересечения потоков авиакорреспонденций. С одной стороны, эти потоки сами формируются авиакомпаниями, базирующимися в хабах, однако, с другой – авиаперевозчики стремятся использовать в качестве хабов аэропорты, естественным образом расположенные в точках пересечения логистических потоков. В частности, поэтому целый ряд крупнейших хабов США являются аэропортами городов с относительно скромной численностью населения, таких как Шарлота (0.6 млн жителей), Цинциннати (2 млн), Питтсбург (2.4 млн), Феникс (1.4 млн), Солт-Лейк-Сити (1 млн) и др. Большинство пассажиров прибывают в аэропорты этих городов только для пересадки, сами города не являются для них целью полета. Это особенно характерно для первых трех из перечисленных выше аэропортов, в которых доля трансфера доходит до 70-75% [38]. Интересным примером небольшого хаба, эффективно использующего свое удачное положение на пересечении воздушных трасс,

является аэропорт столицы Исландии – Рейкьявика. При весьма незначительном, в сравнении с другими европейскими хабами, пассажирообмене, его доля трансфера превышает аналогичный показатель для таких крупных узловых аэропортов, как О’Хара и Схипхол. Преимущество положения большинства хабов проявляется в размещении их в месте контакта двух или нескольких крупных рынков авиаперевозок. Так, аэропорт Майами обслуживает перевозки между двумя густонаселенными регионами мира – США и странами Латинской Америки; аэропорт Бараксас (Мадрид) – между Европейскими и Латиноамериканскими странами, тяготеющими к испанской культуре, причем часть пассажиропотока была «оттянута» им у Майямы, как более дорогого по услугам аэропорта; аэропорт Праги – между странами Западной и Восточной, а также Центральной частей Европы. Эти примеры можно продолжить.

2. Высокие емкость и развитость внутреннего и международного рынков авиаперевозок, наличие значительного местного спроса на перевозки из хаба. Выше одной из главных предпосылок образования хабов назывались либерализация и дерегулирование индустрии авиаперевозок. Однако глубинной причиной и движущей силой процессов, приведших к формированию системы хабов, явился рост спроса на авиаперевозки, который с разной степенью интенсивности охватил все регионы мира. Развитие хабов стало одним из шагов авиаперевозчиков с целью удовлетворения растущего спроса без чрезмерных капиталовложений на расширение авиапарка. Значительные и устойчивые потоки авиакорреспонденций существенно повышают эффективность работы авиакомпании, использующей хаб.

Не случайно процесс формирования хабов был инициирован авиакомпаниями США – страны с наиболее высокими объемными показателями рынка авиаперевозок. До настоящего времени наиболее крупные хабы – это аэропорты США (табл. 1.2.1), которые опережают аэропорты других государств не только по показателям, но и по пройденным ими этапам эволюции. Вторым регионом, развивающим хабы, стала Западная Европа. Затем, с ростом авиаперевозок, вызванным экономическим ростом, этот процесс охватил Юго-Восточную Азию, где за последние 10-15 лет был

введен в эксплуатацию целый ряд больших аэропортов в таких городах, как Гонконг, Куала-Лумпур, Осака, Нагоя, Сеул, Бангкок. Несмотря на большое число загруженных аэропортов в этом регионе, только три из них приближаются к американским и европейским хабам по относительному уровню трансферных перевозок, это – Чек-Лап-Кок (Гонконг) (доля трансферных пассажиров – 20%), Сингапур (16%) и Инчон (Сеул) (12.2%). Такая ситуация объясняется политикой авиакомпаний региона. Только три из них, а именно *Cathay Pacific*, *Singapore Airlines* и *Korean Air*, целенаправленно и эффективно строят сеть своих авиалиний с учетом стыковок в хабе [32].

С первых лет XXI в. серьезную конкуренцию хабам Западной Европы и Юго-Восточной Азии начали создавать аэропорты стран Персидского залива – ОАЭ и Катара. Быстро растущие авиакомпании этих стран успешно развивают свои базовые аэропорты Дубай, Абу-Даби и Доха не только как привлекательные туристические направления, но и как пункты трансфера пассажиров из Западной Европы в страны Азии и Австралию [43]. За последние годы произошел скачок в объемах перевозок в КНР, что нашло отражение в росте показателей аэропорта Пекина (рис. 1.2.1). В настоящее время крупнейшие китайские аэропорты, такие как Пекин по Шанхай, вполне соответствуют крупнейшим мировым хабам, однако доля трансфера в них незначительна. Тем не менее, в планах китайских авиакомпаний превращение аэропорта Пекин в трансферный узел.

3. Удачные климатические и погодные условия. Сбойные ситуации, связанные с ухудшением метеорологической обстановки, приводящие к нарушениям регулярности прибытий и отправок рейсов, крайне негативно влияют на работу узлового аэропорта, нарушая систему стыковок рейсов. Это приводит, в частности, к массовым опозданиям на стыковочные рейсы трансферных пассажиров, что ставит под сомнение эффективность данного аэропорта. Значимость этого фактора явствует из следующего примера. Одним из конкурентных преимуществ хаба в г. Дубай (ОАЭ), по мнению его топ-менеджмента, является хорошая погода в этом регионе в течение 99.9% всего времени [43].

Требования к узловому аэропорту. Для эффективного функционирования аэропорта в роли хаба необходимо, чтобы сам аэропорт и авиакомпании, развивающиеся на его основе, обеспечивали выполнение ряда определенных требований, предъявляемых к узловым аэропортам. Важнейшие требования рассмотрены ниже.

1. Высокая пропускная способность аэродрома. Аэродром – ключевая подсистема, обеспечивающая пропускную способность аэропорта. В связи с волновым принципом работы узлового аэропорта аэродром должен обеспечивать возможность приема и последующего выпуска большого числа самолетов в течение кратких промежутков времени. В крупнейших узловых аэропортах, которые отказались от волновой системы, интенсивность потоков вылетающих и прилетающих самолетов очень велика в течение большей части суток. В любом случае, чем больше самолетов способен принять и выпустить аэродром узлового аэропорта в малый интервал времени, тем больше пассажиров получают возможность совершить пересадку в этом аэропорту и, соответственно, тем более высоким трансферным качеством обладает этот аэропорт.

Пропускная способность аэродрома зависит от комплекса факторов, среди которых важнейшие [44]: тип эксплуатируемых ВС и режим их полета; планировка и размеры аэродрома; количество, взаиморасположение и длины ИВПП; степень развития магистральных и соединительных рулежных дорожек, наличие и характеристики средств посадки и управления воздушным движением; ограничения, связанные с допустимым уровнем шума в районе аэропорта; взлетно-посадочные характеристики ВС и возможности бортового оборудования их навигационных систем; местные метеоусловия и высота расположения аэродрома и др. Некоторые из перечисленных характеристик для ряда узловых аэропортов США и Западной Европы приведены в табл. 1.3.1.

Для узловых аэропортов нормой является наличие нескольких ИВПП, из которых хотя бы одна оснащена средствами инструментальной посадки, соответствующими категории III ИКАО. Единственным аэропортом, входящим в тридцатку наиболее загруженных мировых аэропортов (табл. 1.2.1) и оснащенным

только одной ИВПП, является Гатвик (Лондон), однако в настоящее время доля трансфера в нем незначительна. Повышает пропускную способность аэропорта наличие независимых ИВПП, разнесенных на необходимое расстояние. Это особенно характерно для аэропортов США, в целом менее ограниченных в вопросе наличия свободных площадей по сравнению европейскими аэропортами. Табл. 1.3.1 содержит значения пропускной способности аэродромов ряда узловых аэропортов США [45] и Западной Европы, определенные для нормальных погодных условий.

2. Высокая пропускная способность производственных комплексов аэропорта. Мощности аэропортовых комплексов должны быть достаточными для обеспечения быстрого, безопасного и качественного наземного обслуживания потоков пассажиров, грузов и ВС. Важным с точки зрения работы узлового аэропорта достоинством современных ВС являются относительно малые затраты времени, требующиеся для их оперативно-технического обслуживания. При наличии необходимых сил и средств длительность подготовки к вылету в промежуточном аэропорту, даже для такого гиганта, как А-380, не превышает 2 ч. Для самолетов меньшего класса она значительно меньше.

Высокая пропускная способность пассажирского комплекса узлового аэропорта, как правило, достигается использованием нескольких терминалов, каждый из которых может включать помимо основного здания несколько посадочных галерей, сателлитов и т.д. Современные пассажирские терминальные комплексы представляют собой не только масштабные архитектурные, но и сложные инженерные сооружения. Характеристики пассажирских комплексов нескольких узловых аэропортов приведены в табл. 1.3.1.

Одним из показателей качества обслуживания трансферных пассажиров в узловом аэропорту является Минимальное стыковочное время (Minimum Connection Time, МСТ). МСТ – это минимальное время, за которое аэропорт пересадки и авиакомпания-перевозчик гарантируют обслуживание пассажира и обработку его багажа при осуществлении трансферной перевозки. Очевидно, привлекательность такой поездки для трансферного пассажира возрастает с сокращением времени пересадки, поэтому узловые аэропорты, способные обеспечить малые МСТ, обладают

Табл. 1.3.1.

**Характеристики пропускной способности
комплексов узловых аэропортов**

Аэропорт (город)	Площадь аэропорта, га	Количество ИВПП	Конфигурация ИВПП	Число мест стоянки (МС) ВС	Пропускная способность аэродрома, ВПО/ч	Пропускная способность пассажирского комплекса, млн пасс./год	Число пассажирских терминалов	Общая площадь пассажирских терминалов, тыс. м ²	Число мест регистрации пассажиров	Число выходов на посадку	Число телеграфов
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Схипхол (Амстердам)	2787	5	2 парал. независимые, 3 зависимые пересекающиеся	196	108	45	3	н/д	380	105	87
Каструп (Копенгаген)	1180	3	2 парал. независимые, 1 пересекающаяся	97	83	22	3	н/д	80	90	47
им. Ф.Й. Штраусса (Мюнхен)	1570	2	парал., независимые	135	85	50	2	460	275	142	47
Швехат (Вена)	1000	2	пересекающиеся	85	72	16.5	3	100	134	65	20
Франкфурт-на-Майне	1900	3	2 парал. зависимые; 1 пересекающаяся	187	82	60	2	400	481	147	63
им. Ш. де Голля (Париж)	3238	4	парал, 4 попарно зависимые	212	120	60	8	н/д	420	95	85
им. Хартсфилда-Джексона (Атланта)	1518	5	парал., 4 попарно зависимые	н/д	235	63.3	2	540	124	196	180
Хитроу (Лондон)	1214	2	парал. независимые	195	84	76 ¹	5 ²	680 ¹	н/д	н/д	112
Клотен (Цюрих)	880	3	зависимые, 2 пересекающиеся	50	66	30-40	3	120	207 ³	61	37
Даллас-Форт-Уорт	7315	7	5 парал. из них 4 попарно зависимые; 2 парал. пересекающиеся зависимые	174	279	65	5	н/д	н/д	174	174

¹ вместе с терминалом 5;

² терминал 5 достигнет проектной пропускной способности в 2011 г.;

³ в т.ч. 42 киоска для самостоятельной регистрации.

конкурентными преимуществами. Величина МСТ для международной перевозки, как правило, выше, что объясняется наличием большего числа процедур по обслуживанию пассажиров и обработке их багажа. В аэропортах с несколькими терминалами она различна для разных терминалов. Если перевозка предполагает трансфер пассажира между терминалами одного аэропорта или между аэропортами одного аэроузла, то величина МСТ существенно возрастает. Значения МСТ для ряда зарубежных узловых аэропортов, полученные по материалам сети Интернет, приведены в табл. 1.3.2. Заметна тенденция к некоторому увеличению МСТ с увеличением масштаба аэропорта.

Основными путями снижения МСТ являются объединение потоков трансферных пассажиров в одном терминале, внедрение специализированных информационных технологий, использование современных систем сортировки багажа, использование транспортных систем для перевозок пассажиров внутри и между терминалами и др.

Объединение в одном терминале всех потоков пассажиров одной авиакомпании или альянса позволяет уменьшить расстояния перемещения пассажиров и багажа, более эффективно использовать персонал и оборудование, упростить организационные и технологические схемы обслуживания. Часто для этого базирующаяся авиакомпания не только инициирует строительство нового терминала или расширение существующих, но и инвестирует в это значительные средства. Последние годы ознаменовались целым рядом открытий крупных терминальных комплексов, построенных для отдельных авиакомпаний или их альянсов и с их участием.

Приведем ряд примеров. В 2002 г. был введен в эксплуатацию второй терминал в аэропорту Мюнхена, предназначенный для обслуживания только трансферных пассажиров авиакомпании *Lufthansa* и ее партнеров по альянсу *Star Alliance*. Обслуживание нетрансферных пассажиров переведено в существующий «старый» терминал. Такая схема позволила обеспечить одно из самых малых значений МСТ – около 30 мин (см. табл. 1.3.2). Около 50% расходов на строительство, общей стоимостью 1.5 млрд евро, составили средства *Lufthansa*. Пропускная способность второго терминала 25 млн пасс./год [46].

Табл. 1.3.2.

Значения МСТ для ряда зарубежных аэропортов

Город	Аэропорт(ы) / терминал(ы) пересадки	Код ИАТА	МСТ для пересадки, мин				Расстояние от города или между аэропортами, км	Пассажи-рообмен (2006 г.), млн пасс.
			ВВЛ-ВВЛ	ВВЛ-МВЛ	МВЛ-ВВЛ	МВЛ-МВЛ		
Денвер	Международный	DEN	50	60	60	60	23	47.3
Франкфурт-на-Майне	Франкфурт-на-Майне	FRA	45	45	45	45	6	52.8
Хельсинки	Вантаа	HEL	20	30	40	35	12	12.1
Хьюстон	Международный им. Дж. Буша	IAH	45	60	60	75	20	42.5
	Хобби	HOU	20	-	-	-	8	8.5
	IAH ↔ HOU		120	180	180	-	28	
Куала-Лумпур	Международный	KUL	60	60	60	60	32	24.1
Лондон	Хитроу / 1	LHR	45	45	45	45	15	67.5
	Хитроу / 2,3	LHR	-	-	-	60		
	Хитроу / 4	LHR	-	-	-	45		
	LHR 1 ↔ LHR 2		-	70	75	75		
	LHR 4 ↔ LHR 1		-	-	75	60	27	34.1
	Гатвик / Южный	LGW	40	45	60	55		
	Гатвик / Серверный	LGW	45	45	45	45		
	LGW Ю. ↔ LGW С.	LGW	75	75	75	75		
	Стэнстед	STN	45	45	45	45		
	Сити	LCY	30	30	30	30	6	2.4
	Лутон	LTN	20	60	60	60	31	9.4
	LHR ↔ LGW		150	150	150	150	42	
	LHR ↔ LTN		205	205	205	205	46	
LHR → LCY		210	210	210	210	21		
LHR ← LCY		180	180	180	180	21		
Амстердам	Схипхол	AMS	25	40-50	40-50	50	9	46.1
Атланта	им. Хартсфилда-Джексона	ATL	55	60	90	90	10	84.8
Бостон	Логан Международный	BOS	40	60	90	75	3	27.7
Чикаго	Мидуэй	MDW	25	60	60	-	11	18.7
	О'Хара Международный	ORD	50	75	75	90	18	77.0
	ORD ↔ MDW		160	160	160	160	29	
Копенгаген	Каструп	CPH	30	45	45	45	6	20.8
Даллас	Лав-Филд	DAL	20	-	-	-	6	6.9
	Даллас-Форт-Уорт Международный	DFW	50	50	70	70	12	60.2
Лос-Анджелес	Международный	LAX	70	90	120	120	10	61.0
Мадрид	Баракас	MAD	45	60	60	45	10	45.5
Майями	Международный	MIA	55	60	90	90	7	32.5
Мюнхен	им. Ф.И. Штраусса	MUC	30	30	30	30	28	30.7
Париж	им. Ш. де Голля	CDG	60	60	60	60	27	56.8

Летом 2003 г. в аэропорту им. Ш.де Голля (Париж) был открыт еще один терминал пропускной способностью до 10 млн пасс./год, получивший обозначение 2E, полностью предназначенный для нужд авиакомпании *AirFrance* и ее партнеров по альянсу *SkyTeam* [47].

Открытие в феврале 2006 г. в аэропорту Барахас (Мадрид) четвертого терминала общей площадью 760 тыс. м² позволило довести общую пропускную способность аэропорта до 70 млн пасс./год. Терминал используется авиакомпанией *Iberia* и другими членами альянса *Oneworld*. Одновременно с терминалом были введены в эксплуатацию две ИВПП, что позволило аэропорту стать одним из крупнейших европейских и мировых хабов [48].

В апреле 2008 г. в аэропорту Хитроу (Лондон) были открыты главное здание и один из двух сателлитов Терминала 5, имеющего полную пропускную способность около 31 млн пасс./год, названного крупнейшим сооружением Великобритании. Открытие терминала позволяет авиакомпании *British Airways* сконцентрировать все хабовые операции под одной крышей и избавиться от хронической нехватки площадей.

В случае, если пропускной способности одного терминала для обслуживания всех трансферных пассажиров недостаточно, для узлового аэропорта особое значение приобретает наличие высокоэффективных транспортных систем, позволяющих трансферному пассажиру при необходимости быстро переместиться из терминала прилета в терминал вылета. Современные аэропорты широко используют различные средства транспортировки пассажиров, начиная от традиционных эскалаторов и травелаторов, заканчивая автоматическими транспортными системами. Например, в аэропорту Атланта 6 обширных посадочных галерей связаны между собой подземными переходами, в которых размещена серия травелаторов и автоматизированная система перевозок пассажиров, перевозящая ежегодно около 65 млн пассажиров. Аэропорт Даллас-Форт-Уорт в 2005 г. ввел в эксплуатацию крупнейшую в мире аэропортовую систему скоростных поездов. Полностью автоматизированные поезда отправляются с частотой в несколько минут и идут со скоростью до 60 км/ч. Четыре терминала и автопаркинг аэропорта О'Хара связаны автоматической железнодорожной системой транспорти-

ровки пассажиров длиной 4.3 км. В аэропорту Цюриха 2 терминала связаны подземной железнодорожной системой для перевозки пассажиров *Skymetro* [49]. В конце 2007 г. аэропорт Хитроу начал использовать для перевозки между терминалами и другими объектами легкие четырехместные электромобили, перемещающиеся по специальным трассам со скоростью до 40 км/ч. Управление осуществляется автоматика, пассажирам достаточно указать лишь пункт назначения [50].

Повышение пропускной способности пассажирского комплекса и уменьшение затрат времени и средств на обслуживание пассажиров стали возможными благодаря внедрению в аэропортах целого ряда новых технологий, таких как применение киосков совместного использования для саморегистрации пассажиров (Common Use Self Services, CUSS), технология шрихового кодирования посадочных талонов, технология «сквозной» регистрации трансферных пассажиров и т.д. Все это – результат реализации авиакомпаниями в течение нескольких последних лет программы ИАТА по упрощению авиабизнеса, призванной сократить их расходы.

В настоящее время перечисленные технологии активно распространяются в аэропортах, в том числе узловых. Например, доля пассажиров, предпочитающих самостоятельную регистрацию, наиболее высока в крупнейших узловых аэропортах – в Атланта – 47%, Хитроу – 26%, Гонконге – 19% [51]. По некоторым прогнозам к 2012 г. эта величина может достичь 80%. Даже в таком, далеко не самом крупном хабе, как Цюрих, из 207 имеющихся мест регистрации – 42 представляют собой CUSS. В аэропорту Мюнхена европейские пассажиры настолько привыкли к киоскам CUSS, что обычными стойками пользуются преимущественно те из них, кому необходимо сдать багаж [46]. Наряду с CUSS авиакомпании и аэропорты широко предлагают пассажирам другие альтернативные способы прохождения регистрации, например, в городском аэровокзале, по телефону или сети Интернет, а также предварительную регистрацию за сутки до вылета.

Основой широкого распространения инновационных схем аэропортового бизнеса являются современные компьютерные сетевые технологии. Вообще, функционирование современного

крупного аэропорта, тем более узлового, невозможно без использования интегрированного комплекса информационных систем (ИС), образующих Информационно-управляющую систему аэропорта (Airport information Management System, AIMS). AIMS, создаваемая на базе локальных вычислительных сетей, включает в качестве подсистем следующие ИС [52].

Оперативную базу данных аэропорта (Airport Operation Data Base, AODB), предназначенную для хранения и обработки информации из баз данных сезонного расписания и суточного плана полетов о выполненных, текущих и планируемых прилетах и вылетах.

Систему отображения полетной информации (Flight Information Display System, FIDS), которая используется для визуального отображения данных AODB на мониторах для публики и персонала, что позволяет, в частности, снизить угрозу опоздания пассажира на рейс, повышает производительность труда персонала и т.п.

Систему автоматических объявлений, обеспечивающую формирование и одновременную подачу объявлений в различные зоны аэровокзала на большом количестве языков.

Систему управления отправлениями (Departure Control System, DCS), главными целями использования которой являются снижение затрат времени и большая гибкость при выполнении таких операций, как регистрация, контроль загрузки и управление рейсами. Использование DCS играет одну из ключевых ролей в организации сквозной регистрации, поскольку позволяет автоматизировать процедуру передачи информации о трансферном пассажире по всем сегментам его поездки. DCS автоматически формирует, передает и обрабатывает совокупность сообщений, сопровождающих рейс, в частности, PTM (Passenger Transfer Message) и BTM (Baggage Transfer Message) – телеграммы-сообщения о трансферных пассажирах и трансферном багаже, соответственно. По оценкам [52] применение DCS позволяет сократить длительность регистрации пассажира в 2 раза. По окончании регистрации ИС автоматически подводит ее итоги и распечатывает всю необходимую документацию. Это позволяет уменьшить необходимое число рабочих мест и количество

занятого персонала. Кроме того, наличие DCS делает возможным самостоятельную регистрацию пассажиров и регистрацию пассажиров без багажа с использованием киосков саморегистрации и мобильных стоек (например, в часы пик). DCS обеспечивает автоматическое считывание посадочных талонов на выходах на посадку с проверкой правильности времени и даты рейса, подсчетом количества пассажиров по классу и пункту назначения, записью имени или номера в список ИС. Такой контроль дает возможность поименно выявить не явившихся на посадку пассажиров и организовать оповещение по аэровокзалу с указанием фамилий, что заметно сокращает задержки рейсов.

Систему терминального оборудования общего пользования (Common Use Terminal Equipment, CUTE), представляющую собой интегрированную системную среду, обеспечивающую авиакомпаниям, обслуживаемым в аэропорту, удаленные подключения к информационным ресурсам аэропорта на базе оборудования коллективного пользования. Как правило, крупные авиакомпании имеют собственные системы DCS. Элементами DCS являются программное обеспечение и аппаратные средства общего и специального назначения: компьютер, принтер для печати багажных бирок, считыватели багажных бирок на выходах на посадку и т.д. Обычно все это оборудование находится в собственности аэропорта, который сдает его в аренду авиакомпаниям. Для возможности использования этого оборудования и внедряется система CUTE.

Систему согласования багажа (Baggage Reconciliation System, BRS), основная функция которой – наблюдение за перемещением зарегистрированного багажа с момента регистрации до погрузки в ВС, либо с момента выгрузки с ВС до выдачи пассажиру. В BRS из DCS поступает вся первичная информация о багаже и его принадлежности пассажиру. В дальнейшем сканирование мест багажа позволяет полностью отслеживать их путь на всех этапах обработки. Это позволяет значительно упростить и ускорить такие операции, как снятие багажа не явившихся на посадку пассажиров. В целом, использование системы BRS позволяет снизить в 2-5 раз длительность обработки мест багажа [52]. Близка к BRS по устройству и технологии работы система управления грузовыми перевозками.

Систему управления ресурсами (Resource Management System, RMS), предназначенную как для автоматизации процессов обеспечения работы аэропорта в режиме реального времени, так и для планирования его потребностей в персонале и оборудовании. При внедрении систем RMS потребность в ресурсах на выполнение работ в среднем снижается на 10-20%, производительность труда увеличивается на 15-25% [53].

Интеллектуальную систему управления зданием аэровокзала (Building Management System, BMS), предназначенную для автоматического управления инженерными и технологическими системами, такими как отопление, вентиляция, освещение, система транспортировки багажа и т.д., а также мониторинга перемещений пассажиров.

Кроме перечисленных в AIMS может быть интегрирован еще целый ряд ИС различного назначения, таких как, например, система управления предприятием, система оперативного сопровождения транспортных средств, геоинформационная система аэропорта и др.

Благодаря применению систем DCS, CUTE и BRS становится возможной такая необходимая для функционирования всей трансферной схемы перевозок процедура, как сквозная регистрация. Она предполагает проведение регистрации пассажира и оформление его багажа только в аэропорту отправления. Перегрузка зарегистрированного багажа на стыковочный рейс в аэропорту трансфера происходит без участия его владельца, который получает свой багаж в аэропорту назначения. «Сквозная» регистрация значительно повышает комфорт и уменьшает время пребывания пассажира в аэропорту трансфера.

Необходимость выполнения операций по обработке и сортировке большого числа мест багажа трансферных пассажиров, в том числе прошедших сквозную регистрацию, требует внедрения в узловом аэропорту высокопроизводительной системы обработки багажа (Baggage Handling System, BHS), позволяющей обеспечить выполнение жестких условий по MST и снизить вероятность утери багажа и его засылки не по назначению. С учетом того, что ежегодный объем претензий пассажиров к авиаперевозчикам по багажу составляет в настоящее время более 1 млрд долларов, обеспече-

ние быстрой и безошибочной сортировки багажа – это не только вопрос качества обслуживания пассажиров, особенно актуальный для узловых аэропортов, но и экономическая необходимость [54].

Современные автоматические BHS поддерживают весь цикл терминальных процедур обработки багажа: прием и взвешивание багажа на этапе регистрации, хранение сданного заранее багажа в системе EBS (Earle Baggage System), доставку в помещение сортировки, сортировку багажа по рейсам, срочное перемещение первоочередного багажа, в том числе трансферного, выдачу багажа, обработку багажа отложенного или отмененного рейса и др. В настоящее время BHS различных масштабов получили довольно широкое распространение не только в крупных, но также средних и малых зарубежных аэропортах. Например, только фирмой Siemens в различных аэропортах установлено более 300 систем данного назначения [55].

При всем разнообразии индивидуальных технических решений автоматизированных BHS в различных аэропортах общие принципы их конструкции сходны – багаж перемещается с помощью рольгангов, ленточных транспортеров или поддонов, управление осуществляется с использованием компьютерных информационных систем. В роли носителя информации о назначении места багажа выступает багажная бирка. При этом могут быть использованы различные виды кодирования – штриховое, магнитное или радиочастотное. Последний вид, т.н. радиочастотная идентификация (Radio Frequency Identification, RFID), считается наиболее перспективным, поскольку обладает наиболее высокими надежностью и скоростью считывания информации.

В соответствии с нормами ИАТА каждое место багажа при регистрации получает багажную бирку. Информация о багаже поступает в ИС BRS и CUTE аэропорта. Благодаря информации, содержащейся на бирке, любая единица багажа находится под постоянным контролем вплоть до прибытия к месту назначения. Система BHS также связана с ИС FIDS, благодаря чему в зону сортировки поступает вся необходимая информация, обеспечивающая своевременную доставку багажа на нужный самолет.

В связи с необходимостью обеспечения возрастающих требований авиабезопасности системы BHS включают в качестве

функционального компонента автоматизированную систему контроля багажа HBS (Hold Baggage Screening), в которой багаж проходит несколько, как правило, пять стадий досмотра. При этом «ручной» досмотр предполагается только на последней из них и только для мест багажа, вызвавших «подозрение» на начальных стадиях. Одной из наиболее важных проблем обеспечения авиабезопасности считается ускорение процесса проверки наличия взрывчатых веществ в багаже. Для ее решения внедряются новые типы технических систем, в том числе основанные на использовании компьютерных томографов, в настоящее время считающиеся наиболее эффективными в этом плане. Например, в августе 2005 г. в двух терминалах аэропорта Даллас-Форт-Уорт началась эксплуатация автоматизированной системы HBS, оснащенной 22 компьютерными томографами, интегрированной с функционирующей в аэропорту BHS [56].

Наряду с высокой пропускной способностью и малым временем нахождения багажа в системе, системы BHS должны обеспечивать качественную и бережную обработку разнообразного багажа, сильно различающегося по форме, размерам и массе. Характерным примером современной BHS может служить система *TUBTRAX* фирмы *VanDerLande* (Нидерланды), обеспечивающая обработку мест багажа массой до 100 кг и размерами до 2500x800x600 мм [57]. Носителями багажа служат тележки, перемещающиеся по направляющим со скоростью до 35 км/ч. Еще выше, до 43 км/ч, скорость перемещения багажных тележек системы *BAGTRAX* той же фирмы [58]. Использование этих систем в одном из терминалов аэропорта Схипхол (Амстердам) обеспечивает минимальное время обслуживания одного места багажа до 3-4 мин, при максимальной производительности системы 10000 мест в час. Столь высокая скорость движения багажа в системах позволяет использовать их для пересылки багажа между терминалами, что представляет особую ценность для сокращения МСТ в многотерминальных узловых аэропортах.

На пропускную способность и стоимость необходимой для аэропорта BHS влияет целый ряд факторов – масштаб аэропорта, число и расположение терминалов, применяемые технологии, доля трансферных пассажиров и др. В качестве примеров приве-

дем узловыe аэропорты Гонконга, Цюриха и Вены, обслужившие в 2007 г. соответственно 47.0; 18.8; 20.7 млн пасс. Их VHS имеют пропускную способность 19 200, 20 000, 11 000 мест/ч и стоимость 80, 35, 40 млн евро, соответственно [59-61].

Важным фактором, повышающим трансферную привлекательность узловых аэропортов, является наличие на территории их аэровокзальных комплексов различных коммерческих предприятий по обслуживанию пассажиров – магазинов, в том числе беспрошленной торговли, ресторанов, кафе, отелей, банков, проката автомобилей и т.п. Эти предприятия не только вносят весомый вклад в доходы аэропорта от неавиационной деятельности, но и, что не менее ценно, создают дополнительный комфорт и позволяют скоротать время пересадки трансферным пассажирам. Коммерческая деятельность такого рода принимает в узловых аэропортах новые формы. Пример – аэропорт Мюнхен, в котором одновременно с терминалом 2 был построен т.н. Центр аэропорта, включающий конференц-залы, сдаваемые в аренду офисы, около 100 магазинов и даже подразделение одной из крупных клиник общей площадью около 30 тыс. м². Зимой на площади перед Центром устраиваются ярмарки, заливается каток, что является удачным рекламным ходом аэропорта. В верхней части терминала 2 построена терраса со стеклянным переходом, откуда можно наблюдать жизнь аэропорта. Доходы, приносимые аэропорту предприятиями торговли, общественного питания и офисами, составили в 2007 г. около 270 млн евро, что сопоставимо с его доходами от обслуживания перевозок – 514 млн евро.

3. Наличие эффективных наземных транспортных связей с населенными пунктами района тяготения. Прямое влияние данного фактора на число трансферных пассажиров в узловом аэропорту менее заметно, чем первых двух. Оно состоит в том, что росту доли трансфера способствует увеличение числа рейсов, которое зависит от общего числа обслуживаемых в аэропорту пассажиров, а последний показатель, в свою очередь, – от качества и скорости доставки пассажиров из окружающих населенных пунктов в аэропорт.

Современные крупные аэропорты, как правило, связаны с окружающими населенными пунктами целым рядом видов

наземного транспорта. Кроме личного автотранспорта и такси пассажиры имеют возможность воспользоваться автобусами, скоростными электропоездами, а в случаях, если аэропорт расположен не слишком далеко от города, – то и метро. Такие аэропорты, как Хитроу, им. Ш. де Голля, Барахас и др. имеют станции городского метро на территории своих терминалов.

Требования к качеству и скорости доставки между городом и аэропортом возрастают, если авиакомпания использует для трансферных перевозок два или несколько аэропортов одного авиаузла. Например, после того как авиакомпания *All Nippon Airways* – японский участник *Star Alliance*, организовала перевозки трансферных пассажиров авиакомпаний-членов альянса на специальных автобусах между международным аэропортом Нарита и аэропортом Ханеда, обслуживающим преимущественно внутренние рейсы, число трансферных пассажиров, перемещающихся между этими аэропортами удвоилось [62]. Однако значимость такой ситуации не следует переоценивать. Во-первых, названные выше японские аэропорты нельзя отнести к числу важнейших мировых хабов по причине небольшой доли трансфера. Кроме того, необходимость переезда между аэропортами в случае трансферной перевозки значительно увеличивает МСТ (см. табл. 1.3.2) и весьма негативно воспринимается пассажирами, что отражается на уровне их потока. В частности, несмотря на наличие довольно развитых связей между основными аэропортами Лондонского аэроузла число трансферных пассажиров, совершивших переезд из одного аэропорта в другой, ежегодно составляет 1-1.5 млн чел., или около 1% от всего трансферного пассажиропотока аэропортов Лондона [40].

Особенностью последнего времени явилось открытие высокоскоростного железнодорожного сообщения ряда европейских аэропортов с крупными городами, расположенными на довольно большом расстоянии от них – за пределами непосредственной зоны транспортного тяготения этих аэропортов. Отчасти это вызвано перегруженностью аэропортов, которые вынуждены искать новые способы подвоза пассажиров к стыковочным дальним рейсам. Примерами здесь служат перевозки между аэропортом им. Ш. де Голля и Брюсселем на высокоскоростном поезде

Thalys и между Мадридом (и аэропортом Барахас) и г. Барселона. Перевозки этого типа представляют альтернативу ближним авиарейсам. Так, на линии Мадрид-Барселона, бывшей одной из напряженнейших авиалиний (971 рейс в неделю – 2007 г.), объем перевозок значительно сократился с февраля 2008 г., после открытия скоростной железнодорожной трассы. Однако высокоскоростные поезда становятся полной заменой самолету далеко не во всех случаях. Несмотря на то, что пассажир имеет возможность приобрести сквозной билет по конкурентному тарифу и пройти регистрацию на железнодорожном вокзале, и рейсы поезда обозначаются кодами рейсов самолетов, они все еще приводят к существенному неудобству поездки для трансферных пассажиров из-за ее большей длительности.

4. Наличие хабообразующей компании или альянса авиакомпаний. Успешность деятельности аэропортов напрямую связана с обслуживаемыми ими перевозчиками, что особенно справедливо для системы хаб – доминирующая авиакомпания. Устойчивое положение, более характерное для крупной авиакомпании, благотворно сказывается на деятельности аэропорта. Во время резкого сокращения объемов перевозок в 2000-2002 гг. узловые порты США, замыкающие список 25 крупнейших, потеряли 12.8%, а лидеры рейтинга – всего 6.3% своих перевозок [62].

По данным [63], касающимся 50 крупнейших аэропортов мира, более чем в 75% из них на долю одного перевозчика приходится свыше 40% взлетов и посадок. В отдельных случаях этот показатель достигает 80%. Доли доминирующих перевозчиков по числу взлетно-посадочных операций для ряда хабов со значительным уровнем трансфера приведены в табл. 1.3.3. Основными показателями степени доминирования авиакомпании в аэропорту, наряду с долей взлетно-посадочных операций, являются: доля пассажиров, перевезенных данной компанией, в общем пассажирообмене аэропорта за определенный период времени; доля пассажирооборота данной компании в аналогичном суммарном показателе для авиакомпаний аэропорта; доля трансферного пассажиропотока авиакомпании в общем числе трансферных пассажиров за определенный период времени; количество стыковочных рейсов данной компании за определенный период времени [64].

Ниже приведены примеры аэропортов с единственной доминирующей компанией. Так, аэропорт Атланта обслуживает более 20 компаний, однако доля компании *Delta* по ВПО превышает 70%. Аэропорт Хитроу с основным перевозчиком *British Airways*, доля которого составляет 42%, обслуживает около 80 авиакомпаний, большинство из которых не участвует в стыковках. В аэропорту Цюрих доля доминирующей авиакомпании *Swiss* по пассажиропотоку превышает 53%, а по числу обслуженных трансферных пассажиров – 90%.

Табл. 1.3.3.

Узловые аэропорты и их доминирующие авиакомпании

Аэропорт (город, страна)	Доминирующая авиакомпания	Доля доминирующего перевозчика по числу ВПО, %
им. Хартсфилда-Джексона (Атланта, США)	<i>Delta Airlines</i>	71
О'Хара Международный (Чикаго, США)	<i>United Airlines</i>	49
	<i>American Airlines</i>	40
Хитроу (Лондон, Великобритания)	<i>British Airways</i>	42
им. Ш. де Голля (Париж, Франция)	<i>Air France-KLM</i>	58
Даллас-Форт-Уорт (США)	<i>American Airlines</i>	84
Франкфурт-на-Майне (ФРГ)	<i>Lufthansa</i>	61
Международный (Денвер, США)	<i>United Airlines</i>	52
Барахас (Мадрид, Испания)	<i>Iberia Airlines</i>	>60
им. Дж. Буша (Хьюстон, США)	<i>Continental</i>	86
Скай Харбор (Финикс, США)	<i>US Airways</i>	44
Международный (Сан-Франциско, США)	<i>United Airlines</i>	49
Либерти (Ньюарк, США)	<i>Continental</i>	68
Вейн Кантри (Детройт, США)	<i>NorthWest</i>	76
Шарлотта-Дуглас (Шарлотта, США)	<i>US Airways</i>	86
им. Ф.Й. Штраусса (Мюнхен, ФРГ)	<i>Lufthansa</i>	66
Гатвик (Лондон, Великобритания) ¹	<i>British Airways</i>	25
	<i>easyJet</i>	17
Международный (Майями, США)	<i>American Airlines</i>	68
Международный (Миннеаполис-Сент-Пол, США)	<i>NorthWest</i>	78
Солт-Лейк-Сити (США)	<i>Delta Airways</i>	69
Клотен (Цюрих, Швейцария)	<i>Swiss International Airlines</i>	55.1
Швехат (Вена, Австрия)	<i>Austrian Airlines</i>	52.6

¹ нет доминирующего перевозчика

Существуют также примеры аэропортов с несколькими доминирующими авиакомпаниями. Так аэропорт О'Хара имеет 2 основные компании с примерно одинаковыми долями ВПО.

Факт установления господства доминирующих авиакомпаний в ряде хабов нашел отражение в их американском сленговом названии – «хабы-крепости» или «хабы-бастионы» («hub-fortress»). «Бастионом» принято считать узловый аэропорт, в котором доминирующей авиакомпанией выполняется не менее 70% перевозок по системе «hub-and-spoke». Зачастую авиакомпании, пользуясь доминирующим положением в своих «бастионах», различными способами препятствуют расширению влияния в них конкурентов.

5. Наличие возможности развития. Перспективное планирование деятельности аэропорта по схеме хаба требует учета наличия резервных площадей для расширения летного поля и терминалов. Отсутствие резервов для повышения пропускной способности комплексов аэропорта – самая болезненная проблема крупнейших хабов. Наиболее острую форму она принимает в случае отсутствия возможностей строительства новых ИВПП, что бывает продиктовано жесткими экологическими ограничениями и отсутствием соответствующих зарезервированных площадей. В этой ситуации увеличение пропускной способности других аэропортовых объектов, например, пассажирских терминалов, становится бессмысленным. С такими проблемами столкнулись ведущие аэропорты, такие как Хитроу (Лондон), Ш. де Голль (Париж), Амстердам, Франкфурт и др.

Так в аэропорту Франкфурт спрос на слоты превышает возможности аэропорта на 15%, и аэропорт в течение длительного времени ищет место для строительства ещё одной ИВПП. Еще в 1997 г. авиакомпания *Lufthansa* выступила с инициативой расширения аэропорта Франкфурта, который является ее главным хабом. Однако сильные позиции «зеленых» политических сил в Германии вынуждают власти очень внимательно рассматривать проекты расширения аэропорта, тормозя их реализацию. По этой причине, начиная с 2002 г. авиакомпания *Lufthansa* развивается в качестве второго хаба аэропорт Мюнхена. Роли хабов при этом разделяются: аэропорт Франкфурта остается основным для международных рейсов авиакомпании, а Мюнхен обслуживает,

главным образом, перевозки *Lufthansa* в города Германии и Евросоюза. При этом формирование сети на базе двух хабов рассматривается авиакомпанией *Lufthansa* как вынужденная мера, снижающая качество ее сети.

Существовавшая до недавнего ввода в эксплуатацию терминала 5 в аэропорту Хитроу напряженная ситуация, связанная с острым дефицитом пропускной способности пассажирского комплекса, стала одной из причин того, что в течение 90-х гг. прошлого века авиакомпания *British Airways* использовала два хаба. Наряду с Хитроу в этом качестве выступал другой лондонский аэропорт – Гатвик. Отказ в 2002 г. от такой схемы был вызван, главным образом, ее неэффективностью. Два хаба оказались расположенными слишком близко, для того чтобы охватить различные рынки авиаперевозок, но слишком далеко, чтобы обеспечить удобную стыковку трансферным пассажирам [65].

В Лондоне, Нью-Йорке, Париже ни один из 2-3 исторически сформировавшихся вблизи этих городов аэропортов не в состоянии в одиночку пропустить весь поток пассажиров. И расширить ни один из них нельзя – нет свободной территории. Это объективный фактор, снижающий трансферный потенциал данных авиаузлов.

Реализация возможности развития позволяет аэропорту наращивать свои показатели. Примерами здесь служат аэропорты им. Ш. де Голля и Барахас. Недавнее введение в эксплуатацию новых ИВПП и терминалов позволило им обойти по показателям своих ближайших конкурентов, первому – аэропорт Франкфурт-на-Майне, а второму – Схипхол (Амстердам).

6. Положительное отношение со стороны населения окружающего региона. Успешное развитие аэропорта возможно при наличии доброжелательного отношения к нему со стороны населения, общественных и политических сил окружающего региона. Наличие крупного аэропорта само по себе является мощным фактором регионального развития. Возрастает привлекательность района для размещения новых отраслей промышленности и инвестиций, стимулируются деловые операции, местной экономике обеспечиваются дополнительные прибыли за счет продажи товаров и услуг туристического сектора. Значимость хабов для местной экономики подчеркивается в отчете ИАТА, опубликованном

в 2006 г. Около 80% представителей коммерческих предприятий, опрошенных этой организацией, оценили наличие крупного национального авиатранспортного хаба в регионе в качестве одного из определяющих условий инвестиций в экономику этого региона. 18% опрошенных определили отсутствие авиасвязей с регионом как фактор риска при инвестировании [32].

Аэропорт может выступать в роли крупнейшего работодателя, как прямо – для собственных сотрудников, так и косвенно – для сотрудников предприятий, связанных с воздушными перевозками. Например, аэропорт Атланта, в котором работают около 55.3 тыс. чел., является крупнейшим работодателем штата Джорджия США. Переход аэропорта Мюнхен на работу по схеме хаба и открытие в нем нового терминала привело к увеличению численности персонала на несколько тысяч сотрудников. В 2007 г. она достигла 27.4 тыс. чел. [66]

Наличие крупного аэропорта в регионе наряду с положительными содержит для последнего и негативные моменты, к которым относятся необходимость выделения больших площадей для сооружений аэропорта, что может стать причиной переселения людей и перемещения предприятий, и отрицательное воздействие на окружающую среду: шум, загрязнение воздуха и воды и др. Аэропорт в своей работе должен принимать во внимание нормы, ограничивающие уровень этих негативных факторов, и возможную реакцию населения, общественных и политических организаций, а также государственных структур. Учет всех этих обстоятельств зачастую приводит к снижению пропускной способности комплексов аэропорта, в частности, к сокращению допустимого числа взлетно-посадочных операций в течение суток.

Авиационный шум стал причиной ограничения или отмены полетов в ночное время во многих аэропортах. Характер этих ограничений в общих чертах может быть охарактеризован на примере 10 узловых аэропортов, приведенных в табл. 1.3.1. Из них только аэропорт Атланта свободен от всяких ограничений по шуму. В аэропортах Франкфурт-на-Майне, Схипхол (Амстердам), Швехат (Вена), им. Ш. де Голля, Даллас – Форт-Уорт, Хитроу (Лондон) введены ограничения на полеты в ночное время ВС определенных категорий, в аэропорту Каструп (Копенгаген)

ограничен уровень шума при взлете, в аэропортах Мюнхен, Цюрих действует запрет на полеты между 22:00 и 6:00. Наряду с перечисленными возможны ограничения на направления взлета и посадки и т.п. Во всех крупных аэропортах установлены компьютерные системы по мониторингу уровня шума.

Множество примеров свидетельствуют о противодействии, которое испытывают аэропорты в отношении планов по их расширению со стороны населения, общественных и экологических организаций.

Так, разработанный в 1997 г. компанией, управляющей аэропортом им. Ш. де Голля, план его развития был отвергнут под влиянием «зеленых», заявивших, что около 1 млн чел. подвержены шумовому воздействию самолетов и рост интенсивности полетов негативно отразится на их состоянии. Поэтому управляющей компании пришлось скорректировать программу его развития, отказавшись от цели довести пропускную способность до 80-100 млн пасс. в год. Пытаясь расширить возможности Парижа как трансферного авиаузла, та же компания предложила построить новый аэропорт в 90 км к юго-западу от Парижа. Однако дальше планов этот проект не пошел, сталкиваясь с сильной оппозицией «зеленых» [67].

По-прежнему продолжается обсуждение планов строительства во Франкфурте четвертой ИВПП. Однако до принятия окончательного решения о вводе ее в строй еще далеко, поскольку в суды поступили тысячи исков от местных жителей, выступающих против открытия новой полосы.

Имеются примеры эффективных компромиссов между авиатранспортными предприятиями и региональной общественностью. В 1998 г. решением муниципалитета Милана почти все регулярные пассажирские рейсы были переведены из находящегося в 7 км от города аэропорта Линатэ в расположенный в 53 км аэропорт Мальпенса, имеющий две независимые ИВПП. Основными причинами были названы неприемлемый уровень шума и недостаточная пропускная способность аэропорта Линатэ, располагающего одной ИВПП. В результате этого уже в следующем 1999 г. темпы прироста суммарного количества пассажиров двух миланских аэропортах увеличились в два раза [68]. Авиакомпания

Alitalia получила еще один узловой аэропорт (наряду с Фиумичино (Рим)), расположенный ближе к европейскому рынку. В 2008 г. *Alitalia* была вынуждена свернуть хабовые операции в аэропорту Мальпенса в связи с тяжелой финансовой ситуацией.

Тенденции развития узловых аэропортов. Концепция узловых аэропортов, практическая реализация которой началась в конце 70-х гг. XX в., за прошедшее время подверглась значительной эволюции. Современный этап ее развития характеризуется следующими тенденциями.

1. Концентрация перевозок в хабах. Возрастающая роль хабов. За последние годы сетевые авиакомпании, обеспокоенные оттоком пассажиропотока к бюджетным конкурентам, неоднократно предпринимали попытки перейти к схеме прямых перевозок «point-to-point», что неизменно заканчивалось их возвратом к хабовой системе. Более того, в настоящее время некоторые из низкзатратных авиакомпаний сами применяют некоторое подобие перевозок через узловые аэропорты.

Роль хабов постоянно растет, что нашло отражение в следующих фактах. В США объем международных перевозок между неузловыми аэропортами ежегодно сокращается в среднем на 4.9%, а между узловыми растет на 6.7%. На 20 пар крупнейших городов Североатлантического региона приходится 40% всех провозных мощностей. На направлениях из Европы в Азию на долю маршрутов между крупнейшими мегаполисами приходится 80% пассажиропотока, а на перевозки из крупнейших городов в остальные населенные пункты – только 12%. На рынке перевозок между Азией и Северной Америкой пропорция следующая: 70% пассажиропотока между крупнейшими городами, 20% – между мегаполисами и вторичными городами [69].

Результатом концентрации перевозок в крупнейших хабах становится сокращение числа меньших – вторичных и региональных – хабов. Одним из способов их выживания становится специализация на каком-либо направлении. Примерами такой специализации служит эволюция рассмотренных выше хабов Мадрида, Вены и др. Начавшийся в 90-х гг. в США процесс концентрации перевозок в крупных хабах и уменьшения размеров или закрытия мелких получил название «дехаббинг» (de-hubbing) [29].

2. Формирование «мегахабов». Мощные хабы являются неотъемлемой частью глобальных альянсов и одним из критериев членства в них для авиакомпаний. В зарубежной специализированной литературе [62] делается вывод о том, что в ближайшие годы возможно формирование девяти «мегахабов» – по три на каждый из регионов базирования крупнейших авиакомпаний мира. В качестве кандидатов называются Лондон, Франкфурт и Париж в Европе; Чикаго, Даллас – Форт-Ворт и Атланта в США; Токио, Сингапур и Гонконг в Азии. Прогноз учитывает места базирования ведущих членов трех крупнейших мировых альянсов: *Oneworld*, *SkyTeam* и *Star Alliance*.

Следует отметить сложности с формированием «мегахабов» в Европе, вызванные недостатком пропускной способности и проблемами с расширением крупнейших европейских аэропортов, претендующих на роль «мегахабов».

3. Новые подходы к составлению узлового расписания с целью сглаживания суточных пиков. Ограниченная пропускная способность узловых аэропортов вынуждает авиакомпании вносить существенные коррективы в волновую структуру расписания. Сетевые авиакомпании все шире используют схему перевозок, получившую название «непрерывный хаббинг» или «ролл-хаббинг» [35, 70]. Суть схемы в том, что самолеты, выполняющие рейсы между узловым и периферийными аэропортами, не задерживаются в аэропортах для формирования волны рейсов. Такая схема не устраняет, но существенно сглаживает волны, приводя к образованию системы из перекрывающихся волн. Аспект этой схемы, связанный с производственным процессом хаба, получил название «де-пикинг» (*de-peaking*).

Устранение пиков позволяет решить целый ряд проблем большинства участников авиатранспортного процесса. Авиакомпаниям обеспечивается большая гибкость при составлении расписания, большой уровень налета ВС с малыми простоями в аэропортах. Узловому аэропорту – более эффективное использование персонала и техники за счет более равномерного распределения суточной нагрузки, снижение задержек рейсов. Местным пассажирам хаба – более привлекательное расписание полетов. Главный недостаток такой схемы, состоящий в увеличении вре-

мени ожидания при пересадке, затрагивает в первую очередь трансферных пассажиров. Однако, согласно распространенному среди менеджмента авиакомпаний мнению, пассажиры охотно идут на потерю времени, если перевозчики предлагают более низкие цены на билеты [62].

Условиями успешной реализации «непрерывного хаббинга» считаются: во-первых, значительное число авиасвязей узлового аэропорта с большой частотой выполнения рейсов и, во-вторых, разнонаправленный характер авиасвязей хаба – непрерывный хаб должен быть всенаправленным хабом.

Авиакомпании США начали внедрение схемы «непрерывного хаббинга» с конца 1990-х гг. [63], европейские – несколько позже. В первую очередь этот процесс затронул крупнейшие и наиболее перегруженные европейский хабы – Франкфурт-на-Майне и Хитроу. Авиакомпания *Lufthansa* стала первой из европейских авиакомпаний, осуществивших принцип «де-пикинга» в своем главном узловом аэропорту Франкфурт-на-Майне, начиная с лета 2004 г. Одним из результатов этого шага стало сокращение времени ожидания посадки и вылета ВС, обеспечившее суммарную экономию авиатоплива в размере более 70 000 тонн в течение действия летного расписания. Этому шагу предшествовали детальные исследования с применением метода имитационного моделирования [71].

Следует отметить также схему, названную «динамический хаб», внедряемую авиакомпаниями с многоузловой сетью. Авиакомпания координирует работу своих нескольких (как правило, двух) расположенных в одном регионе хабов, таким образом, чтобы их мощности дополняли друг друга. Схема требует наличия отлаженной системы оперативного управления транспортными потоками, позволяющей их раздваивать, совмещать, комбинировать и переориентировать, направляя через различные хабы.

4. Видоизменение узловых сетей вследствие использования новых типов ВС. Наиболее значимыми вехами в развитии авиастроения, оказавшими влияние на работу узловых аэропортов, стали появление региональных реактивных самолетов, а также самолетов типа *Boeing-777* и *A-380*.

Выход на рынок 50-100-местных реактивных самолетов, относящихся к категории региональных, таких, например, как

Canadair Regional Jet 700 и *Embraer-145* позволил хабам расширить свои сети авиалиний. К ним добавлены новые пункты, которые прежде были слишком отдаленными для обслуживания турбовинтовыми самолетами, или не обеспечивали пассажиропотока, необходимого для использования большого реактивного самолета типа *Boeing-737* [72-74].

Создание самого вместительного дальнемагистрального лайнера А-380 стало реакцией на наблюдающуюся тенденцию к концентрации авиаперевозок и растущую перегруженность крупнейших хабов. Применение таких самолетов, по мнению аналитиков концерна *Airbus Industries*, станет в недалеком будущем насущной необходимостью для обслуживания «мегахабов» и позволит снизить загрузку их комплексов.

В последние годы были введены в эксплуатацию узкофюзеляжные самолеты, рассчитанные на межконтинентальные полеты, такие как *Boeing-777* и *-787*. Сетевым авиакомпаниям это позволяет снизить эксплуатационные расходы, сняв большие широкофюзеляжные самолеты со слабо загруженных линий между узловыми аэропортами. Кроме того, самолеты с большой дальностью полета позволяют удлинить радиальные маршруты узлового аэропорта, тем самым нарушая привязку небольших городов к определенному хабу.

5. Ориентация на стратегию смешанных перевозок. Тенденция особенно характерна для европейских хабов, поскольку они в большей степени ограничены в своей пропускной способности и вынуждены искать новые способы распоряжения слотами. Одной из недавно возникших альтернатив стала ориентация на стратегию перевозок разными видами транспорта – смешанных перевозок. Расширение доли скоростных поездов на рынке перевозок, в первую очередь заметное во Франции, Германии и Великобритании, должно привести к сокращению числа полетов на короткие расстояния и высвобождению слотов для средне- и дальнемагистральных авиалайнеров большой вместимости, о чем сказано выше [67].

1.4. Российский опыт формирования системы перевозок с использованием узловых аэропортов

В России к настоящему времени накоплен не слишком богатый, но достаточно интересный опыт формирования систем трансферных перевозок. Инициаторами их организации в большинстве случаев выступали авиакомпании или их альянсы. В разное время было заявлено об открытии трансферных программ в аэропортах Емельяново (г. Красноярск, авиакомпания *Красноярские авиалинии*), Курумоч (г. Самара, авиакомпания *Самара*, позднее в альянсе с *Красноярскими авиалиниями*), Домодедово (г. Москва, инициатива аэропорта, поддержанная рядом авиакомпаний), Шереметьево (г. Москва, авиакомпания *Аэрофлот*), Кольцово (г. Екатеринбург, авиакомпания *Уральские авиалинии*), Храброво (г. Калининград, авиакомпания *КД авиа*) и некоторых других.

Несмотря на то, что выполнение далеко не всех перечисленных программ можно считать успешным, необходимость формирования сети узловых аэропортов признана на государственном уровне в «Концепции развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года».

Ниже процесс формирования системы трансферных перевозок рассмотрен на примере аэропорта Храброво, на базе которого авиакомпанией *КД авиа* в рамках федеральной целевой программы «Модернизация транспортной системы России» на 2002-2010 гг., был реализован проект по созданию полноценного хаба на пересечении воздушных путей между Россией и Европой.

Характеристика аэропорта Храброво. Аэропорт, расположенный в 13 км севернее г. Калининград, располагает одной ИВПП с бетонным покрытием размером 2500х60 м, позволяющей принимать ВС с максимальным взлётным весом 100 т.

Радиосветотехническое оборудование аэродрома обеспечивает посадку ВС по минимуму I категории ИКАО. Особенность аэропорта – некруглосуточный регламент работы: аэропорт закрыт с 00:00 до 7:00 местного времени [75].

На момент начала реализации трансферного проекта Храброво являлся базовым аэропортом авиакомпании *КД авиа* – акционерного общества со 100% частным капиталом, созданного в 2003 г. на основе обанкротившегося государственного авиапредприятия *Калининградавиа* [76]. Кроме самолетов компании *КД авиа* принадлежал аэровокзал, терминал и здание АТБ. Управление аэропортом приносило порядка 10% прибыли *КД авиа*.

Летным полем и ИВПП владеет ФГУП *Калининградавиа*. Государство арендует построенные и обустроенные *КД авиа* объекты недвижимости в рамках аэропортового комплекса и его инфраструктуры.

В начале 2004 г. компания *КД авиа* (в то время «ОАО *Калининградавиа*») объявила о планах создания на базе Храброво международного хаба, позволяющего, используя среднемагистральные самолеты, организовать удобную связь между российскими и европейскими пунктами назначения, став альтернативой аэропортам Москвы и Санкт-Петербурга. Предложенная схема организации перевозок была названа «Российско-европейская воздушная транспортная система». В качестве первоначальных предпосылок к ее внедрению назывались географическое положение Калининграда удобное для промежуточных посадок самолетов, следующих из РФ в Западную Европу и обратно, и организации пересадок пассажиров, а также проблемы в транспортном сообщении с российским эксклавом, связанные с ужесточением пограничного режима прибалтийскими государствами.

В феврале 2005 г. *КД авиа* получила в операционный лизинг первый самолет типа *Boeing 737-300*. В июне того же года из эксплуатации был выведен последний самолет отечественного производства. Положение Калининграда как свободной экономической зоны существенно снижало таможенные платежи при ввозе самолетов иностранного производства [77]. В дальнейшем рост числа самолетов *Boeing 737-300*, находящихся в коммерческой эксплуатации, происходил сле-

дующими темпами: конец 2005 г. – 6 шт., конец 2006 г. – 11 шт., конец 2007 г. – 16 шт., конец 2008 г. – 17 шт. Средний возраст самолетов компании составлял 17-18 лет. Планировалось скорое прибытие и введение в коммерческую эксплуатацию еще 2 самолетов. В начале июня 2008 г. были обнародованы амбициозные планы авиакомпаний по наращиванию и модернизации парка ВС с постепенным сокращением его среднего возраста до 1-2 лет [75] и доведением числа самолетов иностранного производства до 60 (!).

Наряду с расширением авиапарка и освоением новой авиатехники компанией *КД авиа* в течение 2004-2007 гг. были предприняты следующие шаги: проведена реконструкция и модернизация старого здания аэровокзала (1979 г. постройки) с увеличением числа стоек регистрации; осуществлен набор и подготовка персонала (летного, технического, бортпроводников); получены лицензии для выполнения полетов (на конец 2006 г.: 29 – международных в т.ч. СНГ; 20 – внутрироссийских [78]); была спроектирована, построена и сдана в эксплуатацию первая очередь нового пассажирского терминала. На начало 2009 г. было запланировано завершение строительства его второй очереди.

Стоимость проекта по формированию хаба в аэропорту Храброво на этапе 2004-2007 гг. оценивалась в 140 млн долл. Из них 30 млн долл. были инвестированы ОАО *КД авиа* в модернизацию авиапарка, подготовку летного и технического состава, оптимизацию транспортной схемы и внедрение современных стандартов обслуживания пассажиров. Рыночная стоимость самолетов, находившихся в эксплуатации, – 11-12 млн долл., при стоимости новых – 70 млн долл. Ежемесячный лизинговый платеж составлял (для разных самолетов) 150-180 тыс. долл.

Объем инвестиций *КД авиа* на цели реконструкции здания аэровокзала, включая строительство нового терминала, расширение его пропускной способности и внедрение современных стандартов обслуживания, составлял 40 млн долл. Затраты *КД авиа* финансировались главным образом за счет кредитов банков.

Государственными структурами в лице ФГУП *Калининград-Авиа* было вложено 70 млн долл. в модернизацию аэродрома.

В частности, была проведена реконструкция ВПП, строительство рулежной дорожки, модернизация светосигнального оборудования. За счет государства был модернизирован пункт управления воздушным движением.

Схема организации стыковок рейсов в аэропорту Храброво. В отличие от западных аэропортов, где скоординированное узловое расписание формировалось годами, начало реализации хабового проекта в Храброво приходится на конкретную дату. 14 июня 2007 г. ОАО *КД авиа* ввело в эксплуатацию первую очередь нового пассажирского терминала, а на следующий день, 15 июня, начало осуществлять полеты по узловой системе авиаперевозок из 10 российских городов (Москва, Санкт-Петербург, Самара, Омск, Казань, Нижний Новгород, Волгоград, Тюмень, Челябинск, Уфа) и Астаны в 14 городов Европы (Лондон, Амстердам, Гамбург, Дюссельдорф, Ганновер, Берлин, Брюссель, Прага, Мюнхен, Милан, Барселона, Рим, Афины, Киев) с пересадкой в Калининграде, а также в обратных направлениях. Маршрутная сеть за время работы хаба неоднократно корректировалась: в нее включались новые города (Париж, Тель-Авив, Вена, Одесса, Пермь, Ростов-на-Дону и некоторые другие) и исключались прежние (Тюмень, Амстердам, Брюссель, Афины и др.).

Расписание рейсов разрабатывалось таким образом, чтобы минимизировать трансферному пассажиру суммарное время перевозки. Ежедневно утром осуществлялись вылеты рейсов из городов РФ в Калининград. В интервале 9:00-11:00 происходило «волновое» прибытие ВС в Храброво. Трансферные пассажиры проходили паспортный и таможенный контроль и ожидали посадку на международные рейсы в пределах одного терминала. С 12:15 с интервалом в 5-10 минут осуществлялся «волновой» вылет рейсов в Европу. Обратное движение самолетов из Европы в Россию реализовалось аналогично со стыковкой в калининградском аэропорту в диапазоне 19:00-22:00 местного времени. На ночную стоянку самолеты *КД авиа* размещались в аэропортах городов РФ. Таким образом, аэропорт Храброво представлял собой наглядный пример направленного хаба, осуществлявшего перевозки вдоль линии Восток-Запад.

Узловое расписание было ориентировано прежде всего на российских граждан – жителей регионов. Предполагалось, что для них полеты через Калининград в Западную Европу более удобны, чем через московские аэропорты. Региональные пассажиры могли прибыть в западноевропейский аэропорт назначения в день вылета из российского аэропорта. Отпадала необходимость в возможном переезде из одного московского аэропорта в другой в случае трансферной перевозки. Предполагалось, что из-за большей компактности и меньшей загруженности аэропорта Храброво длительность обслуживания трансферного пассажира в нем будет меньше, а комфорт выше, чем в перегруженных московских аэропортах. Кроме того, судя по расписанию, *КД авиа* обеспечивало более высокие частоты выполнения рейсов по сравнению с другими авиакомпаниями.

Особенности расписания рассмотрим на примере обработки статистических данных, характеризующих работу *КД авиа*, накопленных в течение октября-декабря 2007 г. Регулярные перевозки по узловой схеме в этот период осуществлялись между 14 городами Европы (Киев, Дюссельдорф, Мюнхен, Милан, София, Берлин, Прага, Гамбург, Афины, Рим, Барселона, Лондон, Ганновер, Вена) и 12 городами РФ (Москва-Домодедово, Санкт-Петербург, Казань, Нижний Новгород, Ульяновск, Ростов-на-Дону, Челябинск, Омск, Уфа, Магнитогорск, Самара, Оренбург), а также Астаной. Рейсы в Ульяновск и Оренбург выполнялись транзитом через Нижний Новгород и Самару соответственно.

В случае выполнения ежедневных парных рейсов из Калининграда в перечисленные выше города такая схема позволила бы обеспечить обслуживание не менее 418 авиасвязей ежедневно или 2926 авиасвязей еженедельно с приемлемым для трансферного пассажира временем пересадки в Храброво. Под авиасвязью здесь понимается возможность перевозки пассажира из одного аэропорта в другой в прямом направлении. Перевозка в обратном направлении принимается в качестве отдельной авиасвязи. В приведенное выше число включены также авиасвязи самого Калининграда с другими городами. Направленный характер хаба привел к тому, что вследствие длительных стыковочных времен авиасвязи между российскими (или западноевропейскими) горо-

дами не могут быть приняты во внимание. Кроме того, трудно предположить, что перелет из одного крупного российского (или западноевропейского) города в другой через Калининград может представлять интерес для пассажира.

К рассматриваемому моменту (осень 2007 г.) *КД авиа* располагала 15 самолетами, позволявшими обеспечить следующие частоты выполнения рейсов. Еженедельно во все российские аэропорты совершалось по 6 рейсов. Исключение составляли Москва (Домодедово) и Санкт-Петербург – 14 и 13 рейсов в неделю соответственно. Частоты в аэропорты Европы – от 3 до 7 рейсов в неделю, Астану – 4 рейса в неделю. Расписание еженедельно обеспечивало около 420 приемлемых авиасвязей. Характеристики связей в направлении РФ – Западная Европа незначительно отличались от обратного направления. Так, максимальное еженедельное число приемлемых авиасвязей из РФ в Западную Европу составляло 6, а среднее – 3.7. В обратном направлении – 9 и 3.5 соответственно. Стыковочное время для авиасвязей в направлении РФ – Западная Европа находилось в пределах 0:50-4:40. Среднее время стыковки в этом направлении – 1:36. В обратном направлении диапазон изменения стыковочного времени – 1:10-3:15, средняя величина – 1:33.

Отсутствие ежедневных рейсов из Калининграда в аэропорты РФ и Европы означало отсутствие ежедневных авиасвязей между этими аэропортами. Расширение авиапарка позволило бы увеличить число рейсов, повысив тем самым число авиасвязей. В свою очередь можно предположить, что увеличение числа авиасвязей в хабе явилось бы фактором, обеспечившим рост числа пассажиров. *КД авиа* планировала к концу 2008 г. все рейсы за малым исключением сделать ежедневными, а затем летать по ключевым направлениям дважды в день.

Характеристики расписания движения самолетов авиакомпании *КД авиа* для рассматриваемого периода, представляющие интерес с точки зрения организации трансферных перевозок, сведены в табл. 1.4.1. Учтены московские и петербургские рейсы, включенные в узловое расписание. Так как значения летного времени в прямом и обратном направлениях могут различаться, то в таблице приводятся усредненные величины этой характеристики.

**Характеристики расписания
авиакомпаний КД авиа**

Характеристики	Аэропорты РФ, Астана			Аэропорты Европы		
	min	max	mid	min	max	mid
Летное время рейса в одном направлении по РДС, ч:мин	1:55	5:15	3:29	1:35	3:40	2:23
Время стоянки в аэропорту назначения по РДС, ч:мин	1:35	7:47	4:55	0:50	4:30	2:50
Полное время рейса по РДС, ч:мин	10:25	12:55	11:54	5:35	8:20	7:36
Местное время вылета из Храброво, ч:мин	20:20	22:30	21:54	11:45	13:50	12:15
Местное время прилета в аэропорт назначения, ч:мин	1:15	7:00	3:29	12:55	15:35	13:50
Местное время вылета из аэропорта назначения, ч:мин	5:00	10:25	8:24	15:15	17:45	16:40
Местное время прилета в Храброво, ч:мин	8:40	10:55	9:48	19:15	20:25	19:53

Обращают на себя внимание следующие особенности расписания:

- малый разброс полных времен парного рейса, что вызвано необходимостью скоординированного по времени вылета и прибытия многих самолетов в аэропорт Храброво с целью обеспечения волн рейсов;
- значительный разброс наземного времени стоянки самолетов в аэропортах назначения по указанной выше причине;
- сравнительно малые продолжительности наземных стоянок самолетов, участвующих в хабовых перевозках, что обеспечивает высокую эффективность их использования;
- продолжительности стоянки в зарубежных аэропортах значительно (почти в 2 раза) короче стоянок в российских аэропортах, что приводит заметной экономии валютной составляющей себестоимости рейса;

- удобные для пассажиров времена вылетов из аэропортов РФ и прибытия в аэропорты Западной Европы;
- неудобные для пассажиров ночные времена прибытия самолетов *КД авиа* в аэропорты РФ, что, безусловно, является недостатком узлового расписания.

Анализ расписания показал, что его реализация в течение рассматриваемого периода требовала от авиакомпании *КД авиа* использования 11 самолетов. С учетом необходимости в наличии резерва самолетов, проведении работ по ТОиР и т.д. это количество вполне согласуется с имевшимся тогда у авиакомпании авиапарком.

В рассматриваемый период наряду с *КД авиа* пассажирские перевозки в аэропорту Храброво выполнял еще ряд как российских, так и зарубежных авиакомпаний. Еще в 2006 г., до начала трансферного проекта, *КД авиа* вышла на первое место по числу пассажиров, обслуженных в аэропорту Храброво. Ее доля в общем пассажиропотоке тогда составила 38%. Места остальных авиакомпаний распределились следующим образом: *Аэрофлот* (28%), *Россия* (14%), *Ютэйр* (5%), другие авиакомпании РФ (7%), *Гомельавиа* (Беларусь, 3%), *Белавиа* (Беларусь, 2%), другие иностранные авиакомпании (главным образом, *LOT* – Польша, 3%) [78].

Являясь хабообразующей авиакомпанией, *КД авиа* не привлекла другие авиакомпании к прямому участию в стыковке рейсов. Однако был заключен ряд (только за 10 месяцев 2008 г. – более 40) соглашений о взаимном признании перевозочной документации (интерлайн-соглашений), по которым каждая из сторон получила право продавать единые билеты на перевозки по маршрутам другой стороны. С несколькими авиакомпаниями заключены соглашения о единых сквозных тарифах (прорейтовые соглашения), позволяющие пассажиру при перелете из любого города маршрутной сети одной авиакомпании в любой аэропорт сети другой авиакомпании приобрести один билет по совмещенному более низкому тарифу.

Особенности технологии обслуживания пассажиров в аэропорту Храброво. Начало работы по узловой схеме существенно изменило характер загрузки аэропорта. График интенсивности движения самолетов имеет по два ярко выраженных пика (две

«волны») отправляющихся (время пиков – 10:00 и 20:00) и вылетающих (12:00 и 22:00) рейсов. Величина интенсивности может достигать уровня 10 ВС/ч и более.

«Старый» пассажирский аэровокзал, введенный в эксплуатацию в июле 1979 г., обладает пропускной способностью 400 пассс./ч, что совершенно недостаточно для обслуживания трансферных перевозок. Поэтому в июле 2004 г. началось строительство нового пассажирского аэровокзала, первая очередь которого была открыта в июне 2007 г. Как уже было сказано, завершение строительства и ввод в эксплуатацию второй очереди намечался на 2009 г.

Площадь первой очереди нового аэровокзала составляет 12.4 тыс. м², второй очереди – порядка 14 тыс. м². Общая площадь нового и «старого» аэровокзалов составит 34 тыс. м². Имеющиеся мощности обеспечивают обслуживание 900-1000 пасс./ч. Предполагалось, что к 2010-2012 гг., с введением в эксплуатацию второй очереди аэровокзала и нового оборудования, аэропорт сможет обслуживать около 6-7 млн пассажиров в год. Более 2 млн из них должны были прийти на долю базового перевозчика [79]. В пиковые периоды пропускная способность нового аэровокзала должна была составить 1800 пасс./ч.

Рыночная оценка стоимости первой очереди терминала без учета НДС составляет 2.8 млрд р., в т.ч. здание терминала – 2.37 млрд р., технологическое оборудование – 430 млн р. В 2008 г. на окончание строительства второй очереди терминала планировалось направить около 700 млн р. [80]

В аэровокзале предполагается выделение и параллельное обслуживание трех пассажиропотоков: международных, внутренних и транзитных рейсов. Повышенное внимание уделяется именно пассажирам последней категории, для обслуживания которых предназначен новый терминал. Таким образом, планировалось, что пассажирский аэровокзал будет обслуживать в 4 раза больше трансферных и транзитных пассажиров, чем пассажиров других категорий.

Был использован реверсивный режим работы терминала, при котором операционный зал выполнял функции как зала прилета (во время волны прибытия рейсов), так и зала вылета (во время волны отправления рейсов) [76].

Достраиваемый новый терминал имеет фронтально-дуговую планировочную схему, позволяющую устанавливать самолеты носом к фронту терминала. Для посадки и высадки пассажиров предполагается использовать 8 телескопических трапов. С целью их установки было произведено расширение перрона. Часть теле-трапов первой очереди терминала была смонтирована.

Одно из конкурентных преимуществ трансферной перевозки через Храброво, состоящее в наличии «сквозной» регистрации пассажира на рейс, потребовало серьезного изменения технологии работы аэропорта. Сложным вопросом, требующим разрешения при реализации «сквозной» регистрации, является необходимость личного прохождения таможенного досмотра пассажиром, въезжающим в РФ из-за рубежа вместе со своими вещами.

В аэропорту Храброво была разработана, одобрена таможенными властями и внедрена технология по таможенному оформлению багажа без участия пассажира [81]. С этой целью закуплено и введено в эксплуатацию необходимое оборудование, в т.ч. системы обнаружения взрывчатых веществ, с помощью которых сотрудники соответствующих служб аэропорта проводят досмотр багажа. Процедура досмотра выполняется на первом этаже терминала, пассажир в это время находится на втором этаже. Если возникает необходимость в личном присутствии владельца багажа, то его по громкой связи вызывают на первый этаж. Система досмотра багажа интегрирована с BHS.

Регистрация билетов и оформление багажа начинается на международных рейсах за 3 ч, на внутренних – за 1 ч 40 мин, заканчивается – за 40 мин до времени вылета ВС. Пассажир, опоздавший ко времени окончания регистрации, к перевозке принимается с уплатой соответствующего сбора. В аэровокзале имеется 11 стоек регистрации. Шесть из них размещены на первом этаже «старого» терминала, где регистрируются пассажиры как внутренних, так и международных рейсов, не включенных в узловую систему. Пять стоек – на втором этаже нового терминала, где регистрируют только пассажиров международных рейсов и транзитных (трансферных) пассажиров, проходящих через хаб. Благодаря отсутствию зарегистрированного багажа процедура регистрации значительно упрощается.

Проводилась работа по внедрению электронных методов регистрации пассажиров, включая использование киосков саморегистрации и регистрацию на веб-сайте авиакомпании *КД авиа*.

Пунктов предполетного досмотра два – один для пассажиров внутренних рейсов, состоящий из двух стоек досмотра, второй – для пассажиров международных и транзитных рейсов – там три стойки.

Таможенный досмотр проводится с использованием двух «красных» и одного «зеленого» каналов. Последний открыт в апреле 2008 г. и предназначен для использования пассажирами, у которых нет подлежащих обязательному письменному декларированию предметов или денежных сумм. Его использование значительно снижает затраты времени на процедуру таможенного контроля.

В Храброво были установлены 16 стоек паспортного контроля, время обслуживания одного человека на этом этапе в среднем не превышает 1.5 мин. Для оптимизации обслуживания возрастающего пассажиропотока планировалась установка до 34 кабин паспортного контроля [82].

Для поддержания всех этапов работы хаба в пассажирском терминале аэропорта Храброво были установлены современные системы связи. В феврале 2008 г. компания *Belmel* (Санкт-Петербург) завершила первый этап комплексного проекта по строительству интегрированных систем связи для первой очереди нового терминала, в рамках которого был выполнен монтаж структурированной кабельной системы (СКС), обеспечивающей функционирование локальной компьютерной сети; в багажной зоне на цокольном этаже развернута Wi-Fi-сеть для обслуживания багажной системы; организована телефонная связь [83]. Предполагалось внедрение системы громкого оповещения на весь аэровокзальный комплекс. Все этапы проекта должны были завершиться в 2009 г.

Организация трансферного проекта потребовала от авиакомпании *КД авиа* внедрения новых информационных технологий. В августе 2006 г. авиакомпания подписала с фирмой *Sabre Airline Solutions* пятилетний контракт на приобретение ряда ее программных разработок, а в ноябре того же года перевела на ее программное обеспечение свои системные ресурсы, став лидером среди

российских авиакомпаний по количеству внедренных программных продуктов такого рода. Основные программные разработки, внедренные *КД авиа*, и их функции [84]: *Sabre AirMax* – расчет доходности маршрута от пункта вылета пассажира до конечного пункта назначения; *SabreSonic Passenger Solutions* – управление ресурсом мест, бронированием, ценообразованием и регистрацией пассажиров; *Sabre Rocado* – включает модуль управления самолетным парком, модуль коммерческой загрузки и расписания, а также модуль управления экипажами. Программное обеспечение использует возможности накапливаемой базы знаний.

Заключение договоров на использование электронного билета с системами бронирования и продаж авиаперевозок *Sabre*, *Amadeus*, *Galileo* позволило поднять объем продаж электронных билетов авиакомпании *КД авиа* в Европе с 0.3% в феврале 2007 г. до 82.9% в августе. *КД авиа* существенно опередила по данному показателю все остальные авиакомпании СНГ и РФ.

Для приобретения электронного билета российские пассажиры *КД авиа* должны были бронировать его на веб-сайте авиакомпании или по телефону. Оплата могла быть произведена «электронными» деньгами через Интернет, например, на веб-сайтах платежных систем *МОНЕТА.PY*, *WebMoney* и *Яндекс.Деньги* или через сеть терминалов оплаты «Свободная касса».

Результаты трансферного проекта. Начальные результаты внедрения трансферного проекта выглядели довольно оптимистично. Начиная с 2004 г. авиакомпания и аэропорт демонстрировали уверенный рост объемных показателей. Число пассажиров, перевезенных *КД авиа* распределялось по годам следующим образом: 2004 г. – 208 тыс. пасс.; 2005 г. – 285 тыс. пасс.; 2006 г. – 583 тыс. пасс.; 2007 г. – 653 тыс. пасс. (18 место среди авиакомпаний РФ); 2008 г. – 1361 тыс. пасс. (9 место). Пассажирооборот авиакомпании в 2007 г. составил – 2 272 млн пкм.

До введения в июне 2007 г. узлового расписания авиакомпания активно занималась чартерными перевозками. В 2006 г. было выполнено примерно равное число регулярных и чартерных рейсов, на которые пришлось порядка 45% перевезенных пассажиров. По результатам 2006 г., опубликованным авиакомпанией, в структуре выручки чартерные рейсы занимали 50.8% (регуляр-

ные – лишь 37.3%, остальное пришлось на доходы от прочей, в том числе аэропортовой, деятельности). Средняя занятость пассажирских кресел по всем рейсам составила 71.3%. Более того, чтобы увеличить загрузку и повысить рентабельность на этапе становления хабового бизнеса, авиакомпания интенсифицировала чартерные перевозки. В частности, в первые 4 месяца 2007 г. объем чартерных перевозок в общей структуре составил 57.25%, в то время как регулярные перевозки занимали лишь 42.75%.

С началом работы хаба авиакомпания *КД авиа* практически прекратила выполнять чартерные перевозки. В 2008 г. их доля в общем объеме перевозок составила 1.1%.

Число рейсов, совершенных в 2007 г. (10320 рейсов), превысило показатели 2006 г. более чем на 60%, а число перевезенных пассажиров – на 13%. Это соотношение свидетельствовало о снижении занятости кресел. Действительно, по итогам первого полного месяца работы хаба (июль 2007 г.) средний уровень загрузки самолетов составил 60%, при этом в августе 2007 г. занятость пассажирских кресел варьировалась в пределах 60-65%. Представители менеджмента авиакомпании заявили, что подобный уровень в целом соответствует их ожиданиям. Кроме того, зарубежный опыт говорит о том, что загрузка в хабовой системе на 20-25% меньше, чем на чартерах, однако доход с одного пассажира значительно выше. По мере «раскрутки» трансферного проекта средний уровень занятости мест повышается.

На загрузку рейсов влияние оказывает сезонный фактор. В качестве примера приведем рейсы Самара-Калининград, где минимум среднемесячного коэффициента загрузки был достигнут в ноябре 2007 г. – 23%, а максимум в июне 2008 г. – 57% (последний месяц по которому имеются статистические данные на момент подготовки работы). При этом темпы сезонного роста пассажиропотока по рассматриваемому направлению превышали средние его темпы по аэропорту Курумоч. Следует отметить неравномерность загрузки в зависимости от направления перевозки. Так, среди зарубежных направлений, обеспечивающих высокий уровень загрузки, выделялись рейсы в города Германии [81].

Данные по числу обслуженных аэропортом Храброво пассажиров выглядят следующим образом: 2004 г. – 116 тыс. пасс.;

2005 г. – 280 тыс. пасс.; 2006 г. – 732.6 тыс. пасс.; 2007 г. – 1098.3 тыс. пасс.; 2008 г. – 1 874.5 тыс. пасс. (7 место среди аэропортов РФ). На начало III квартала 2008 г. доля трансферных пассажиров составляла 50-60% всего пассажиропотока аэропорта. В общем пассажиропотоке Храброво доля авиакомпании *КД авиа* выросла с 38% в 2006 г. и до 67% в 2007-2008 гг.

Таким образом, начальный этап построения авиакомпанией *КД авиа* системы трансферных перевозок в аэропорту Храброво считался вполне успешным.

Наиболее весомыми предпосылками этого успеха явились:

- наличие собственного аэропорта, имеющего удачное географическое положение;
- серьезная государственная поддержка в плане финансирования реконструкции аэропорта и системы УВД, а также поддержка местных властей, состоявшая, в частности, в освобождении от уплаты налога на имущество и уменьшении налога на прибыль;
- глубокая реконструкция и расширение пассажирского комплекса аэропорта и оптимизация его работы с целью обслуживания значительного объема трансферных перевозок;
- рациональный выбор сегмента рынка пассажирских воздушных перевозок (ориентация на жителей регионов РФ);
- привлекательность перелета не через московские аэропорты для региональных пассажиров;
- политика по формированию парка самолетов. Использование однотипных топливно-экономичных самолетов иностранного производства, имеющих возраст, не требующий их модернизации в среднесрочной перспективе;
- проведение рекламной компании в городах – пунктах трансферной сети;
- эффективная маркетинговая политика, гибкая система тарифов, наличие разнообразных скидок.

Среди факторов, негативно повлиявших на работу трансферной программы можно отметить:

- недостаточно развитую маршрутную сеть авиакомпании *КД авиа*;

- наличие серьезной конкуренции с крупными национальными авиаперевозчиками, такими как *Аэрофлот* и *Lufthansa*, и узловыми аэропортами;
- высокую долговую нагрузку, вызванную необходимостью привлечения заемных средств, связанных с запуском хабовой системы;
- значительный объем средств, направляемых на оплату лизинга ВС;
- отставание от графика прилета новых самолетов, вызванное независимыми от компании причинами, а именно более длительным капитальным ремонтом, предусмотренным для этих самолетов, а также изменениями в таможенном законодательстве РФ;
- отсутствие в авиакомпании достаточных мощностей и необходимого числа специалистов для выполнения работ по ТОиР самолетов иностранного производства. Необходимость использования в этих целях услуг других авиакомпаний.

Влияние перечисленных факторов, усугубившихся в условиях сначала резкого роста цен на авиаГСМ, а затем развивающегося мирового финансово-экономического кризиса, привело к нарастанию задолженности *КД авиа* различным кредиторам, перебоям в перевозочном процессе и, в конечном счете, к банкротству авиакомпании. Отмечалось [85], что кризис сильнее, чем в Москве, сказался на деловой активности в российских региональных центрах, т.е. сократил именно тот пассажиропоток, на который делала ставку *КД авиа*. Обещанная авиакомпании государственная поддержка не была оказана. В сентябре 2009 г. было аннулировано свидетельство эксплуатанта *КД авиа*, а в октябре самолеты возвращены лизингодателям. Трансферный проект на базе аэропорта Храброво свернут.

Несмотря на то, что, к сожалению, этот и ряд других трансферных проектов нельзя признать успешными, моменты, связанные с использованием узловых аэропортов, не стали непосредственными причинами неудач, а практический опыт, накопленный отечественными авиапредприятиями в ходе реализации этих проектов, заслуживает самого внимательного изучения.

2. МОДЕЛИ ПОТОКОВ ТРЕБОВАНИЙ, ОБСЛУЖИВАЕМЫХ УЗЛОВЫМ АЭРОПОРТОМ

2.1. Волновой принцип организации расписания узлового аэропорта

Процесс преобразования аэропорта в хаб ставит ряд вопросов, основной из которых – обеспечение высокой пропускной способности системы обслуживания пассажиров в течение непродолжительных интервалов времени прибытия и вылета многих самолетов. Решение данной задачи связано с существенными изменениями организационных и технологических схем работы аэропорта, а главное – со значительными капиталовложениями. Поэтому решению о выборе аэропортом узловой модели функционирования должен предшествовать детальный количественный анализ возможных путей повышения пропускной способности его комплексов, обеспечивающих должный уровень безопасности и регулярности перевозок при минимальных затратах.

Одним из наиболее предпочтительных методов выполнения такого анализа является имитационное моделирование, предполагающее формирование вероятностной модели исследуемого процесса или объекта и ее использование для оптимизации его характеристик. Создать детальную аналитическую модель для описания функционирования крупного аэропорта, являющегося сложной динамической системой, включающей большое число разноуровневых подсистем, не представляется возможным. Поэтому в большинстве ситуаций имитационное моделирование является единственным методом изучения процессов, происходящих в аэропорту. Моделирова-

ние производственных процессов узлового аэропорта, необходимое при решении задач расчета и оптимизации его параметров, предполагает знание характера, особенностей и числовых характеристик потока рейсов, прибывающих в аэропорт для обслуживания.

«Идеальная волна». Как уже было сказано, расписание узловых аэропортов, не относящихся к перегруженным «мегахабам», строится по волновому принципу, что позволяет значительно повысить число трансферных авиасвязей через узловую аэропорт.

Под авиасвязью понимается упорядоченная пара аэропортов, включающая аэропорты отправления и назначения, между которыми возможна воздушная перевозка. Возможность перевозки определяется наличием воздушных линий, соединяющих рассматриваемую пару аэропортов. Воздушная линия – это утвержденный постоянный маршрут регулярных полетов транспортных самолетов между населенными пунктами. Авиасвязь может обеспечиваться несколькими воздушными линиями, проходящими через различные промежуточные аэропорты, благодаря чему зачастую в пределах одной авиасвязи возможны несколько вариантов перевозки пассажиров. Авиасвязи в прямом и обратном направлениях рассматриваются как различные.

В свою очередь трансферная авиасвязь – это авиасвязь, предполагающая наличие аэропорта трансфера. В случае разветвленной сети авиалиний, характерной для густонаселенных районов, обычно существует несколько вариантов перевозки в пределах авиасвязи, реализуемых несколькими авиаперевозчиками через различные (один или несколько) аэропорты трансфера. В этом смысле понятие трансферной авиасвязи нуждается в уточнении. Далее под трансферной авиасвязью понимается вариант перевозки на определенной авиасвязи, предполагающий пересадку пассажиров между рейсами одной и той же или различных авиакомпаний в определенном аэропорту трансфера. Для обеспечения пересадки с приемлемыми для пассажиров характеристиками расписание в узловом аэропорту должно быть скоординировано с целью создания стыковок между прибывающими и вылетающими рейсами. Трансферные авиасвязи, обеспечивающие возможность перевозки как в прямом, так и обратном направлениях, называются двусторонними трансферными авиасвязями.

В ряде зарубежных работ [35, 86] для описания волновой структуры расписания введено понятие «основной» или «идеальной» волны, которая определяется как «совокупность прибывающих и вылетающих рейсов, упорядоченных таким образом, что каждый прибывающий рейс обеспечивает стыковку с каждым вылетающим рейсом, которую можно предсказать заранее».

В идеальной волне можно выделить три временных интервала, первый из которых соответствует волне прибытия рейсов, второй – периоду передачи трансферных пассажиров и их багажа на стыковочные рейсы (периоду трансфера), третий – волне отправления рейсов. Описываемая здесь идеальная волна в большей степени соответствует всенаправленному хабу, в котором обслуживаемые рейсы без большой ошибки могут быть разбиты на две категории. При этом в первую категорию включаются рейсы, требующие более, а во вторую – менее продолжительного обслуживания. Для западноевропейских аэропортов традиционно используется разделение на меж- и внутриконтинентальные рейсы. Это может быть также разделение рейсов на магистральные и региональные, дальние и ближние, МВЛ и ВВЛ и др. Более детальная классификация рейсов требует усложнения схемы, что не всегда оправдано.

К характеристикам, определяющим идеальную волну, можно отнести, во-первых, минимальные времена стыковки (*МСТ*) для магистральных и региональных рейсов, во-вторых, максимально допустимые значения продолжительности стыковки и, в-третьих, максимальное число рейсов по расписанию, которое аэропорт способен обслужить в единицу времени.

Первая и последняя характеристики определяются возможностями аэропорта, в частности, пропускной способностью его летного поля, авиационно-технического и пассажирского комплексов. Диапазон значений *МСТ*, принимаемый в различных узловых аэропортах, зависит от аэропорта, авиакомпании, класса и маршрута пассажирской перевозки (табл. 1.3.2). Вторая характеристика – максимально допустимая продолжительность стыковки, характеризует степень привлекательности пересадки в хабе с точки зрения трансферного пассажира.

На рис. 2.1.1, иллюстрирующем общую структуру идеальной волны для всенаправленного узлового аэропорта, использованы

следующие обозначения: λ_{II}, λ_B – интенсивности потоков прибывающих и вылетающих рейсов, соответственно; $C = t_3$ – центр идеальной волны – точка, относительно которой профиль идеальной волна симметричен. Кроме того, пусть M_M – МСТ для стыковок между магистральными рейсами, M_P – МСТ между региональным и магистральным рейсами (и наоборот), T_P – максимально допустимое время стыковки для региональных рейсов и T_M – максимально допустимое время стыковки между региональным и магистральным рейсами (и наоборот). Величины M_M, M_P, T_P и T_M однозначно определяют временные интервалы, в течение которого должны быть запланированы прибытия или отправления как магистральных, так и региональных рейсов узлового аэропорта. Действительно, прибытия магистральных рейсов должны планироваться в пределах между моментами

$$t_1 = C - T_M + \frac{1}{2}T_P \quad \text{и} \quad t_3 = C - M_M + \frac{1}{2}M_P$$

Прибытия региональных рейсов должны быть запланированы в пределах интервала между $t_2 = C - \frac{1}{2}T_P$ и $t_4 = C - \frac{1}{2}M_P$

Вылеты региональных рейсов должны планироваться в пределах интервала между $t_6 = C + \frac{1}{2}M_P$ и $t_8 = C + \frac{1}{2}T_P$

Вылеты магистральных рейсов должны быть запланированы в пределах интервала между $t_7 = C + M_M - \frac{1}{2}M_P$ и $t_9 = C + T_M - \frac{1}{2}T_P$

Схема позволяет определить также минимально и максимально допустимые времена стыковок между двумя магистральными рейсами, а именно $M = 2M_M - M_P$ и $T = 2T_M - T_P$ соответственно.

Следует отметить, что идеальная волна является абстрактной схемой, не реализуемой в полной мере в условиях работы реального аэропорта. Среди причин этого: дефицит слотов; интенсивное

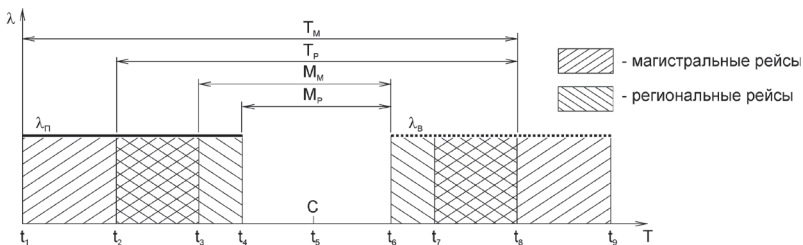


Рис. 2.1.1. Схема идеальной волны

движение рейсов, не входящих в веерную схему; конкуренция между авиакомпаниями; необходимость обеспечения более высоких частот рейсов и т.п. Тем не менее, модель идеальной волны может оказаться весьма полезной, так как позволяет связать временные характеристики идеальной волны (M_c , M_p , T_c и T_i) с пропускной способностью аэропорта (которая должна быть не менее $\lambda_{п}$, $\lambda_{в}$) и числом рейсов в течение волны, что необходимо при решении таких задач, как составление расписания, выделение слотов, планирование загрузки комплексов аэропорта, расчет потребной численности персонала и технических средств и др.

Структура системы волн. Волна рейсов, для описания которой используется изложенная выше модель, входит в состав системы волн узлового аэропорта, имеющей определенную структуру. Согласно выводам, изложенным в работах [35, 86], структура системы волн узловой авиакомпании является полностью определенной, если заданы следующие ее параметры:

- 1) число волн;
- 2) временной интервал между одинаковыми точками двух последовательных волн – так называемый «цикл хаба» [29];
- 3) место постоянного базирования ближне- и среднемагистральных самолетов авиакомпании.

Место постоянного базирования самолетов определяется тем, где располагается на ночную стоянку ближне- и среднемагистральный парк узловой авиакомпании. Ее самолеты могут базироваться в хабе, в периферийных аэропортах или, в случае так называемого «двойной базирования», и в хабе и периферийных аэропортах.

Для формализованного описания структуры системы волн в указанных выше работах предлагается использовать комплекс из трех параметров, включающий: Q – число волн структуры волновой системы; C – цикл хаба; H – фиктивная переменная, такая что: $H = 0$, если ближне- и среднемагистральный парк авиакомпании располагается в хабе; $H = 1$, если – в периферийных аэропортах; $H = 2$ – в случае двойного базирования. Таким образом, комплекс показателей (Q, C, H) однозначно идентифицирует структуру волновой системы авиакомпании. Параметры, определяющие структуру волновой системы, взаимосвязаны. Например, C будет уменьшаться, если Q увеличивается.

На рис. 2.1.2 приведены несколько примеров волновых систем узловых аэропортов. Предполагается, что волны прилетов и вылетов реализуются только в дневное время суток, не ранее 7:00 и не позднее 22:00. Первый из приведенных примеров, обозначенный $(2,6,0)$, соответствует системе с 2 волнами, основанной на 6-часовом цикле, с парком самолетов, базирующимся в хабе. Такая система предполагает, что вторая из ежедневных волн не является полной, т.е. волна прилетов в хаб не сопровождается волной вылетов из хаба. Фактически это означает, что трансферные пассажиры, следующие через хаб из одного периферийного аэропорта в другой, могут совершить свою поездку не чаще, чем 1 раз в сутки. Такая низкая частота значительно снижает привлекательность хаба для обслуживания

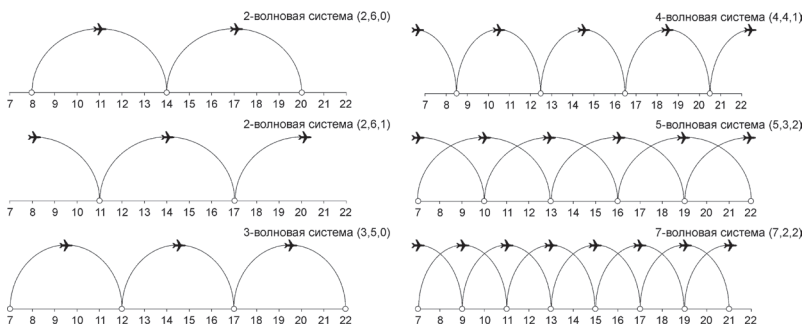


Рис. 2.1.2. Примеры волновых систем

трансферных перевозок. При переходе к структуре (2,6,1), то есть при перебазировании парка из хаба в периферийные аэропорты, обе волны становятся полными.

Увеличение числа волн может быть достигнуто снижением продолжительности цикла хаба. В этом случае могут быть получены такие волновые системы, как (3,5,0) и (4,4,1). Естественным ограничением на этом пути является минимальная длительность парного рейса, которая, даже на линиях малой протяженности, как правило, не может быть меньше 4 ч. Этому времени соответствует аналогичная продолжительность цикла хаба, обеспечивающая 4-волновую систему.

Для еще большего увеличения числа волн разрабатываются более сложные системы волн с использованием схемы двойного базирования авиапарка ($H=2$). В случае систем (5,3,2), (7,2,2) самолеты, выполняющие рейсы в периферийные аэропорты, «пропускают» волну, следующую за их вылетом, и прибывают к последующей и т.д. Отметим, что схемы с таким количеством волн характерны только для больших хабов, обслуживающих высокочастотные авиалинии.

Примеры волновых систем для 6 ведущих европейских хабов приведены на рис. 2.1.3. Исходными данными для построения графиков послужили расписания рейсов хабообразующих компаний для определенной даты – 19 января 2005 г. (среды). Движение рейсов других обслуживаемых в хабах авиакомпаний не учтено. В общем случае параметры волновой структуры расписания могут заметно меняться от одного дня недели к другому, но здесь интерес представляет ее общий вид, позволяющий выявить ее принципиальные особенности.

В тех аэропортах, где волновая структура четко выражена, число волн возрастает от 3 до 6 по мере увеличения масштаба и пропускной способности аэропорта. В Европе до конца 90-х гг. нормой были 3 волны в день. Исключение составлял Франкфурт-на-Майне с его 4-волновой структурой. Повышение пропускной способности позволило в 1997 г. аэропорту Схипхол (Амстердам) организовать прием 4-х волн в день [65]. Несколько ранее, в 1996 г., число ежедневных волн в аэропорту им. Ш. де Голля (Париж) составило 5, а к 2005 г. возросло до 6.

Авиакомпания Alitalia в соответствии с зимним расписанием 2004–2005 гг. выполняла перевозки через два своих узловых аэропорта – им. Леонардо да Винчи (Фиумичино, Рим) и Мальпенса (Милан). Реализация расписания требовала использования парка из 19 широко- и 127 узкофюзеляжных самолетов. Самолеты, обслуживающие внутриевропейские авиалинии, базировались, как правило, не в хабах, а в периферийных аэропортах [29]. Узловой аэропорт Мальпенса характеризовался тремя волнами с центрами около 9:00, 14:00 и 20:00 со средней величиной цикла хаба 5 ч 30 мин. Таким образом, структура его волновой системы описывается тройкой показателей вида (3, 5½, 1).

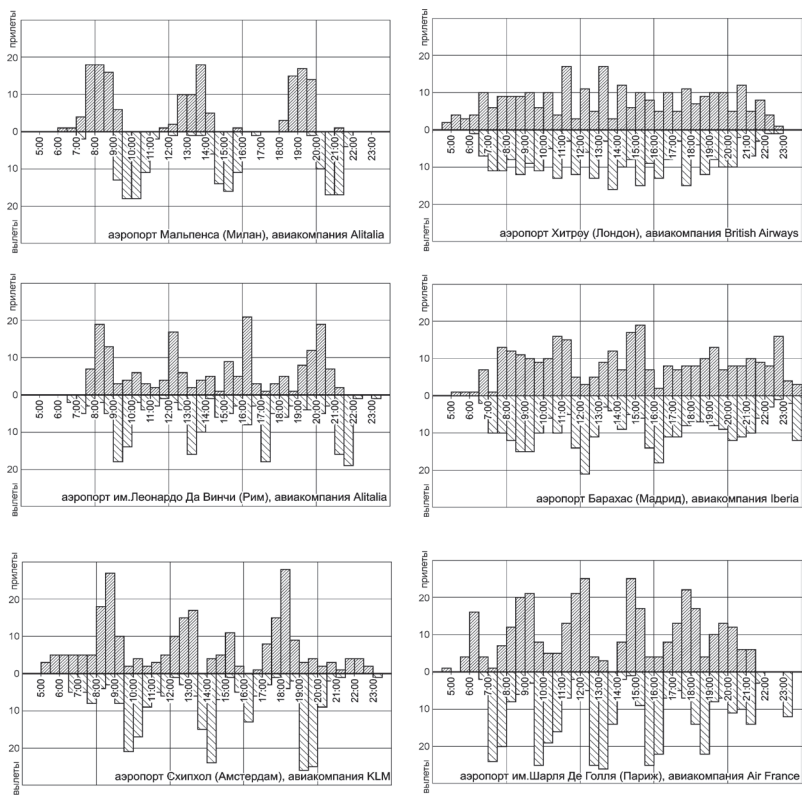


Рис. 2.1.3. Волновые системы ведущих европейских узловых аэропортов

Второй узловой аэропорт Alitalia – им.Леонардо да Винчи (Фиумичино, Рим) характеризовался четырьмя волнами с центрами около 9:00, 13:00, 17:00 и 21:00. Комплекс его показателей может быть описан как (4, 4, 1).

Расписание авиакомпании Iberia в аэропорту Баракас и особенно British airways в Хитроу не имеет выраженной волновой структуры, что может объясняться меньшей пропускной способностью (на то время) и перегруженностью этих аэропортов.

Отметим, что волны могут существенно различаться по своим характеристикам. В промежутках между «основными» волнами, включающими большее число рейсов, могут формироваться «вспомогательные» волны с заметно меньшим числом рейсов, дополняющие основные. Это приводит к некоторому усложнению комплекса показателей (Q, C, H) для аэропортов с такой «искаженной» системой волн.

Планирование узловых сетей требует решения ряда проблем, суть которых изложена ниже.

1. Реализация узлового расписания требует синхронизации времени прибытия многих рейсов в узловой аэропорт. В случае обслуживания авиалиний различной протяженности такая синхронизация достигается увеличением времени стоянки в периферийных аэропортах, расположенных на небольшом расстоянии от хаба. Для исключения вынужденных простоев самолетов авиакомпании могут планировать фидерные рейсы по замкнутому маршруту с возвращением в хаб через несколько периферийных аэропортов. Могут также использоваться описанные выше схемы с «исключенными» дальними рейсами одной из волн.

2. Выбор для постоянного базирования самолетов периферийных аэропортов, не являющихся базовыми для авиакомпании, позволяет ей повысить эффективность узловой схемы перевозок, исключив наличие неполных волн. Однако этот выбор приводит к повышению уровня аэропортовых, командировочных и других расходов. Частичное решение этой проблемы авиакомпании находят в заключении договоров с аэропортами на более выгодных условиях, оптимизации расписания с целью сокращения времени пребывания в периферийных аэропортах и т.п.

3. Жестко выстроенное узловое расписание уязвимо в случае нарушений регулярности. Задержки прибытия рейсов на завершающей стадии волны прилетов приводят к массовым «разрывам» стыковок. Особенно вредны сбои, возникающие в начале дня. Они приводят к распространению задержек по всей узловой сети и многократно увеличивают число нарушенных стыковок.

4. В случае очень разветвленных узловых сетей рейсы из всех периферийных аэропортов не могут быть одновременно приняты в хабе по причине ограниченности его пропускной способности. Встает задача о разнесении этих рейсов во времени и распределении их по нескольким волнам. Такое распределение приводит к увеличению времени стыковки между рейсами, вошедшими в разные волны, и может сделать неприемлемой трансферную авиасвязь, обеспечиваемую этими рейсами. В общем, распределение рейсов по нескольким волнам приводит к снижению числа потенциальных трансферных авиасвязей. Минимизировать негативное влияние этого эффекта позволяет рациональное распределение рейсов по волнам, учитывающее реальную привлекательность трансферной авиасвязи для пассажиров. Данная задача может решаться с использованием методов математического программирования. Перекрытие волн рейсов, не требующих стыковок, позволяет сгладить пики нагрузки на службы аэропорта и является основополагающим принципом «ролл-хаббинга».

2.2. Модели оценки привлекательности трансферных авиасвязей и согласованности расписания узлового аэропорта

В качестве важнейшей цели функционирования волновой системы узлового аэропорта признается максимизация его связности, под которой понимается возможность поддержания трансферных авиасвязей. Связность хаба зависит:

- 1) от количества периферийных аэропортов, связанных с хабом прямыми рейсами;
- 2) частоты выполнения рейсов;
- 3) времени прибытия и отправления рейсов, запланированных расписанием хаба.

Большое влияние на уровень связности оказывают масштабы узлового аэропорта. Крупные узловые аэропорты имеют преимущество, поскольку связность возрастает пропорционально квадрату числа рейсов.

Если рассматривать некоторую совокупность из N_A аэропортов, все элементы которой связаны авиарейсами, то число двусторонних прямых авиасвязей определится:

$$N_{np} = \frac{N_A(N_A - 1)}{2}$$

Под прямыми понимаются авиасвязи, перевозка в пределах которых не предполагает посадки в промежуточном аэропорту.

Добавление к сети еще одного аэропорта, играющего роль хаба, позволяет увеличить общее число двусторонних авиасвязей, как прямых N_{np} , так и трансферных N_{mp} , в соответствии со следующей зависимостью:

$$N_{общ} = N_{np} + N_{mp} = N_A + \frac{N_A(N_A - 1)}{2} = \frac{N_A(N_A + 1)}{2}$$

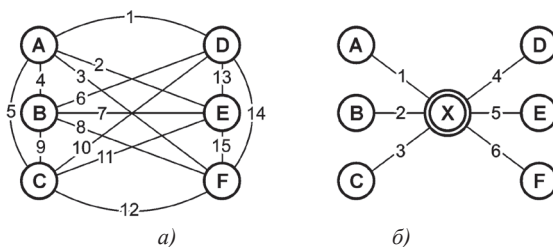


Рис. 2.2.1

Число прямых авиасвязей при этом сокращается до N_A , что позволяет значительно расширить охват рынка авиаперевозок, не расширяя авиапарка. Так, например, для организации перевозок внутри сети, включающей 6 аэропортов, с частотой 1 рейс в сутки, необходимо выполнение 15 ежедневных рейсов (рис. 2.2.1а).

Организация же перевозок через хаб – 7-й аэропорт сети позволяет сократить число ежедневных рейсов до 6, обеспечив 21 ежедневную двустороннюю авиасвязь (рис. 2.2.1б). Влияние узлового аэропорта на возможное число обслуживаемых двусторонних авиасвязей отражено в табл. 2.2.1 [33].

Табл. 2.2.1.

Число двусторонних авиасвязей хаба

Число периферийных аэропортов	Потребное число прямых авиасвязей при отсутствии хаба	Возможное общее число авиасвязей при наличии хаба
2	1	3
6	15	21
10	45	55
50	1225	1275
100	4950	5050

Следует заметить, что указанное выше число авиасвязей через хаб может быть реализовано только при наличии скоординированного расписания, обеспечивающего возможность приемлемых стыковок рейсов в хабе. Малые узловые авиакомпании также могут обеспечить высокую связность, повысив уровень согласованности расписания, который не зависит от масштаба хаба.

Координация расписания в хабе позволяет сделать его трансферные авиасвязи более привлекательными для пассажиров, что, в свою очередь, обеспечивает рост уровня пассажиропотока в аэропорту в целом и на каждой трансферной авиасвязи в отдельности.

На привлекательность трансферной авиасвязи определенно го хаба влияние оказывает целый комплекс разнородных факторов, среди которых важнейшие [29]:

- длительность перевозки, в том числе в сравнении с прямой перевозкой и другими вариантами трансферной перевозки (в случае их наличия). Длительность перевозки с одной пересадкой складывается из продолжительностей перевозок пассажира из аэропорта отправления в хаб, из хаба – в аэропорт назначения, а также ожидания пересадки в хабе. Очевидно, сумма первых двух складываемых будет тем меньше, чем ближе расстояние трансферной перевозки к расстоянию перевозки прямой;
- величина стыковочного времени в аэропорту пересадки, которая не должна быть слишком малой, чтобы гарантировать пассажиру возможность пересесть на стыковочный рейс (особенно в случае задержки прибытия в хаб), и слишком большой, чтобы исключить длительное ожидание в хабе;
- стоимость перевозки (тариф), в том числе в сравнении с прямой перевозкой и другими вариантами трансферной перевозки (в случае их наличия). Тарифная политика авиакомпании в целях привлечения дополнительного числа пассажиров и повышения коэффициента занятости мест должна предусматривать возможность применения сниженных тарифов на перевозку с пересадкой;
- наличие и привлекательность других конкурентоспособных прямых и транзитных вариантов перевозки, доступных пассажирам, в том числе другими видами транспорта;
- расстояние между пунктами отправления и назначения пассажира. Относительно небольшое расстояние перевозки, как правило, означает широкие возможности по выбору вида транспорта, вариантов перевозки и тарифов на нее, что является причиной снижения привлекательности

трансферной перевозки. Напротив, в случае значительного расстояния перелет с пересадкой (или пересадками) зачастую является единственным способом добраться до нужного пункта назначения;

- время отправлений и прибытий, частота выполнения рейсов, используемый тип самолета, регулярность выполнения рейсов. Как правило, использование перевозчиком узловой схемы позволяет существенно повысить частоту рейсов между хабом и периферийными аэропортами, что обеспечивает возможность выполнения более высокочастотных перевозок на трансферной авиасвязи. Это означает снижение времени ожидания перевозки пассажиром, что, несмотря на увеличение ее длительности, является весомым аргументом в пользу выбора пассажиром трансферной авиасвязи;
- организация перевозки – участие в перевозке одного или нескольких авиаперевозчиков; наличие соглашений между передающей и принимающей авиакомпаниями. Привлекательность трансферной перевозки с точки зрения пассажира повышается, если она выполняется рейсами одной авиакомпании или авиакомпаниями, входящими в один альянс. Если же перевозка осуществляется несколькими перевозчиками, весьма желательным считается наличие заключенных между ними соглашений типа интерлайн или код-шеринг. Все это служит определенными степенями защиты пассажира в случаях опоздания к стыковочному рейсу, потери багажа и т.п.;
- прочие факторы, такие как комфорт и качество обслуживания в аэропорту пересадки, возможность интересно и полезно провести время в аэропорту/городе пересадки, репутация авиаперевозчика и целый ряд других обстоятельств вплоть до уровня «строгости» таможенного контроля в хабе.

В работе [35] приведена классификация по уровню качества стыковок рейсов для европейского рынка авиаперевозок. Здесь в качестве критерия привлекательности выступает максимальная продолжительность пребывания пассажира в аэропорту пересадки (табл. 2.2.2).

Табл. 2.2.2.

Классификация стыковок рейсов

Максимально допустимое время стыковки, мин		Качество стыковки		
		«Отлично»	«Хорошо»	«Плохо»
Тип стыковки	Континентальный рейс – Континентальный рейс	90	120	180
	Континентальный рейс – Межконтинентальный рейс	120	180	300
	Межконтинентальный рейс – Межконтинентальный рейс	120	240	720

Для оценки степени временного согласования расписания рейсов в узловом аэропорту предложен ряд показателей, различающихся числом учитываемых факторов и, соответственно, сложностью формы самого показателя.

В работе [86] вводится показатель, названный авторами «взвешенное число трансферных авиасвязей» (Weighted indirect connection number), обозначаемый WNX . Он учитывает увеличение продолжительности трансферной перевозки по сравнению с прямой перевозкой, вызванное пересадкой в хабе и увеличением полетного времени. Расчет показателя производится для определенного интервала времени действия расписания, как правило, для одних суток. Расчетные формулы имеют вид:

$$WNX = \sum_k WI_k \quad (2.2.1)$$

$$WI_k = \begin{cases} \frac{1 \left(1 - \frac{IFT_k - DFT_k}{DFT_k} \right) + 2.4 \left(1 - \frac{TT_k}{MACT_k} \right)}{3.4} = \\ \frac{2 - \frac{IFT_k}{DFT_k} + 2.4 \left(1 - \frac{TT_k}{MACT_k} \right)}{3.4}, & \text{если } \begin{cases} MCT_k \leq TT_k \leq MACT_k \\ 1 < \frac{IFT_k}{DFT_k} \leq 1.4 \end{cases} ; \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

где WI_k – параметр, получивший название «взвешенная косвенная связь»;

$i = 1, \dots, n_a$ – рейс, прилетающий в хаб в течение периода времени T ;

$j = 1, \dots, n_d$ – рейс, вылетающий из хаба в течение T ;

n_a – число рейсов, прилетающих в хаб в течение периода времени T ;

n_d – число рейсов, вылетающих из хаба в течение T ;

t_{ai} – время прибытия рейса i ; t_{dj} – время вылета рейса j ;

$TT_k = t_{dj} - t_{ai}$ – время трансфера между рейсом i и рейсом j , где $k = (i, j)$;

MCT_k – минимальное стыковочное время между рейсами i и j , зависящее от типа стыковки, категории рейсов и т.д.;

$MACT_k$ – максимально допустимое время стыковки между рейсами i и j ;

IFT_k – полное время трансферной перевозки через хаб от пункта отправления рейса i до пункта назначения рейса j ;

DFT_k – расчетное время прямой перевозки от пункта отправления i до пункта назначения j .

Как следует из (2.2.1), качество стыковки снижается с ростом времени пересадки в хабе и увеличением разрыва между продолжительностями трансферной и прямой перевозок. Трансферная авиасвязь становится неприемлемой для пассажиров в случаях, если время трансфера превосходит величину $MACT$, и/или длительность трансферной перевозки превышает более чем на 40% длительность перевозки прямой.

В качестве максимально допустимого времени стыковки для западноевропейских аэропортов в [35] рекомендуются следующие величины. В случае стыковки между двумя континентальными рейсами $MACT_k = 180$ мин. В случаях стыковок между континентальным и межконтинентальным или двумя межконтинентальными рейсами величина $MACT_k$ увеличивается до 300 мин.

Подсчет показателя WNX позволяет оценить уровень связности хаба. В случае $WNX \geq 2500$ связность оценивается как «высокая»; если $2500 \leq WNX < 500$ – связность средняя; для $WNX < 500$ – связность низкая.

Авторами работы [33] предложен «коэффициент связности» (connectivity ratio), выражающий долю «неслучайных» стыковок в хабе, обозначаемый CR . Вводится понятие жизнеспособной стыковки, которая, согласно данному в [6] определению, представляет собой любое отправление рейса, которое удовлетворяет минимальному (MCT) и максимально допустимому ($MACT$) времени стыковки после каждого прибывающего в хаб рейса. В качестве величин MCT и $MACT$ предлагаются значения 45 мин и 90 мин соответственно, позволяющие обеспечить формирование жизнеспособной связи для пары, состоящей из одного прибывающего и одного вылетающего рейса.

Наряду с использованными выше вводится обозначение m_{ij} – фиктивная переменная, такая, что $m_{ij} = 1$, если $45 \text{ мин} \leq (t_d - t_a) \leq 90 \text{ мин}$, и $m_{ij} = 0$, в противном случае.

Таким образом, коэффициент связности может быть записан:

$$CR = \frac{N_c}{N_r}$$

где N_c – общее количество жизнеспособных связей, предлагаемых в хабе в период времени T ;

N_r – количество жизнеспособных связей, которое ожидалось бы в случае чисто произвольного распределения прибытий и отправлений в расписании в течение интервала времени T . Как правило, T принимается равным одному рабочему дню аэропорта или авиакомпании, т.е. $T = 15 \div 18$ ч.

Величины N_c и N_r рассчитываются по формулам:

$$N_c = \sum_i \sum_j m_{ij}$$

$$N_r = n_a \frac{n_d}{T} (MACT - MCT) = n_a n_d \frac{MACT - MCT}{T}$$

Главным преимуществом коэффициента связности является простота его вычисления. Стыковки подразделяются только на жизнеспособные и нежизнеспособные. Жизнеспособные связи определяются только исходя из простейших временных ограничений, при этом пространственный и другие факторы из рассмотрения исключаются. Какая-либо количественная характеристика степени жизнеспособности не используется.

Для повышения корректности оценки временного согласования расписания хаба в работе [86] предложен показатель, названный авторами «**взвешенный коэффициент связности**» (weighted connectivity ratio, WCR). Для его определения производится ранжирование стыковок по временным и пространственным показателям качества, роль которых играют длительность ожидания пассажиром стыковочного рейса в хабе и относительное увеличение расстояния трансферной перевозки по сравнению с прямой перевозкой. Кроме того, учитывается разделение рейсов на континентальные и межконтинентальные.

Как и в предыдущих случаях, расчет производится для рейсов узлов авиаконпании в течение одного отдельно взятого дня. Наряду с временными параметрами MCT_k и $MACT_k$ используется ICT_k – «среднее время продолжительности стыковки» – показатель, учитывающий различное качество обслуживания с точки зрения привлекательности для пассажиров, совершающих посадку с рейса i на рейс j . Все жизнеспособные стыковки подразделяются на две категории: «быстрые», для которых выполняется условие $MCT_k \leq TT_k \leq ICT_k$, и «медленные», для которых $ICT_k \leq TT_k \leq MACT_k$. В табл. 2.2.3 представлены типичные значения MCT_k и возможные значения ICT_k и $MACT_k$ – для континентальных и межконтинентальных стыковок европейских хабов.

Табл. 2.2.3.

Минимальные (MCT_k), средние (ICT_k) и максимально допустимые ($MACT_k$) значения стыковочного времени

Вид стыковки	Время стыковки (мин)		
	MCT_k	ICT_k	$MACT_k$
Континент – Континент	45	90	120
Континент – Межконтинент	60	120	180
Межконтинент – Межконтинент	60	120	180

Временное ранжирование стыковок отражается на форме записи так называемой «матрицы стыковок», первоначально введенной в работе [87]. Это матрица с числом строк и столбцов, соответствующим количеству прилетающих (n_a) и вылетающих (n_d) за время T рейсов. В данном случае величины элементов матрицы стыковок τ_{ij} зависят от качества стыковок и определяются:

$$\tau_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } MCT_k \leq TT_{ij} \leq ICT_k, \\ 0.5, & \text{если } ICT_k \leq TT_{ij} \leq MACT_k, \\ 0, & \text{если } TT_{ij} \leq MCT_k. \end{cases}$$

Аналогичным образом жизнеспособные стыковки подразделяются на две категории по пространственному признаку, в качестве которого используется отношение расстояния трансферной перевозки (ID_k) от пункта отправления рейса i до пункта назначения рейса j к расстоянию прямой перевозки (DD_k) от i до j .

Используя введенные выше обозначения можно записать:

$$DR_k = \frac{ID_k}{DD_k}$$

Первую категорию составляют более приемлемые для пассажиров стыковки, для которых расстояние трансферной и прямой перевозок не слишком различаются: $DR_k \leq 1.2$.

Вторую категорию образуют менее приемлемые стыковки, попадающие в диапазон $1.2 \leq DR_k \leq 1.5$.

Формируется «пространственная матрица стыковок», также имеющая n_a строк и n_d столбцов, соответствующих прилетевшим и вылетающим рейсам. Ее элементы δ_{ij} зависят от пространственного качества стыковок и определяются по формуле:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } DR_k \leq 1.2, \\ 0.5, & \text{если } 1.2 < DR_k \leq 1.5, \\ 0, & \text{если } DR_k < 1.5. \end{cases}$$

Элементы третьей используемой в модели матрицы – «взвешенной матрицы стыковок» (w_{ij}) – определяются перемножением соответствующих элементов двух предыдущих матриц:

$$w_{ij} = \tau_{ij} \delta_{ij}$$

Взвешенный коэффициент связности определяется по формуле:

$$WCR = \frac{WN_c}{WN_r}$$

где WN_c – количество взвешенных стыковок за период времени T ;

WN_r – приближенное число взвешенных стыковок за период времени T , которые ожидалось бы в случае, если расписание было составлено исходя из случайных прибытий и отправлений рейсов.

Величины WN_c и WN_r определяются:

$$WN_c = \sum_i \sum_j w_{ij}$$

$$WN_r = \left[n_d^c \frac{n_d^c}{T} \left(ICT^{cc} - MCT^{cc} + \frac{MACT^{cc} - ICT^{cc}}{2} \right) + \right. \\ + n_d^c \frac{n_d^i}{T} \left(ICT^{ci} - MCT^{ci} + \frac{MACT^{ci} - ICT^{ci}}{2} \right) + \\ + n_d^i \frac{n_d^c}{T} \left(ICT^{ic} - MCT^{ic} + \frac{MACT^{ic} - ICT^{ic}}{2} \right) + \\ \left. + n_d^i \frac{n_d^i}{T} \left(ICT^{ii} - MCT^{ii} + \frac{MACT^{ii} - ICT^{ii}}{2} \right) \right] \frac{\sum_i \sum_j d_{ij}}{n_a n_d}$$

Здесь верхние индексы указывают на категорию рейсов и стыковок между ними: «с» – континентальный рейс, «i» – межконтинентальный рейс.

Коэффициенты CR и WCR являются взаимодополняющими показателями, их следует использовать совместно. Оптимально согласованное расписание хаба характеризуется величинами коэффициентов CR и WCR , лежащими в диапазоне 2-3. Их величина, не превышающая единицы, указывает на отсутствие координации стыковок.

Результаты сравнительного анализа связности расписаний шести авиакомпаний, являющихся хабообразующими для крупнейших европейских узловых аэропортов, рассмотренных в п. 2.1. сведены в табл. 2.2.4. В таблице приводятся также характеристики российского аэропорта Храброво (Калининград), полученные в результате обработки веерного расписания авиакомпании *КД авиа*. Сравнение проводится для одного выбранного дня работы аэропорта по трем показателям: WNX , CR и WCR . Для сравнения приведено также количество прибывающих рейсов (n_a)

и создаваемых ими взвешенных стыковок (WN_c) в течение рассматриваемых суток. Величина расчетного интервала времени T принималась равной: 18 ч для аэропортов им. Ш. де Голля, Хитроу и Барахас; 16 ч – для Схипхол; 15 ч – для аэропортов им. Л. да Винчи, Мальпенса и Храброво.

Табл. 2.2.4.

**Характеристики связности расписания
узловых аэропортов**

Узловой аэропорт	Авиакомпания	n_a	WN_c	WNX	CR	WCR
им. Ш. де Голля (Париж)	Air France	380	7285	8700	1.70	1.42
Барахас (Мадрид)	Iberia	320	3967	2200	1.23	1.32
Хитроу (Лондон)	British Airways	280	3788	4600	1.16	1.23
Схипхол (Амстердам)	KLM	247	4526	4300	1.87	1.75
им. Л. да Винчи (Фиумичино, Рим)	Alitalia	203	1983	1000	1.60	1.53
Мальпенса (Милан)	Alitalia	163	2942	1800	2.23	2.48
Храброво (Калининград)*	КД-авиа	21	125	60	2.12	4.37

* – все расчеты по данным 2007 г. (для расписания 18 декабря 2007 г.).

Как следует из табл. 2.2.4, из зарубежных вариантов наиболее эффективным в смысле обеспечения связности следует признать зимнее 2004-2005 гг. расписание аэропорта Мальпенса, не относящегося к наиболее крупным европейским хамам. Аэропорт Храброво на момент реализации в нем веерного расписания характеризовался впечатляющей связностью расписания при незначительном общем числе рейсов.

Описанная здесь методика дает возможность не только проводить сравнение расписаний различных аэропортов, но также выбирать из нескольких вариантов и оптимизировать расписание для одного аэропорта с целью повышения его согласованности.

2.3. Статистический анализ потока самолетов узлового аэропорта

Аэропорт представляет собой характерный пример сложной СМО. Одним из блоков имитационной модели такой системы является генератор поступающих в нее требований. Для адекватного воссоздания происходящих в системе процессов генератор должен располагать характеристиками входящего потока требований, к которым относятся: возможность одновременного входа в систему группы требований, число требований в группе, интервал времени между последовательными поступлениями требований и др. Данные величины могут быть как детерминированными, так и вероятностными. В этом случае необходимо задать их функции распределения.

Аэропорт характеризуется целым набором разнородных входящих потоков, к которым относятся потоки самолетов, пассажиров, грузов, почты, экипажей и пр. В них могут быть выделены отдельные потоки: прилетающие, вылетающие, транзитные и др. Потоки самолетов следует рассматривать в качестве первичных, не только порождающих прочие потоки требований, но и определяющих их свойства. Здесь рассматриваются потоки прилетающих и вылетающих самолетов (точнее потоки рейсов, для которых зафиксировать время прибытия или отправления значительно проще, чем время посадки или взлета самолета).

Движение рейсов в аэропорту – типичный пример случайного процесса $X(t)$ с непрерывным временем и дискретными состояниями [88]. Переход системы в соседнее дискретное состояние происходит в момент прибытия или отправления рейса. Эти моменты, запланированные расписанием, не являются случайными величинами, т.к. они известны заранее. Однако с учетом возможных

отмен и совмещений рейсов, нерегулярности их выполнения и других обстоятельств фактические моменты времени прибытия и отправки рейсов представляют собой случайные величины, а сами события прибытия и отправки рейсов можно рассматривать как случайные. Здесь случайный процесс $X(t)$ – число прибытий или отправок рейсов к моменту t . Сечением случайного процесса $X(t)$ при любом фиксированном t является дискретная случайная величина, подчиненная определенному распределению.

В качестве реализации $x(t)$ случайного процесса $X(t)$ может рассматриваться движение рейсов в аэропорту в течение определенного промежутка времени, например, конкретной недели, суток или другого интервала. Наблюдение за работой аэропорта в течение ряда таких интервалов позволяет получить семейство реализаций.

Важнейшей характеристикой случайного процесса является его математическое ожидание – неслучайная функция $m_x(t)$, которая при любом значении аргумента t равна математическому ожиданию соответствующего сечения случайного процесса:

$$m_x(t) = M[X(t)]$$

Основной характеристикой потока требований, связанной со средними значениями сечений соответствующего процесса, является его интенсивность (плотность):

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[X(t + \Delta t) - X(t)]}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[N(t, \Delta t)]}{\Delta t} \quad (2.3.1)$$

где $N(t, \Delta t)$ – случайное число событий, попадающее на элементарный интервал $(t, t + \Delta t)$.

В большинстве имитационных моделей в качестве входящего может быть использован простейший (или стационарный пуассоновский) поток. Поток считается простейшим, если он обладает свойствами ординарности, отсутствия последействия и стационарности.

1. Поток ординарный, если для него вероятность попадания на элементарный интервал времени Δt двух и более событий пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания на него ровно одного события.

2. Поток обладает свойством отсутствия последствия, если для любых неперекрывающихся участков времени, число требований, попадающее на один из участков, не зависит от числа требований, попадающих на другие участки.

3. Поток стационарный, если вероятность попадания того или иного числа требований на определенный интервал времени зависит только от величины этого интервала, но не зависит от того, где именно на оси времени расположен данный интервал.

Для стационарного потока его интенсивность постоянна: $\lambda(t) = \lambda = const$. Характеристикой нестационарного потока является мгновенная интенсивность, являющаяся функцией времени.

Исследуем возможность использования простейшего потока в качестве входящего потока требований в имитационной модели узлового аэропорта. С этой целью рассмотрим возможность соблюдения перечисленных выше условий на примерах планового и фактического графиков движения рейсов в аэропортах, которые можно рассматривать как узловые. В качестве таких аэропортов примем Храброво (Калининград, РФ) и Мюнхен (ФРГ). Источником информации о потоках рейсов служат виртуальные табло этих аэропортов, публикуемые на их официальных Web-сайтах.

Дадим здесь краткую характеристику аэропорта Мюнхена. Аэропорт Храброво был описан выше (п. 1.4).

Аэропорт г. Мюнхен (Мюнхенский международный аэропорт им. Ф.И. Штрауса, ФРГ) наряду с аэропортом г. Франкфурт-на-Майне является одним из двух базовых аэропортов авиакомпании Lufthansa. Он располагает двумя ВПП с искусственным покрытием длиной по 4000 м и двумя пассажирскими терминалами. Один из терминалов предназначен для обслуживания пассажирских перевозок авиакомпаний, входящих в группу Lufthansa, и их партнеров по альянсу Star Alliance. Второй терминал обслуживает все остальные авиакомпании, в том числе российские, выполняющие полеты в Мюнхен. Аэропорт специально проектировался и строился в качестве крупного хаба. С момента ввода в эксплуатацию в 1992 г. аэропорт динамично развивается. Его основные показатели, такие как число взлетно-посадочных операций, количество обслуженных пассажиров, обработанных грузов и почты ежегодно возрастают на

2-9%. В 2007 г. аэропорт обслужил около 34 млн пассажиров, заняв по этому показателю 2-е место в ФРГ и 7-е – в Евросоюзе. В определенном смысле он может служить эталоном формирования узлового аэропорта для крупнейших российских аэропортов.

Аэропорт Храброво представляет интерес в качестве первого примера российского аэропорта, действовавшего по принципу классического хаба, с большой долей трансферных перевозок в общем пассажиропотоке и формированием полноценных волн прилетающих и вылетающих рейсов.

Итак, проведем анализ соответствия потоков рейсов двух выбранных аэропортов условиям ординарности, отсутствия последствия и стационарности.

1. Условие ординарности акцентирует внимание на возможности одновременного поступления нескольких, как правило, взаимосвязанных требований, образующих группу. В этом смысле движение коммерческих рейсов принципиально не может носить группового характера. Кроме того, вероятность строго одновременного прибытия или одновременного отправления двух рейсов может считаться пренебрежимо малой. Таким образом, потоки рейсов с учетом их фактических моментов прибытия или отправки могут рассматриваться в качестве ординарных. Заметим, что указанные в расписании плановые моменты, – как прибытия, так и отправки нескольких рейсов – часто совпадают, что не позволяет считать ординарным поток рейсов, полученный на основании расписания.

2. Требованию отсутствия последствия в полной мере соответствует только фактический поток рейсов. Для планового потока в любой момент времени число требований как уже поступивших, так и ожидаемых полностью определяется расписанием.

Суммируя приведенные соображения, можно сказать, что ординарными и не имеющими последствия являются только фактические потоки рейсов. Плановые потоки могут считаться удовлетворяющими этим требованиям лишь в самом грубом приближении.

3. Как было отмечено выше, характерной особенностью большинства узловых аэропортов является нестационарность потоков рейсов. Однако изменения их интенсивности не являются

хаотичными, они, как правило, характеризуются четко выраженной периодичностью колебаний, образующей волны прибытий и вылетов рейсов.

Частую периоды наибольшей и наименьшей интенсивности движения рейсов (соответственно «вершины» волн и «впадины» между волнами) «привязываются» к определенным моментам времени в течение суток, а по продолжительности интервалы времени между ними являются постоянными. Число волн в течение суток, интервалы между волнами, минимальные и максимальные уровни интенсивности прибытий и отправок рейсов отражаются в расписании узлового аэропорта, формируя его волновую структуру. В течение периода действия расписания аэропорта параметры его волновой структуры могут оставаться неизменными. Это означает, например, что ежедневно в аэропорту планируется постоянное число волн с неизменными интервалами между ними. Безусловно, фактические отклонения от расписания влияют на интенсивность потоков ВС в аэропорту, но общая структура волн, запланированная расписанием, при этом остается неизменной. Кроме того, обращают на себя внимание повторяющиеся особенности каждой из волн, например, некоторые из волн ежедневно могут выделяться заметно большей (или, напротив, меньшей) интенсивностью потока, характером изменения интенсивности и др.

Параметры волновой структуры расписания должны стоять во главе угла при формировании вероятностных характеристик входящего потока требований имитационной модели узлового аэропорта.

Для выявления волновой структуры рассматриваемых аэропортов был произведен расчет и построены графики величины мгновенной интенсивности прилетов и вылетов ВС в зависимости от времени суток. Исходными данными для их построения явились накопленные массивы плановых и фактических моментов прибытия и отправления рейсов. Для Мюнхена проводился анализ статистики, собранной в течение недели, с 15 по 21 марта 2007 г.; для аэропорта Храброво – в течение 20 дней ноября того же года. Накопленный массив включал данные о приблизительно 7500 рейсах аэропорта Мюнхен и 950 рейсах аэропорта Храбро-

во, в число которых входили как прибывающие, так и вылетающие рейсы в примерно равных долях. Информация о фактическом времени отправления рейсов из аэропорта Храброво не была доступной.

Как отмечалось выше, значение мгновенной интенсивности нестационарного случайного процесса меняется при переходе от одного сечения процесса к другому. Класс рассматриваемого процесса (с непрерывным временем) делает бесконечными множества всех сечений процесса и, соответственно, всех значений интенсивности. На практике для ограничения объема множества определяемых значений интенсивности расчет производится для моментов времени, отстоящих друг от друга на некоторые интервалы Δt_j .

Необходимо учитывать также, что, как следует из соотношения (2.3.1), при определении мгновенной интенсивности нестационарного потока используется среднее число событий, попадающих на элементарный интервал времени Δt , поэтому на практике расчет возможен только при применении накопленных наблюдений множества реализаций процесса.

На рассматриваемом этапе анализа в качестве отдельной реализации процесса движения рейсов в аэропорту рассматривались одни сутки. Принималась гипотеза об однородности наборов данных, соответствующих разным реализациям, которая базируется на приведенных выше соображениях относительно особенностей волновой структуры узловых аэропортов и анализе динамики интенсивности в течение рассматриваемого числа суток.

Таким образом, с целью расчета мгновенной интенсивности временной интервал длительностью m целых суток, для которого имелись статистические данные, был разбит на ряд подынтервалов одинаковой продолжительности (Δt), так, чтобы в каждом сутках содержалось одинаковое число подынтервалов (n). В пределах каждого суток подынтервалы были пронумерованы от 1 до n . Оценка мгновенной интенсивности для i -го подынтервала определялась по формуле:

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^m N_j(t_i)}{m}, \quad i = 1 \div n, \quad j = 1 \div m \quad (2.3.2)$$

где λ_i – оценка мгновенной интенсивности потока ВС;
 m – число исследуемых суток;
 n – число временных подынтервалов в течение одних исследуемых суток;
 $N_j(t_i)$ – число прилетов (вылетов) ВС в течение интервала $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ j -х суток.

В рамках рассматриваемой вычислительной методики величины и границы интервалов дискретизации процесса Δt_1 и усреднения числа требований Δt принимались равными.

Следует обратить внимание на то, что описанная методика позволяет получить лишь приближенную оценку мгновенной интенсивности, во-первых, по причине ограниченного числа реализаций случайного процесса; во-вторых, в связи с дискретизацией модели.

Расчет производился отдельно для плановых и фактических моментов времени прибытия или вылета рейсов. В первом случае определялась величина плановой интенсивности потоков прибывающих или вылетающих ВС ($\lambda_i^{П}$), во втором – величина фактической интенсивности λ_i^{Φ} . Для аэропорта Мюнхен принималось $\Delta t = 15$ мин, для аэропорта Храброво $\Delta t = 30$ мин.

Результаты расчетов приведены на рис. 2.3.1. Для удобства восприятия рисунков интенсивности потоков вылетающих рейсов отложены в области отрицательных значений. Рис. 2.3.1а содержит результаты расчетов для аэропорта Мюнхен; рис. 2.3.1б – для аэропорта Храброво (Калининград). На последнем рисунке уровни фактической интенсивности показаны только в интервалах, соответствующих волнам прилетов. По остальному диапазону данные, обеспечивающие необходимую точность результатов, отсутствуют.

Анализ результатов позволяет сделать следующие выводы по волновой структуре.

В аэропорту Мюнхен:

- 1) ежедневно наблюдается по 8 волн прилетов и вылетов рейсов в интервале между 5:00 и 23:00;
- 2) волновой процесс инициирует волна вылетов и завершает волна прилетов. Это означает, что значительная часть самолетов,

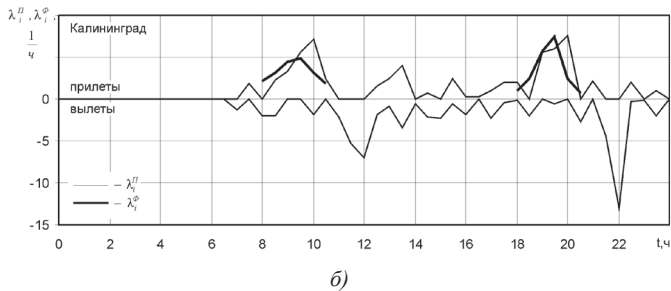
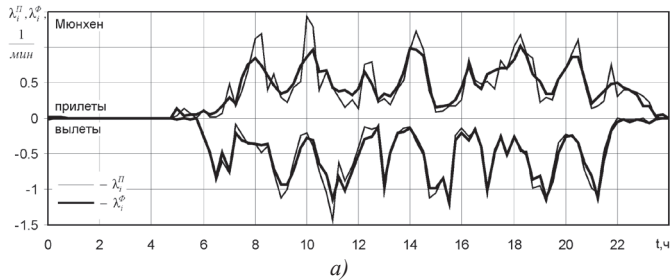


Рис. 2.3.1. Интенсивность потоков рейсов для аэропортов а) Мюнхен и б) Храброво

выполняющих рейсы, базируются в рассматриваемом аэропорту. Данный вывод вполне соответствует действительности, учитывая, что Мюнхен является базовым аэропортом крупнейшей европейской авиакомпании Lufthansa;

3) длительность цикла хаба составляет 2 ч. Это довольно небольшая величина по сравнению с другими европейскими аэропортами. Она, вероятно, обусловлена большим числом сравнительно коротких региональных рейсов, обслуживаемых аэропортом Мюнхен;

4) наибольшие значения интенсивности («вершины» волн) соответствуют моментам времени 8:15, 10:15, 12:15, 14:15, 16:15, 18:15, 20:15, 22:15 – для прилетов; 6:30-7:00, 9:00, 11:00, 13:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00 – для вылетов. Таким образом, время трансфера пассажира, пересеживающегося с рейса на рейс, в большинстве случаев может составлять величину не более 45 мин;

5) волны заметно отличаются как по амплитуде, так и по продолжительности. Наиболее «слабыми» изо дня в день являются 3-я и 5-я волны прилетов и, соответствующие им 4-я и 6-я волны вылетов. Кроме того, 1-я волна вылетов начинается несколько раньше, чем этого можно было ожидать при двухчасовом цикле хаба;

6) максимальные плановые интенсивности потоков составляют 1.2-1.4 ВС/мин, что соответствует пропускной способности двух ВПП аэропорта;

7) отклонения движения самолетов от расписания приводят к определенному «размыванию» волн и снижению максимального уровня интенсивности.

В аэропорту Храброво:

1) рейсы авиакомпании *КД-авиа* сгруппированы в две волны прилета и две волны вылета. Первая волна прилетов (10:00) соответствует рейсам, прибывающим из аэропортов РФ. Трансферные пассажиры пересаживаются на рейсы первой волны вылетов (12:00) в аэропорты Западной Европы. Вторая волна прилетов (20:00) соответствует рейсам из западноевропейских аэропортов. Происходит пересадка пассажиров на рейсы второй волны вылетов (22:00) в аэропорты РФ. Самолеты, выполняющие эти рейсы, остаются на ночную стоянку в аэропортах назначения;

2) продолжительность волн составляет от 1.5 до 3 ч, в остальное время интенсивность потоков ВС в аэропорту незначительна;

3) отклонения фактического времени прибытия самолетов от планового, как в одну, так и в другую сторону, а также отмены рейсов приводят к снижению выраженности волн;

4) максимальная интенсивность потоков вполне отвечает пропускной способности аэропорта.

Учет индивидуальных особенностей отдельных волн нецелесообразен на начальном этапе построения имитационной модели аэропорта, когда не требуется столь полная детализация свойств потока самолетов. Кроме того, на этом этапе особенности волн могут быть априори неизвестны. В этом случае требуется лишь общее описание предполагаемой волновой системы, состоящей из неких обобщенных волн с «одинаковыми» средними характеристиками. Все это позволяет рассматривать в качестве отдельной

реализации случайного процесса не ряд волн, наблюдающихся в течение суток, а одну волну. В этом случае роль продолжительности реализации процесса может играть интервал времени между моментами, выбранными в качестве начала волны и ее окончания. Данный прием позволяет повысить объем выборки наблюдений, используемой для выявления вероятностных характеристик потока требований.

Оценка мгновенной интенсивности для i -го подынтервала обобщенной волны определяется по формуле, сходной с выражением (2.3.2):

$$\lambda_i = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^V N_{jv}(\tau_i)}{mV}, \quad i=1 \div n, \quad j=1 \div m, \quad v=1 \div V \quad (2.3.3)$$

где V – число исследуемых волн прибытий (отправлений) в течение суток;

τ – параметр, соответствующий времени, истекшему от начала волны;

$N_{jv}(\tau_i)$ – число прибытий (отправлений) рейсов в течение интервала $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ волны с номером v j -х суток. Остальные обозначения аналогичны использованным в (2.3.2).

Длительность волны аэропорта Мюнхен принималась равной двум часам; аэропорта Храброво – трем часам, как для прилета, так и для вылета.

Полученные графики обобщенных волн приведены на рис. 2.3.2. Для аэропорта Храброво из-за недостатка достоверных исходных данных график фактической интенсивности не приводится. Характерной особенностью профиля волн аэропорта Мюнхен является их вид треугольника, близкого к равнобедренному. Между волнами выявляется небольшой (продолжительностью около 15 мин) интервал с неизменной интенсивностью потока. Волны аэропорта Храброво имеют менее правильный, асимметричный вид.

Изложенный выше материал позволяет выдвинуть предположение о принадлежности потока рейсов к нестационарному пуассоновскому типу. Получение обобщенных волн позволяет произвести формализованную проверку этого предположения с

использованием стандартных методик проверки статистической гипотезы. С учетом нестационарного характера потока проверка проводится в нескольких сечениях обобщенной волны. Для этого используется разбиение длительности волны на подынтервалы $\Delta\tau$. Известно, что в случае нестационарного пуассоновского потока число требований, попадающих на участок продолжительностью $\Delta\tau$, начинающийся в точке τ_{i-1} , подчиняется закону Пуассона:

$$P_k(\Delta\tau, \tau_{i-1}) = \frac{a_i^k}{k!} e^{-a_i}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.3.4)$$

где $P_k(\Delta\tau, \tau_{i-1})$ – вероятность попадания k требований на начинающийся в точке τ_{i-1} участок продолжительностью $\Delta\tau$;

a_i – математическое ожидание числа требований на участке от τ_{i-1} до $\tau_{i-1} + \Delta\tau = \tau_i$, равное:

$$a_i = \int_{\tau_{i-1}}^{\tau_i} \lambda(t) dt.$$

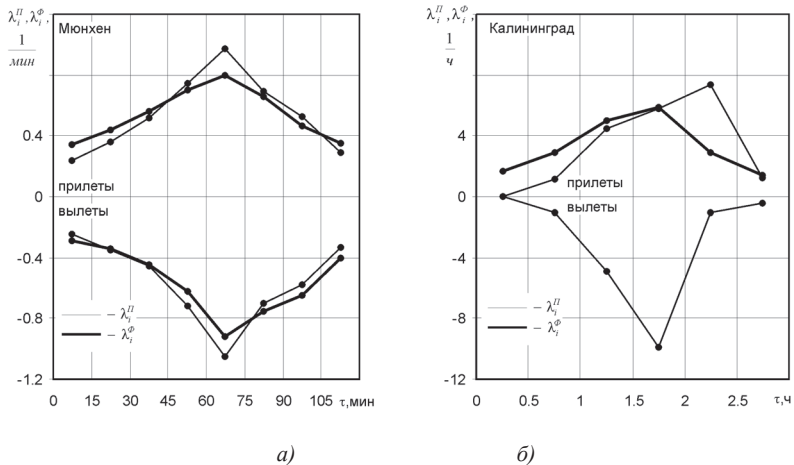


Рис. 2.3.2. Интенсивность обобщенных волн рейсов для аэропортов а) Мюнхен; б) Храброво

Проверка соответствия эмпирического, т.е. фактически наблюдавшегося в аэропортах, числа рейсов пуассоновскому распределению вида (2.3.4) выполнялась с использованием алгоритма критерия согласия χ^2 Пирсона, предполагающего следующие манипуляции [89].

В качестве случайной величины рассматривается число прибытий или отправлений рейсов, попадающее в подынтервал $(\tau_i - \tau_{i-1})$ обобщенной волны. Опуская здесь и далее все индексы, связанные с нумерацией суток, волн и подынтервалов, не существенные для решения поставленной задачи, обозначим случайную величину N . Объем выборки (n) равен числу рассмотренных волн. В частности, для аэропорта Мюнхен, с учетом недельного интервала сбора статистики по восемь ежедневных волн, выборка включает 56 наблюдений ($n = 56$).

Область значений случайной величины N делится на K непесекающихся множеств (классов). Принимая во внимание дискретный характер случайной величины, классами являются либо отдельные значения этой случайной величины, либо их группы. Подсчитывается L_k – число значений случайной величины N , попадающее в определенный (k -й) класс.

С использованием формулы (2.3.4) находится произведение nP_k – «теоретическое» число значений N , попадающее в k -й класс, если эта случайная величина подчинена пуассоновскому распределению.

В соответствии с рекомендациями [89] разбиение на классы производится таким образом, чтобы для граничных классов выполнялось неравенство $nP_k \geq 1$; для остальных классов $nP_k \geq 5$. Если эти условия «автоматически» не выполняются, используется объединение классов.

Подсчитывается значение критерия согласия χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^K \frac{(L_k - nP_k)^2}{nP_k}$$

Величина критерия χ^2 сравнивается с критическим значением $\chi^2(\rho; \nu)$, определяемым по таблице в зависимости от критического уровня значимости ρ и числа степеней свободы ν . Величина ρ , как правило, задается в пределах 0.1-0.01. Число степеней свободы определяется по формуле:

$$v = m - r - 1,$$

где r – число оцениваемых параметров. Для распределения Пуассона $r = 1$.

Если $\chi^2 < \chi^2(\rho; v)$ – гипотеза о распределении Пуассона принимается, в противном случае – отвергается.

Проверке были подвергнуты обобщенные волны прибытий и отправлений рейсов аэропорта Мюнхен, а также прибытий рейсов аэропорта Храброво. Рассматривались фактические моменты времени. Здесь приводятся некоторые результаты, относящиеся к потоку прибытий аэропорта Мюнхен, иллюстрирующие процесс статистической проверки.

Для потока прибытий в аэропорт Мюнхен графики эмпирического и «теоретического» числа требований для всех 8 15-минутных подынтервалов Δt приведены на рис. 2.3.3. (Здесь гистограммы – эмпирическое число требований; полигоны – «теоретическое» число требований).

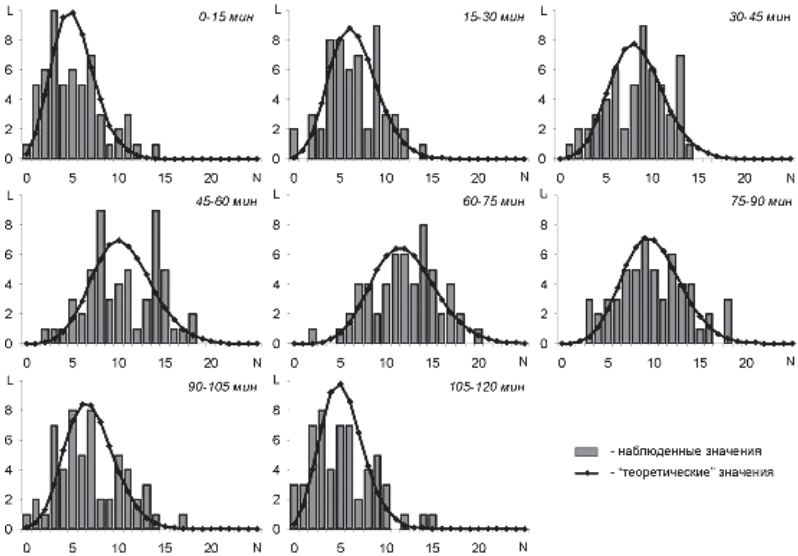


Рис. 2.3.3. Распределение числа требований для подынтервалов обобщенной волны аэропорта Мюнхен

Результаты проверки для трех подынтервалов, соответствующих минимальному, максимальному и некоторому среднему значениям интенсивности потока обобщенной волны прибытий аэропорта Мюнхен, приведены в табл. 2.3.1.

Как для трех описанных в таблице, так и для подавляющего большинства других подынтервалов обобщенных волн прибытий и отправок рассматриваемых узловых аэропортов потоки рейсов подчинены распределению Пуассона.

Заметим, что значение математического ожидания числа требований a_p , используемое при расчете вероятности P_k , достоверно не известно. Используя полученные выше оценки мгновенной интенсивности потока λ_p , можно принять:

$$a_i \approx \lambda_i \Delta t \quad (2.3.5)$$

При решении рассматриваемой здесь задачи выполнялось уточнение величины a_i из условия минимума критерия χ^2 с использованием стандартных методов оптимизации. Начальное приближение рассчитывалось по формуле (2.3.5). В принципе, такое уточнение влияет на параметры и характер обобщенной волны. Однако результаты описываемой здесь проверки статистической гипотезы выявили отклонение уточненной интенсивности λ_i от рассчитанной по формуле (3) не более чем на 5%. Поэтому данным уточнением на начальном этапе разработки имитационной модели можно пренебречь.

В заключение следует отметить, что точность описанных расчетов несколько снижает довольно небольшой объем выборок статистических наблюдений, что особо относится к аэропорту Храброво. Кроме того, здесь времена поступления прибывающих и вылетающих рейсов рассматриваются в качестве независимых случайных величин, что не всегда правомерно на практике, особенно в отношении узловых аэропортов. Тем не менее, как качественный анализ, так и проведенная статистическая проверка позволяют сделать вывод о возможности использования нестационарного пуассоновского потока для описания процесса прибытия и отправки рейсов в узловом аэропорту, по крайней мере, на начальном этапе формирования его имитационной модели.

Табл. 2.3.1.

**Процедура и результаты проверки
статистической гипотезы**

$\tau_1 = 15$ мин (0-15 мин)				
Номер класса, k	Класс	L_k	nP_k	$\frac{(L_k - nP_k)^2}{nP_k}$
1	{0,1}	6	2.41	5.36
2	{2}	6	4.92	0.23
3	{3}	10	8.09	0.45
4	{4}	5	9.97	2.48
5	{5}	6	9.82	1.49
6	{6,7}	12	13.74	0.22
7	{8,9,...}	11	7.05	2.24
Сумма		56	56	$\chi^2=12.47$
Для $v = 5$ и $\rho = 0.02$ $\chi^2(\rho, v) = 13.4$. $\chi^2 < \chi^2(\rho, v)$ – гипотеза о распределении Пуассона принимается				
$\tau_4 = 60$ мин (45-60 мин)				
Номер класса, k	Класс	L_k	nP_k	$\frac{(L_k - nP_k)^2}{nP_k}$
1	{0,6}	8	6.15	0.55
2	{7}	5	4.53	0.05
3	{8,9}	12	12.60	0.03
4	{10}	9	13.58	1.51
5	{11,14}	13	13.45	0.01
6	{15,16,...}	9	5.69	2.43
Сумма		56	56	$\chi^2=4.58$
Для $v = 4$ и $\rho = 0.02$ $\chi^2(\rho, v) = 11.7$. $\chi^2 < \chi^2(\rho, v)$ – гипотеза о распределении Пуассона принимается				
$\tau_5 = 105$ мин (90-105 мин)				
Номер класса, k	Класс	L_k	nP_k	$\frac{(L_k - nP_k)^2}{nP_k}$
1	{0,4}	15	10.21	2.25
2	{5}	8	7.36	0.06
3	{6}	5	8.46	1.41
4	{7,8}	11	15.53	1.32
5	{9,10,11}	11	11.70	0.04
6	{12,13,...}	6	2.74	3.88
Сумма		56	56	$\chi^2=8.96$
Для $v = 4$ и $\rho = 0.02$ $\chi^2(\rho, v) = 11.7$. $\chi^2 < \chi^2(\rho, v)$ – гипотеза о распределении Пуассона принимается				

2.4. Вероятностная модель потока самолетов узлового аэропорта

Для компьютерного генерирования стохастических процессов поступления требований необходимо иметь набор случайных чисел, вырабатываемый соответствующим источником. Все современные среды программирования и имитационного моделирования включают в качестве функций датчики случайных чисел (ДСЧ), реализующие основные законы распределения случайных величин. Однако непосредственное использование вырабатываемых ДСЧ чисел для формирования потоков узлового аэропорта может оказаться невозможным из-за их нестационарности. Для этого случайные числа, формируемые ДСЧ, должны быть модифицированы в соответствии с определенным алгоритмом.

В случае, если имеющийся ДСЧ позволяет получать только равномерно распределенные случайные числа, то для получения любого другого распределения может быть использован т.н. метод обратного преобразования. Суть метода в следующем. Пусть необходимо генерировать непрерывную случайную величину Z , имеющую непрерывную и строго возрастающую функцию распределения F . Предположим, что ДСЧ позволяет получать реализации случайной величины U , равномерно распределенной на интервале g, h . Ее функция распределения – $U(g, h)$. Примем, что F^{-1} – обратная функция F . Тогда алгоритм для формирования случайной величины Z с функцией распределения F будет включать два следующих шага:

- 1) генерирование реализации U , имеющей распределение $U(0, 1)$;
- 2) определение $Z = F^{-1}(U)$.

На рис. 2.4.1 этот алгоритм изображен графически.

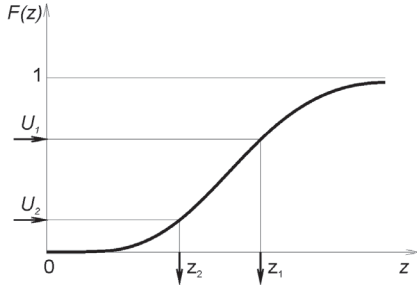


Рис. 2.4.1. Принцип метода обратного преобразования

Метод подробно описан в ряде работ [88; 90 и др.]. Его недостатком является необходимость обращения функции F , что не всегда возможно в конечном виде.

Метод обратного преобразования используется для моделирования стационарного пуассоновского потока, который характеризуется показательным законом распределения времени между двумя соседними поступлениями требований:

$$F(A) = 1 - e^{-\lambda A} \quad (A \geq 0), \quad (2.4.1)$$

где A – случайная величина – промежуток времени между двумя соседними произвольными поступлениями требований;

$F(A)$ – функция распределения A .

Обозначив $A_i = t_i - t_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots$) промежуток времени между поступлениями $(i-1)$ -го и i -го требований, из (2.4.1) можно выразить время поступления i -го требования при наличии времени поступления $(i-1)$ -го требований:

$$t_i = t_{i-1} - \frac{1}{\lambda} \ln(1 - F(A)) \quad (2.4.2)$$

Учитывая, что случайная величина $(1 - F(A))$ здесь имеет функцию распределения $U(0,1)$ [88], в соответствии с методом обратного преобразования получим:

$$t_i = t_{i-1} - \frac{1}{\lambda} \ln U \quad (2.4.3)$$

Для моделирования нестационарного пуассоновского потока применяется прием, представляющий собой развитие метода обратного преобразования. В качестве аналога функции распределения $F(z)$ здесь выступает $a(t) = \int_0^t \lambda(t) dt$ – математическое ожидание числа событий, вошедших в систему за время t с начала ее функционирования. В случае нестационарного потока величина $a(t)$ зависит не только от продолжительности интервала поступлений требований, но и от его положения на оси времени. За промежуток времени протяженностью A , начало которого совпадает с некоторым моментом t_0 , ожидаемое число требований потока составит:

$$a(t_0, A) = \int_{t_0}^{t_0+A} \lambda(t) dt$$

Предположим, что первое из двух соседних требований нестационарного потока вошло в систему в момент t_0 , тогда закон распределения времени A между этими двумя требованиями запишется как

$$F_{t_0}(A) = 1 - e^{-a(t_0, A)} = 1 - e^{-\int_{t_0}^{t_0+A} \lambda(t) dt}$$

Откуда по аналогии с (2.4.2), (2.4.3) получим:

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} \lambda(t) dt = -\ln(1 - F_{i-1}(A)) = -\ln U \quad (2.4.4)$$

В случае наличия простой зависимости $\lambda(t)$, допускающей решение уравнения (2.4.4) в квадратурах, величина t_i при известной t_{i-1} может быть легко найдена из соотношения:

$$a'_i - a'_{i-1} = -\ln U$$

где a'_i, a'_{i-1} – значения функции в точках t_i и t_{i-1} , соответственно, т.е. $a'_i = a(t_i)$ и $a'_{i-1} = a(t_{i-1})$

Рекуррентный алгоритм определения времени поступления требований нестационарного пуассоновского потока включает три следующих шага:

1) генерирование реализации U , имеющей распределение $U(0,1)$;

2) определение $a'_i - a'_{i-1} = -\ln U$;

3) расчет $t_i = a^{-1}(a'_i)$.

Найдем вид функции $a^{-1}(a'_i)$, приняв в качестве упрощения, что функция $\lambda(t)$ является кусочно-линейной. Рассмотрим один из интервалов области определения $\lambda(t)$, предположив, что на этом интервале функция линейно возрастает или убывает. Обозначим границы интервала t_H и t_K . В граничных точках функция принимает значения $\lambda_H = \lambda(t_H)$, $\lambda_K = \lambda(t_K)$.

Для произвольного t из геометрических соображений получим:

$$\lambda = \frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} (t - t_H) + \lambda_H$$

Для определения вида $a(t)$ возьмем интеграл:

$$\begin{aligned} a(t) &= \int_{t_H}^t \left[\frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} (t - t_H) + \lambda_H \right] dt = \\ &= \frac{1}{2} \frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} t^2 - \left(\frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} t_H - \lambda_H \right) t + \frac{1}{2} \frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} t_H^2 - \lambda_H t_H \end{aligned}$$

Один из корней полученного выше квадратного уравнения и будет выражать искомую функцию $a^{-1}(a')$, а именно:

$$t = \frac{\left(\frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} t_H - \lambda_H \right) + \sqrt{\left(\frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} t_H - \lambda_H \right)^2 - 2 \left(\frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} \right) \left(\frac{1}{2} \frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H} t_H^2 - \lambda_H t_H - a \right)}}{\frac{\lambda_K - \lambda_H}{t_K - t_H}} \quad (2.4.5)$$

Постоянство функции $\lambda(t) = \lambda = const$ на интервале t_H и t_K приводит к очевидному выражению:

$$t = \frac{a}{\lambda} + t_H \quad (2.4.6)$$

Полученные формулы, справедливые для одного интервала области определения $\lambda(t)$, являются составной частью общей модели нестационарного потока рейсов узлового аэропор-

та с кусочно-линейной функцией интенсивности. В качестве следующего упрощения будем считать, что волновая система узлового аэропорта состоит из обобщенных волн с постоянными усредненными характеристиками. Неизменными во времени являются суточное число волн Q и цикл хаба C . Интенсивность потока прибывающих рейсов циклически колеблется между минимальным λ_{min} и максимальным λ_{max} уровнями. В течение определенного интервала, соответствующего ночному периоду, интенсивность потока держится на минимальном уровне – λ_{min} .

Принятие последнего допущения позволяет существенно упростить модель потока, сведя алгоритм определения времени входа требования к многократному повторению двух вложенных циклов. Первый из них – «внешний» – соответствует одному суточному периоду, а второй – «внутренний» – одной волне прилетов. В связи с выделением циклов целесообразно использовать, наряду с абсолютным, отмеряемым от начала процесса, также относительное время, измеряемое в пределах цикла. Необходимый при реализации алгоритма переход от абсолютного времени к относительному и обратно может быть произведен в соответствии с приводимыми ниже формулами.

С учетом Q и C длительность интервала минимума интенсивности («ночного периода») T_H определится как

$$T_H = T_{сут} - QC$$

где $T_{сут} = 24$ часа – продолжительность суток.

Среднее число требований, входящих в систему за сутки, включает в себя требования, прибывающие в течение Q волн прилетов, а также требования, прибывающие в течение ночного периода одних суток. Оно определяется по формуле:

$$a_{сут} = a_v Q + \lambda_{min} T_H$$

где a_v – среднее число требований, поступающее в течение одной волны.

Значение функции $a(t)$ для i -го требования в пределах k -х суток находится:

$$a_i^k = a_i - a_{CVT}(k - 1)$$

где $k = E \left[\frac{a_i}{a_{CVT}} \right]$ – номер суток поступления требования;

E – операция округления до ближайшего большего целого числа.

Если i -е требование приходится на ночное время k -х суток, т.е. выполняется условие:

$$a_i^k > a_V Q \quad (2.4.7)$$

то расчет времени проводится с использованием формулы для участка постоянной интенсивности (2.4.6), модифицированной следующим образом:

$$t_i^k = \frac{a_i^k - a_V Q}{\lambda_{min}}$$

Определенное по этой формуле время отмеряется в относительной системе отсчета от начала текущих суток. Следовательно, необходим переход к абсолютному времени, выполняемый по формуле:

$$t_i = t_i^k + T_{CVT}(k - 1) + QC$$

Невыполнение условия (2.4.7) означает, что требование вошло в систему в течение одного из внутренних циклов k -х суток. Номер цикла в пределах этих суток определится:

$$l = E \left[\frac{a_i^k}{a_{CVT}} \right]$$

С учетом этого значение функции $a(t)$ для i -го требования в пределах l -го цикла k -х суток находится:

$$a_i^{kl} = a_i^k - a_V(l - 1)$$

В этом случае после определения t_i^{kl} переход к абсолютному времени возможен по формуле:

$$t_i = t_i^{kl} + T_{CVT}(k - 1) + C(l - 1)$$

С целью определения t_i^{kl} в рамках принятой кусочно-линейной модели функция интенсивности внутри интервала C может быть аппроксимирована отрезками прямых. В зависимости от характера этой функции, различного для разных аэропортов, и необходимой степени детализации модели число и расположение этих отрезков будет различным. Ниже рассмотрен случай разбиения интервала C на три участка, границами которых внутри этого интервала будут являться точки t_A , t_B , t_C и t_D . Участок $(t_A t_B)$ характеризуется линейным возрастанием интенсивности от уровня λ_{min} до уровня λ_{max} . Участок $(t_B t_C)$ – ее убыванием от λ_{max} до λ_{min} . На участке $(t_C t_D)$ интенсивность прибытия рейсов постоянна на уровне λ_{min} . Для удобства положение точек t_A , t_B , t_C и t_D определяется в относительной системе координат, связанной с началом волны (поэтому $t_A = 0$ и $t_D = C$). График зависимости $\lambda(t)$ и расположение участков для одного из циклов (волн) приведены на рис. 2.4.1а. На рис. 2.4.2б показан график математического ожидания $a(t)$, соответствующего функции интенсивности $\lambda(t)$.

Значения функции $a(t)$, соответствующие моментам t_A , t_B , t_C и t_D , на рис. 2.4.2б обозначены a_A , a_B , a_C и a_D . В относительной системе координат, связанной с началом цикла, они определяются:

$$a_A = 0;$$

$$a_B = (\lambda_{min} + \lambda_{max}) \frac{t_B}{2};$$

$$a_C = a_B + (\lambda_{min} + \lambda_{max}) \frac{(t_C - t_B)}{2};$$

$$a_D = a_C + \lambda_{min} (t_D - t_C).$$

Момент поступления требования a_i^{kl} для пуассоновского потока с единичной интенсивностью попадает в один из трех интервалов, на которые разбивают цикл точки a_A , a_B , a_C и a_D . Вид расчетного выражения, связывающего a_i^{kl} с относительным вре-

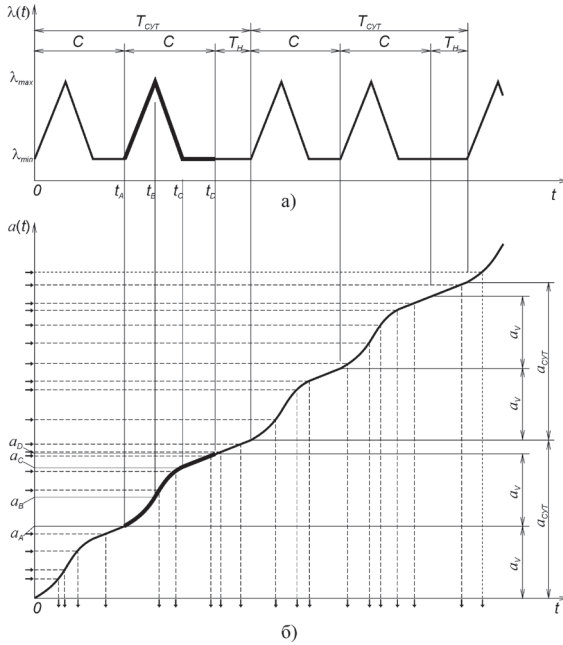


Рис. 2.4.2. Генерирование нестационарного пуассоновского потока: а) функция интенсивности поступления требований; б) обращение экспоненциальной функции

менем поступления i -го требования в нестационарном потоке t_i^{kl} , зависит от того, в какой из интервалов попадает a_i^{kl} .

В случае попадания в первый интервал, т.е. при выполнении условия $0 \leq a_i^{kl} < a_B$ используется выражение (2.4.5) с учетом следующих замен:

$$\begin{aligned}
 t_i^{kl} &\sim t; \\
 \lambda_H &\sim \lambda_{min}; & \lambda_K &\sim \lambda_{max}; \\
 t_H &= 0; & t_K &\sim t_B; \\
 a &\sim a_i^{kl}
 \end{aligned}$$

Попадание во второй интервал, означающее выполнение условия $a_B \leq a_i^{kl} < a_C$, приводит также к использованию формулы (2.4.5) с заменами:

$$\begin{aligned}
t_i^{kl} &\sim t; \\
\lambda_H &\sim \lambda_{max}; & \lambda_K &\sim \lambda_{min}; \\
t_H &\sim t_B; & t_K &\sim t_C; \\
a &\sim a_i^{kl} - a_B
\end{aligned}$$

При попадании в третий интервал, когда выполняется условие $a_C \leq a_i^{kl} < a_D$, должна быть выбрана формула (2.4.6) с заменами:

$$\begin{aligned}
t_i^{kl} &\sim t; \\
\lambda &\sim \lambda_{min}; \\
t_H &\sim t_C; \\
a &\sim a_i^{kl} - a_C
\end{aligned}$$

Модельный пример нестационарного пуассоновского потока прибывающих рейсов, сформированного с использованием описанного выше алгоритма, приведен на рис. 2.4.3. Поток характеризуется следующими параметрами:

- минимальная интенсивность $\lambda_{min} = 2 \frac{BC}{ч}$;
- максимальная интенсивность $\lambda_{max} = 20 \frac{BC}{ч}$;
- число циклов в течение суток $Q = 3$;
- временные характеристики цикла $t_A = 0, t_B = 1ч, t_C = 2ч, t_D = 4ч$.

Высота столбцов соответствует числу рейсов, прибывающих в течение получасовых интервалов. Продолжительность модельного времени в примере составила 5 суток. Волны прибывающих рейсов отчетливо различимы на рисунке.

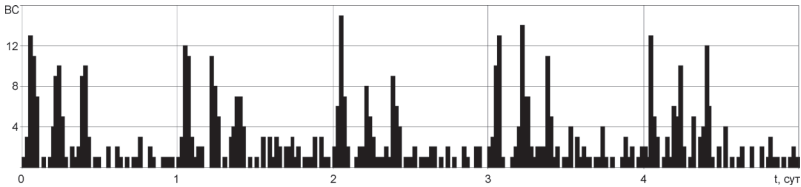


Рис. 2.4.3. Пример нестационарного пуассоновского потока

2.5. Модель потока пассажиров аэропорта

Для решения задач, связанных с оптимизацией аэровокзального обслуживания пассажиров и обработки багажа, необходимо знание характеристик потока пассажиров, прибывающих в аэропорт для прохождения предполетных формальностей. К важнейшим из этих характеристик относится вероятностное распределение времени пребывания пассажиров в аэропорту, число мест багажа у каждого пассажира, а также доля пассажиров, прибывающих в аэропорт в составе группы.

Туристические группы, семьи, делегации и другие совокупности пассажиров, располагающие общим багажом и проходящие обслуживание совместно, следует рассматривать в качестве отдельных требований на обслуживание, равно как и одиночных пассажиров, путешествующих не в группе. Это позволяет обеспечить выполнение условия ординарности входящих потоков пассажиров и багажа. Для учета группового характера поступления и обслуживания пассажиров используется коэффициент $k_{гр}$, представляющий собой отношение суммы числа групп и одиночных пассажиров к общему числу пассажиров.

С целью определения перечисленных выше характеристик в аэровокзалах ряда аэропортов РФ были проведены экспериментальные исследования входящего потока пассажиров, результаты которых приведены в табл. 2.5.1.

Интенсивность входящего в аэровокзал потока пассажиров – широко используемая в моделях аэропорта величина, может быть определена, если известно вероятностное распределение длительности пребывания вылетающих пассажиров в аэропорту. Эта длительность представляет собой интервал времени от момента

прибытия пассажира в аэровокзал для прохождения предполетных формальностей до момента вылета рейса. При ее определении особое удобство представляет использование времени, измеряемого до вылета τ . В отличие от натурального времени t , направление возрастания которого на временной оси традиционно изображается слева направо, время τ имеет противоположную направленность, причем в качестве начала отсчета используется момент вылета рейса. Таким образом, если t – натуральное время прибытия пассажира в аэровокзал, а t_d – натуральное время отправления рейса, которым вылетает пассажир, то τ – длительность пребывания пассажира в аэропорту, определится как $\tau = t_d - t$.

Табл. 2.5.1.

**Результаты исследования входящего
потока пассажиров**

Аэропорт, год наблюдений	Объем выборки пассажиров, чел.	Число групп и одиночных пассажиров	Групповой коэффициент, $k_{гр}$	Число мест зарегистрированного багажа	Число мест багажа на 1 пассажира / на 1 группу
Пулково 1 (СПб), 2008	152	100	0.66	103	0.68 / 1.03
Храброво (Калининград), 2009	571	392	0.69	Только трансферные пассажиры, зарегистрированный багаж обрабатывается отдельно	
Курумоч (Самара), 2005	89	70	0.79	54	0.61 / 0.77
Курумоч (Самара), 2008	212	165	0.78	138	0.65 / 0.83
Курумоч (Самара), 2009	146	109	0.75	115	0.79 / 1.06
Сумма	1170	836	–	410 (без Храброво)	–
Среднее	–	–	0.71	–	0.68 / 0.92

Целым рядом работ [91-99] установлено, что распределение вероятностей τ зависит от многих факторов, к которым относятся:

- принятые методы обслуживания пассажиров в аэровокзале и конкретные сроки начала и окончания регистрации;
- соотношение между внутренними и международными рейсами;
- расстояние от города до аэропорта и имеющиеся транспортные связи;
- относительная численность транзитных и трансферных пассажиров;
- класс аэропорта и интенсивность воздушного движения;
- характеристика района тяготения аэропорта и др.

Ниже рассмотрен пример статистического анализа процесса прибытия пассажиров в аэровокзал аэропорта Курумоч (Самара) в течение ряда дней весны 2009 г. На входе в аэровокзал был проведен опрос 556 пассажиров, вылетающих внутрироссийскими рейсами. Учитывая групповой характер поступления пассажиров, число наблюдений составило 438. Минимальное время нахождения в аэровокзале составило 40 мин, максимальное – 481 мин(!); выборочное среднее – 98.33 мин; выборочное среднее квадратическое отклонение – 36.99 мин. Для оценки ошибки выборки использована формула [100]:

$$S_{\bar{x}} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}} \quad (2.5.1)$$

где $S_{\bar{x}}$ – стандартная ошибка выборочного среднего;

$\bar{\sigma}$ – выборочное среднее квадратическое отклонение;

n – объем выборки (556 пасс.);

N – объем генеральной совокупности.

В качестве генеральной совокупности принято годовое число вылетающих пассажиров для аэропорта Курумоч ($N \approx 700$ тыс. пасс.). Таким образом, ошибка составляет вполне удовлетворительную величину – 1.6%.

Считая продолжительности пребывания пассажиров в аэропорту взаимно независимыми случайными величинами,

Табл. 2.5.2.

**Обработка данных о продолжительности
пребывания пассажиров в аэропорту**

№ интервала, j	Границы интервала, $\tau_{j-1} - \tau_j$	Среднее значение, $(\tau_{j-1} - \tau_j)/2$	Эмпирическая частота, a_j	Оценка функции распределения, $F^*(t_j)$	Оценка вероятности попадания в интервал, $p^*(j)$	Выравнивающая частота, $a^*(j)$	$\delta(j)$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	35-45	40	5	0.01509	0.01509	6.609	0.39156
2	45-55	50	26	0.06052	0.04543	19.897	1.87166
3	55-65	60	31	0.14714	0.08663	37.941	1.27010
4	65-75	70	54	0.26767	0.12053	52.792	0.02764
5	75-85	80	64	0.40455	0.13687	59.951	0.07004
6	85-95	90	54	0.53948	0.13493	59.100	0.16265
7	95-105	100	62	0.65935	0.11987	52.505	0.57504
8	105-115	110	37	0.75769	0.09834	43.073	0.38522
9	115-125	120	26	0.83345	0.07575	33.180	0.8086
10	125-135	130	33	0.88890	0.05545	24.288	1.85471
11	135-145	140	20	0.92782	0.03892	17.046	1.43978
12	145-155	150	4	-	-	-	-
13	155-165	160	10	0.97151	0.04369	19.137	1.37905
14, 15	165 ... 185	-	14	-	-	-	-
16	185-195	190	0	-	-	-	-
17	195-205	200	1	-	-	-	-
18	205-215	210	3	-	-	-	-
19	215-225	220	0	-	-	-	-
20	225-235	230	1	-	-	-	-
21	235-245	240	0	-	-	-	-
22 ... 29	245 ... 325	-	1	-	-	-	-
30	325-335	330	0	-	-	-	-
31	335-345	340	12	-	-	-	-
32	245-355	350	1	-	-	-	-
33	355-365	360	2	-	-	-	-
34,35	365 ... 385	-	0	-	-	-	-
36	385-395	390	1	-	-	-	-
36 ... 44	395 ... 475	-	0	-	-	-	-
45	475-485	480	1	0.99994	0.02849	12.479	0.01837
			0				
			1				
Сумма			438		1	438	$\chi^2=10.2545$

определим закон их распределения в соответствии с алгоритмом критерия согласия χ^2 Пирсона, включающим следующие этапы.

Временной диапазон, в течение которого вылетающие пассажиры прибывают в аэровокзал, разбивается на интервалы (классы) одинаковой ширины $\Delta t = 10$ мин. Границы и срединные значения интервалов приведены в табл. 2.5.2.

Для каждого (j -го) интервала подсчитывается эмпирическая частота a_j , т.е. зафиксированное в результате наблюдений число пассажиров, длительность пребывания в аэровокзале которых попадает в j -й интервал. Для корректного использования критерия χ^2 необходимо, чтобы число наблюдений в интервале было не менее 7-10, поэтому ряд интервалов, как правило, объединяются.

Анализ построенной по результатам обработки наблюдений гистограммы распределения времени пребывания пассажиров в аэропорту (рис. 2.5.1) позволяет выдвинуть гипотезу о принадлежности рассматриваемой случайной величины тому или иному закону распределения. Здесь проводилась проверка возможности сглаживания эмпирических распределений тремя законами: логарифмически нормальным, Вейбулла и гамма. Все три закона

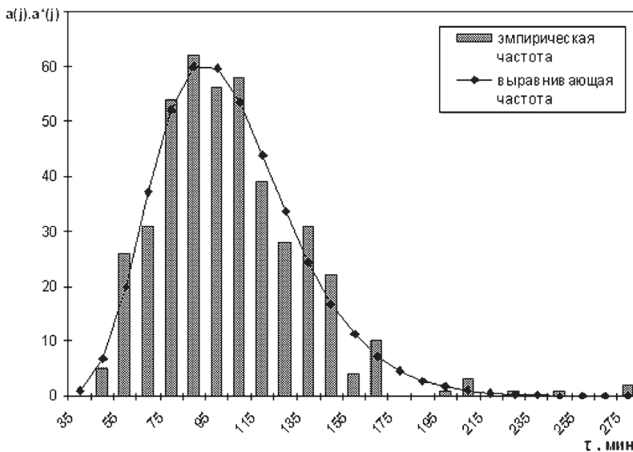


Рис. 2.5.1. Распределение времени пребывания вылетающего пассажира в аэропорту

описываются не более чем тремя параметрами и характеризуются положительной асимметрией, что, судя по характеру гистограммы, делает правомерным гипотезу о возможности их использования. В дальнейшем для параметров распределений использованы единообразные обозначения: α – параметр формы; β – масштабный параметр; s – параметр положения или сдвиг распределения.

Ниже приводятся важнейшие характеристики перечисленных законов для некоторой случайной величины X .

Функция и плотность логарифмически нормального распределения выражаются формулами [89]:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi\alpha^2}} \int_0^\pi \exp \left\{ -\frac{[\ln(x-s) - \beta]^2}{2\alpha^2} \right\} dt, & x > s; \end{cases} \quad (2.5.2)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ \frac{1}{(x-s)\sqrt{2\pi\alpha^2}} \exp \left\{ -\frac{[\ln(x-s) - \beta]^2}{2\alpha^2} \right\}, & x > s. \end{cases} \quad (2.5.3)$$

Среднее значение и дисперсия логарифмически нормального распределения выражаются через его параметры:

$$\mu = s + \exp \left\{ \beta + \frac{1}{2} \alpha^2 \right\}; \quad \sigma^2 = \exp \left\{ 2\beta + \alpha^2 \right\} \times (e^{\alpha^2} - 1) \quad (2.5.4)$$

Выражения для функции и плотности гамма-распределения вероятностей имеют вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \Gamma_{\frac{1}{\beta}(x-s)}(\alpha), & x > s; \end{cases} \quad (2.5.5)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ \frac{\beta^{-\alpha}}{\Gamma(\alpha)} (x-s)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-s)}{\beta}}, & x > s, \end{cases} \quad (2.5.6)$$

где $\Gamma_{\frac{1}{\beta}(x-s)}$ – неполная гамма-функция, значения которой приведены, например, в [101].

Среднее значение и дисперсия связаны с параметрами α , β , s соотношениями:

$$\mu = \alpha\beta + s; \quad \sigma^2 = \alpha\beta^2. \quad (2.5.7)$$

Для распределения Вейбулла функция и плотность определяются в соответствии с формулами:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-s}{\beta}\right)^\alpha\right\}, & x > s; \end{cases} \quad (2.5.8)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s, \\ \frac{\alpha}{\beta^\alpha} (x-s)^{\alpha-1} \exp\left\{-\left(\frac{x-s}{\beta}\right)^\alpha\right\}, & x > s. \end{cases} \quad (2.5.9)$$

Среднее и дисперсия распределения Вейбулла определяются следующим образом:

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) + s; \quad \sigma^2 = \frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\} \quad (2.5.10)$$

Следующим шагом алгоритма является расчет величины оценки функции сглаживающего распределения $F^*(\tau_j)$ для заданных определенным образом значений параметров α , β и s . В зависимости от выбранного закона распределения, расчет проводится по одной из формул: (2.5.2), (2.5.5) или (2.5.8). Как показала проверка, наилучшее сглаживание обеспечивает гамма-распределение, функция которого определяется по формуле (2.5.5). Для этого случая результаты расчетов приведены в столбцах 5-8 табл. 2.5.2.

Далее определяются величины $p^*(j)$ – оценки вероятности попадания случайной величины в j -ый интервал:

$$p^*(1) = F^*(t_1); \quad p^*(j) = F^*(t_j) - F^*(t_{j-1}), \quad 1 < j < m; \quad p^*(m) = 1 - F^*(t_{m-1}),$$

где m – число интервалов (с учетом объединения).

Находятся оценки ожидаемого числа наблюдений в соответствующих интервалах – выравнивающие (теоретические) частоты, при условии, что гипотеза о выбранном теоретическом распределении верна:

$$a^*(j) = np^*(j)$$

Производится подсчет величин $\delta(j)$, используемых при определении значения критерия χ^2 :

$$\delta(j) = \frac{(a_j - a^*(j))^2}{a^*(j)}$$

Величина статистики критерия χ^2 определяется как сумма:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^m \delta(j) \quad (2.5.11)$$

Найденная таким образом величина χ^2 сравнивается с критическим значением квантили χ^2 -распределения $K^{-1}(1-\rho; \nu)$, определяемым по таблице в зависимости от критического уровня значимости ρ и числа степеней свободы ν . Величина ρ задается в пределах 0.1-0.01. Число степеней свободы в данном случае определяется по формуле:

$$\nu = m - r - 1,$$

где m – число интервалов;

r – число оцениваемых параметров.

Число интервалов с учетом объединения $m = 13$. В рассматриваемом случае число параметров для гамма-распределения $r = 3$. Принятая величина критического уровня значимости $\rho = 0.05$. Для перечисленных величин определенное по таблице χ^2 -распределения критическое значение $K^{-1}(0.95; 9) = 16.919$.

Значения параметров α , β и s определяются в ходе решения задачи математического программирования с использованием табличного программного обеспечения для ПЭВМ. Результатом является совокупность α , β и s , доставляющая минимум величине χ^2 при ограничениях $\alpha > 0$; $\beta > 0$; $\tau_{min} > s \geq 0$. Первые два условия определяются свойствами функции гамма-распределения, а последнее – еще и физическим смыслом задачи.

Приведенные в табл. 2.5.2 данные соответствуют следующему решению $\alpha = 6.061$; $\beta = 12.567$; $s = 19.969$. Среднее значение и среднее квадратическое отклонение, определенные по форму-

лам (2.5.7), равны $\mu = 95.609$; $\sigma = 30.325$, что довольно близко к эмпирическому распределению. Построенный для этих значений полигон сглаживающих частот представлен на рис. 2.5.1. Сопоставление его с гистограммой показывает хорошее сглаживание.

Как следует из табл. 2.5.2, величина критерия χ^2 не превышает критического значения, что свидетельствует о правомерности предположения о принадлежности распределения времени пребывания пассажира в аэропорту Курумоч гамма-закону.

Одновременно в аэропорту Курумоч проводилось обследование пассажиров международных рейсов. Полученные результаты свидетельствуют в пользу принадлежности и их времени пребывания гамма-распределению. Однако малый объем наблюдений не позволяет выполнить строгое доказательство этой гипотезы. В качестве первого приближения могут быть приняты следующие параметры «гипотетического» распределения: $\alpha = 7.1$; $\beta = 16.0$; $s = 25.1$.

3. МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА НАЗЕМНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ПЕРЕВОЗОК В АЭРОПОРТУ

3.1. Процессы наземного обслуживания перевозок в аэропорту

Производственный процесс узлового аэропорта должен обеспечивать минимальные значения времени стыковки при соблюдении требований безопасности и регулярности полетов, а также поддержании необходимого уровня качества обслуживания всех категорий пассажиров. Необходимая для решения данной задачи оптимизация технологических процессов и систем аэропорта выполнима при наличии их математических моделей. При этом требуются, во-первых, общие модели функционирования аэропорта или его комплексов и, во-вторых, модели отдельных технологических операций, которые могут использоваться как в составе общих моделей, так и самостоятельно. В первом случае, учитывая, что аэропорт представляет собой пример сложной системы, объединяющей множество разнообразных элементов, как правило, используются имитационные модели. Во втором – аналитические модели, в том числе предполагающие применение численных методов. Широкое применение здесь находят модели теории массового обслуживания.

Адекватность имитационной модели, то есть степень ее соответствия реальной системе, повышается по мере роста ее детализации. Однако это приводит к техническим проблемам при ее использовании – сложность модели затрудняет ее мо-

дификацию и поиск ошибок, возрастает машинное время моделирования, увеличивается сложность оптимизации и анализа результатов.

Рациональные ограничения по уровню детализации требуют, чтобы формируемая модель отражала лишь тот набор технологических операций, который принципиально важен для отображения работы узлового аэропорта. Для выявления такого набора операций следует:

1) провести анализ летно-технических и коммерческих характеристик, а также параметров технологических процессов наземного обслуживания различных типов самолетов с целью обоснованного их группирования. Эта процедура позволит значительно снизить объем исходных данных, используемых моделью;

2) рассмотреть технологию обслуживания рейсов, выделив основные операции, в наибольшей степени влияющие на общую продолжительность обслуживания и используемые ресурсы. Результатом этой процедуры должен явиться некоторый технологический график, включающий операции критического пути, справедливый для подавляющего большинства типов самолетов. Такой технологический график будем называть модельным;

3) построить модели технологических операций, входящих в модельный технологический график. Результатами использования этих моделей должны быть продолжительности описываемых операций и потребные для их выполнения ресурсы.

Для решения поставленных задач кратко рассмотрим производственный процесс аэропорта, который направлен на решение задач по обеспечению полетов с целью безопасного, регулярного и эффективного выполнения рейсов ВС ГА. В Наставлении по производству полетов ГА [102] выделяются следующие виды обеспечения полетов: штурманское; обеспечение аэронавигационной информацией; метеорологическое; инженерно-авиационное; аэродромное; электросветотехническое; радиотехническое; орнитологическое; коммерческое; режимно-охранное; поисково-спасательное и аварийно-спасательное; медицинское, а также оперативное управление производством.

В производственном процессе аэропорта могут быть выделены следующие основные технологические процессы, назначение

которых – организация и осуществление перечисленных выше видов обеспечения полетов:

- 1) обслуживание пассажиров и обработка багажа;
- 2) техническое обслуживание (ТО) ВС;
- 3) обработка грузов и почты;
- 4) обеспечение материальными ценностями, необходимыми для поддержания производственной деятельности;
- 5) решение задач управления воздушным движением;
- 6) эксплуатационное содержание аэродрома.

Далее задачи формирования моделей рассмотрены для первого и второго технологических процессов, представляющих особое значение для организации перевозок в пассажирском хабе.

Одним из важнейших показателей, характеризующих возможности аэропорта по обслуживанию пассажиров, грузов, почты и ВС, является его пропускная способность, которая определяется величинами пропускной способности элементов аэропорта. Главными из этих элементов, определяющих пропускную способность аэропорта в целом, являются:

- 1) взлетно-посадочные полосы и система рулежных дорожек;
- 2) средства УВД в районе аэродрома;
- 3) перрон и система МС ВС;
- 4) пассажирский аэровокзал;
- 5) средства наземного обслуживания ВС на перроне и МС.

Далее рассматриваются задачи, связанные с функционированием последних двух элементов.

Характеристики технологического процесса перронного обслуживания, такие как состав и средняя продолжительность технологических операций и задействованные силы и средства зависят от многих факторов, главными из которых являются тип обслуживаемого ВС, вид рейса, уровень механизации и автоматизации технического обслуживания.

Из четырех существующих видов рейсов: начального, конечного, транзитного и обратного, наиболее полным составом выполняемых операций наземного обслуживания отличаются рейсы последнего вида. В аэропорту при подготовке к вылету ВС, выполняющего обратный рейс, как правило, выполняется почти полный набор операций, свойственных как начальному, так и ко-

нечному рейсам. Несколько меньший набор операций соответствует наземному обслуживанию транзитного рейса. Дальнейший анализ ограничен этими двумя видами рейсов.

Один из возможных вариантов технологического графика наземного обслуживания обратного рейса внутренних воздушных линий, выполняемого ВС пассажироместимостью 150-200 пасс. приведен на рис. 3.1.1. В соответствии с [103] под прибытием ВС понимается его остановка на перроне или МС после заруливания или буксировки, под отправлением – начало движения ВС после запуска двигателей.

Расчетное время взлета – это время отправления ВС, установленное расписанием, плюс время, отведенное на руление и обеспечение безопасности. Величина последнего, установленная [103], составляет при отправлении: до 15 мин – для всех ВС; при прибытии: 15 мин – для самолетов Ил-86, Ил-96-300; 10 мин – для Ил-62; 5 мин – для остальных типов ВС.

Все наземное обслуживание рейса может быть представлено в виде следующих групп работ:

- 1) по обслуживанию пассажиров;
- 2) обработке багажа;
- 3) обработке грузов и почты;
- 4) подготовке бортового питания;
- 5) ТО ВС;
- 6) комплектованию рейса.

Работы первой группы включают обслуживание пассажиров в аэровокзале и на перроне. Обслуживание вылетающих пассажиров в аэровокзале может проводиться по одной из двух основных технологических схем – порейсовой и свободной [104]. Под порейсовой схемой понимается организация обслуживания пассажиров данного рейса на закрепленных рабочих местах. Под свободной – обслуживание пассажиров любых рейсов на любом рабочем месте. К обслуживанию пассажиров, кроме работ представленных на рис. 3.1.1, относятся информирование, продажа билетов в аэропорту, дополнительное обслуживание и пр. Обслуживание международных рейсов предполагает выполнения целого ряда работ, таких как паспортно-пограничный, таможенный, миграционный и другие виды контроля.

Состав технологических операций по обслуживанию пассажиров и обработке их багажа зависит от их категории. Транзитные пассажиры в аэропорту пересадки после объявления посадки на рейс проходят досмотр имеющейся ручной клади и личный досмотр. Багаж транзитных пассажиров из ВС не выгружается. Трансферные пассажиры обслуживаются в аэровокзале вначале как прилетевшие, проходят специальное обслуживание у диспетчера по транзиту, а затем оформляются как вылетающие. При этом ряд операций может исключаться или видоизменяться, так, например, в случае раздельного обслуживания трансферных пассажиров и их багажа процедура регистрации упрощается, а ее длительность сокращается.

Сложность операций по обработке багажа увеличивается с ростом уровня пассажиропотока и увеличением класса аэропорта. Большой объем пассажирских перевозок, значительная доля трансфера, а также использование свободной схемы обслуживания являются факторами, определяющими необходимость сортировки багажа вылетающих и прилетевших пассажиров с использованием высокопроизводительных багажных сортировочных систем (BHS). С увеличением числа трансферных пассажиров возрастают требования к таким параметрам BHS, как пропускная способность и время обработки одного места багажа. В малых и средних аэропортах, использующих порейсовую схему регистрации, комплектование багажа на рейс происходит вблизи стойки регистрации, соответствующей рейсу, поэтому необходимость в сортировке отпадает. Выгрузка и погрузка багажа, как правило, производится одновременно с высадкой и посадкой пассажиров.

На рис. 3.1.1 показаны только перронные операции с грузом и почтой. Они выполняются в интервале между выгрузкой прибывшего и погрузкой вылетающего багажа. В настоящее время велика доля контейнеризованных багажных и грузовых перевозок.

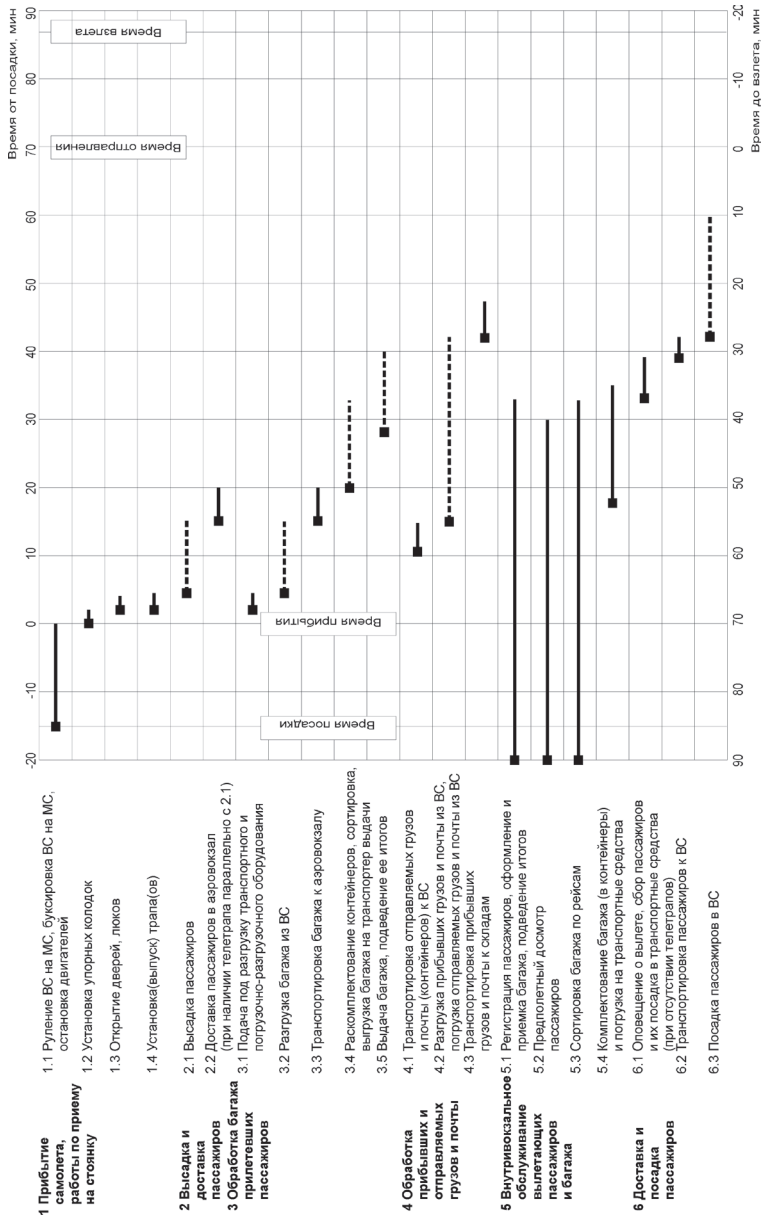
Отдельный технологический цикл связан с подготовкой бортового питания пассажиров. Как правило, операции с бортопитанием и буфетно-кухонным оборудованием у борта самолета выполняются одновременно с загрузкой багажа. Наряду с представленными на рис. 3.1.1, операции по подготовке бортопитания

включают также получение сведений о количестве пассажиров, комплектование и оформление борТПитания, погрузку контейнеров с борТПитанием на транспортное средство и доставку его к ВС и др. После получения данных о численности пассажиров возможна дозагрузка контейнеров с борТПитанием. Для самолетов большой пассажировместимости операции, связанные с подготовкой борТПитания, характеризуются значительной продолжительностью и трудозатратами.

Самостоятельным, но тесно связанным с другими технологическими процессами, является комплекс работ по ТО ВС и подготовке его к вылету. Согласно [105] различают следующие виды ТО: оперативное, периодическое, специальное и ТО при хранении. Все названные виды ТО в свою очередь включают сформированные в соответствии с периодичностью выполнения отдельных работ различные формы ТО. Далее здесь рассматривается только оперативное ТО, основным назначением которого является подготовка самолета к полетам и обеспечение его работоспособности в процессе выполнения полетов.

Все формы ТО имеют буквенные обозначения. Набор работ по ТО, как и буквенные обозначения могут различаться в зависимости от типа ВС. Однако различия не носят принципиального характера. Оперативное ТО включает следующие формы, некоторые из них приводятся с используемыми в отечественной нормативной документации обозначениями:

- работы по встрече самолета. Выполняются после каждой посадки и включают приемку ВС на МС, установку упорных колодок под колеса шасси, заземление ВС, подключение наземного источника питания, открытие дверей и люков и др;
- работы по обеспечению стоянки. Выполняются при передаче ВС от экипажа аэродромным службам или при планируемой стоянке, длительность которой превышает определенное для данного типа ВС время (2-5 ч). Кроме работ, выполняемых при встрече, производится осмотр самолета для выявления внешних повреждений, закрытие дверей и люков, установка заглушек, отключение электропитания и др.;



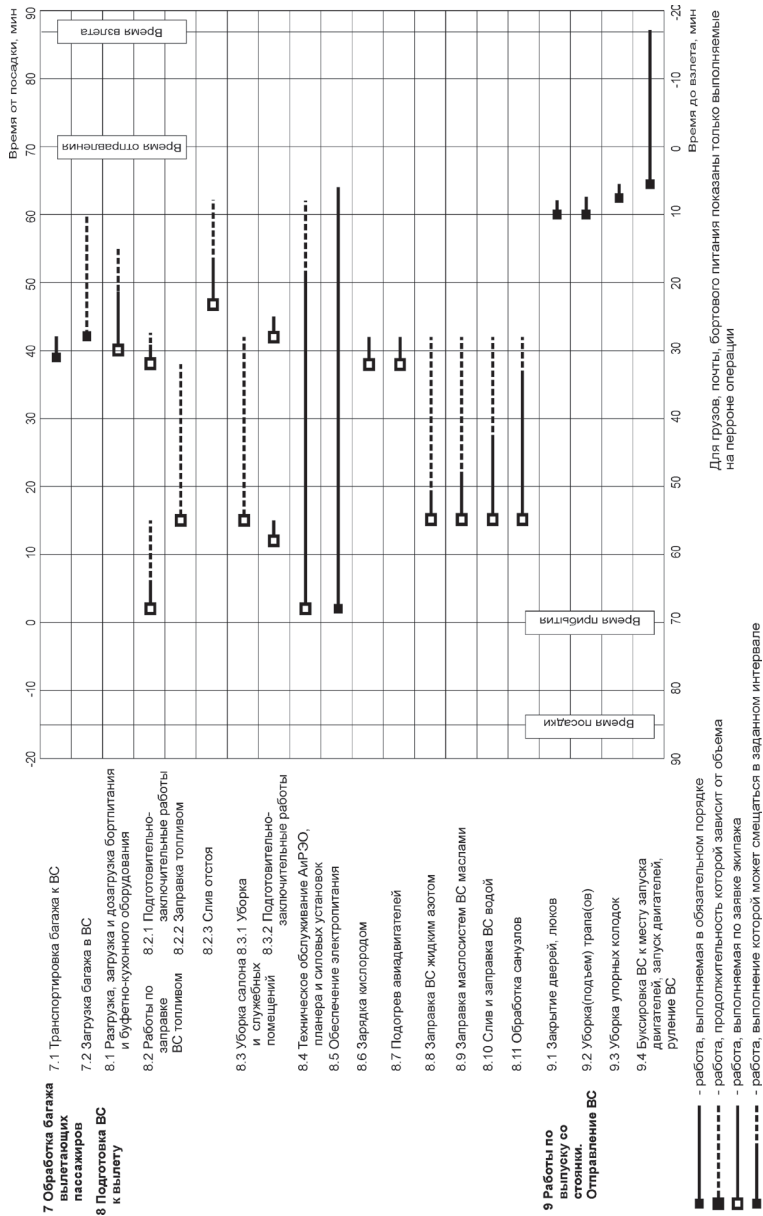


Рис. 3.1.1. Вариант технологического графика подготовки самолета к вылету в конечном (транзитном) аэропорту

- работы по обеспечению вылета. Выполняются непосредственно перед каждым полетом и включают открытие дверей и люков, удаление снега и льда с поверхности ВС, обеспечение работы наземного источника питания, кондиционирование воздуха в кабине, проверку количества и при необходимости дозаправку топлива, проверку количества и при необходимости дозаправку спецжидкостями и водой и зарядку газами, подготовку к запуску двигателей, уборку колодок и др.;
- работы по осмотру и обслуживанию по форме A_1 (транзитная). Выполняются в промежуточном или конечном аэропорту перед повторным планируемым вылетом, если не требуется выполнения другой формы ТО. Включают проверку количества и при необходимости дозаправку топлива, проверку количества и при необходимости дозаправку спецжидкостями и водой и зарядку газами, осмотр самолета с целью обнаружения внешних повреждений, проверки герметичности топливной, масляной, гидравлической и водяной систем, осмотр шасси, уборку в пассажирских салонах, кабине экипажа и грузовых помещениях и др.;
- работы по осмотру и обслуживанию по форме A_2 (базовая). Послеполетное ТО, выполняемое в конце летного дня и/или после выполнения определенного количества полетов, либо перед планируемой стоянкой, длительность которой превышает время, установленное для данного типа ВС (от 5 ч). Работы по форме A_2 включают все работы по форме A_1 и, кроме того, ряд дополнительных работ, таких как проверка уровня масла в маслобаках, осмотр дверей, форточек, проверку бытового оборудования и др.;
- работы по осмотру и обслуживанию по форме Б. Выполняются преимущественно в базовом аэропорту не реже одного раза за определенное количество летных суток (как правило, 10-20 летных суток). Кроме работ по формам A_1 и A_2 включают ряд дополнительных работ, обеспечивающих более глубокую проверку технического состояния самолета и его систем.

В течение летного дня выполняются следующие виды оперативного ТО:

- предполетное ТО, выполняемое один раз в летный день перед первым полетом (по Регламенту ТО соответствующего типа ВС – работы по обеспечению первого вылета и включающее работы после стоянки и работы по обеспечению вылета);
- транзитное ТО, выполняемое в промежуточном или конечном аэропорту перед каждым последующим полетом, включающее работы по встрече самолета, работы по форме A_1 и работы по обеспечению вылета;
- послеполетное ТО, выполняемое в базовом аэропорту в конце летного дня, включающее работы по встрече, работы по форме A_2 и работы по обеспечению стоянки;
- базовое ТО, выполняемое в базовом аэропорту по календарным срокам, включающее работы по встрече, по форме Б и по обеспечению стоянки.

Как следует из приведенного перечня, наибольшую значимость для анализа работы узлового аэропорта представляют характеристики транзитного ТО. Его продолжительность является важнейшим фактором, определяющим длительность времени стыковки и, следовательно, величину затрат времени трансферных пассажиров на пересадку. Следует отметить, что при формировании модели функционирования аэропорта во время волн прилетов и вылетов ТО большинства ВС можно рассматривать как транзитное.

Транзитное ТО включает в себя типовой объем работ, который можно представить в виде следующих основных групп работ [106]:

- работы по приему ВС на стоянку (установка колодок, заземление и т.п.);
- работы по осмотру ВС с земли в целях обнаружения внешних повреждений;
- отдельные проверки работоспособности приборного и радиоэлектронного оборудования;
- внутренняя уборка (по требованию экипажа);
- заправка топливом;

- заправка спецжидкостями, водой и зарядка газами (по требованию экипажа);
- работы по обеспечению посадки – высадки пассажиров;
- погрузочно-разгрузочные работы (обслуживание багажа, буфета и т.п.);
- работы по выпуску ВС со стоянки (уборка колодок, отключение источников питания и т.п.).

Кроме перечисленных могут выполняться такие работы, как кондиционирование (в летний период) или подогрев (в осенне-зимний период) воздуха в пассажирских салонах и кабине экипажа, обработка санузлов. В осенне-зимний период, как правило, требуется выполнение операций по подогреву авиадвигателей и систем самолета, а также устранению его обледенения. Часто работы по приему и выпуску самолета предполагают необходимость его буксировки.

Продолжительность и трудоемкость форм ТО определяются по технологическим графикам соответствующей формы ТО. В основе исходных данных для построения технологических графиков формы ТО лежат:

- перечень и содержание работ по ТО;
- перечень средств ТО, потребных для выполнения данной формы ТО;
- ограничения на порядок выполнения работ;
- продолжительность и состав исполнителей для выполнения каждой работы данной формы ТО;
- располагаемое количество и квалификация исполнителей ТО.

Для одной и той же формы ТО возможно построение большого числа вариантов технологических графиков, отличающихся порядком выполнения работ.

Существенной особенностью оперативных форм ТО является наличие в них работ с неопределенной периодичностью выполнения [106]:

- буксировка ВС после посадки и перед вылетом;
- дозаправка систем ВС рабочими жидкостями и газами (кроме топлива);
- внутренняя уборка ВС;
- обработка санузлов ВС;

– удаление обледенения и обработка поверхности ВС анти-обледенительной жидкостью и др.

Эти работы выполняются в зависимости от технического состояния ВС и/или по требованию экипажа. Продолжительность и трудоемкость ряда из перечисленных работ зависит от их требуемого объема. Продолжительность таких работ как, например, внутренняя уборка ВС может быть сокращена путем увеличения числа исполнителей. Наличие в технологическом графике некоторых работ может зависеть от плановой продолжительности стоянки самолета в промежуточном или конечном аэропорту. Необходимость выполнения работ, содержащих все перечисленные особенности в составе оперативного ТО, приводит к получению различий в оценках продолжительности и трудоемкости оперативных форм ТО.

Анализ технологических графиков обслуживания отечественных и зарубежных самолетов в промежуточных и конечных аэропортах позволяет выявить совокупность работ, определяющих критический путь процесса. Для большинства отечественных самолетов работы по заправке топливом и посадка – высадка пассажиров являются критическими. Данный факт объясняется тем, что, во-первых, совмещение выполнения таких работ запрещено Руководством по технической эксплуатации (за исключением особо оговоренных случаев), во-вторых, продолжительность их выполнения не может быть сокращена путем привлечения дополнительного числа исполнителей. Поэтому эти работы выполняются в следующем технологическом порядке: высадка пассажиров – заправка топливом – посадка пассажиров. Группа работ по осмотру самолета с земли и проверке работоспособности оборудования, как правило, выполняется одновременно с работами по заправке и посадкой – высадкой пассажиров. То обстоятельство, что продолжительность их выполнения может регулироваться путем изменения количества привлекаемых исполнителей, позволяет исключить их из числа критических работ [106].

Технология заправки самолетов топливом предусматривает выполнение после, а иногда и до непосредственной заправки топливом, отстоя топлива в течение 10-15 мин с последующим сливом отстоя

для определения наличия воды в топливе. Поэтому у ряда самолетов к критическим работам относится отстой топлива и его слив.

Практика эксплуатации большинства зарубежных типов самолетов допускает совмещение работ по посадке – высадке пассажиров с заправкой топливом, что отражено в эксплуатационной документации этих самолетов и регулируется национальными правилами большинства государств.

Для самолетов большой пассажироместимости к числу критических работ может относиться внутренняя уборка. В этом случае цепочка критических работ принимает вид: высадка пассажиров – внутренняя уборка – посадка пассажиров. Однако время внутренней уборки может регулироваться количеством уборщиков и используемой техники.

Операции по обработке самолета антиобледенительной жидкостью, проводимые после заправки ВС и посадки пассажиров, также относятся к критическим и значительно увеличивают продолжительность наземного обслуживания. Однако следует помнить, что необходимость в их выполнении существует только в осенне-зимний период.

Представленное здесь описание технологических процессов обслуживания перевозок далеко от полноты и носит обзорный характер. Так на рис. 3.1.1 не нашли отражение такие важные работы и процессы, как информирование пассажиров, оформление перевозочной документации, обеспечение безопасности полетов и др. Тем не менее, даже поверхностный показ дает возможность составить набор технологических операций для включения в модель функционирования узлового аэропорта и проведения их детального анализа.

С учетом изложенных выше соображений включенные в этот набор операции должны удовлетворять трем требованиям:

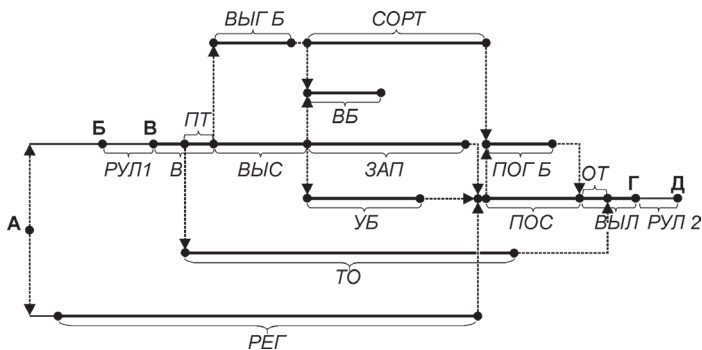
- 1) выполняться обязательно или в подавляющем большинстве случаев при обслуживании транзитных или обратных рейсов;
- 2) находиться (или возможно находиться) на критическом пути;
- 3) иметь значительную, существенную для рассматриваемого уровня детализации модели продолжительность (срав-

нимую с продолжительностью других обязательных критических операций).

К таким операциям могут быть отнесены:

- работы по приему самолета на стоянку;
- высадка и доставка прилетевших пассажиров в аэровокзал;
- выгрузка багажа и доставка его к месту выдачи;
- выдача багажа прилетевшим (конечным и трансферным, либо только конечным) пассажирам;
- заправка самолета топливом;
- проведение работ по ТО планера, силовых установок, авиационного и радиоэлектронного оборудования в объеме формы A_1 ;
- уборка салонов и кабины самолета;
- регистрация вылетающих пассажиров;
- доставка и посадка вылетающих пассажиров;
- сортировка багажа;
- доставка и погрузка багажа;
- работы по выпуску самолета со стоянки.

Технологический график, включающий перечисленные операции, приведен на рис. 3.1.2. Как общая продолжительность наземного обслуживания самолета определяется составом и продолжительностью отдельных технологических операций, так и набор операций и характер их выполнения меняются в зависимости от планового времени подготовки самолета к вылету. В случае малой плановой продолжительности стоянки самолета ряд операций (таких как уборка, выгрузка-погрузка бортпитания) может быть исключен из технологического графика или сокращена продолжительность их выполнения. Несмотря на то, что параметры операций зависят от типа ВС, значения их меняются в широких пределах, а в ряде случаев некоторые из операций вообще исключаются из технологического процесса, это не приводит к нарушению связей между операциями и «разрушению» графика. Поэтому технологический график на рис. 3.1.2, называемый далее модельным, будет справедлив для описания процесса обслуживания любого типа ВС.



События: А – поступление сообщения о движении ВС, Б – посадка ВС, В – прибытие ВС на МС, Г – отправление ВС с МС, Д – вылет ВС.

Операции (или временные интервалы): РЕГ – регистрация билетов и оформление багажа вылетающих пассажиров; РУЛ 1 – движение ВС на МС; В – встреча ВС на МС; ПТ – установка трапа; ВИС – высадка и доставка в аэровокзал пассажиров; ВЫГ Б – выгрузка багажа и транспортировка его в багажные помещения аэровокзала; ВБ – выдача багажа прилетевшим пассажирам; ЗАП – заправка ВС топливом; УБ – уборка салона; ТО – работы по ТО; ПОС – доставка вылетающих пассажиров к ВС и посадка в ВС; СОРТ – сортировка и комплектация по рейсам багажа вылетающих пассажиров; ПОГ Б – транспортировка к ВС и погрузка багажа вылетающих пассажиров; ВЫЛ – работы по выпуску ВС со стоянки; ОТ – уборка трапа; РУЛ 2 – движение ВС с МС

Рис. 3.1.2. Модельный технологический график подготовки ВС к вылету

3.2. Количественные показатели уровня качества наземного обслуживания перевозок в аэропорту

Потребная для выполнения технологических операций численность персонала и технических средств аэропорта должна определяться с учетом параметров качества обслуживания перевозок. На сегодняшний день нет эффективных количественных методов оценки качества услуг вообще и в аэропортовом бизнесе в частности. В Отраслевом стандарте «Услуги, предоставляемые пассажирам в аэропортах» (ОСТ 54-1-283.02-94) [107], введенном в действие в РФ 1 января 1995 г., количественные временные показатели качества обслуживания пассажиров в аэропортах отсутствуют.

В то же время ИАТА разработан «Рекомендуемый текст – Меморандум о взаимопонимании по стандартам оказываемых услуг» (документ АНМ 803), являющийся частью Стандартного соглашения о наземном обслуживании [108]. Этот документ содержит шаблонный перечень стандартов оказываемых авиакомпаниям услуг, которые могут использоваться как инструмент оценки качества работы компании – оператора аэропорта.

При заключении соглашения о наземном обслуживании между конкретными аэропортом и авиакомпанией указанный типовой перечень может быть принят во внимание, при этом он может быть расширен, сокращен или изменен. Назначаются также определенные количественные величины, определяющие уровень качества обслуживания, отсутствующие в шаблоне. Показатели разделены на несколько категорий, характеризующих основные технологические процессы, такие как обслуживание пассажиров, перронное обслуживание, обработка груза. Как правило, задается также уровень надежности выполнения того или иного показателя, как доля своевременного и/или корректного исполнения согласованной услуги.

Ниже приводится список требований к обеспечению показателей качества, принятый в одном из крупнейших аэропортов Московского аэроузла на 2005 г. Наименования пунктов списка в целом соответствуют перечню документа АНМ 803. В скобках – заданная надежность выполнения требований.

Регистрация пассажиров и оформление багажа:

1. Наличие отдельных стоек регистрации для пассажиров первого и бизнес- класса (100%).
2. Время ожидания пассажира с момента прибытия на регистрацию и до начала обслуживания у стойки не более:
 - для пассажира первого класса – 5 мин (85%);
 - для пассажира бизнес-класса – 7 мин (75%);
 - для пассажира экономического класса – 10 мин (65%).

Обслуживание пассажиров при посадке на борт ВС:

3. Ожидание пассажиров в автобусе до его отправления от аэровокзала не более 10 мин (90%).
4. Прибытие последнего пассажира на борт ВС не позднее 10 мин до времени отправления ВС по расписанию (95%).
5. Предоставление полетной документации на борт ВС не позднее, чем 5 мин до времени отправления ВС по расписанию (95%).

Обслуживание пассажиров по прилету ВС:

6. Выход первого пассажира из ВС через 2 мин после установки колодок или получения разрешения от сотрудников пограничной службы на высадку (90%).
7. Прибытие персонала, автобусов и средств перральной механизации на МС для встречи пассажиров к моменту открытия дверей ВС (95%).

Обработка багажа:

8. Загрузка последнего места багажа (контейнера с багажом) в ВС не позднее, чем за 10 мин до времени отправления ВС по расписанию (90%).

9. Время подачи в зону выдачи первого места багажа с момента открытия багажных люков (в одном из терминалов аэропорта):
 - при поштучном способе перевозки – 20 мин (85%);
 - при контейнерном способе перевозки – 25 мин (85%).
10. Время подачи в зону выдачи последнего места багажа с момента открытия багажных люков (в одном из терминалов аэропорта):
 - при поштучном способе перевозки – 35 мин (85%);
 - при контейнерном способе перевозки – 40 мин (85%).

В качестве комментария к приведенному списку отметим, что требования к качеству услуг, предоставляемых рассматриваемым аэропортом, нельзя назвать чрезмерно жесткими. Так, в других аэропортах Москвы установленная продолжительность ожидания регистрации меньше на 2-3 мин. То же касается и некоторых других показателей.

Наряду с перечисленными используется целый ряд показателей, не упомянутых в списке. Это, например, количество пассажиров в очереди у стойки регистрации (считается приемлемым – не более 30 чел.); время регистрации одного пассажира (не более 1 мин); доля неправильно обработанного багажа; время до вылета по расписанию, за которое должна быть завершена заправка, или доставлена полетная документация и др.

Особое значение для узловых аэропортов имеют показатели, характеризующие соблюдение времени стыковки рейсов и качественное обслуживание транзитных и трансферных пассажиров и их багажа. Как уже отмечалось в гл. 1, главным требованием в обслуживании трансферных пассажиров является безусловное обеспечение пересадки пассажиров с рейса на рейс при минимальном времени стыковки рейсов. Так, например, в аэропорту Шереметьево минимальное стыковочное время, необходимое для обслуживания трансферных безвизовых пассажиров, составляет: в одном терминале – 1 ч; между двумя терминалами – 2 ч. Минимальное стыковочное время, необходимое для обслуживания трансферных визовых пассажиров (в том числе внутрироссийский трансфер), составляет: в Терминале-1 – 1.5 ч; в Терминале-2 – 1 ч; между двумя терминалами – 2 ч.

3.3. Вероятностные модели технологических операций наземного обслуживания перевозок в аэропорту

Математические модели отдельных операций, входящих в модельный технологический график, должны отражать связи между продолжительностями этих операций, численностью привлекаемого персонала и технических средств, их техническими характеристиками, используемыми организационными схемами, технологическими, планировочными и иными особенностями аэропорта. Ниже рассмотрено построение статистических моделей операций модельного графика, связывающих важнейшие из перечисленных характеристик.

Имитационное моделирование, основывающееся на использовании вероятностной модели исследуемых процессов, предполагает наличие статистических данных, описывающих эти процессы. При этом точность и адекватность модели зависит от объема накопленной статистики. До недавнего времени сбор статистических данных в условиях аэропорта мог быть осуществлен единственным способом, не предполагавшим какую-либо автоматизацию. Такой способ – «вручную» – сводится к трем основным процедурам: проведению замеров времени, затрачиваемого на технологические операции; наблюдением за обслуживаемыми в аэропорту потоками ВС, пассажиров и грузов с целью выявления их характеристик и особенностей; опросам специалистов-сотрудников аэропорта, пассажиров и грузоотправителей. Из-за сложности и разнообразия технологических процессов аэропорта эти операции требуют значительных трудовых и временных затрат. Практически статистика может быть собрана только по важнейшим операциям в относительно небольшом объеме, не

позволяющем обеспечить высокую точность и детальность формируемой модели.

Внедрение в ряде аэропортов автоматизированных информационных систем (ИС) управления их производственной деятельностью позволяет избежать длительных и трудоемких процедур сбора статистики путем использования материалов, хранящихся в базах данных (БД) этих систем. К основным задачам, решаемым указанными системами, относятся:

- 1) автоматизация процесса управления при обслуживании воздушных судов в аэропорту;
- 2) повышение безопасности и регулярности полетов на основе применения современных информационных технологий;
- 3) оптимизация использования людских и материальных ресурсов для снижения издержек авиатранспортного производства;
- 4) повышение качества контроля за выполнением технологических операций и расходованием ресурсов при обслуживании авиарейсов;
- 5) снижение информационной нагрузки на персонал, обеспечивающий организацию и контроль за выполнением обслуживания ВС в аэропорту.

Число аэропортов РФ, использующих в своей практике ИС указанного назначения, продолжает расширяться. Этот процесс охватывает не только крупные, но также средние и даже малые аэропорты.

В БД ИС накапливается информация, подробно и всесторонне описывающая технологические процессы аэропорта, а именно:

- характеристики обслуженных аэропортом рейсов – тип и модификация ВС, выполнявшего рейс; вид перевозки (ВВЛ, МВЛ); категория рейса (начальный, конечный, обратный, транзитный) и т.п.;
- регулярность выполнения рейсов, определяемая плановыми, расчетными и фактическими значениями времени вылета и посадки ВС, выполнявших рейсы;
- параметры коммерческой загрузки ВС – число пассажиров и их распределение по категориям и классам обслуживания; вес зарегистрированного багажа и груза и т.п.;

- временные характеристики технологических операций по обслуживанию пассажиров, грузов и ВС – плановые и фактические значения времени начала и окончания операций;
- ресурсы аэропорта, задействованные в обслуживании рейса – численность персонала, число и виды средств механизации;
- количество заправляемого авиатоплива и спецжидкостей и другая информация.

В БД ИС фиксируется и сохраняется информация практически о каждом рейсе, обслуженном в аэропорту, что делает их ценным источником исходных данных для формирования математической модели процесса аэропортового обслуживания рейсов.

Описываемые ниже результаты получены как с помощью обработки информации, взятой из БД ИС ряда аэропортов РФ, так и путем непосредственных наблюдений. Как правило, наблюдения проводились с целью создания портрета процесса обслуживания вылетающих пассажиров в аэровокзале. В этом случае объектом наблюдений явились пассажиры. Данные, характеризующие процессы поступления и обслуживания рейсов, по большей части черпались из БД ИС. В данном случае объект исследования – рейсы.

Статистические данные служат исходным «сырьем» для построения вероятностных распределений времени обслуживания названных объектов на различных этапах производственного процесса. Использование широко известных методов математической статистики после обработки имеющейся выборки результатов наблюдений позволяет получить сначала эмпирическое, а затем и сглаженное, теоретическое распределение времени обслуживания. Заметим, что обязательной необходимости в получении сглаженных распределений для решения задач имитационного моделирования нет. Современные компьютерные системы моделирования позволяют реализовать произвольное распределение сколь угодно сложного вида. Однако получение сглаженных распределений очень желательно по целому ряду причин.

Во-первых, функции эмпирического распределения могут содержать определенные «искажения», особенно если они получены на основе выборки малого объема. Теоретическое распре-

деление «сглаживает» данные и предоставляет информацию об общем распределении, лежащем в их основе.

Во-вторых, изменение эмпирического распределения с целью изучения работы системы с изменившимися параметрами или в изменившихся условиях очень затруднительно. Трансформирование же теоретического распределения достигается изменением двух-трех его параметров.

В-третьих, применение эмпирического распределения делает невозможным получение значений вне области данной выборки наблюдений.

Кроме того, некоторые теоретические распределения широко используются в простых аналитических моделях теории массового обслуживания. Другие из них могут быть использованы ценой некоторого усложнения и доработки этих моделей. Все это невозможно для эмпирических распределений.

С другой стороны, методы теории вероятностей путем комбинации ряда законов позволяют получить теоретическое распределение, соответствующее едва ли не любому сколь угодно сложному эмпирическому распределению. Однако применение комбинированных законов очень осложняет качественный анализ поведения рассматриваемых систем и может быть оправдано, только если простые теоретические законы не позволяют обеспечить удовлетворительное сглаживание. Поэтому ниже главное внимание уделено выявлению теоретических распределений, подчиняющихся простым, детально изученным законам. Это рассмотренные ранее законы гамма- и логарифмически нормального распределений, а также распределения Вейбулла, соответствующие особенностям исследуемых здесь процессов.

Поскольку целью работы является не построение имитационной модели конкретного аэропорта, а выявление общих закономерностей функционирования аэропорта-хаба, во главу угла ставится не подбор сглаженного распределения, идеально соответствующего распределению эмпирическому, а подтверждение возможности использования простых «традиционных» законов распределения вероятностей. Полученные на основании анализа статистики, собранной в определенном аэропорту, эти распределения будут отражать как специфические черты, характерные

для этого аэропорта (пусть с определенной погрешностью), так и общие закономерности описываемой операции, не зависящие от конкретного предприятия. Это позволяет использовать их в модели некоторого абстрактного хаба. Кроме того, отметим, что Международный аэропорт Курумоч, в котором получена большая часть статистики, претендует в перспективе на роль одного из крупных узловых аэропортов РФ, так что анализ и моделирование его работы по узловой схеме представляет самостоятельную актуальную задачу.

В качестве важнейшей операции аэровокзального обслуживания пассажиров рассмотрена регистрация билетов и оформление багажа. Длительность обслуживания на местах регистрации является случайной величиной, зависящей от числа мест багажа, предъявляемого пассажирами к перевозке; распределения пассажиров по группам; принятого метода регистрации; числа сотрудников, обслуживающих одно рабочее место; используемых средств механизации и информационных технологий.

В табл. 3.3.1 и на рис. 3.3.1 приведены результаты хронометража длительности регистрации пассажиров, проведенного в рассмотренных в п. 2.5 аэропортах. В качестве отдельного наблюдения рассматривается группа совместно следующих пассажиров, либо одиночный пассажир.

В аэропортах Курумоч и Пулково 1 фиксировались данные об обслуживании пассажиров внутренних рейсов. Здесь используется порейсовая схема регистрации. Каждую стойку обслуживают 2 сотрудника службы перевозок аэропорта. Применяются компьютерные системы управления отправлениями.

В аэропорту Храброво проводились отдельные наблюдения регистрации трансферных пассажиров «утренней волны», пересеживающихся с внутрироссийских на международные рейсы, и трансферных пассажиров «вечерней волны», пересеживающихся с международных на внутренние рейсы. Как было сказано в гл. 1, для организации регистрации этих категорий пассажиров в аэровокзале выделена отдельная зона, оснащенная специализированными стойками. Сравнительно малая средняя продолжительность регистрации объясняется отсутствием багажа, предъявляемого к оформлению пассажирами.

Время обслуживания для операций малой трудоемкости принято приближенно описывать показательным законом распределения [91]:

$$f(t) = \nu e^{-\nu t}$$

где $\nu = \frac{1}{M[t_{\text{обсл}}]}$ – интенсивность обслуживания пассажиров на рабочем месте;

$M[t_{\text{обсл}}]$ – среднее время обслуживания пассажира на рабочем месте.

Для повышения точности модели могут быть использованы более сложные законы распределения. Здесь проводилась проверка возможности сглаживания эмпирических распределений тремя перечисленными выше законами. В табл. 3.3.1 приведены результаты проверки только для тех случаев, когда теоретическое распределение обеспечивает сглаживание с уровнем значимости не менее 0.05. В таблице использованы следующие обозначения:

n – объем выборки;

$\min t_{\text{обсл}}, \max t_{\text{обсл}}$ – минимальное и максимальное эмпирические значения, соответственно;

$\bar{\mu}$ – выборочное среднее;

\bar{k} – выборочный коэффициент вариации, определяемый как $\bar{k} = \bar{\sigma} / \bar{\mu}$, где $\bar{\sigma}$ – выборочное среднее квадратическое отклонение;

ρ^* – уровень значимости.

Как следует из таблицы, наиболее универсальным оказывается логарифмически нормальный закон, позволяющий учесть острый «выступ» эмпирического распределения при малых значениях $t_{\text{обсл}}$. В ряде случаев хорошее сглаживание демонстрирует также гамма-распределение.

Для создания вероятностных моделей технологических операций (за исключением заправки топливом), в которых в качестве единичного объекта принимается рейс, используются материалы БД ИС аэропорта Курумоч.

**Характеристики распределения продолжительности
регистрации пассажира**

Аэропорт, год на- блюдений	Курумоч, 2005	Куру- моч, 2008	Курумоч, 2009	Пул- ково, 2008	Храброво, 2009					
					ВВЛ- МВЛ	МВЛ- ВВЛ				
Параметры выборки										
n	70	145	109	100	196	196				
$\min t_{\text{обсл.}}$ мин	0.15	0.15	0.68	0.32	0.13	0.12				
$\max t_{\text{обсл.}}$ мин	3.33	5.12	3.27	5.25	3.33	6.5				
$\bar{\mu}$, мин	1.03	1.05	1.47	0.89	0.55	0.63				
\bar{k}	0.71	0.76	0.42	0.72	0.77	1.03				
Теоретические распределения										
Закон распреде- ления	гамма	логнорм.	Вей- булла	логнорм.	гамма	лог- норм.	Вей- булла	лог- норм.	лог- норм.	лог- норм.
α	1.47	0.89	1.16	0.76	1.49	0.64	1.34	0.84	0.76	0.96
β	0.60	-0.52	0.92	-0.36	0.53	-0.21	0.85	-0.82	-1.20	-1.11
s, мин	0.14	0.15	0.15	0.12	0.67	0.47	0.67	0.25	0.13	0.12
ρ^*	0.55	0.46	0.29	0.46	0.60	0.59	0.34	0.11	0.59	0.63

Обслуживаемые в аэропорту ВС отличаются разнообразием типов и модификаций, затрудняющим формирование вероятностных моделей. Между тем полный учет этого многообразия необходим только при построении чрезвычайно детальных моделей. Для упрощения модели ценой незначительного снижения ее точности было предпринято объединение различных типов и модификаций ВС в небольшое число совокупностей.

Предварительно был определен набор наиболее характерных для рассматриваемого аэропорта типов ВС, в который были включены 11 типов и модификаций самолетов, вносящих наибольший вклад в интенсивность движения в аэропорту: их совокупная доля в общем количестве рейсов, обслуженных в течение 2007-2008 гг., составила около 92%.

Следующим шагом стало выявление минимально необходимого числа совокупностей и распределение по ним отобранных ранее типов ВС. Признаками для такого распределения служили характеристики ВС – пассажироместимость и максимальная взлетная масса, а также важнейшая характеристика операций его обслуживания – временная продолжительность. При этом для основных технологических операций рассматривались как плановые, так и фактические величины последней. Источником данных о продолжительности операций служила БД ИС аэропорта.

Проведенный анализ статистического материала и характеристик ВС позволил провести группирование ВС, обслуживаемых в рассматриваемом аэропорту, с выделением трех совокупностей. Здесь, чтобы избежать путаницы с используемыми терминами

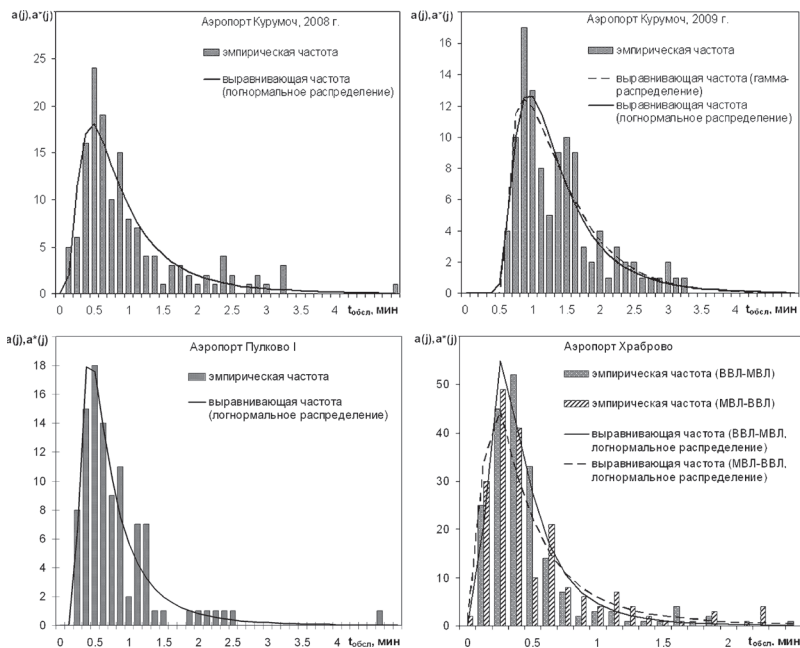


Рис. 3.3.1. Распределение продолжительности регистрации пассажира

«класс ВС» и «группа ВС», эти совокупности обозначены как «категории ВС». Наиболее характерные для исследуемого аэропорта ВС распределились по категориям следующим образом:

Категория I – Ту-154, В-757-200, В-737-400, А-320;

Категория II – Ту-134, Як-42, В-737-200, В-737-500, А-319;

Категория III – Ан-24, Як-40.

В целом данное распределение близко к разделению ВС по классам.

Анализ статистики выявил зависимость временных характеристик операций не только от типа ВС, но и от категории перевозки – международной или внутренней. Для таких операций как, например, регистрация билетов, эта зависимость обусловлена различиями технологических графиков. Для других операций влияние имеет более сложный характер.

Результаты обработки статистических данных ИС аэропорта Курумоч, содержащие параметры эмпирических и теоретических распределений продолжительности важнейших операций и интервалов времени, приведены в табл. 3.3.2. Исследованы материалы, характеризующие обслуживание около 2000 оборотных рейсов, выполненных самолетами различных типов в течение 2007-2008 гг. В ходе предварительной обработки было отсеяно около 10% наблюдений, результаты которых квалифицированы как некорректные. Как и в приведенных выше случаях, в качестве сглаживающих рассматривались гамма- и логарифмически нормальное распределения, а также распределение Вейбулла. Для различных выборок эти законы распределения обеспечивали различное качество сглаживания, однако наиболее универсальным, обеспечивающим наивысший уровень значимости в большинстве случаев, оказалось гамма-распределение. С целью упрощения формируемой модели в дальнейшем только этот закон используется для описания длительности всех операций. В тех случаях, когда ни один из перечисленных законов не обеспечивает удовлетворительного сглаживания, в таблице приводятся параметры гамма-распределения, доставляющие минимум статистике критерия χ^2 Пирсона.

Ограниченные рамки монографии не позволяют представить здесь все распределения в графическом виде. На рис. 3.3.2 это

сделано только для ВС II категории, выполняющих внутрироссийские рейсы. Видно, что характер гамма-распределения в целом соответствует гистограмме эмпирических значений, даже в тех случаях, когда полученный уровень значимости невелик.

Прокомментируем некоторые из полученных результатов. Посадка, высадка пассажиров включает также время доставки к самолету или от него. Доставка осуществляется перронными автобусами либо, реже, пешком. На продолжительность операции влияет удаленность МС от терминала, интенсивность движения на перроне в момент высадки, количество пассажиров, отсутствие конфликтных ситуаций и т.д.

Погрузка и выгрузка багажа включает также затраты на его транспортировку по перрону. Разброс продолжительности багажных операций вызван различиями в численности мест багажа, перевозимых различными рейсами; в расстояниях транспортировки багажа по перрону; в численности и номенклатуре используемых средств механизации; в технологии перевозки багажа и т.д.

Характеристики уборки салона приведены для тех случаев, когда она выполняется. Доля рейсов, при обслуживании которых уборка выполнялась, среди всех рейсов данной категории обозначена в табл. 3.3.2 как $K_{убор}$. Уборка осуществляется бригадой уборщиков с использованием бытового автобуса.

Малый объем выборки по установке (подгону или выпуску) и уборке (отгону или подъему) трапа объясняется отсутствием надежных данных по данной операции в БД ИС. Сбор данных осуществлялся «вручную», путем непосредственных наблюдений на перроне. При подгоне фиксировалось время от начала движения трапа от зоны стоянки трапов на МС ВС до окончания установки у борта ВС. При отгоне трапа – от начала отгона от борта ВС до окончания установки в пределах зоны стоянки трапов. В подавляющем большинстве случаев использовался один трап.

Для транзитного ТО выявляется зависимость только от категории ВС, но не от категории перевозки.

Регистрация билетов является операцией, в которой конкуренция между гамма- и логнормальным распределениями наиболее заметна. В аэропорту используется порейсовая схема регистрации, при которой число стоек, отводимое для обслуживания

пассажиры рейса, колеблется от одной до трех, в зависимости от типа ВС, категорий рейса и перевозки, ожидающегося числа пассажиров и других факторов. Распределение числа стоек для ВС II категории приведено на рис. 3.3.3.

Табл. 3.3.2.

Характеристики распределений длительности технологических операций модельного графика

Операция	Параметры распределений	Категории самолета и рейса				
		I		II		III
		ВВЛ	МВЛ	ВВЛ	МВЛ	ВВЛ
1	2	3	4	5	6	7
Выгрузка багажа	n	552	94	476	170	нет данных
	$\bar{\mu}$, мин	13.05	14.19	10.95	12.07	
	\bar{k}	0.44	0.44	0.53	0.62	
	α ; β ; s , мин	3.75; 2.95; 1.99	5.05; 2.81; 0.00	3.35; 3.17; 0.33	1.85; 5.51; 1.88	
	ρ^*	0.06	0.50	0.07	0.29	
Погрузка багажа	n	559	101	467	165	нет данных
	$\bar{\mu}$, мин	16.95	24.53	14.95	20.24	
	\bar{k}	0.43	0.45	0.49	0.71	
	α ; β ; s , мин	4.77; 3.32; 1.10	4.81; 5.10; 0.00	4.19; 3.57; 0.00	1.97; 10.27; 0.00	
	ρ^*	0.86	0.22	0.06	0.70	
Высадка пассажиров	n	564	100	584	167	392
	$\bar{\mu}$, мин	11.02	12.63	7.91	9.45	5.40
	\bar{k}	0.28	0.35	0.33	0.48	0.60
	α ; β ; s , мин	5.18; 1.35; 4.03	4.67; 2.04; 3.10	2.91; 1.51; 3.52	2.63; 2.79; 2.11	1.42; 2.70; 1.57
	ρ^*	0.05	0.48	0.00	0.48	0.21
Посадка пассажиров	n	531	96	600	161	596
	$\bar{\mu}$, мин	16.96	26.13	15.28	20.86	11.42
	\bar{k}	0.41	0.40	0.47	0.81	0.56
	α ; β ; s , мин	5.99; 2.83; 0.00	4.62; 4.85; 3.73	4.42; 3.45; 0.00	1.52; 13.74; 0.00	3.21; 3.56; 0.00
	ρ^*	0.12	0.88	0.08	0.47	0.06

1	2	3	4	5	6	7
Уборка салона	n	527	100	352	162	705
	$\bar{\mu}$, мин	24.90	29.30	16.81	22.98	12.61
	\bar{k}	0.33	0.51	0.36	0.38	0.43
	α ; β ; s , мин	9.12; 2.73; 0.00	3.81; 7.69; 0.00	3.26; 3.32; 5.99	6.86; 3.35; 0.00	1.80; 4.03; 5.36
	ρ^*	0.10	0.08	0.07	0.70	0.06
$K_{убор}^2$, %	96.28	84.21	80.75	81.3	91.58	
Установка трапа	n	нет дан- ных	нет дан- ных	91		нет дан- ных
	$\bar{\mu}$, мин			2.18		
	\bar{k}			0.41		
	α ; β ; s , мин			3.77; 0.50; 0.00		
	ρ^*			0.54		
Уборка трапа	n	нет дан- ных	нет дан- ных	91		нет дан- ных
	$\bar{\mu}$, мин			2.09		
	\bar{k}			0.44		
	α ; β ; s , мин			4.73; 0.40; 0.00		
	ρ^*			0.21		
Транзитное ТО	n	525		48		705
	$\bar{\mu}$, мин	65.97		45.62		12.45
	\bar{k}	0.35		0.34		0.42
	α ; β ; s , мин	1.73; 17.32; 36.00		4.80; 7.17; 11.20		1.43; 4.37; 6.21
	ρ^*	0.07		0.28		0.07
Регистрация билетов	n	538	97	452	161	537
	$\bar{\mu}$, мин	54.63	124.38	52.57	99.26	42.89
	\bar{k}	0.17	0.23	0.11	0.36	0.32
	α ; β ; s , мин	12.40; 2.61; 22.23	19.19; 6.48; 0.00	4.86; 2.66; 39.65	5.71; 14.76; 15.00	8.06; 4.83; 4.00
	ρ^*	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01
От посадки до встречи	n	466	87	545	152	15
	$\bar{\mu}$, мин	12.58	12.89	10.78	12.92	10.19
	\bar{k}	0.29	0.29	0.33	0.32	0.15
	α ; β ; s , мин	9.01; 1.23; 1.50	8.60; 1.27; 2.00	9.32; 1.16; 0.00	7.29; 1.54; 1.71	недо- статочно данных
	ρ^*	0.20	0.73	0.06	0.37	

1	2	3	4	5	6	7
От выпуска до вылета	n	437	77	409	110	5
	$\bar{\mu}$, мин	6.28	7.33	6.77	7.94	10.54
	\bar{k}	0.36	0.40	0.43	0.36	0.43
	α ; β ; s , мин	6.46; 0.90; 0.50	4.67; 1.35; 1.00	4.00; 1.44; 1.00	4.22; 1.41; 2.00	недостаточно данных
	ρ^*	0.00	0.54	0.49	0.28	
От встречи до подгона трапа	n	375	73	600	134	14
	$\bar{\mu}$, мин	2.73	3.47	2.55	2.60	1.31
	\bar{k}	1.42	1.05	1.15	1.10	1.26
	α ; β ; s , мин	0.50; 5.41; 0.00	0.92; 3.76; 0.0	0.75; 3.39; 0.0	0.82; 3.16; 0.0	недостаточно данных
	ρ^*	0.27	0.76	0.06	0.74	
От отгона трапа до конца выпуска	n	452	75	383	113	5
	$\bar{\mu}$, мин	8.76	7.80	7.39	8.29	5.74
	\bar{k}	0.36	0.37	0.39	0.67	0.79
	α ; β ; s , мин	5.00; 1.44; 1.64	7.49; 1.03; 0.0	3.59; 1.52; 2.00	1.18; 5.15; 2.25	недостаточно данных
	ρ^*	0.13	0.24	0.86	0.18	
Выдача Багажа	n	360	193	962	62	нет данных
	$\bar{\mu}$, мин	28.94	52.25	25.60	47.42	
	\bar{k}	0.77	0.51	0.79	0.63	
	α ; β ; s , мин	1.70; 17.02; 0.00	2.55; 16.57; 10.00	1.60; 16.00; 0.00	2.02; 21.08; 5.00	
	ρ^*	0.06	0.09	0.05	0.08	

Помимо технологических операций в табл. 3.3.2 и на рис. 3.3.2 приведены результаты обработки статистики для важных интервалов времени: от посадки ВС до начала его встречи на МС, от начала встречи на ВС до начала подгона трапа, от окончания отгона трапа до окончания выпуска ВС с МС, а также от окончания выпуска ВС с МС до вылета.

Заправка топливом требует значительных затрат времени и предопределяет общую продолжительность подготовки ВС к вылету. По ряду причин данные об этой операции отсутствуют в БД ИС аэропорта Курумоч, поэтому здесь использована статистика, накопленная в аналогичной ИС аэропорта Когалым с 2004 по 2006 г. Масштаб аэропорта не позволяет даже ориентировочно рассматривать его в качестве узлового, что, однако, не является препятствием для использования его статистических материалов для формирования вероятностной модели операции заправки.

Слабая разветвленность сети авиалиний базирующейся в аэропорту авиакомпании облегчает учет объемов запрашиваемого топлива. Примеры результатов такого учета приведены на рис. 3.3.4а, где отображены полигоны распределений массы запрашиваемого в ВС для выполнения рейса топлива, отнесенной к массе максимального его запаса. Рассмотрены заправки двух определенных самолетов, выполняющих рейсы на двух авиалиниях, а именно: Ту-154 Б-2 – на линии протяженностью 1900 км, Ту-134 Б – протяженностью 2400 км.

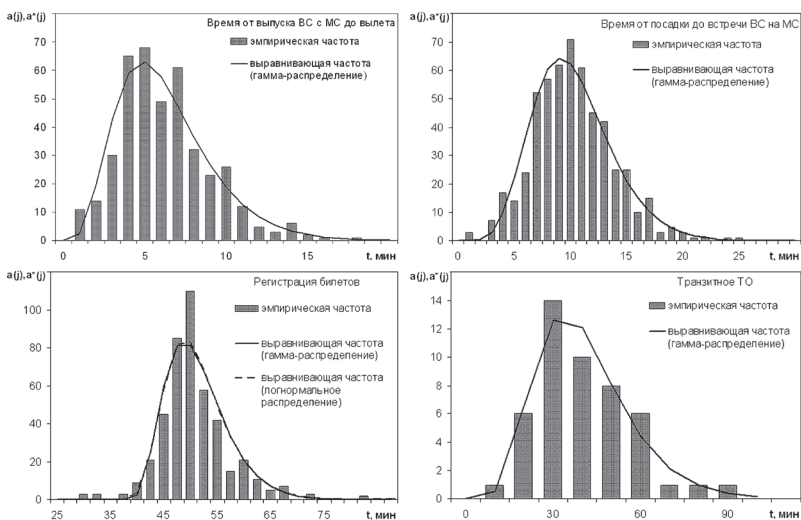


Рис. 3.3.2. Распределения продолжительности технологических операций
(см. продолжение на след. стр.)

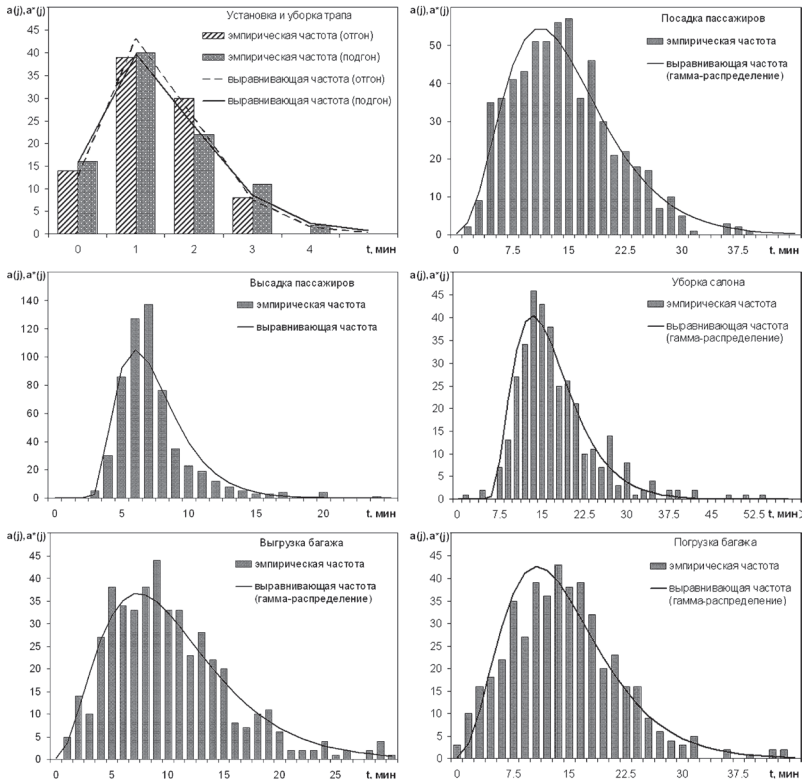


Рис. 3.3.2. Распределения продолжительности технологических операций (продолжение)

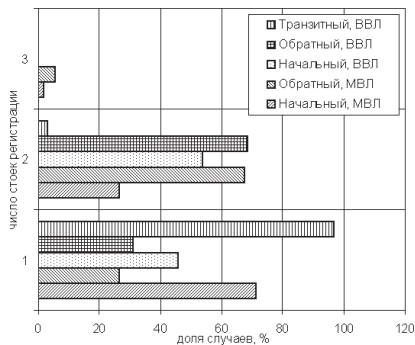


Рис. 3.3.3. Распределение числа стоек регистрации

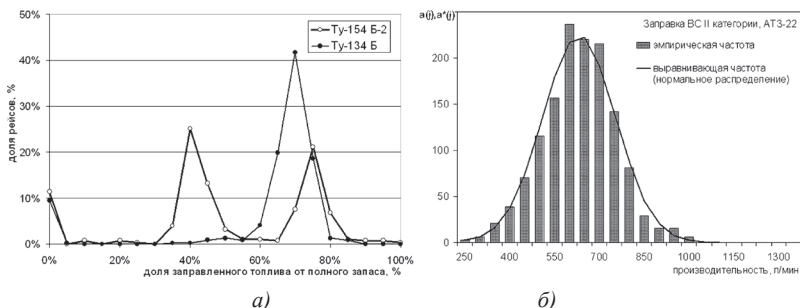


Рис. 3.3.4. Статистические распределения характеристик операции заправки ВС топливом

В целом данные ИС свидетельствуют о значительном разбросе количества заправляемого топлива, причем примерно в 10% всех случаев ВС в аэропорту вылета не заправлялось, очевидно, используя для полета имеющийся запас топлива.

Для выполнения приблизительно 35% рейсов самолет Ту-154 Б-2 заправлялся количеством топлива, достаточным для перелета в аэропорт назначения и обратно, что позволяло избежать дозаправки в аэропорту с большей стоимостью топлива. Еще в 40% случаев самолет Ту-154 Б-2 заправлялся топливом, достаточным для перелета в аэропорт назначения, с необходимостью дозаправки в нем.

Меньшая дальность самолета Ту-134 Б и большая протяженность обслуживаемой им авиалинии привела к тому, что в подавляющем большинстве случаев самолет заправлялся количеством топлива, достаточным для перелета в аэропорт назначения с необходимостью дозаправки. Следует отметить, что график оборота указанных самолетов в течение исследуемого периода предполагал выполнение рейсов и в другие аэропорты, помимо рассматриваемых, что нашло отражение в распределении массы заправляемого топлива.

На продолжительность заправки, наряду с объемом заправляемого топлива и характеристиками топливных систем ВС, влияют технические характеристики и число используемых средств заправки. В рассматриваемом аэропорту, не отличающемся высокой интенсивностью движения, заправка выполняется одним

топливозаправщиком, совершающим в случае необходимости несколько подъездов к заправляемому ВС. Для заправки самолетов, относящихся к I, II и, отчасти, III категориям по введенной здесь классификации, используются топливозаправщики типа АТЗ-22, для вертолетов и самолетов третьей и меньших категорий – АТЗ-10.5. Определенное по данным ИС время на подъезд и отъезд топливозаправщиков составляет ориентировочно 3-5 мин.

Анализ статистических данных позволяет рассматривать производительность заправки в качестве нормально распределенной случайной величины, зависящей от категории ВС и типа топливозаправщика. Как следует из результатов проверки статистической гипотезы, приведенных в табл. 3.3.3, наиболее ярко нормальный характер распределения производительности проявляется для ВС I и II категорий. Помимо использованных ранее обозначений, здесь μ – математическое ожидание сглаживающего нормально распределения, k – его коэффициент вариации. Гистограмма эмпирических значений и график сглаживающего нормального распределения для производительности заправки ВС II категории приведены в качестве иллюстрации на рис. 3.3.4б.

Табл. 3.3.3.

Характеристики распределения продолжительности операции заправки ВС топливом

Параметры распределений	Категория ВС, тип используемого топливозаправщика			
	I, АТЗ-22	II, АТЗ-22	III, АТЗ-22	III, АТЗ-10.5
n	1731	1373	246	257
$\bar{\mu}$, мин	930.45	657.52	497.88	310.03
\bar{k}	0.25	0.18	0.29	0.32
μ , л/мин	927.86	656.87	498.58	310.99
k	0.25	0.18	0.29	0.33
ρ^*	0.06	0.13	0.01	0.00

Отметим, что приводимые выше числовые характеристики технологических операций, полученные на основе обработки статистических данных, в целом совпадают с аналогами, приводимыми в нормативной и специальной литературе. Это служит определенной гарантией адекватности формируемой модели аэропорта.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УЗЛОВЫХ АЭРОПОРТОВ

4.1. Верификация статистических моделей, полученных на основе данных ИС аэропорта

Приводимые в предыдущих главах материалы, содержащие описание потоков самолетов и пассажиров, прибывающих для обслуживания в узловой аэропорт, и процесса функционирования самого аэропорта, позволяют сформировать целый ряд математических моделей, описывающих с различной степенью детализации как весь технологический процесс аэропорта, так и отдельные его стадии. Главной целью использования этих моделей должна явиться оптимизация технологических параметров узловых аэропортов, выполняемая с учетом волнового характера их расписания.

Источником значительной части статистических материалов, характеризующих технологические операции обслуживания перевозок, послужили БД ИС аэропортов. При этом выборочный анализ информации, хранящейся в БД ИС аэропортов, свидетельствует о наличии некоторой доли некорректных данных, что объясняется целым рядом причин, среди которых ошибки и проявления халатности оператора, нарушения технологии работы с ИС, несогласованность действий сотрудников различных подразделений и служб аэропорта, сбои в программном и аппаратном обеспечении самой ИС и смежных систем и пр. Встает вопрос о доверии к данным ИС и правомерности их использования для моделирования работы аэропорта.

Совместное использование данных, накопленных в результате наблюдений, и данных ИС может позволить провести взаимную проверку их корректности. В идеальном случае, когда имеются две выборки достаточного объема, характеризующие один и тот же технологический процесс, одна из которых содержит статистику, полученную «вручную», а вторая – данные, накопленные ИС, может быть проведено прямое сравнение этих выборок, позволяющее выявить ошибочные данные. Однако такое сравнение на практике часто оказывается невозможным или малоэффективным вследствие отсутствия или недостаточного объема одной из выборок. С другой стороны, в БД содержится разнообразная статистика, описывающая прямо или опосредованно связанные факторы. Зная характер и параметры этих связей, а также располагая вероятностными распределениями взаимосвязанных величин можно провести проверку статистики на наличие ошибок. Надежность такой проверки существенно возрастает, если для ее выполнения привлечь статистику, собранную «вручную», т.е. в результате непосредственных наблюдений, хронометража и т.п. Учитывая сложный характер связей, выразить его аналитически для проведения проверки не представляется возможным, однако проверка может быть осуществлена с помощью имитационного моделирования.

Здесь для совместной верификации статистических данных используется метод имитационного моделирования. Предполагается, что имеется вероятностное распределение F_T случайной величины T , представляющей собой, например, временную продолжительность выбранной технологической операции. Эта величина, как правило, является суперпозицией целого ряда других случайных величин X_1, X_2, \dots, X_n . Зная их законы распределения и характер влияния на T , можно в результате моделирования установить ее теоретический закон распределения F_{T1} . Если параметры исходного и теоретического распределений окажутся достаточно близкими, то с большой долей вероятности можно считать, что корректен не только исходный закон распределения F_T , но законы случайных величин X_1, X_2, \dots, X_n .

Для проведения моделирования предварительно должны быть определены законы распределения случайных величин, яв-

ляющихся входными данными для имитационного эксперимента. Как правило, используются два вида таких законов – эмпирический и теоретический. В первом случае функция эмпирического распределения формируется из самих данных наблюдений, во втором – форма теоретического распределения подбирается с помощью стандартных методов статистического анализа. По целому ряду изложенных ранее причин второй способ считается более предпочтительным. Эмпирическое распределение используется, как правило, в случае, если не удастся сформировать закон теоретического распределения.

Ниже рассматривается процедура верификации одной из статистических моделей, полученной в результате анализа данных ИС аэропорта Курумоч. В качестве объекта моделирования рассматривается работа системы обслуживания пассажиров в ходе выполнения одной из важнейших предполетных технологических операций – регистрации пассажиров и оформления багажа к перевозке в операционном зале аэровокзала. Система обслуживания пассажиров на этапе регистрации может рассматриваться в качестве характерного примера СМО, в которой роль обслуживающих аппаратов играют стойки регистрации, а входящими требованиями являются пассажиры, прибывающие в операционный зал аэропорта для прохождения регистрации.

Исследование ограничено только внутрироссийскими рейсами, выполняемыми на самолетах типа Ту-154. Технологическая схема – порейсовая с выделением для обслуживания каждого рейса от 1 до 3 стоек регистрации. Рассматриваются регулярные перевозки двух видов – рейсовые и вахтовые. В дальнейшем, с целью избежания тавтологии, рейсы первого вида условно названы регулярными.

В соответствии с технологическими графиками регистрация на внутрироссийские рейсы должна начинаться, как правило, за 1.5 ч или, в ряде случаев, за 2.5 ч и заканчиваться за 40 мин до времени вылета.

Как отмечено выше, в силу ряда причин массив исходной информации ИС неизбежно содержит некоторую долю явно ошибочных данных. Для различных технологических операций эта доля колеблется в пределах 5-30%. К наиболее характерным

примерам ошибок относятся случаи, когда для достаточно трудоемких операций в базе данных ИС фиксируется нулевая или даже отрицательная продолжительность, либо происходит существенное «перекрытие» по времени последовательных технологических операций и т.п. Поэтому шагом, предваряющим собственно имитационное моделирование, является анализ накопленной статистики с целью отбраковки очевидных ошибок.

Принципиальная блок-схема моделирующего алгоритма приведена на рис. 4.1.1. Алгоритм реализует два вложенных цикла, внешний из которых соответствует множеству исследуемых рейсов, а внутренний (обозначен на рисунке двойной рамкой) – прибывающим для обслуживания требованиям.

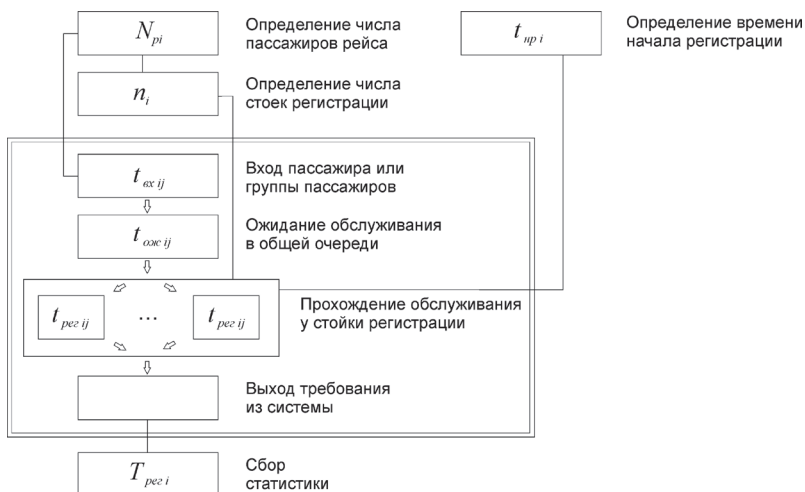


Рис. 4.1.1. Блок-схема моделирующего алгоритма

Для каждого (i -го) рейса определяется число пассажиров, являющееся случайной величиной – N_{pi} . С целью определения ее закона распределения были исследованы статистические данные, характеризующие 465 регулярных и 189 вахтовых вылетающих рейсов, обслуженных в аэропорту с сентября 2008 по июль

2009 г. В первом случае выявить простой теоретический закон не удалось, поэтому в модели используется эмпирическое распределение, вид которого приведен на рис. 4.1.2а, с величиной математического ожидания 74.5 пасс. Во втором случае (рис. 4.1.2б) проверка с применением критерия Пирсона позволила сделать вывод о близости распределения к гамма-закону с параметрами $\alpha = 1.3$; $\beta = 15.4$; $s = 0$. Учитывая, что гамма-закон может быть применен к распределениям, имеющим только положительную асимметрию, в качестве случайной здесь используется величина $(N - N_{pi})$, где N – наибольшее из зафиксированных число пассажиров одного рейса. Для регулярных рейсов $N = 170$ пасс, для вахтовых – $N = 167$ пасс. Соответственно на рис. 4.1.2 по оси абсцисс отложена величина $(N - N_p)$.

Учитываются особенности группового характера потоков прибывающих на регистрацию пассажиров. Как уже отмечалось, каждую группу следует рассматривать в ходе моделирования в качестве одного требования. Групповой коэффициент потока пассажиров регулярных рейсов, принятый для моделирования, составляет $k_{гп} = 0.78$.

В потоке вахтовых пассажиров число групп незначительно, так как каждый пассажир следует со своим багажом и самостоятельно проходит регистрацию. По этой причине для вахтовых рейсов число требований, входящих в систему обслуживания, равно числу пассажиров рейса.

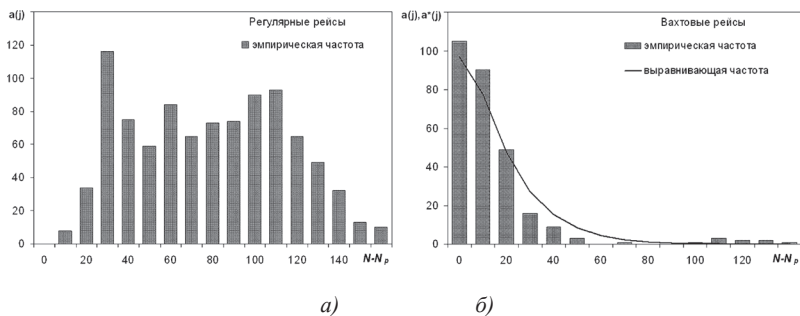


Рис. 4.1.2. Распределение числа занятых мест по рейсам,
а) регулярные рейсы; б) вахтовые рейсы

Следующим шагом алгоритма является розыгрыш числа стоек регистрации, выделяемых для обслуживания пассажиров рассматриваемого рейса – n_i . Это число является дискретной случайной величиной, не превышающей 3. Как показал анализ статистики, ее вероятности зависят от числа пассажиров рейса, т.е. $P_k = f_k(N_p)$, где $k = 1, 2, 3$. Графики зависимостей вероятностей того или иного числа стоек от числа пассажиров, полученные в результате обработки статистики, приведены на рис. 4.1.3.

Для удобства моделирования эмпирические зависимости аппроксимированы алгебраическими функциями.

Для регулярных рейсов:

$$P_1 = -2.82 \cdot 10^{-7} N_p^3 + 1.26 \cdot 10^{-4} N_p^2 - 1.93 \cdot 10^{-2} N_p + 1.05$$

$$P_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } N_p \leq 75; \\ -2.52 \cdot 10^{-8} N_p^3 + 1.62 \cdot 10^{-5} N_p^2 - 2.15 \cdot 10^{-3} N_p + 8.05 \cdot 10^{-2}, & \text{если } N_p > 75; \end{cases}$$

$$P_2 = 1 - (P_1 + P_3)$$

Для вахтовых рейсов:

$$P_1 = \begin{cases} -5.55 \cdot 10^{-5} N_p^2 + 1.67 \cdot 10^{-2} N_p + 6.25 \cdot 10^{-2}, & \text{если } N_p \leq 75; \\ 0, & \text{если } N_p > 75; \end{cases}$$

$$P_3 = \begin{cases} 0, & \text{если } N_p \leq 105; \\ 3.00 \cdot 10^{-4} N_p + 3.50 \cdot 10^{-2}, & \text{если } N_p > 105; \end{cases}$$

$$P_2 = 1 - (P_1 + P_3)$$

Наряду с числом вылетающих пассажиров и используемых стоек на продолжительность регистрации влияет момент времени ее начала, который на практике обычно не совпадает с требованиями технологического графика. Здесь, как и ранее в п.2.5 при формировании математической модели обслуживания вылетающих пассажиров, наряду с натуральным временем t удобно использовать параметр τ – время, измеряемое до вылета.

Задача выбора начала отсчета по оси натурального времени представляет особый интерес. Момент $t = t_0 = 0$, очевидно, и должен явиться моментом начала моделирования для i -го рейса. Од-

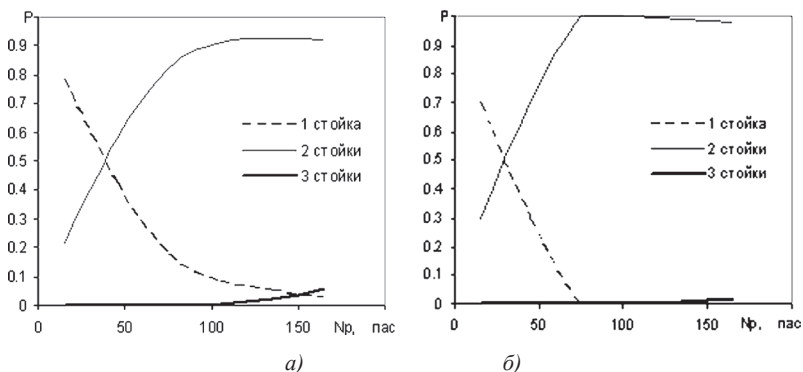


Рис. 4.1.3. Эмпирическая зависимость числа занятых стоек регистрации от количества пассажиров рейса, а) регулярные рейсы; б) вахтовые рейсы

нако само начало регистрации на i -й рейс не может соответствовать моменту начала моделирования, т.к. поступление пассажиров в операционный зал и формирование из них очереди начинается значительно раньше, чем регистрация. Для учета этих процессов в качестве начального момента моделирования выбирается начало 480-й минуты до вылета рейса. Этот момент соответствует началу интервала, в течение которого существует заметная вероятность прибытия вылетающих пассажиров в аэропорт для прохождения формальностей. Данный факт был установлен в результате обследования потока вылетающих пассажиров из аэропорта Курумоч в 2005-2009 гг., о чем говорилось в п.2.5.

Предполагается, что в случае незначительной задержки вылета рейса пассажир, ориентируясь на расписание, может уточнить планируемое время вылета и скорректировать свое время прибытия в аэропорт. Принятие этого допущения позволяет считать, что задержки вылета не влияют на величину интервала, в течение которого пассажиры прибывают в аэропорт. Таким образом, считается, что по прошествии 480 мин модельного времени самолет, выполняющий рейс, неизбежно вылетит. Длительные задержки вылета и отмены рейсов в модели не учитываются. Соответствующие им статистические данные из рассмотрения исключены.

Итак, для определения вероятностного распределения времени начала регистрации внутрисоссийских рейсов, выполняемых

самолетами Ту-154, был проведен статистический анализ данных ИС аэропорта Курумоч, результаты которого приведены на рис. 4.1.4. По горизонтальной оси здесь отложена величина интервала времени от начала регистрации до вылета i -го рейса – $\tau_{np\ i}$. Переход к натуральному времени начала регистрации, введя обозначение $t_{max} = 480$ мин, можно выполнить по формуле $t_{np\ i} = t_{max} - \tau_{np\ i}$. Учитывая большой острый «выступ» столбцов гистограммы регулярных рейсов (рис. 4.1.4а), для этого случая был применен логнормальный закон распределения с параметрами $\alpha=3.2$; $\beta=0.4$; $s=70.0$. С учетом отрицательной асимметрии распределения вахтовых рейсов (рис. 4.1.4б) здесь использован закон Вейбулла с $\alpha=9.0$; $\beta=74.2$; $s=50.0$.

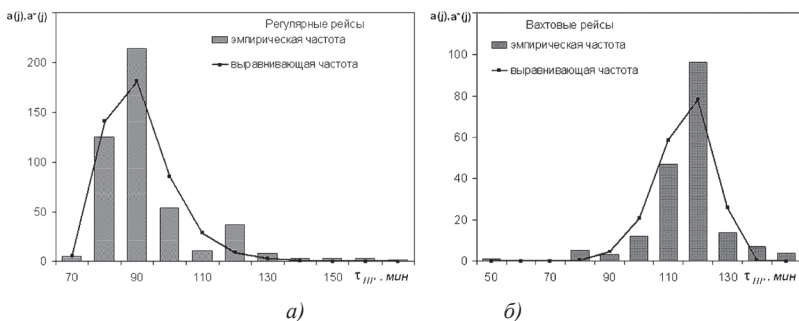


Рис. 4.1.4. Распределение интервалов времени от начала регистрации до вылета: а) регулярные рейсы; б) вахтовые рейсы

Для имитации входа пассажиров в операционный зал должны быть известны моменты времени их прибытия в аэровокзал. Интервал времени от момента входа пассажира в аэровокзал до вылета τ_{ex} представляет собой длительность нахождения пассажира в аэропорту. Переход к натуральному времени прибытия в аэровокзал j -го пассажира, вылетающего i -м рейсом, выполняется по формуле $t_{ex\ ij} = t_d - \tau_{ex\ ij}$. Как отмечено в п. 2.5, результаты исследований, проведенных в аэропорту Курумоч в 2009 г., свидетельствуют о том, что время пребывания пассажиров (или их групп) в аэровокзале является случайной величиной, распределенной по гамма-закону с параметрами $\alpha=6.061$; $\beta=12.567$; $s=19.969$.

Длительность обслуживания одного требования одной стойкой регистрации $t_{рег\ ij}$ также считается подчиненным логнормальному закону распределения с параметрами $\alpha=0.76$; $\beta=-0.36$; $s=0.12$, что соответствует наблюдениям 2008 г. (табл. 3.3.1)

Таким образом, при проведении моделирования операции регистрации учитывались вероятностные распределения следующих факторов, оказывающих наиболее заметное влияние на ее продолжительность:

- 1) число вылетающих пассажиров рейсов;
- 2) число стоек регистрации, выделенных для обслуживания пассажиров одного рейса;
- 3) интервал времени от начала регистрации до вылета;
- 4) распределение пассажиров по группам;
- 5) интервал времени от прибытия пассажира в аэровокзал для прохождения предполетных формальностей до вылета;
- 6) длительность проведения регистрации пассажира (или их группы).

Источником статистической информации для первых трех факторов явилась база данных ИС, для оставшихся трех факторов – непосредственные наблюдения и опросы пассажиров в операционном зале аэровокзала.

В качестве инструментальных средств реализации представленного выше алгоритма была выбрана система имитационного моделирования GPSS World. В ходе моделирования фиксировались величины продолжительности регистрации каждого рейса $T_{рег\ i}$, под которой понимался интервал времени от начала работы стоек регистрации до окончания обслуживания всех пассажиров рассматриваемого рейса. Возможность наличия опоздавших пассажиров не учитывалась. Результатами явились вероятностные распределения продолжительности регистрации пассажиров регулярных (рис. 4.1.5а) и вахтовых (рис. 4.1.5б) рейсов.

Сравнение результатов моделирования с данными ИС, приводимыми на тех же рисунках, позволяют судить об их близости. Об этом говорит как анализ полигонов распределений, так и сравнение их параметров. Различия математических ожиданий результатов моделирования и данных ИС в случае регулярных рейсов не превышает 2%, для вахтовых рейсов – 3%.

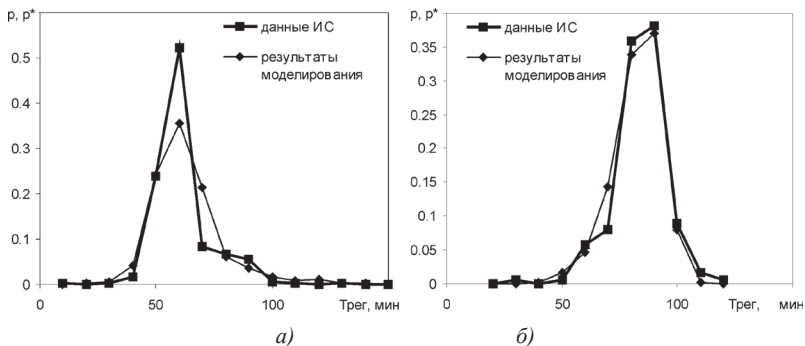


Рис. 4.1.5. Распределение продолжительности регистрации:
 а) регулярные рейсы; б) вахтовые рейсы

Близость эмпирических и модельных распределений позволяет сделать вывод о том, что совокупность статистических данных, зафиксированных в ИС, в целом отражает взаимовлияние комплекса факторов, участвующих в формировании технологических процессов аэропорта. Это говорит о возможности и правомерности использования данных ИС аэропорта для решения задач моделирования и оптимизации его параметров с условием предварительной фильтрации ошибочных наблюдений.

4.2. Оптимизация параметров технологических операций методом имитационного моделирования

Преобразование аэропорта в хаб ставит 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. Способом решения этой задачи, 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 из двух широко известных методов регистрации – свободного и порейсового – наибольшее распространение получил последний. 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.

Ниже рассматривается задача оптимизации параметров системы обслуживания вылетающих пассажиров на этапе регистрации для аэропорта Курумоч.

Описание входящего потока требований и обслуживающей системы. Обслуживание пассажиров на этапе регистрации представляет собой пример СМО. Анализ таких систем существенно упрощается в случае, если входящий в систему поток требований является пуассоновским (простейшим),

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 предполетных формальностей. Для описания входящего потока здесь используется введенный ранее параметр τ , представляющий собой интервал времени до момента вылета рассматриваемого рейса. В п. 2.5 было показано, что τ является случайной величиной, распределенной по гамма-закону с параметрами $\alpha=6.061$; $\beta=12.567$; $s=19.969$ (для удобства обозначим как «Закон распределения A »). Предполагается, что данному распределению подчиняется время прибытия пассажиров всех внутрироссийских рейсов, вылетающих из аэропорта Курумоч в 2009 г. Очевидно, 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. Однако, как правило, непосредственное обслуживание у стойки регистрации проходит только один из членов группы, что позволяет рассматривать группу пассажиров в качестве одного требования. Факт прибытия пассажиров группами учитывает коэффициент $k_{гр}$, представляющий собой долю пассажиров, проходящих непосредственное обслуживание у стоек регистрации. По данным наблюдений для аэропорта Курумоч $k_{гр} = 75-78\%$. 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 последей-

ствием, т.к. для любого момента времени возможная численность прибывших для регистрации пассажиров зависит от числа пассажиров, уже прошедших ее.

Как следует из приведенных рассуждений, поток пассажиров одного рейса, прибывающих для регистрации в аэровокзал, не является пуассоновским (простейшим).

Для полного определения СМО, 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 СМО, каждая стойка получает собственный порядковый номер. Предполагается, что стойки обслуживают пассажиров с одинаковой интенсивностью.

Допустимо наличие очереди, причем 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 наименьшим 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 пассажиров, т.е. прибывших на регистрацию после ее окончания. Для них предусмотрена платная регистрация. Ниже под опоздавшими понимаются, во-первых, пассажиры, прибывшие в аэровокзал после окончания регистрации, во-вторых, пассажиры, ожидающие в очереди, обслуживание которых не началось до наступления времени окончания регистрации. Если момент окончания регистрации наступает в течение обслуживания очередного пассажира, регистрация продолжается до окончания обслуживания этого требования (требование «дообслуживается»).

Данные пп. 3.4 и 4.1 позволяют считать длительность обслуживания каждого требования $t_{обсл}$ одной стойкой регистрации случайной величиной, подчиненной логарифмически нормальному закону распределения с параметрами $\alpha=0.76$; $\beta=-0.36$; $s=0.12$ (закон распределения В).

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 1200) рейсов различных авиакомпаний из аэропорта Курумоч в течение летних периодов 2008 и 2009 гг. позволил считать распределение $k_{зм}$ близким к гамма-закону (закон распределения В) с параметрами $\alpha=6.5$; $\beta=18.2$; $s=0.0$ (использованная процедура доказательства статистической гипотезы по критерию Пирсона аналогична, рассмотренным выше, и здесь не приводится).

Моменты начала и окончания регистрации пассажиров рейса и, следовательно, ее продолжительность зависят от категории рейса (транзитный или начальный) и пассажироместимости самолета, выполняющего рейс. Учитывая, что регистрация пассажиров транзитного рейса требует меньшего времени, чем начального, ниже рассматривается процесс регистрации пассажиров начальных рейсов.

Для повышения пропускной способности системы обслуживания пассажиров в аэровокзале, желательно, чтобы время, затраченное системой на регистрацию пассажиров вылетающего рейса, а также число стоек (и, соответственно, численность пер-

сонала), выделяемое для выполнения регистрации, были минимальными. При этом должны соблюдаться определенные требования к качеству обслуживания пассажиров.

Необходимо, в частности, чтобы время ожидания обслуживания пассажиром было не слишком велико. Использование пореисового метода не позволяет существенно снизить среднее время пребывания пассажира в аэропорту – от момента его прибытия в аэровокзал до подхода к стойке регистрации. Однако время ожидания пассажира непосредственно в очереди перед стойкой после объявления регистрации должно быть не слишком длительным. Кроме того, число опоздавших на регистрацию пассажиров, вероятность появления которых всегда существует, должно быть малым.

Постановка задачи оптимизации. 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 пассажироместимостью N , обеспечивающие минимум суммарным затратам рабочего времени:

$$S(t_K - t_H) \longrightarrow \min$$

Принимаются следующие ограничения:

1) регистрация должна заканчиваться не позднее чем за 30 мин до вылета самолета по расписанию – $\tau_K \leq 30$ мин, что связано с необходимостью выполнения технологического графика подготовки самолета к вылету;

2) допустимое число опоздавших пассажиров – не более 1% от пассажироместимости самолета;

3) расчетное время ожидания в очереди у стойки после объявления регистрации – 15 мин, что позволяет обеспечить достаточный уровень качества 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 расчетного времени. Однако система обслуживания должна обеспечивать заданный низкий уровень вероятности возникновения таких ситуаций. В связи с этим

вводится допустимая вероятность того, что расчетное 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 последствием;

2) в течение некоторых интервалов времени пропускная способность системы может быть недостаточной, что приведет 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.

Итак, единственным методом решения поставленной задачи является статистическое моделирование (метод Монте-Карло), схема применения которого состоит в следующем [109]. Характеристику системы обслуживания, которую необходимо 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 приближенно определяется величина искомой характеристики, причем точность оценки тем выше, чем больше число проведенных 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_{ex} или τ_{ex});
- 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 распределенное 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 определенному (неравномерному) закону распределения: $x = F(y)$. Знание функциональной зависимости $F(y)$ позволяет найти величину y , в качестве которой может выступать $k_{зм}$, t_{ex} (либо τ_{ex}), $t_{обсл}$.

Оценке подлежат следующие значения, необходимые для решения оптимизационной задачи:

- среднее число опоздавших пассажиров по окончании регистрации $n_{он}$;
- максимальная доля пассажиров, время ожидания в очереди у стойки которых превышает расчетное время ожидания (15 мин) $P_{ожс}^{max}$.

Имитационная модель процесса обслуживания. Моделирующий алгоритм в общих чертах выглядит следующим образом. С целью сокращения затрат машинного времени считается, что реальная вероятность поступления требований существует только в течение 350 мин перед вылетом, что согласуется с результатами наблюдений в аэропорту. Работа системы обслуживания моделируется на интервале времени $[0, t_B]$ продолжительностью 350 мин, правая граница которого 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 В разыгрывается величина коэффициента занятости мест $k_{зм i}$ и определяется соответствующее ей число пассажиров:

$$n_{nac i} = k_{3M} N, \quad i = 1 \div M$$

где i – номер реализации случайного процесса (испытания);
 N – пассажироместимость самолета, выполняющего рассматриваемый рейс;

$n_{nac i}$ – число пассажиров (входящих требований) в i -м испытании.

Для найденного $n_{nac i}$ многократно разыгрываются величины: t_{exij} – времени входа j -го требования в i -м испытании и $t_{обслij}$ – длительности обслуживания j -го требования при i -м испытании ($j = 1 \div n_{nac i}$). Используются законы распределения А и Б, 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_{exij} понимаются элементы упорядоченного по возрастанию массива).

Для первого требования ($j = 1$) реализуется следующий алгоритм. Если требование входит до объявления начала регистрации ($t_{exi1} < t_H$), его обслуживание начинается с началом регистрации после некоторого ожидания ($t_{HOi1} < t_H$). В случае, если первое требование поступает уже после начала регистрации ($t_H \leq t_{exi1} < t_K$), его обслуживание начинается немедленно ($t_{HOi1} = t_{exi1}$).

Для всех последующих требований ($1 < j < n_{nac i}$) алгоритм несколько иной. Если к моменту поступления очередного (j -го) требования обслуживание всех предыдущих требований уже завершилось ($t_{exij} \geq t_{OOij-1}$), то это требование начинает обслуживаться в момент поступления ($t_{HOij} = t_{exij}$). 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 встает в очередь ($t_{HOij} \neq t_{exij}$), то число требований, находящихся в очереди ($n_{ожij}$), 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 $t_{ожij}^* = t_{HOij} - t_{axij}$;

2) длительностью ожидания в очереди непосредственно перед стойкой регистрации:

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

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

По завершении всех M испытаний определяются средние значения следующих величин:

1) среднее число опоздавших пассажиров:

$$n_{on} = \frac{\sum_{i=1}^M n_{oni}}{M}$$

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:

$$t_{ожс}(t) = \frac{\sum_{i=1}^M t_{ожсi}(t)}{M}$$

где $t_{ожсi}(t)$ – 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 $t_{ожсi}(t)$, наблюдая за единственным требованием невозможно. Поэтому для ее определения используется усреднение на некотором интервале времени Δt :

$$t_{ожсi}(t) = \frac{\sum_{j=1}^{n^*} t_{ожсij}}{n^*}$$

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

$$t - \frac{\Delta t}{2} < t_{вхij} \leq t + \frac{\Delta t}{2} \quad (4.2.1)$$

$t_{ожсij}$ – длительность ожидания у стойки каждого из требований, для которых выполняется условие (4.2.1);

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

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

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 $t_1 \leq t_{ожсij} \leq t_2$:

$$P_{t_1 \cdot t_2}(t) = \frac{\sum_{i=1}^M n_{t_1 \cdot t_2 i}^*(t)}{\sum_{i=1}^M n_i^*(t)}$$

где $n_{t_1-t_2i}^*(t)$ – число пассажиров в i -м испытании, для которых продолжительность ожидания в очереди у стойки составляет величину $t_1 \leq t_{ожij} \leq t_2$;

$n_i^*(t)$ – общее число пассажиров в i -м испытании.

В числе $n_{t_1-t_2i}^*(t)$ и $n_i^*(t)$ оказываются только те пассажиры, для которых выполняется условие (4.2.1);

2) доля пассажиров, время ожидания для которых превышает расчетное 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 выполняются условие $t_{ожij} > 15 \text{ мин}$, а также условие (4.2.1).

Используемая в решении оптимизационной задачи максимальная доля пассажиров, время ожидания в очереди у стойки которых превышает расчетное время ожидания, $P_{ож}^{max}$ находится:

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

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

$$P_{оп}(t) = \frac{\sum_{i=1}^M n_{опi}^*(t)}{\sum_{i=1}^M n_i^*(t)}$$

где $n_{опi}^*(t)$ – число опоздавших пассажиров i -го испытания, для которых выполняется условие (4.2.1).

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 $T_{paб_s}$, длительность которого в общем случае превышает объявленную продолжительность регистрации:

$$T_{paб_s} \geq (t_K - t_H), \quad s = 1 \div S$$

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 обслуживания не прерывается, а доводится до конца. Следующие за ним требования к обслуживанию не принимаются и считаются опоздавшими. Таким образом, продолжительность регистрации каждой стойкой $T_{paб_s}$ представляет собой случайную величину.

С другой стороны, стойка занята обслуживанием пассажиров не непрерывно в течение $T_{paб_s}$. 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 $T_{paб_s}$ соотношением $T_{обсл_s} \leq T_{paб_s}$.

В результате M испытаний определяются наборы величин $T_{обсл_s i}$, $T_{paб_s i}$ для $s = 1 \div S$; $i = 1 \div M$, знание которых позволяет определить средние значения характеристик занятости стоек:

1) средняя продолжительность регистрации стойкой:

$$T_{paб_S}^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^M T_{paб_S i}}{M}$$

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

$$T_{обсл_S}^{cp} = \frac{\sum_{i=1}^M T_{обсл_S i}}{M}$$

3) средний коэффициент занятости s -ой стойки:

$$k_{3s} = \frac{T_{обслs}^{cp}}{T_{рабs}^{cp}}$$

4) средний коэффициент занятости системы:

$$k_3 = \frac{\sum_{s=1}^S T_{обслs}^{cp}}{\sum_{s=1}^S T_{рабs}^{cp}}$$

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

- пассажировместимость самолета $N=76$ пасс.;
- используемое количество стоек $S=1$;
- время от начала регистрации до вылета $\tau_H = 110$ мин;
- время от окончания регистрации до вылета $\tau_K = 50$ мин.

Проводились эксперименты с числом испытаний от 50 до 150 000. 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 мин $P_{ож}^{max}$;
- среднее время занятости стойки непосредственным обслуживанием

$$T_{обсл1}^{сред} = \frac{\sum_{i=1}^M T_{обсл1i}}{M}$$

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: $X_{M \max} = 150\,000$.

Результаты моделирования процесса регистрации пассажиров с различным числом испытаний приведены в табл. 4.2.1.

На основании анализа результатов можно сделать вывод о том, что проведение всего 5 000 испытаний позволяет обеспечить погрешность определения всех перечисленных выше средних значений, не превышающую 3%.

Табл. 4.2.1.

**Результаты моделирования процесса
регистрации пассажиров**

M	$n_{ож}^{max}$, пасс.	$n_{оп}$, пасс.	$P_{ож}^{max}$	$T_{обсл}$, мин	$\Delta n_{ож}^{max}$, %	$\Delta n_{оп}$, %	$\Delta P_{ож}^{max}$, %	$\Delta T_{обсл}$, %
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	-	-	-	-

Наряду со средними значениями производилась оценка погрешности определения вероятностных характеристик распределения такой случайной величины, как время занятости стойки непосредственным обслуживанием пассажиров $T_{обсл}$. Результаты некоторых экспериментов в виде полигонов относительных частот для $T_{обсл}$, построенных на интервалах, равных 1 мин, при-

ведены на рис. 4.2.1 (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.

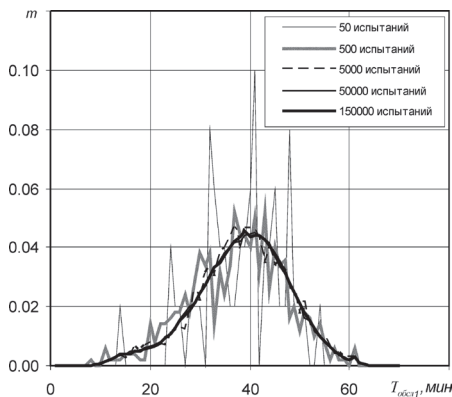


Рис. 4.2.1. Полигон относительных частот для $T_{\text{обс}1.1}$

Таким образом, проведенный анализ позволил установить необходимое число испытаний для каждого эксперимента в количестве 50 000. Эта величина позволяет обеспечить ошибку по каждому из оцениваемых параметров в достаточных для решения оптимизационной задачи пределах.

Результаты решения оптимизационной задачи. Оптимизационная задача решалась для двух величин пассажироместности N – 76 и 180 пассажиров, отвечающих возможным вариантам компоновки салонов самолетов Ту-134 и Ту-154, соответственно. Для первого варианта пассажироместности рассматривались возможности использования одной и двух стоек регистрации; для второго варианта – от 1 до 4 стоек. Оказалось, что использование 1 стойки для регистрации пассажиров большего самолета не позволяет обеспечить выполнение ограничений по числу опоздавших пассажиров, ни при каком сочетании времени начала и времени окончания регистрации. Основные результаты оптимизации приведены в табл. 4.2.2.

Табл. 4.2.2.

**Результаты оптимизации параметров
системы обслуживания пассажиров**

Число стоек, S	τ_H , мин	τ_K , мин	$\tau_H - \tau_K$, мин	T_{Σ} , мин	$n_{ожж}$, пасс.	Номер стойки, s	$T_{обсл\ s}^{cp}$, мин	$T_{рабо\ s}^{cp}$, мин	k_{3S}	k_3^{cp}
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	

Как следует из результатов, для обеих пассажироместимостей 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 приводит к большей неравномерности в их загрузке, причем 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 самолета использование одной стойки позволяет вдвое сократить длину очереди при незначительном увеличении суммарных затрат времени на регистрацию.

Процесс накопления и обслуживания пассажиров проиллюстрирован рис. 4.2.2. Здесь приведены графики числа обслуживаемых и ожидающих обслуживания пассажиров самолета 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. 4.2.3 и 4.2.4. 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.

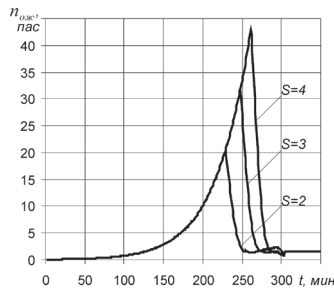


Рис. 4.2.2. Число ожидающих пассажиров

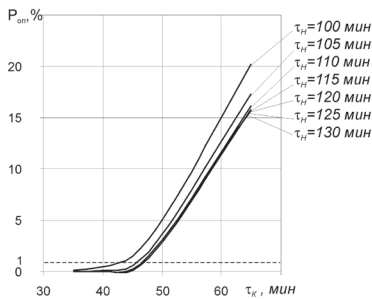


Рис. 4.2.3. Доля опоздавших пассажиров

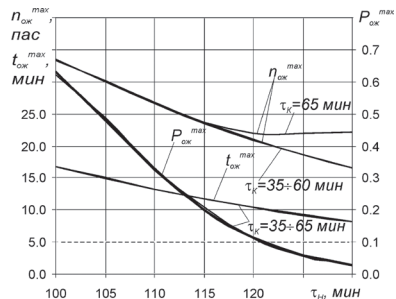


Рис. 4.2.4. Характеристики очереди

На рис. 4.2.5 приведены графики полигонов относительных частот (m_r) времени обслуживания $T_{обсл_s}$ для каждой из стоек в случае использования двух, трех и четырех стоек. Значительный разброс значений, возрастающий с уменьшением числа стоек, объясняется, в первую очередь, большим разбросом коэффициентов занятости кресел.

Графики, характеризующие разброс значений времени работы $T_{раб_s}$ для $S = 2$ и 4 , приведены на рис. 4.2.6. 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, оснащенной процессором Pentium IV с тактовой частотой 2-2.5 ГГц. Затраты машинного времени на один эксперимент, предполагающий проведение 50 000 испытаний, составили около 10 мин.

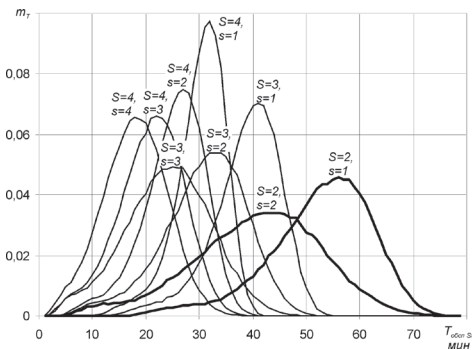


Рис. 4.2.5. Распределение времени обслуживания

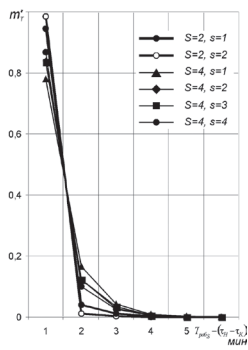


Рис. 4.2.6. Распределение времени работы

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

4.3. Оптимизация численности средств обслуживания перевозок узлового аэропорта методами теории массового обслуживания

Модели и методы теории массового обслуживания широко применяются для анализа производственных процессов в гражданской авиации. Среди традиционных вопросов, решаемых методами этой теории, можно назвать исследование эффективности работы аэродрома, планирование обслуживания пассажиров в аэровокзале, расчет вместимости помещений аэровокзала, планирование перронного обслуживания самолетов и целый ряд др. [93]

При решении перечисленных задач методами теории массового обслуживания необходимо учитывать наличие (или отсутствие) специализации обслуживающих аппаратов. Если в СМО любое из требований может быть обслужено любым аппаратом, то такая СМО называется полnodоступной. В случае специализации аппаратов СМО – непnodоступная.

В перечисленных выше задачах поток самолетов считается стационарным пуассоновским, что позволяет использовать для решения этих задач простые аналитические модели теории массового обслуживания, полученные на основе системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова. Условие стационарности, как было показано в п. 2.3, не выполняется в случае узлового аэропорта, поэтому в данном случае для анализа и оптимизации его работы могут быть применены непосредственно уравнения Колмогорова. Возможности современной вычислительной техники позволяют легко решать задачи численного интегрирования систем этих уравнений, имеющих значительную размерность.

Отметим, что учет нестационарности имеет смысл не только для узлового аэропорта, в котором изменения интенсивности потоков самолетов и пассажиров являются неотъемлемым атрибутом его расписания. Регулярные колебания интенсивности присущи многим неузловым аэропортам, в которых они не связаны с необходимостью обеспечения пересадок трансферных пассажиров, а вызваны другими причинами, например, организацией расписания с удобным для пассажиров движением рейсов, что может проявляться в наличии ежедневных утренних и вечерних максимумов интенсивности, характерных для многих аэропортов.

Наибольшую ценность в рассматриваемых задачах представляет определение оптимального числа средств обслуживания ВС и(или) пассажиров. Под оптимальным здесь понимается минимальное количество средств, обеспечивающее заданный уровень качества обслуживания. Большинство производственных комплексов аэропорта можно рассматривать как СМО с ожиданием, поэтому логично использовать в роли показателя качества длительность ожидания обслуживания требованием. Эта длительность должна обеспечиваться системой с определенной надежностью, которая задается посредством вероятности превышения заданного времени ожидания.

Модели теории массового обслуживания позволяют определить помимо оптимального числа обслуживающих аппаратов такие важные для описания работы системы характеристики, как среднюю длину очереди, уровень занятости или простоя аппаратов и др.

Традиционно по понятным причинам расчет оптимальной численности обслуживающих средств проводится для наиболее загруженного периода работы аэропорта. Ежедневная работа узлового аэропорта характеризуются несколькими такими периодами сравнительно малой продолжительности, которые соответствуют волнам рейсов. Учитывая, что волны вылетов сдвинуты по времени относительно волн прилетов, аэропорт получает возможность в определенных случаях маневрировать своими ресурсами, используя одни и те же силы и средства для обслуживания как вылетающих, так и прилетевших самолетов. Повышению эф-

фективности такого перераспределения ресурсов может способствовать прогнозирование оптимального числа обслуживающих приборов для любого, а не только «пикового», момента времени. Поэтому зачастую желательным является определение зависимости оптимального числа мест обслуживания от времени для некоторого достаточно продолжительного его интервала, например, суток, недели и т.п. Источником данных для подобных расчетов может явиться расписание движения самолетов или суточный план полетов.

При анализе большинства технологических операций аэропортовые комплексы могут рассматриваться в качестве полностью доступной СМО с ожиданием, состоящей из конечного числа n однотипных обслуживающих аппаратов. В систему поступает нестационарный пуассоновский поток требований с мгновенной интенсивностью $\lambda(t)$. Время обслуживания каждого требования каждым прибором может с достаточной точностью считаться подчиненным показательному закону с параметром ν .

Требование, поступившее в систему в момент, когда все обслуживающие аппараты заняты, не покидает систему, а «становится» в очередь и ждет, пока его не обслужит один из освободившихся аппаратов.

Длина очереди из требований ограничена величиной m , исходя из условия, что $n+m$ – предельная численность всех требований, которые могут поступить на обслуживание в данный период.

Вероятности состояний описываемой системы $P_i(t)$, где $i = 0, 1, \dots, n+m$ как для стационарного, так и нестационарного пуассоновского потока [109] описываются уравнениями Колмогорова:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_0(t) &= -\lambda(t)P_0(t) + \nu P_1(t); \\ \frac{d}{dt} P_i(t) &= \lambda(t)P_{i-1}(t) - (\lambda(t) + i\nu)P_i(t) + (i+1)\nu P_{i+1}(t), \quad 1 \leq i \leq n-1; \\ \frac{d}{dt} P_i(t) &= \lambda(t)P_{i-1}(t) - (\lambda(t) + m\nu)P_i(t) + m\nu P_{i+1}(t), \quad n \leq i \leq n+m-1; \\ \frac{d}{dt} P_{n+m}(t) &= \lambda(t)P_{n+m-1}(t) - m\nu P_{n+m}(t). \end{aligned} \quad (4.3.1)$$

Начальные условия для интегрирования этой системы линейных дифференциальных уравнений при $t = 0$ записываются в виде:

$$P_0(0) = 1; P_i(0) = 0; i = 1, 2, \dots, n+m \quad (4.3.2)$$

Несмотря на то, что система (4.3.1) с начальными условиями (4.3.2) является линейной, найти ее точное аналитическое решение в явном виде при большом $n+m$ практически невозможно. Исследование поведения этой системы может быть проведено с использованием ЭВМ путем численного решения уравнений (4.3.1) с учетом (4.3.2).

Входящее в систему потребное количество мест обслуживания n может быть определено из следующих соображений.

Очевидно, чтобы избежать неограниченного возрастания очереди, необходимо выполнение условия:

$$\frac{\lambda}{\nu} < n \quad (4.3.3)$$

Однако, выполнения неравенства (4.3.3) недостаточно для обеспечения определенного уровня качества обслуживания требования. Дело в том, что время ожидания обслуживания в очереди является случайной величиной и выполнение условия (4.3.3) не дает гарантии, что эта величина будет приемлемой.

Потребное значение численности обслуживающих аппаратов должно определяться исходя из требования, чтобы фактическое время ожидания в очереди для большинства запросов не превышало некоторого заданного расчетного времени.

В теории массового обслуживания доказывается: когда входящий поток является пуассоновским (не обязательно стационарным), длина очереди не ограничена, а распределение времени обслуживания подчиняется показательному закону, то вероятность того, что фактическое время ожидания в очереди может превысить заранее заданное расчетное время, определяется формулой [109]:

$$P_{t_{\phi} > t_p} = \sum_{i=n}^{\infty} \left[P_i \sum_{k=0}^{i-n} e^{-n\mu_p} \frac{(n\nu)^k}{k!} \right] \quad (4.3.4)$$

где t_p – расчетное максимальное время ожидания обслуживания требованием в очереди;

t_ϕ – фактическое время ожидания в очереди;

$P_{t_\phi > t_p}$ – вероятность того, что фактическое время ожидания в очереди сможет превысить расчетное время ожидания.

Для системы с ограниченной длиной очереди верхняя («бесконечная») граница суммирования в выражении (4.3.4) должна быть заменена на $n+m$, что при больших m слабо отражается на точности этого выражения.

Итак, считая время ожидания требования в очереди ограниченной величиной t_p , необходимо определить такое число обслуживающих средств n , чтобы вероятность $P_{t_\phi > t_p}$ не превышала некоторой заданной величины P_p :

$$P_{t_\phi > t_p} \leq P_p \quad (4.3.5)$$

Судя по материалам п. 3.2, значения параметров t_p и P_p , определяющих уровень качества аэропортовых услуг, задаются в пределах $t_p = 2 \div 20$ мин и $P_p = 0.05 \div 0.45$, в зависимости от технологической операции.

Уже формула (4.3.4) дает возможность осуществить расчет потребного значения n . При этом величины вероятностей P_p , входящие в (4.3.4), должны определяться непосредственно в ходе численного интегрирования системы (4.3.1), (4.3.2), что значительно усложняет эту процедуру. Упрощение расчетов может быть достигнуто ценой допущения о малой скорости изменения интенсивности потока пассажиров. Это позволяет использовать аналитические формулы для расчета вероятностей в предельном установившемся режиме СМО [109]:

$$P_i = \begin{cases} \frac{\rho^i}{i!} P_0, & 1 \leq i \leq n, \\ \frac{\rho^i}{n! n^{i-n}} P_0, & i \geq n, \end{cases} \quad (4.3.6)$$

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{i=n}^{n+m} \left(\frac{\rho}{n} \right)^{i-n} \right]}$$

Здесь, для сокращения записи введено обозначение $\rho = \lambda v$.

Если рассматривать только установившийся режим, то формула (4.3.4) также может быть упрощена и, как показано в [109], приведена к виду:

$$P_{l_q > l_p} = W e^{-(nv-\lambda)l_p} \quad (4.3.7)$$

где W – суммарная вероятность того, что все аппараты заняты обслуживанием независимо от наличия у каждого из них очереди. В соответствии с теоремой сложения вероятностей:

$$W = \sum_{i=n}^{n+m} P_i \quad (4.3.8)$$

Для системы с ожиданием в очереди неограниченной длины формула (4.3.8) принимает вид:

$$W = \sum_{i=n}^{\infty} P_i = \frac{P_0 \rho^n}{(n-1)!(n-\rho)} \quad (4.3.9)$$

Как и в случае с формулой (4.3.4), выражение (4.3.9) может использоваться для системы с ограниченной длиной очереди.

Таким образом, расчет потребного числа аппаратов обслуживания проводится в соответствии со следующим итерационным алгоритмом, который вследствие введенных допущений носит приближенный характер. Для выбранного в качестве начального приближения $n^0 = E[\rho]$ по формулам (4.3.6), (4.3.9) и (4.3.7) находится величина $P_{l_q > l_p}$. Выполняется проверка условия (4.3.5). Если оно выполняется, то принятая величина n и является искомым потребным количеством средств обслуживания. В случае невыполнения условия (4.3.5) величина n увеличивается на единицу и расчет повторяется до тех пор, пока (4.3.5) не будет выполнено. Следует учитывать, что потребное количество обслуживающих аппаратов не может превышать числа аппаратов, имеющихся в аэропорту: $n \leq n_{max}$.

Наряду с оптимальным числом обслуживающих аппаратов в результате численного интегрирования системы (4.3.1), (4.3.2) могут быть получены такие важные характеристики СМО, зависящие от времени, как, например, средняя длина очереди $M_{оч}$ и коэффициент занятости системы K_z , определяемые по формулам:

$$M_{Oч} = \sum_{i=n+1}^{n+m} (i-n)P_i$$

$$K_3 = \frac{1-n_c}{n}$$

где n_c – среднее число свободных от обслуживания средств, рассчитываемые:

$$n_c = \sum_{i=0}^{n-1} (n-i)P_i$$

Ниже рассмотрены варианты применения описанной выше модели для оптимизации параметров аэропортовых комплексов на нескольких примерах, прямо или косвенно касающихся узловых аэропортов.

Рассматривается обслуживание прибывающих в хаб самолетов с целью подготовки их к вылету на МС ВС. Требованиями на обслуживание выступают прибывающие самолеты, обслуживающими аппаратами – МС ВС. Маневрирование числом МС со стороны аэропорта трудноосуществимо, поэтому в данном примере, в отличие от следующего, располагаемое общее число аппаратов обслуживания считается неизменным. Определению подлежат такие характеристики процесса обслуживания, как загрузка обслуживающих аппаратов, вероятность наличия очереди из ВС, ожидающих постановки на МС, и число таких ВС.

В модельном примере рассматривается аэропорт Мюнхена, для которого, как показано в п. 2.3, входящий поток самолетов может считаться нестационарным пуассоновским. В том же пункте по недельным данным расписания определена величина мгновенной плановой интенсивности прилетов ВС как функция времени суток (рис. 2.3.1а). Аэропорт располагает 135 МС пассажирских ВС разных типов. По результатам обработки расписания получено среднее время пребывания ВС, совершающего обратный рейс, в аэропорту. Это время, составляющее чуть более 56 мин, и принято в качестве времени занятости МС при обслуживании рейса. Считается, что оно распределено экспоненциально, что в целом не противоречит эмпирическим данным.

Расчетное максимальное время ожидания самолетом обслуживания задано равным $t_p = 5$ мин. Значение вероятности того,

что фактическое время ожидания обслуживания самолетом может превысить расчетное время ожидания, задано достаточно малым $P_p = 0.05$.

Численное интегрирование системы (4.3.1), (4.3.2) при $n = n_{max} = 135$ для рассматриваемых уровней входящего потока ВС показало отсутствие очереди в течение всего суточного интервала времени. Наибольшее значение коэффициента занятости системы, не превышающее $K_3 = 0.34$, достигается несколько позже пика одной из волн прилетов, около 19:00. Среднее число занятых обслуживанием МС ВС для рассматриваемого варианта расписания аэропорта приведено на рис. 4.3.1.

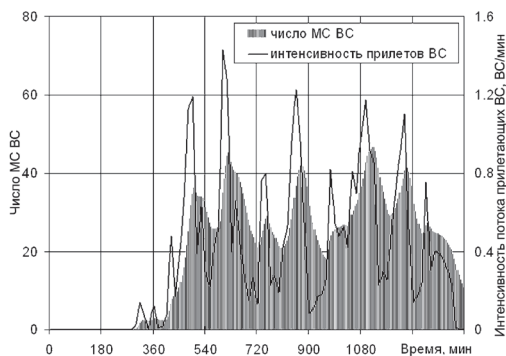


Рис. 4.3.1. Интенсивность прилета ВС и среднее число занятых МС ВС для расписания марта 2007 г. аэропорта Мюнхена

Следующий пример является более показательным в плане демонстрации возможностей описанной выше модели. Рассматривается этап регистрации пассажиров по свободному методу в одном из трех терминалов аэропорта Мюнхена. Требованием на обслуживание здесь является пассажир с багажом (точнее группа совместно следующих пассажиров), обслуживающим аппаратом — место регистрации. Предполагается, что аэропорт (и действующие в нем авиакомпании) могут маневрировать персоналом и оборудованием, увеличивая число действующих мест регистрации в течение волн вылетов и сокращая их число во время волн прилетов. Таким образом, должно быть определено оптимальное

количество мест регистрации n , обеспечивающее заданные показатели качества обслуживания $t_p = 5$ мин и $P_p = 0.05$, но не превышающее максимальное имеющее в терминале число стоек $n_{max} = 150$.

Длительность обслуживания считается распределенной по экспоненциальному закону со средним $M[T_{обсл.}] = 1.5$ мин. Более точные данные по аэропорту отсутствуют, величина принята по аналогии с другими зарубежными международными аэропортами [110], учитывая значительную долю международных перевозок.

В данном случае входящая в систему уравнений (4.3.1) величина λ представляет собой интенсивность потока пассажиров, проходящих регистрацию, и является функцией времени. Для некоторого момента времени t она определяется по формуле:

$$\lambda(t) = \sum_{i=1}^M N_i k_{3M_i} f(t_i - t) k_{ГР_i}$$

где M – количество рейсов, пассажиры которых могут находиться в аэровокзале в момент t ;

N_i – пассажироместимость самолета, выполняющего i -й рейс;

k_{3M_i} – коэффициент занятости мест i -го рейса;

t_i – момент вылета i -го рейса по расписанию;

$f(t_i - t)$ – плотность распределения вероятностей прибытия пассажиров i -го рейса за время $(t_i - t)$ до вылета;

$k_{ГР_i}$ – групповой коэффициент – доля пассажиров, проходящих непосредственное обслуживание у стойки регистрации.

Функция $f(t_i - t)$ может считаться не зависящей от конкретного рейса [99], но она будет различной для разных аэропортов и видов рейсов (внутренних, международных и т.д.). Как отмечено в п. 2.5 распределение вероятностей прибытия пассажира в аэровокзал, как правило, отвечает логарифмически нормальному или гамма-законам. Для аэропорта Мюнхена это распределение построено на основании данных, приведенных [96, 97]. Принят гамма-закон с характеристиками $\alpha = 5.60$; $\beta = 11.25$; $s = 0$, для которого среднее составляет 66.5 мин.

Данные по времени вылета рейсов взяты непосредственно из расписания аэропорта для определенной даты, а именно 19 марта 2007 г. Пассажиروместимости определены в соответствии с типами самолетов, заявленными в расписании. В соответствии с данными публикуемой аэропортом отчетности [111] коэффициент занятости кресел принят равным $k_{зМи} = 0.74$. Результаты наблюдений, проведенных в ряде аэропортов РФ, и данные, опубликованные в специальной литературе, указывают на то, что не будет большой ошибкой использование в расчетах значения $k_{гР} = 0.8$.

Из рис. 4.3.2, содержащего результаты моделирования, следует, что имеющихся в терминале стоек с большим запасом достаточно для обслуживания современных уровней пассажиропотока.

При заданном уровне качества обслуживания среднее число пассажиров в очереди, как правило, не превышает 20 человек. Требование по вероятности превышения расчетного времени ожидания фактическим выполняется практически всегда за ис-

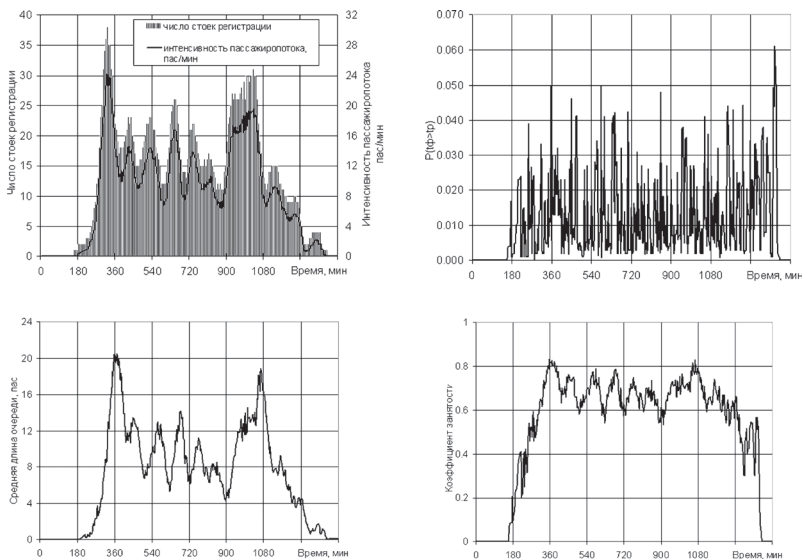


Рис. 4.3.2. Результаты моделирования процесса регистрации пассажиров

ключением одного очень непродолжительного интервала времени. Это объясняется использованием приближенного алгоритма для расчета потребного числа стоек. Стойки, выделяемые для регистрации, заняты работой по непосредственному обслуживанию пассажиров в течение 60-80% времени.

Следует подчеркнуть, что переходу к свободному методу регистрации должно предшествовать детальный технико-экономический анализ, целесообразность выполнения которого становится несомненной только в случае, если расчет, осуществленный по приведенной выше методике, выявит эффективность рассматриваемого метода для конкретных условий функционирования аэропорта.

4.4. Оптимизация численности средств обслуживания перевозок узлового аэропорта методом имитационного моделирования

Необходимость обслуживания большого числа трансферных пассажиров в аэровокзале узлового аэропорта предъявляет повышенные требования к его пропускной способности. Число персонала и технических средств должно быть достаточным для быстрого обслуживания пассажиров с соблюдением необходимых требований к безопасности и регулярности перевозок, а также качеству обслуживания. Под параметрами качества обслуживания здесь понимается расчетное время ожидания пассажиром в очереди на обслуживание и вероятность обеспечения этого времени. В качестве оптимального принимается наименьшее число средств обслуживания, обеспечивающее соблюдение заданных параметров качества.

Особенности потоков пассажиров и самолетов узловых аэропортов ограничивают область применения классических моделей теории массового обслуживания для решения поставленной оптимизационной задачи. В частности, поступление трансферных пассажиров в аэровокзал аэропорта пересадки для прохождения установленных формальностей носит выраженный групповой характер. Все трансферные пассажиры прибывшего рейса почти одновременно приходят на регистрацию, досмотр, паспортно-пограничный контроль и т.д. Причем такая «большая» группа пассажиров обычно включает «малые» группы – семьи, делегации и т.п. Это свойство входящего потока пассажиров, не позволяющее считать его пуассоновским, делает единственно возможным методом детального изучения системы решения исследуемой задачи имитационное моделирование.

В качестве модельного примера здесь рассматривается оптимизация параметров системы обслуживания трансферных пассажиров на этапе регистрации в аэропорту Храброво при функционировании его по узловой схеме.

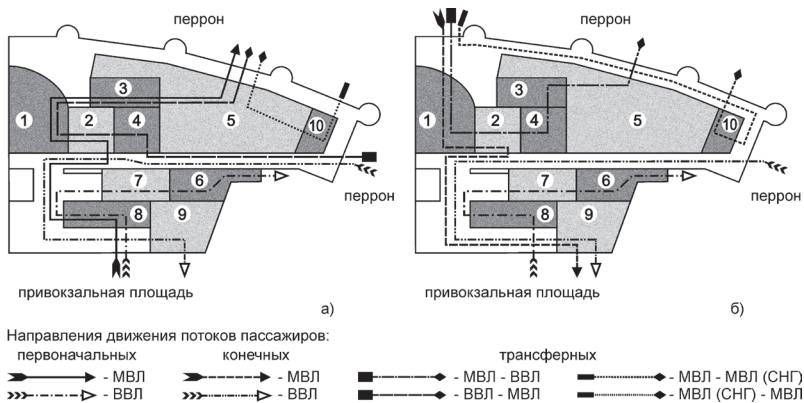
Свойства потока трансферных пассажиров, прибывающих на регистрацию, определяются характеристиками потока рейсов. Напомним, что стыковавшая в аэропорту свои рейсы авиакомпания *КДавиа* организовала расписание таким образом, что наибольшая интенсивность прилетов и вылетов рейсов приходилась на два довольно коротких интервала времени. Для использованного в рассматриваемом примере летнего расписания 2008 г. продолжительность первого интервала составила около 1 ч 30 мин (ориентировочно с 10:00 до 11:30). В среднем с промежутками 5-15 мин прибывали 10-12 рейсов. В течение этого интервала, соответствующего утренней волне прилетов-вылетов рейсов из аэропортов РФ в аэропорты Западной Европы, происходила регистрация трансферных пассажиров, пересаживающихся в направлении ВВЛ-МВЛ.

В течение второго интервала, соответствующего вечерней волне рейсов из зарубежных в российские аэропорты, регистрацию проходили трансферные пассажиры, пересаживающиеся в направлении МВЛ-ВВЛ. Продолжительность интервала, число рейсов и промежутки между рейсами близки к утренней волне.

Как отмечалось в гл. 1, благодаря организации в аэровокзале реверсивной схемы обслуживания, потоки пассажиров, следующих в различное время суток в различных направлениях, разделены во времени. Принципиальные схемы планировки первой очереди аэровокзала Храброво и движения потоков пассажиров в ее пределах отображены на рис. 4.4.1.

Помимо описанных выше особенностей расписания при моделировании входящего потока трансферных пассажиров использовались следующие параметры, в целом соответствующие коммерческим показателям деятельности авиакомпании *КДавиа* для рассматриваемого промежутка времени и результатам непосредственных наблюдений в аэропорту (табл. 2.5.1):

- средний коэффициент загрузки рейсов – 70%;
- доля трансфера среди всех пассажиров на рейсах – 45%;
- групповой коэффициент – 69%.



Технологические зоны аэровокзала:

1 – зона паспортно-пограничного контроля; 2 – зона таможенного контроля; 3 – зона досмотра трансферной системы; 4 – зона регистрации трансферных пассажиров; 5 – зал ожидания вылета пассажиров трансферной системы; 6 – зал ожидания вылета пассажиров ВВЛ; 7 – зона досмотра пассажиров ВВЛ; 8 – зона регистрации первоначальных пассажиров ВВЛ и МВЛ; 9 – зона выдачи багажа конечных пассажиров ВВЛ и МВЛ; 10 – зал ожидания вылета пассажиров трансферной системы, следующих рейсами из/в аэропорты СНГ

Рис. 4.4.1. Схема пассажирского аэровокзала аэропорта Храброво

а) этап массовых пересадок трансферных пассажиров с рейсов ВВЛ на рейсы МВЛ («утренняя волна прилетов-вылетов»);

б) этап массовых пересадок трансферных пассажиров с рейсов МВЛ на рейсы ВВЛ («вечерняя волна прилетов-вылетов»)

Несложный расчет с использованием приведенных показателей и учетом пассажировместимости эксплуатируемых *КДавиа* самолетов Boeing-737, составляющей 148 кресел, дает среднее число трансферных пассажиров на каждом рейсе – около 47 человек.

В главе 1 уже отмечалось, что регистрация трансферных пассажиров производилась в специализированной зоне аэровокзала на специально выделенных для этого 5 стойках.

Как показала обработка статистических наблюдений, собранных в Храброво, затраты времени на регистрацию трансферных пассажиров ВВЛ-МВЛ и МВЛ-ВВЛ несколько различаются, вследствие некоторого различия операций при регистрации этих

категорий пассажиров (табл. 3.3.1). Распределение длительности регистрации одного пассажира (точнее, «малой» группы) подчинено логарифмически нормальному закону с параметрами:

– трансферные пассажиры с пересадкой ВВЛ-МВЛ $\alpha = 0.76$;
 $\beta = -1.20$; $s = 0.13$ мин;

– трансферные пассажиры с пересадкой МВЛ-ВВЛ $\alpha = 0.96$;
 $\beta = -1.11$; $s = 0.12$ мин.

Объем статистического материала, собранного в аэропорту, обеспечивает ошибку по длительности обслуживания в пределах 2%.

Из-за описанных различий в продолжительности обслуживания оптимизация числа мест регистрации трансферных пассажиров проводится отдельно для утренней и вечерней волн прилетов-вылетов.

Для пиковых периодов работы системы с описанными выше характеристиками потоков требований и обслуживания необходимо определить минимальное число обслуживающих аппаратов, которое, как и в ранее рассмотренных задачах, должно обеспечивать заданное расчетное время ожидания в очереди t_p с надежностью не хуже заданной P_p . Алгоритм поиска потребного числа аппаратов обслуживания близок к представленному в предыдущем пункте, с существенным отличием, заключающимся в том, что значение $P_{t_{\phi} > t_p}$ определяется не с помощью приближенных аналитических формул, а путем проведения имитационного моделирующего эксперимента.

В ходе имитационного моделирования осуществляется накопление статистики по времени ожидания трансферных пассажиров в очереди перед регистрацией с использованием заданного числа стоек n . Продолжительность модельного времени охватывает несколько сотен волн прилетов-вылетов рейсов. Вероятность $P_{t_{\phi} > t_p}$ в соответствии с законом больших чисел считается близкой к частоте $P_{t_{\phi} > t_p}^*$ события, состоящего в ожидании поступившего в систему требования дольше расчетного времени:

$$P_{t_{\phi} > t_p} \approx P_{t_{\phi} > t_p}^* = \frac{m_{t_{\phi} > t_p}}{m}$$

где m – общее число требований, вошедших в систему, в имитационном эксперименте;

$m_{t_{\phi} > t_p}$ – число требований в имитационном эксперименте, длительность ожидания которых превысила расчетную.

Моделирующий алгоритм включает следующие шаги.

1. Разыгрывается интервал времени между двумя соседними моментами прилетов самолетов как случайная величина, равномерно распределенная на интервале 5-15 мин.

2. Разыгрывается число входящих требований, соответствующих трансферным пассажирам прибывшего рейса. Это случайная величина, распределенная по закону Пуассона, со средним значением 32, что с учетом группового характера поступления требований соответствует 47 трансферным пассажирам.

3. Поток трансферных пассажиров, прибывших на рейсе, распределяется перед несколькими стойками регистрации. Фиксируется время ожидания трансферного пассажира в очереди перед стойками.

4. Обслуживание пассажира имитируется введением задержки продвижения требования, продолжительность которой распределена по логарифмически нормальному закону. Параметры распределения зависят от направления трансфера – МВЛ-ВВЛ или ВВЛ-МВЛ.

5. По окончании обслуживания (истечении времени задержки) требование покидает систему.

6. Зафиксированная длительность ожидания в очереди заносится в таблицу распределения.

Шаги приведенного выше алгоритма повторяются внутри 2 циклов. Внешний цикл соответствует определенному числу (в описываемой модели 11 000) волн прилетов-вылетов, позволяющему обеспечить необходимый уровень точности модели. Внутренний цикл – рейсам одной волны (в данной модели 10 рейсов).

Описанный алгоритм программно реализован в многоцелевой среде имитационного компьютерного моделирования GPSS World. Расчеты проводились отдельно для утренней волны прилетов с пересадками в направлении ВВЛ-МВЛ и вечерней волны – с пересадками МВЛ-ВВЛ. Наряду с современным уровнем интенсивности прилетов ВС рассматривался возможный перспективный двукратный рост этого показателя.

Результаты обработки полученной в ходе моделирования статистики представлены на рис. 4.4.2, где в координатах t_p и $P^*_{t_\phi > t_p}$ отображены изолинии оптимального числа стоек реги-

страции в пределах от 1 до 6. Область между изолиниями n и $n-1$ стоек, включает сочетание параметров, для которого число стоек n является оптимальным. Большее число является избыточным, обеспечивающим уровень качества обслуживания, значительно превышающий заданный. Меньшее число не позволяет предоставить обслуживание с заданным качеством. Ниже изолинии, соответствующей числу стоек n , расположена область, в которой сочетание параметров $P^*_{t_{\phi} > t_p}$ и t_p не может быть достигнуто использованием этого числа стоек.

Из рисунков, в частности, следует, что при существовавшем в 2008 г. в аэропорту Храброво уровне трансферного пассажиропотока имевшееся число стоек регистрации трансферных пассажиров (5 штук) обеспечивало с надежностью, близкой к 100%, максимальное время ожидания, не превышающее 3.5 мин для пересадки ВВЛ-МВЛ, и – 4 мин для МВЛ-ВВЛ. Более того, даже четырех стоек достаточно, чтобы время ожидания гарантированно не превышало 5 мин для любого направления пересадки.

В условиях планировавшегося двукратного роста интенсивности движения рейсов, как для пересадки ВВЛ-МВЛ, так и МВЛ-ВВЛ, имеющих 5 стоек регистрации достаточно, чтобы время ожидания не превысило 5 мин.

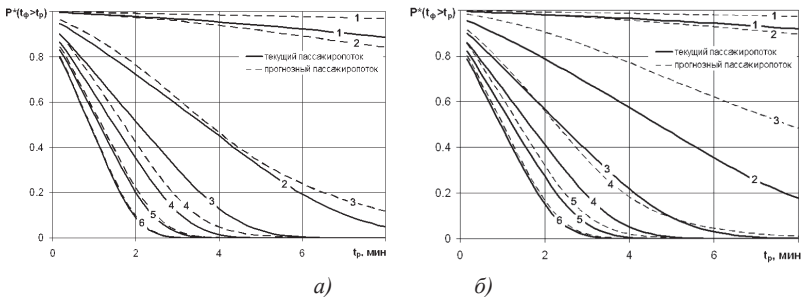


Рис. 4.4.2. Изолинии оптимального числа мест регистрации трансферных пассажиров:
 а) пересадка ВВЛ-МВЛ; б) пересадка МВЛ-ВВЛ

4.5. Комплексная оптимизация численности средств обслуживания перевозок узлового аэропорта

Рассматривается задача оптимизации числа обслуживающих средств совместно для всех операций модельного технологического графика подготовки ВС к вылету в узловом аэропорту. Интенсивность потока прибывающих в аэропорт самолетов описывается кусочно-линейной функцией времени $\lambda(t)$, введенной в п. 2.4. Предполагается, что в течение суток в аэропорту наблюдается несколько волн прилетов, повторяющихся через одинаковые интервалы времени и имеющих одинаковые треугольные конфигурации. «Вершинам» волн соответствует некоторый максимальный уровень интенсивности, считающийся одинаковым для всех волн. В промежутках между волнами – уровень интенсивности минимальный, постоянный для всех промежутков. Присутствует также некоторый «ночной период» продолжительности T_H с минимальным уровнем интенсивности, не включенный в систему волн. Таким образом, параметрами функции $\lambda(t)$ являются суточное число волн прилетов Q , цикл хаба C , продолжительности временных интервалов возрастания $(t_A t_B)$, убывания $(t_B t_C)$ и постоянства $(t_C t_D)$ интенсивности прилетов, а также ее минимальное λ_{min} и максимальное λ_{max} значения.

Методом исследования процесса наземного обслуживания перевозок, включающего все основные технологические операции, является имитационное компьютерное моделирование. Выбор метода обусловлен целым рядом особенностей процесса, таких как выраженная нестационарность входящего потока, сложность технологического графика обслуживания, а также возможное взаимное влияние фаз обслуживания.

Здесь, как и в рассмотренных ранее задачах, под оптимальным понимается минимально необходимое число средств обслуживания, обеспечивающее выполнение условия $P_{t_{\phi} > t_p} \leq P_p$ для заданных аэропортом значений t_D и P_p . Далее принимается (хотя для решения рассматриваемой задачи это и необязательно), что величины t_D и P_p заданы одинаковыми для всех технологических операций.

Для некоторой операции вероятность $P_{t_{\phi} > t_p}$ зависит от самой величины t_p , насыщенности аэропортовых комплексов средствами для выполнения данной операции, продолжительности обслуживания одного требования одним средством и параметров потока требований. Рассматривая в качестве требования один прибывший рейс, можно записать:

$$P_{t_{\phi} > t_p} = f_n(t_p, F(t_{обсл}), n, \lambda(t)) \quad (4.5.1)$$

где n – число средств обслуживания;

$F(t_{обсл})$ – функция распределения времени обслуживания требования.

Из-за нестационарности входящего потока вероятность $P_{t_{\phi} > t_p}$ является функцией времени, мгновенное значение которой приближенно может быть найдено:

$$P_{t_{\phi} > t_p}(t) \approx \frac{m_{t_{\phi} > t_p}(t, \Delta t)}{m(t, \Delta t)}, \quad \text{при } \Delta t \rightarrow 0$$

где $m(t, \Delta t)$ – число поступлений требований на участке длиной Δt , начало которого совпадает с моментом t ;

$m_{t_{\phi} > t_p}(t, \Delta t)$ – число тех требований из $m(t, \Delta t)$, для которых продолжительность ожидания в очереди превысила t_p . Величины $m(t, \Delta t)$ и $m_{t_{\phi} > t_p}(t, \Delta t)$ могут быть определены в ходе имитационного моделирования на суточном интервале модельного времени.

Отметим, однако, что свойство ординарности входящего потока, означающее, что на малый интервал Δt ($\Delta t \rightarrow 0$) может поступить не более одного требования, вызывает необходимость выполнения неприемлемо большого числа прогонов модели для определения мгновенных (виртуальных) значений $P_{t_{\phi} > t_p}$. Кроме

того, обычно знание этих значений на всем суточном интервале не является необходимым. В случае если число средств обслуживания постоянно на всем суточном интервале и достаточно для предотвращения неограниченного нарастания очереди, мгновенные значения $P_{t_{\phi} > t_p}$ будут достигать максимума в районе пиков волн прилетов. Поэтому далее для сокращения числа прогонов модели ценой некоторого снижения точности производится определение не мгновенных, а усредненных значений $P_{t_{\phi} > t_p}$ для интервалов времени, соответствующих волнам прилетов. Кроме того, учитывая периодический характер функции $\lambda(t)$, моделирование сводится к одному прогону модели, соответствующему множеству суток работы аэропорта с N_V волнами прилетов. При этом для определения оценки $P_{t_{\phi} > t_p}$ используется формула:

$$P_{t_{\phi} > t_p} \approx \frac{\sum_{k=1}^{N_V} m_{t_{\phi} > t_p k}}{\sum_{k=1}^{N_V} m_k}$$

где m_k – число требований, вошедших в систему в течение k -й волны;

$m_{t_{\phi} > t_p k}$ – число требований, вошедших в систему в течение k -й волны, для которых фактическое время ожидания в очереди превысило расчетное время.

Поскольку величина $P_{t_{\phi} > t_p}$ определяется с помощью имитационного эксперимента, то уравнение (4.5.1) не решается относительно n в явном виде. Минимальное значение n'_l , обеспечивающее выполнение условия $P_{t_{\phi} > t_p} \leq P_p$ для некоторой (l -й) технологической операции, определяется в результате решения задачи:

$$n'_l = \min n_l | (f_n(t_p), F_l(t_{обсн}), n_l, \lambda(t)) \leq P_p), \quad l = 1, \dots, L$$

где L – число операций модельного технологического графика.

В используемой для решения поставленной задачи имитационной модели реализован модельный технологический график

подготовки самолета к вылету в аэропорту (рис. 3.1.2). Предполагается, что все рейсы, обслуживаемые в аэропорту, являются либо транзитными, либо обратными, поэтому прибывающие самолеты проходят полный набор операций модельного графика. В качестве требования, входящего в обслуживающую систему, принимается прибывающий самолет. Каждое требование характеризуется следующими параметрами:

- временем входа в систему (моментом времени поступления сообщения о движении самолета);
- категорией самолета, соответствующего требованию;
- категорией перевозки, соответствующей требованию (МВЛ, ВВЛ). Предполагается, что категории перевозки прибывающего и вылетающего рейсов, выполняемых одним и тем же самолетом, совпадают.

Прямая связь параметров требования с расписанием (каким-либо: реальным или модельным) отсутствует. Предполагается, что влияние расписания на характеристики требований проявляется опосредованно, через функцию $\lambda(t)$ и вероятностные распределения этих характеристик как случайных величин.

Модельное распределение входящих требований по категориям самолетов и перевозок приведено в табл. 4.5.1.

Табл. 4.5.1.

Распределение входящих требований по категориям

Категория самолета	I	II	III
Доля рейсов, выполняемых самолетами данной категории в общем числе рейсов, %	25	65	10
Доля рейсов ВВЛ в общем числе рейсов, выполняемых самолетами данной категории, %	70	90	100
Доля рейсов МВЛ в общем числе рейсов, выполняемых самолетами данной категории, %	30	10	0

Ниже приведены модельные характеристики технологических операций (в скобках – обозначения операций в соответствии с рис. 3.1.2).

Регистрация билетов и оформление багажа вылетающих пассажиров (РЕГ). Операция выполняется по порейсовой схеме. Предполагается, что трансферные пассажиры проходят регистрацию

вместе с первоначальными. Распределение продолжительности операции принято в соответствии с данными табл. 3.3.2. Интервал времени от поступления сообщения о движении самолета до начала регистрации фиксирован и зависит от категорий самолета и перевозки. Число стоек, занятых обслуживанием пассажиров одного рейса, зависит от категории самолета и перевозки (обработка данных статистики аэропорта Курумоч – табл. 4.5.2)

Табл. 4.5.2.

Доли рейсов, обслуживаемых различным числом стоек регистрации, в общем числе рейсов данных категорий самолетов и перевозки, %

Категория самолета		I			II			III
Число стоек		1	2	3	1	2	3	1
Категория перевозки	МВЛ	20	70	10	60	35	5	нет рейсов
	ВВЛ	30	70	0	60	40	0	100

Движение самолета на МС после посадки (*ПУЛ1*); движение самолета с МС перед вылетом (*ПУЛ2*). Распределение продолжительности операций для самолетов I и II категорий в соответствии с табл. 3.3.2. Для самолетов III категории – нормальные распределения для обеих операций из-за недостатка данных.

Встреча самолета на МС. В отличие от модельного технологического графика (рис. 3.1.2) здесь – интервал от начала встречи до начала установки трапа. Распределение продолжительности операции в соответствии с табл. 3.3.2. Начало операции – занятие МС требованием. Дифференциации МС по категориям ВС в рамках модели нет.

Установка (*ИТ*) и уборка (*ОТ*) трапа. Предполагается, что для обслуживания самолетов I и II категорий во всех случаях используется один трап, предоставляемый аэропортом. Самолетами III категории всегда используется встроенный трап. Распределение времени как установки, так и уборки трапов для самолетов всех категорий считается одинаковым (табл. 3.3.2). Начало перемещения трапа для установки – его занятие требованием. Окончание движения трапа после уборки – его освобождение требованием.

Высадка и доставка в аэровокзал прилетевших пассажиров (*ВЫС*); доставка вылетающих пассажиров к самолету и посадка

в самолет (*ПОС*). Доставка выполняется автобусами. Всегда используется 1 автобус. Распределение продолжительности – в соответствии с табл. 3.3.2.

Выгрузка багажа прилетевших пассажиров и транспортировка его в багажные помещения аэровокзала (*ВЫГ Б*); транспортировка к самолету и погрузка багажа вылетающих пассажиров (*ПОГ Б*). Используется 1 перронное средство только для самолетов I и II категорий. Пассажиры самолетов III категории самостоятельно доставляют багаж. Распределение продолжительности – в соответствии с табл. 3.3.2.

Выдача багажа прилетевшим пассажирам (*ВБ*). Один рейс обслуживается одним средством выдачи багажа. Распределение продолжительности – в соответствии с табл. 3.3.2. Для рейсов, выполняемых самолетами III категории, операция не выполняется.

Заправка ВС топливом (*ЗАП*). Осуществляется с использованием ЦЗС, конечным элементом которой служат передвижные заправочные агрегаты. Заправка одного самолета всегда выполняется одним агрегатом. Продолжительность собственно заправки определяется как композиция следующих случайных величин, распределение которых зависит от категории самолета:

- производительность заправки – случайная величина, подчиненная нормальному распределению с параметрами, приведенными в таблице (табл. 3.3.4);
- объем максимального запаса топлива самолета – равномерно распределенная случайная величина с пределами от 30-55 м³ – для самолетов I категории; до 3.5-7.5 м³ – для самолетов III категории;
- относительный объем заправки – случайная величина смешанного типа, предполагающая как вероятность отсутствия заправки в аэропорту, так и ее наличия в некоторых пределах относительно максимального запаса топлива.

Продолжительности вспомогательных операций – равномерно распределенные случайные величины:

- установка заправочного средства у самолета, подготовка к заправке и свертывание: 2-6 мин – для самолетов I категории; 2-5 мин – для самолетов II-III категории;

– продолжительность отъезда средства заправки от ВС и переезд к другому самолету (в случае его наличия) – 1-4 мин – для ВС всех категорий.

Подготовительно-заключительные операции могут выполняться параллельно с посадкой и/или высадкой пассажиров.

Использование в модели ЦЗС исключает необходимость учета затрат времени на наполнение цистерны топливозаправщика.

Уборка салона (*УБ*). Средство обслуживания включает уборочную бригаду и бытового автобус. Уборка выполняется не всегда. В тех случаях, когда это происходит, параметры распределения продолжительности принимаются по табл. 3.3.2.

Работы по ТО (*ТО*). Средством обслуживания является бригада по ТО. Распределение продолжительности операции принимается по табл. 3.3.2.

Сортировка и комплектация по рейсам багажа вылетающих пассажиров (*СОПТ*). Использование порейсовой регистрации исключает необходимость в специальной процедуре сортировки багажа первоначальных пассажиров. Сортировка багажа трансферных пассажиров может производиться в ходе его разгрузки. Таким образом, затраты времени и сил на данную операцию могут не учитываться.

Работы по выпуску самолета со стоянки. В отличие от рис. 3.1.2 здесь – интервал от окончания уборки трапа до окончания выпуска с МС. Окончание операции – освобождение МС требованием. Распределение продолжительности операции принимается по табл. 3.3.2.

Во всех операциях, где это необходимо, отдельно учитывается время на перемещение средства обслуживания между его МС и МС ВС или между МС ВС. Время перемещения принимается распределенным равномерно в пределах 0.5-4 мин.

Результаты моделирования для трех наборов исходных данных, отвечающих трем вариантам волновых систем, приведены в табл. 4.5.3. Варианты 1 и 2 соответствуют узловому аэропорту с относительно малым среднесуточным числом рейсов, распределенным на две волны, в среднем по 10 прибывающих и такому же числу вылетающих рейсов в каждой. Первый вариант характеризуется значительно более концентрированными

волнами, длящимися около 1 ч. В третьем варианте число волн, в каждой из которых в среднем по 10 прилетов-вылетов, увеличено до 4.

Результаты включают оптимальное число обслуживающих средств для основных технологических операций и модельное среднее время стоянки самолетов различных категорий в узловом аэропорту $M[t_{CT}]$. Длительность стоянки t_{CT} определялась как продолжительность временного интервала между моментами времени прилета t_a и вылета t_d самолета: $t_{CT} = t_a - t_d$. Продолжительность модельного интервала времени выбиралась таким образом, чтобы обеспечить ошибки по $M[t_{CT}]$ в пределах 0.1%; по $P_{t_{\phi} > t_p}$ – в пределах 0.5%. Расчеты проводились при довольно жестких требованиях к качеству обслуживания, одинаковых для всех технологических операций: $t_p = 5$ мин и $P_p = 0.05$.

Моделирование позволяет сделать некоторые выводы относительно характера занятости обслуживающих средств.

Время занятости таких средств как сервисеры, бригады по ТО и уборке, стойки регистрации, багажные транспортеры полностью определяется продолжительностью соответствующей операции. Для перронных автобусов и багажных транспортеров время занятости складывается из продолжительностей двух операций: для автобусов – высадки и посадки пассажиров, для багажных транспортеров – выгрузки и погрузки багажа. В рамках рассматриваемой модели сокращение времени ожидания обслуживания рейсом при недостатке перечисленных средств может быть достигнуто только увеличением их количества.

На время занятости таких обслуживающих средств, как МС ВС и трап, которые считаются занятыми в продолжение целого ряда других операций, влияет суммарная продолжительность этих операций с учетом параллельности выполнения и возможности ожидания. Поэтому время ожидания обслуживания этими средствами может быть сокращено не только увеличением их числа, но и сокращением времени ожидания при выполнении ряда других операций. Таким образом, на число МС ВС и трапов влияет количество других средств механизации.

Табл. 4.5.3.

Исходные данные и результаты моделирования

Параметры волновой системы	Вариант волновой системы	1	2	3
	Q	2	2	4
	C, ч	10	10	5
	T_{H^2} , ч	4	4	4
	$(t_A t_B)$, ч / $(t_B t_C)$, ч	0.5 / 0.5	1 / 1	1 / 1
	λ_{max}^2 ВС/ч / λ_{min}^2 ВС/ч	20 / 0	10 / 0	10 / 0
Оптимальное число средств обслуживания перевозок	МС ВС	13	11	11
	Средства транспортировки багажа	5	5	5
	Пассажирские трапы	10	9	9
	Средства транспортировки пассажиров (автобусы)	5	4	4
	Средства заправки ВС топливом (сервисеры)	5	4	4
	Средства выдачи багажа	6	6	6
	Стойки регистрации	18	15	15
	Бригады ТО ВС	10	9	9
Модельное среднее время стоянки $M[t_{ст}]$, мин	Бригады уборки ВС	6	4	4
	Все рейсы	94.0	91.6	93.5
	Самолеты 1 кат., ВВЛ	111.2	108.3	110.4
	Самолеты 1 кат., МВЛ	128.2	125.7	127.1
	Самолеты 2 кат., ВВЛ	86.2	84.0	85.9
	Самолеты 2 кат., МВЛ	115.3	112.4	113.9
	Самолеты 3 кат., ВВЛ	69.2	67.4	69.4

Сравнение вариантов волновых систем 1 и 2 позволяет сделать ожидаемый вывод о том, что «размывание» волн позволяет не только снизить требуемую пропускную способность аэропорта, но и несколько уменьшить наземные простои самолетов.

При достаточных промежутках времени между волнами и достаточной пропускной способности аэропорта влияние соседних волн практически неощутимо. Это позволяет наращивать число волн без необходимости увеличения пропускной способности аэропорта. Такой вывод следует из сравнения вариантов 2 и 3.

На рис. 4.5.1 приведены графики интенсивности $\lambda(t)$ для обобщенной волны прилетов и вылетов рейсов второго варианта волновой схемы. Практически волна является суперпозицией нескольких волн, соответствующих различным категориям рейсов с различными величинами $M[t_{CT}]$.

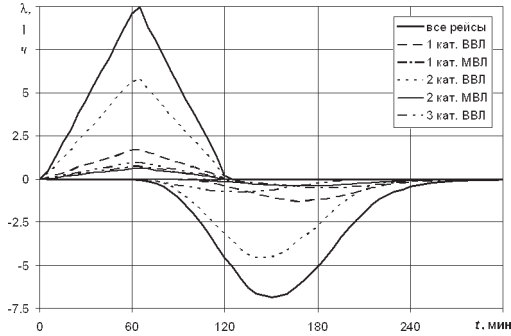


Рис. 4.5.1. Интенсивность обобщенной волны прилетов-вылетов

Проведенная по результатам моделирования проверка еще раз подтвердила, что для оптимизации технологических параметров узловых аэропортов неприменимы аналитические и полуаналитические зависимости теории массового обслуживания, полученные в предположении стационарности входящего потока. Как указано в [93], их использование оправдано, если периоды постоянства интенсивности потока не менее чем в 5-7 раз продолжительнее среднего времени обслуживания одного требования. В отношении узловых аэропортов это требование не выполняется, поэтому инструментом решения задач синтеза оптимальных аэропортовых систем является только имитационное моделирование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бачурин, Е. В. Доклад на расширенном заседании Коллегии Росавиации 14 марта 2008 г. / Е. В. Бачурин.
2. Руководство по регулированию международного воздушного транспорта : документ ИКАО 9626. – 2-е изд. – 2004.
3. Концепция развития аэродромной (аэропортовой) сети Российской Федерации на период до 2020 года. Проект 17.01.2008. – М., 2008.
4. Власов, В. Прогноз развития индустрии воздушных перевозок в России и СНГ на ближайшие 20 лет : тезисы доклада / В. Власов. – М., 2008.
5. Фиорино, Ф. Что в запасе? / Ф. Фиорино // Авиатранспортное обозрение. – 2006. – Апр. – С. 22, 23.
6. Уолл, Р. Грозовые тучи / Р. Уолл, А. Шофилд // Авиатранспортное обозрение. – № 86. – 2008. – Янв.-февр.
7. Зверева, П. Будущие потери в 5.6 млрд долл. / П. Зверева // Авиатранспортное обозрение. – № 106. – 2010. – Янв.-февр.
8. Зверева, П. В ожидании светлого будущего / П. Зверева // Авиатранспортное обозрение. – № 101. – 2009. – Июль.
9. Мичелз, Д. В конце концов все будет хорошо // Д. Мичелз, А. Шофилд // Авиатранспортное обозрение. – № 99. – 2009. – Май.
10. Кириллова, Н. Зарубежный опыт либерализации и дерегулирования рынка авиаперевозок / Н. Кириллова // Авиатранспортное обозрение. – 2005. – Май.
11. Отт, Д. Хмурое небо / Д. Отт // Авиатранспортное обозрение. – № 85. – 2007. – Дек.
12. Гражданская авиация в России : аналитический обзор // РосБизнесКонсалтинг. – М., 2005.

13. Канищев, А. Приближение к ВТО / А. Канищев // Авиатранспортное обозрение. – 2006. – Сент. – С. 15-17.
14. Вилсон, Б. «Авиаперевозчики понимают, что 1 июня наступит» / Б. Вилсон // Авиатранспортное обозрение. – № 88. – 2008. – Апр.
15. Казачкова, Е. А вы боялись! / Е. Казачкова // Авиатранспортное обозрение. – № 91. – 2008. – Июль-авг.
16. Синицкий, А. Упрощение жесткого бизнеса / А. Синицкий // Авиатранспортное обозрение. – 2005. – Янв.-февр. – С. 54, 55.
17. Мурадян, Г. Три ипостаси Amadeus / Г. Мурадян, А. Сырых // Авиатранспортное обозрение. – 2005. – Май.
18. Зверева, П. Умный домик. Администрация Домодедово доверится новым технологиям / П. Зверева // Авиатранспортное обозрение. – 2006. – Апр. – С. 37, 38.
19. Гипич, Г. Н. Обеспечение и поддержание летной годности воздушных судов гражданской авиации (теория и практика) : дис. ... д-ра техн. наук / Г. Н. Гипич. – М., 2005.
20. Бачурин, Е. В. Перспективы развития авиаперевозок и парка воздушных судов авиакомпаний Российской Федерации : доклад 10 октября 2007 г. / Е. В. Бачурин.
21. Анализ состояния рынка // Авиатранспортное обозрение. – № 102. – 2009. – Сент.
22. Синицкий, А. Трудно, но нормально / А. Синицкий // Авиатранспортное обозрение. – № 101. – 2009. – Июль-авг.
23. Обзор состояния авиаперевозок в России в 2008 году. Подготовлен Исполнительным органом Ассоциации эксплуатантов воздушного транспорта РФ.
24. Борисов, Ф. Тормозящие пошлины // Авиатранспортное обозрение. – № 93. – 2008. – Окт.
25. Пядушкин, М. Перевозчики удивили авиастроителей / М. Пядушкин // Авиатранспортное обозрение. – № 78. – 2007. – Апр.
26. Годовой отчет ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» за 2007 г. – М., 2008.
27. Комаров, А. Парк ВС западного производства в России : доклад на конференции «ТОиР: перспективы российского рынка» 4-5 марта 2008 г. / А. Комаров. – М., 2008.

28. Колобков, С. Россию делят на авиахабы / С. Колобков // РБК Daily. – 2009. – 8 окт.
29. Danesi, A. Spatial concentration, temporal co-ordination and profitability of airline hub-and-spoke networks / A. Danesi. – Bologna, 2006. – 143 p.
30. Holloway, S. Straight and Level / S. Holloway // Practical Airline Economics, Ashgate. – 2003.
31. Официальный сайт Федерального управления авиации США (www.faa.gov).
32. The Hub of the Matter. Daily Travel & Tourism Newsletter // http://www.traveldailynews.com/pages/show_page/20537. – 2008. – Decemb. 12.
33. Doganis, R. Lessons in Hubbing / R. Doganis, N. Dennis // Airline Business. – 1989. – March. – P. 42-47.
34. Dennis, N. Scheduling strategies for airline hub operations / N. Dennis // Journal of Air Transport Management. – 1994. – Vol.1. – P. 131-144.
35. Bootsma, P. D. Airline Flight Schedule Development / Elinkwijk B.V. Utrecht ; P. D. Bootsma. – 1997.
36. DeNeufville, R. Effects of deregulation on airports / R. DeNeufville. – Massachusetts institute of technology, 2002.
37. Button, K. Air Transport Networks: Theory and Policy Implications / K. Button, R. Stough. – Edward Elgar Publishing, 2000.
38. Derudder, B. Flying Where You Don't Want to Go: An Empirical Analysis of Hubs in the Global Airline Network / B. Derudder, L. Devriendt, F. Witlox // Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie. – 2007. – № 98(3). – P. 307-324.
39. Annual Report of Hartsfield-Jackson Atlanta // International Airport. – Atlanta, 2006. – P.69.
40. Connecting passengers at UK airports // Civil Aviation Authority UK. – London, 2008. – Nov.
41. Doganis, R. Flying off course, Routledge / R. Doganis. – 2002.
42. Dennis, N. Airline hub operations in Europe / N. Dennis // Journal of Transport Geography. – 1994. – Vol. 2. – P. 219-233.
43. Синицкий, А. Авиакомпания посредине мира / А. Синицкий // Авиатранспортное обозрение. – № 78. – 2007. – Апр.

44. Глушков, Г. И. Изыскания и проектирование аэродромов : учебник для вузов / Г. И. Глушков, В. Ф. Бабков, В. Е. Тригопи. – М. : Транспорт, 1992. – 436 с.
45. Airport capacity benchmark report 2004. U.S. Department of transportation. Federal aviation administration. – Washington, 2004. – Sept.
46. Фетисов, А. Сделай сам / А. Фетисов // Авиатранспортное обозрение. – № 49. – 2003. – Ноябрь.-дек.
47. Фетисов, А. Парижский дом SkyTeam / А. Фетисов // Авиатранспортное обозрение. – № 47. – 2003. – Июль-авг.
48. Официальный сайт Международного аэропорта Баракс (Мадрид) www.aena.es.
49. Unique (Flughafen Zürich AG). Facts and figures 2007. – Zürich, 2007.
50. С ветерком на посадку // Авиатранспортное обозрение. – № 86. – 2008. – Янв.-февр.
51. Зверева, П. Самообслуживание. Пассажиры учатся печатать посадочные талоны / П. Зверева, Л. Вершко // Авиатранспортное обозрение. – № 78. – 2007. – Апр. – С. 37, 38.
52. Гойденко, А. С. Совершенствование системы управления наземным обслуживанием воздушных судов в аэропорту : дис. ... канд. экон. наук / А. С. Гойденко. – М., 2004.
53. Колесников, С. Об оценке эффективности внедрения и применения систем управления ресурсами предприятия / С. Колесников // www.cit.ru.
54. Банкерс, М. Эффективная обработка багажа. Все системы работают нормально / М. Банкерс // www.nmaee.ru.
55. Системы обработки и хранения багажа. Глобальная сеть инноваций Siemens. – М., 2005. – 12 с.
56. Dallas/Forth Worth int'l airport. ATSAC terminal B and E, Dallas Texas // WanDerLande industries Press-release. – 2006.
57. Solution to suit you. TUBTRAX // WanDerLande industries Press-release. – Vegnel, 2004.
58. Solution to suit you. BAGTRAX // WanDerLande industries Press-release. – Vegnel, 2004.
59. Hong Kong International airport // WanDerLande industries Press-release. – 2007.

60. Vienna International airport. Skylink Terminal // WanDerLande industries Press-release. – 2006.
61. Zürich airport. Midfield, terminals A end B, A4 and pre-sorting area // WanDerLande industries Press-release. – 2006.
62. Мэххэм, М. Естественный отбор / М. Мэххэм // Авиатранспортное обозрение. – № 55. – 2004. – Ноябрь.-дек. – С. 50-53.
63. D. Meehan Managing Risk in an Environment of Dehubbing. Proceeding of Airport Economics and Finance Conference. – Phoenix, USA, 2007. – May 22.
64. Котин, В. К вопросу о необходимости и возможности создания аэропорта-хаба в Московском авиационном узле. Ч. 1. / В. Котин // www.aviaport.ru.
65. Dennis, N. Developments of Hubbing at European Airports / N. Dennis // Air & Space Europe. – 2001. – Vol. 3. – № 1/2. – P. 51-55.
66. Munich Airport. Facts and figures. Mediengruppe Universal. – München, 2007.
67. Спарако, П. Самолеты, поезда и нехватка площадей / П. Спарако, Д. Флоттау // Авиатранспортное обозрение. – № 55. – 2004. – Ноябрь.-дек. – С. 54-56.
68. Катчан, В., Прозорова Т. Московские аэропорты – взгляд в будущее. Ч. 2. / В. Катчан, Т. Прозорова // www.aviaport.ru.
69. Фетисов, А. Споры о будущем / А. Фетисов // Авиатранспортное обозрение. – № 52. – 2004. – Май-июнь. – С. 52, 53.
70. Treitel, D. All change / D. Treitel, E. Smick // Airline Business. – 1996. – July. – P. 34-36.
71. Frank, M. Depeaking – economic optimization of air traffic systems / M. Frank, M. Mederer, B. Stolz, T. Hanschke // Aerospace science and technology. – 2005. – № 9. – P. 738-744.
72. Wong, D. K. Y. The impact of regional jets on air service at selected US airports and markets / D. K. Y. Wong, D. E. Pitfield, I. M. Humphreys // Journal of Transport Geography. – 2005. – Vol. 13. – P. 151-163.
73. Savage, I. Deploying regional jets to add new spokes to a hub / I. Savage, B. Scott // Journal of Air Transport Management. – 2004. – Vol. 10. – P. 147-150.
74. Dresner, M. Regional jet services: supply and demand / M. Dresner, R. Windle, M. Zhou // Journal of Air Transport Management. – 2002. – Vol. 8. – P. 267-273.

75. Официальный сайт авиакомпании *КД авиа* (www.kdavia.ru).
76. КД авиа: бонды высокого полета?! // CBONDS review. – 2007. – Янв. – С. 40-46.
77. «Калининград авиа» пересаживается на «Боинги» // Авиа-транспортное обозрение. – № 53. – 2004. – Июль-авг.
78. Годовой отчет по итогам работы Открытого акционерного общества *КД авиа* за 2006 год.
79. Трофимова, Е. Стык в стык / Е. Трофимова // Секрет фирмы. – № 22(205). – 2007. – 11 июня.
80. ОАО *КД авиа*: первые итоги работы хаба. Долговой рынок. – 2007. – 30 авг.
81. Зверева, П. С *КД авиа* произошла метаморфоза / П. Зверева // Авиатранспортное обозрение. – № 81. – 2007. – Июль-авг.
82. КД авиа в 2008 году начнет новый этап модернизации парка воздушных судов : сообщение агентства «НТА-Приволжье». – Н. Новгород, 2007. – 10 июля.
83. Рыбченко, И. Связь для «Храброво» / И. Рыбченко // Сайт информационного агентства SPbit г. Санкт-Петербург (www.spbit.ru/news).
84. Перешли на *Sabre* // Авиатранспортное обозрение. – № 75. – 2006. – Дек.
85. Синицкий, А. Тяжелые последствия / А. Синицкий // Авиатранспортное обозрение. – № 102. – 2009. – Сент.
86. Burghouwt, G. Temporal configurations of European airline networks / G. Burghouwt, J. De Wit // Journal of Air Transport Management 11. – 2005. – P. 185-198.
87. Ivy, R. L. Variations in hub service in the U.S. domestic air transportation network / R. L. Ivy // Journal of Transport Geography. – 1993. – № 1. – P. 211-218.
88. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб. : Питер, 2004.
89. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников / А. И. Кобзарь. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006.
90. Томашевский, В. Н. Имитационное моделирование в среде GPSS / В. Н. Томашевский, Е. Г. Жданова. – М. : Бестселлер, 2003. – 416 с.

91. Русинов, И. Я. Организация воздушных перевозок / И. Я. Русинов, Л. А. Цеханович, В. А. Подшипников и др. – М. : Транспорт, 1976.
92. Русинов, И. Я. Механизация наземного обслуживания воздушных перевозок / И. Я. Русинов. – М. : Транспорт, 1971. – 252 с.
93. Андронов, А. М. Математические методы планирования и управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий гражданской авиации / А. М. Андронов, А. Н. Хижняк. – М. : Транспорт, 1977.
94. Jackson, R. P. Operational research and aviation management / R. P. Jackson, P. A. Longton // Journal of the Royal Aeronautical Society. – 1965. – Aug. – Vol. 69.
95. Kim, W. Estimating hourly variations in passenger volume at airports using dwelling time distributions / W. Kim, Y. Park, B. J. Kim // Journal of Air Transport Management. – 2004. – № 10. – P. 395-400.
96. Ashford, N. Airport operations / N. Ashford, H. P. M. Stanton, C. A. Moore, – 2-nd Edition. – New York: McGraw-hill, 1995.
97. Ashford, N. Airport Engineering / N. Ashford, P. H. Wright. – 3-rd Edition. – Inc.: John Wiley & Sons, 1992. – 520 p.
98. Gosling, G. D. Ground access to airport. Proceedings UCBITS-P-94-1 / G. D. Gosling. – 1994.
99. Романенко, В. А. Исследование процессов обслуживания пассажиров в международном аэропорту Курумоч / В. А. Романенко // Вестник СГАУ. – Самара, 2006. – № 3(11). – С. 35-43.
100. Шварц, Г. Выборочный метод / Г. Шварц. – М. : Статистика, 1978.
101. Пагурова, В. И. Таблицы неполной гамма-функции / В. И. Пагурова. – М. : ВЦ АН СССР, 1963.
102. Наставление по производству полетов в гражданской авиации СССР (НПП ГА-85). – М., 1985.
103. Руководство по обеспечению и учету регулярности полетов воздушных судов гражданской авиации СССР (РПП ГА-90). – М., 1990.
104. Ведомственные нормы технологического проектирования аэровокзалов аэропортов (ВНТП 3-81). – М., 1982.

105. Далецкий, С. В. и др. ОСТ 5430054-88. Система ТОиР АТ. Регламент технического обслуживания самолета (вертолета) / С. В. Далецкий и др. – М. : ЦНТИ ГА, 1988. – 62 с.
106. Далецкий, С. В. Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации / С. В. Далецкий, О. Я. Деркач, А. Н. Петров. – М. : Воздушный транспорт, 2002. – 216 с.
107. ОСТ 54-1-283.02-94 «Услуги, предоставляемые пассажирам в аэропортах». – М., 1995.
108. Руководство по аэропортовому обслуживанию. ИАТА. Документ АНМ 803. 28th Edition. – 2008.
109. Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М. : Наука, 1987.
110. Kazda, A. Airport design and operation / A. Kazda, R. E. Caves. – Elsevier, 2007.
111. Annual Traffic Report 2008. Munich Airport (www.munich-airport.de).

Владимир Алексеевич Романенко

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭРОПОРТОВ
В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО
АВИАТРАНСПОРТНОГО РЫНКА**

Монография

*Редактор Л.Ф. Васильева
Верстка Е.П. Питропова
Дизайн обложки Е.П. Питропова*

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Печать оперативная. Подписано в печать 14.05.2010
Усл. п.л. 14,18 (15,25). Усл. изд. л. 14,70
Тираж 500 экз. Заказ № 6562
Гарнитура Times New Roman, Kudrashov

ООО «Издательство АсГард»
член Ассоциации книгоиздателей России
443023, г. Самара, ул. Промышленности, 278
Тел./факс (846) 246-97-01, e-mail: as_gard@mail.ru

Отпечатано в ООО «Типография»
443029, г. Самара, ул. Ново-Садовая, 246-33

