

ВЫБОР СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМОВ ПРИ ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г. Л. В. Вишнякова^а, А. С. Попов^{а,*}

^аФГУП “ГосНИИАС”, Москва, Россия

*e-mail: andrey.popov@gosniias.ru

Поступила в редакцию 21.08.2020 г.

После доработки 30.06.2021 г.

Принята к публикации 26.07.2021 г.

Представлена задача поиска наилучших путей обеспечения эффективного и безопасного трафика воздушных судов на основе применения методов математического компьютерного моделирования. Рассматривается выбор одного из альтернативных вариантов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. Предложены постановка задачи и группы показателей эффективности для различных заинтересованных лиц в использовании структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, на основе которых формируется критерий эффективности. Каждая группа представлена количественными показателями, которые могут быть вычислены с помощью компьютерного математического моделирования. Определена структура воздушного пространства и инфраструктура аэродрома в виде векторов, состоящих из множества элементов, таких, как: сеть воздушных трасс, секторы диспетчерского управления, маршруты прибытия и вылета и др. Представлена математическая постановка задачи многомерной условной оптимизации с учетом предложенных ограничений и условий применения, в которых функционируют рассматриваемые варианты структуры воздушного пространства. Дано описание математических моделей и алгоритмы расчета показателей. Приведены примеры решения исследовательских задач с использованием методов компьютерного моделирования на базе комплекса имитационного моделирования системы организации воздушного движения, который предназначен для оценки структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.

DOI: 10.31857/S0002338821060172

Введение. Система организации и управления воздушным движением (УВД) – сложная система, в которой присутствует большое число взаимосвязанных элементов, взаимодействующих между собой в процессе ее функционирования [1]. Основной целью данной системы, согласно Глобальному аэронавигационному плану, является обеспечение качественного и эффективного обслуживания полетов воздушных судов (ВС) с соблюдением требуемого уровня безопасности выполнения полетов [2]. Как и все сложные системы, система организации воздушным движением (ОрВД) имеет свои показатели качества функционирования, среди которых: безопасность, регулярность и эффективность. Повышение эффективности ее функционирования может быть достигнуто за счет:

строительства инфраструктуры – взлетно-посадочных полос (ВПП), новых терминалов, радиотехнического обеспечения, командно-диспетчерских пунктов, новых центров автоматизированного УВД;

совершенствования структуры воздушного пространства (ВП) и повышения эффективности использования инфраструктуры аэродрома – оптимизация сети воздушных трасс (ВТ), создание маршрутов зональной навигации (РВН – performance-based navigation) как в верхнем ВП, так и в диспетчерской зоне района аэродрома, повышение эффективности выполнения операций на поверхности аэродрома;

обучения и повышения квалификации диспетчерского состава – внедрение новых тренажеров, разработка технологий и методик обучения диспетчеров;

совершенствования технологических процессов – внедрение системы совместного согласованного принятия решений (CDM – collaborative decision-making) как на аэродроме, так и при УВД в верхнем ВП и в диспетчерской зоне района аэродрома, интеграция процессов планирования в ВП (NOP – network operation plan) и на аэродроме (AOP – airport operation plan), распространение информации всем участникам процесса организации и УВД в рамках инициативы по гармонизации обмена данными (SWIM – system wide information management);

систем поддержки принятия решения – внедрения систем управления прилетающими и вылетающими потоками ВД (AMAN/DMAN – arrival manager/departure manager), а также системы управления движением на поверхности аэродрома (A-SMGCS – advanced surface management guidance and control system), интеграция средств поддержки диспетчера при обнаружении и разрешении конфликтных ситуаций в автоматизированную систему УВД (MTCD – medium-term conflict detection и CORA – conflict resolution assistant);

внедрения перспективных бортовых приложений – процедур: обнаружение конфликтов – (CD – conflict detection), автоматическое разрешение конфликтов (ACM – automatic collision management), ситуационная осведомленность об обстановке на поверхности аэродрома (ASAS – airborne separation assurance systems), поддержка вертикального эшелонирования на маршруте (ITP – in-trail procedure).

Рассмотренные факторы, позволяющие повысить эффективность функционирования системы ОрВД, могут применяться как отдельно – последовательное внедрение, так и параллельно. Однако во втором случае требуется синхронизация процессов внедрения. В Российской Федерации (РФ) организована и проводится федеральная целевая программа “Модернизация Единой системы ОрВД Российской Федерации” [3].

В статье рассмотрен один из перечисленных выше факторов – совершенствование структуры ВП и использования инфраструктуры аэродрома. Задача состоит в выборе наилучшего варианта структуры ВП и варианта инфраструктуры аэродрома из ряда альтернативных вариантов, построенных специалистами с учетом соответствующих нормативных документов.

1. Постановка задачи поиска оптимальной структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. 1.1. Показатели эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома. В настоящее время в Международной организации гражданской авиации ИКАО (ICAO – international civil aviation organization) принят подход оценки функционирования системы ОрВД, основанный на глобальных характеристиках [4]. В целях гармонизации и унификации ИКАО были предложены ключевые области показателей, которые приведены в Глобальной эксплуатационной концепции ОрВД [5]. В [6] представлены показатели, рекомендуемые ИКАО для оценки функционирования системы ОрВД в рамках ключевых областей показателей. Международные организации провайдеров аэронавигационных услуг организации аэронавигационного обслуживания гражданской авиации (CANSO – civil air navigation services organization) и ассоциации управления воздушным движением (ATCA – air traffic control association) поддержали инициативы ИКАО и попробовали конкретизировать области до показателей и метрик [7, 8]. Данный подход можно распространить и на задачу оценки использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Для этого необходимо определить области показателей, по которым возможно провести количественный анализ, а также выбрать метрики для сравнительного анализа вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Основными заинтересованными лицами при внедрении или совершенствовании структуры ВП и инфраструктуры аэродрома являются: пользователи ВП, провайдеры аэронавигационных услуг, операторы аэропортов, а также авиационные власти. Пользователями ВП выступают: авиакомпании, выполняющие коммерческие перевозки пассажиров и грузов, авиация общего назначения, экспериментальная авиация, операторы беспилотных летательных аппаратов и др. Провайдером аэронавигационных услуг в РФ является ФГУП “Госкорпорация по ОрВД”, которая предоставляет аэронавигационное и полетно-информационное обслуживание в разных классах ВП. Провайдер на местах представляют диспетчеры, которые осуществляют контроль и УВД и движением ВС по поверхности аэродрома. Операторы аэропортов отвечают за обслуживание ВС на поверхности аэродрома. Авиационные власти являются регулирующим органом и занимаются координацией процессов в системе ОрВД.

Эффективность использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома для каждой группы заинтересованных лиц измеряется своей группой показателей. Так, например, для авиакомпаний приоритетны пунктуальность, экономическая эффективность полетов, эффективность по времени полета и протяженности маршрута, минимизация задержек и т.д. Для провайдера аэронавигационных услуг важны также безопасность выполнения полетов, загруженность дис-

петчерского персонала, обеспечение баланса между спросом на авиаперевозки и пропускной способностью системы, оптимизация количества персонала. Аэропорты стремятся обслужить как можно больше ВС в единицу времени, таким образом, приоритетным является пропускная способность аэродромов (ПА). Авиационные власти в свою очередь, как и провайдер аэронавигационных услуг, следят за уровнем безопасности выполнения полетов и координируют действия всех участников системы ОрВД.

Необходимо отметить, что показатели из разных групп не только взаимосвязаны, но и противоречивы. Улучшения показателей для одной группы заинтересованных лиц могут приводить к ухудшению показателей в рамках другой группы. Оптимизация траекторий, например, в зонах интенсивного ВД может приводить к перегрузке диспетчерского персонала и снижению уровня безопасности полетов. Таких примеров можно привести множество. Следовательно, задача выбора одного из альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома является задачей обеспечения баланса между разными группами взаимосвязанных показателей. Выбор показателей и метрик для анализа каждого варианта – очень важный вопрос при постановке задачи оценки сформированных вариантов.

Провести анализ и выбрать вариант по одному показателю достаточно сложно из-за описанных выше интересов различных участников в системе ОрВД. Поэтому структуру ВП и инфраструктуру аэродрома как часть аэронавигационной системы можно определить рядом характеристик – показателей эффективности функционирования. Необходимо построить вектор, который будет задавать по разным показателям каждый исследуемый вариант.

Предлагается критерий эффективности при выборе одного из альтернативных вариантов определять следующим вектором:

$$W = \begin{pmatrix} W_a \\ W_6 \\ W_{\text{ОрВД}} \\ W_{\text{ПВП}} \\ W_{\text{ПА}} \\ W_{\text{ср}} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где каждая группа показателей отражает интересы участников процессов в системе ОрВД.

С точки зрения пользователей ВП определена следующая группа:

показатели, характеризующие эксплуатационную эффективность для пользователей ВП (авиакомпаний) W_a , в том числе затрат ресурсов пользователей в полете по маршрутам обслуживания воздушного движения (ОВД), в районе аэродрома и при движении ВС по поверхности аэродрома.

Интересы авиационных властей отражают следующие группы показателей:

безопасность выполнения полетов W_6 ;

окружающая среда $W_{\text{ср}}$.

Для провайдеров аэронавигационных услуг определены две группы показателей:

эффективность использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$;

пропускная способность воздушного пространства (ПВП) и сложность УВД в секторе $W_{\text{ПВП}}$.

Показатели для операторов аэропортов сформулированы в следующей группе:

ПА $W_{\text{ПА}}$.

При выборе варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома каждую группу показателей требуется максимизировать или минимизировать. Например, издержки, вызванные отклонением ВС от оптимальной траектории, которые входят в группу показателей для пользователей ВП, должны быть минимизированы, как и показатели безопасности. Такие группы показателей,

как ПА и ПВП, должны быть, наоборот, максимизированы. Таким образом, значения показателей в каждой группе необходимо максимально увеличить или уменьшить:

$$\begin{cases} W_a \rightarrow \min, \\ W_6 \rightarrow \min, \\ W_{\text{ОрВД}} \rightarrow \min, \\ W_{\text{ПВП}} \rightarrow \max, \\ W_{\text{ПА}} \rightarrow \max, \\ W_{\text{ср}} \rightarrow \min. \end{cases} \quad (1.2)$$

Определим далее подробнее каждый из этих показателей, представляющий собой в свою очередь также вектор показателей, из каких компонент они состоят.

Вектор W_a задается следующим набором показателей:

$$W_a = (W_{\text{а.зад}}, W_{\text{а.топл.эф}}, W_{\text{а.налет}}, W_{\text{протяж.марш}}, W_{\text{ортодр}}, W_{\text{врем.рул}})^T, \quad (1.3)$$

где $W_{\text{а.зад}}$ – задержки ВС в воздухе и на аэродроме, $W_{\text{а.топл.эф}}$ – расход топлива при полете и движении ВС по аэродрому, $W_{\text{а.налет}}$ – время полета ВС, $W_{\text{протяж.марш}}$ – протяженность маршрута, $W_{\text{ортодр}}$ – ортодромичность маршрутов, $W_{\text{врем.рул}}$ – время руления ВС по поверхности аэродрома.

Вектор W_6 определяется следующим набором:

$$W_6 = (W_{\text{ПКС}}, W_{\text{инт.ВПП}}, W_{\text{ННЭ}}, W_{\text{риски}}, W_{\text{конфл.схем}})^T, \quad (1.4)$$

где $W_{\text{ПКС}}$ – количество потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС), $W_{\text{инт.ВПП}}$ – количество нарушений временных интервалов на ВПП, $W_{\text{ННЭ}}$ – количество нарушений норм эшелонирования (ННЭ), $W_{\text{риски}}$ – оценки рисков, $W_{\text{конфл.схем}}$ – конфликтность схем маневрирования.

Вектор $W_{\text{ОрВД}}$ определяется следующим набором показателей:

$$W_{\text{ОрВД}} = (W_{\text{загр.уч.ВТ}}, W_{\text{загр.точек.ВП}}, W_{\text{эш}}, W_{\text{исп.ЗО}}, W_{\text{МС}})^T, \quad (1.5)$$

где $W_{\text{загр.уч.ВТ}}$ – неравномерность загруженности участков ВТ, $W_{\text{загр.точек.ВП}}$ – неравномерность загруженности точек ВП, $W_{\text{эш}}$ – использование ВС неэффективных эшелонов, $W_{\text{исп.ЗО}}$ – применение зон ожидания (ЗО), $W_{\text{МС}}$ – неэффективность использования мест стоянок (МС).

Вектор $W_{\text{ПВП}}$ – группа показателей, характеризующая ПВП и сложность УВД в секторе:

$$W_{\text{ПВП}} = (W_{\text{врем.загр.дисп}}, W_{\text{сек}}, W_{\text{одновр}})^T, \quad (1.6)$$

где $W_{\text{врем.загр.дисп}}$ – равномерность временной загруженности диспетчера, $W_{\text{сек}}$ – загрузка секторов без превышения НПС сектора, $W_{\text{одновр}}$ – количество ВС одновременно под управлением диспетчера без превышения временной загруженности диспетчера.

Вектор $W_{\text{ПА}}$ – группа показателей, характеризующая ПА:

$$W_{\text{ПА}} = (W_{\text{ВПО}}, W_{\text{пересеч}})^T, \quad (1.7)$$

где $W_{\text{ВПО}}$ – количество взлетно-посадочных операций (ВПО), $W_{\text{пересеч}}$ – количество аэродромных операций без пересечения ВПП.

Вектор $W_{\text{ср}}$ – группа показателей, характеризующая окружающую среду:

$$W_{\text{ср}} = (W_{\text{шум}}, W_{\text{CO}_2})^T, \quad (1.8)$$

где $W_{\text{шум}}$ – шумовые воздействия, W_{CO_2} – выбросы вредных веществ.

1.2. Группы параметров, определяющие показатели эффективности. Очевидно, что эффективность использования ВП и аэродрома зависит от условий их применения: интенсивности ВД, метеоусловий, ограничений, накладываемых на ВП (в том числе и временных), технической оснащенности рабочих мест диспетчера. Критерий эффективности для

выбора структуры ВП и инфраструктуры аэродрома можно представить в виде следующей функции:

$$\mathbf{W} = W(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}), \quad (1.9)$$

где заданы аргументы функции:

структура ВП и инфраструктура аэродрома \bar{s} ;

алгоритмы управления и средства поддержки диспетчера при УВД и движением ВС по поверхности аэродрома \bar{u} ;

и параметры:

полетные данные, включающие потоки ВС и их летно-технические характеристики (ЛТХ) \bar{y} ;

условия выполнения полетов, характеризующие метеорологическую обстановку и ограничения использования ВП $\bar{\omega}$;

технология работы диспетчера \bar{v} .

Так как показатель эффективности состоит из групп ключевых показателей, то функцию \mathbf{W} можно записать так:

$$\mathbf{W} = W(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) = \begin{pmatrix} W_a(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_6(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ОрВД}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ПА}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ср}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

где показатели по каждой из шести групп $\mathbf{W} = (W_a, W_6, W_{\text{ОрВД}}, W_{\text{ПВП}}, W_{\text{ПА}}, W_{\text{ср}})^T$ рассчитываются на основе компьютерного математического моделирования исследуемых вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

1.2.1. Структура ВП и инфраструктура аэродрома. Структура ВП в зависимости от задачи может рассматриваться в масштабе как сектора диспетчерского управления, когда исследуются вопросы снижения нагрузки на диспетчера, так и в масштабе нескольких укрупненных центров, когда разрабатывается новая структура ВП. Если проводятся исследования узлового диспетчерского района, где происходит влияние прибывающих и вылетающих потоков ВД из разных аэродромов друг на друга, то в задаче могут рассматриваться сразу несколько аэродромов. На рис. 1 представлен пример структуры ВП РФ.

Рассматриваются альтернативные варианты структуры \bar{s} ВП и инфраструктуры аэродрома, которые характеризуются парой векторов $\{\bar{s}_{\text{ВП}}, \bar{s}_a\}$, где вектор $\bar{s}_{\text{ВП}}$ – структура ВП, \bar{s}_a – инфраструктура аэродрома. Представим структуру ВП в виде набора элементов:

$$\bar{s}_{\text{ВП}} = (\bar{s}_{\text{сек}}, \bar{s}_{\text{ВТ}}, \bar{s}_{\text{SID}}, \bar{s}_{\text{STAR}}, \bar{s}_{\text{app}}), \quad (1.11)$$

где $\bar{s}_{\text{сек}}$ – структура секторов УВД, $\bar{s}_{\text{ВТ}}$ – сеть ВТ, \bar{s}_{SID} – маршруты вылета моделируемого(ых) аэродрома(ов) (SID – standard instrument departure), \bar{s}_{STAR} – маршруты прибытия моделируемого(ых) аэродрома(ов) (STAR – standard terminal arrival), \bar{s}_{app} – маршруты захода на посадку (approach) моделируемого(ых) аэродрома(ов).

Структура секторов $\bar{s}_{\text{сек}}$ представляет собой вектор из секторов диспетчерского управления в рассматриваемой структуре ВП:

$$\bar{s}_{\text{сек}} = (s_{1\text{сек}}, s_{2\text{сек}}, \dots, s_{i\text{сек}}, \dots, s_{N_{\text{сек}}}), \quad (1.12)$$

где $\bar{s}_{\text{сек}} \in S_{\text{ВП}}$, $i = \overline{1, N_{\text{сек}}}$, $N_{\text{сек}}$ – количество секторов в структуре ВП, $S_{\text{ВП}}$ – исследуемое ВП.

Каждый сектор $s_{i\text{сек}}$ характеризуется набором элементов:

$$s_{i\text{сек}} = (s_{i\text{сек.верт.гран}}, s_{i\text{сек.гориз.гран}}, s_{i\text{сек.норм}}, s_{i\text{сек.регл}}, s_{i\text{сек.хар}}), \quad (1.13)$$

где $s_{i\text{сек.верт.гран}}$ – вертикальные границы сектора, $s_{i\text{сек.гориз.гран}}$ – горизонтальные границы сектора, $s_{i\text{сек.норм}}$ – НПС сектора, $s_{i\text{сек.регл}}$ – регламент работы сектора, $s_{i\text{сек.хар}}$ – характеристики работы сектора.



Рис. 1. Структура ВП

Сеть ВТ $\bar{s}_{\text{ВТ}}$, представляющая собой вектор ВТ:

$$\bar{s}_{\text{ВТ}} = (s_{1\text{ВТ}}, s_{2\text{ВТ}}, \dots, s_{j\text{ВТ}}, \dots, s_{N_{\text{ВТ}}}), \quad (1.14)$$

где $\bar{s}_{\text{ВТ}} \in S_{\text{ВП}}$, $j = \overline{1, N_{\text{ВТ}}}$, $N_{\text{ВТ}}$ – количество ВТ в структуре ВП.

ВТ $s_{j\text{ВТ}}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{j\text{ВТ}} = (s_{j\text{точки.ВП}}, s_{j\text{участки.ВТ}}, s_{j\text{эш}}, s_{j\text{огр}}, s_{j\text{ЗО ВВП}}), \quad (1.15)$$

где $s_{j\text{точки.ВП}}$ – точки ВП, $s_{j\text{участки.ВТ}}$ – участки ВТ, $s_{j\text{эш}}$ – разрешенный для полетов диапазон высот (эшелон), $s_{j\text{огр}}$ – ограничение на использование участков ВТ (по согласованию с органами УВД), $s_{j\text{ЗО ОВД}}$ – ЗО на маршруте ОВД.

Маршруты вылета представляют собой вектор маршрутов \bar{s}_{SID} :

$$\bar{s}_{\text{SID}} = (s_{1\text{SID}}, s_{2\text{SID}}, \dots, s_{k\text{SID}}, \dots, s_{N_{\text{SID}}}), \quad (1.16)$$

где $\bar{s}_{\text{SID}} \in S_{\text{ВП}}$, $k = \overline{1, N_{\text{SID}}}$, N_{SID} – количество маршрутов вылета моделируемого(ых) аэродрома(ов). Каждый маршрут $s_{k\text{SID}}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{k\text{SID}} = (s_{k\text{SID WP}}, s_{k\text{SID route}}, s_{k\text{SID хар}}), \quad (1.17)$$

где $s_{k\text{SID WP}}$ – точки пути (way point – WP), которые состоят из контрольных или промежуточных точек района аэродрома, $s_{k\text{SID route}}$ – участки маршрута вылета, $s_{k\text{SID хар}}$ – параметры, характеризующие использование маршрута при выполнении полетов ВС.

Маршруты прибытия представляют следующий вектор \bar{s}_{STAR} :

$$\bar{s}_{\text{STAR}} = (s_{1\text{STAR}}, s_{2\text{STAR}}, \dots, s_{j\text{STAR}}, \dots, s_{N_{\text{STAR}}}), \quad (1.18)$$

где $\bar{s}_{STAR} \in S_{ВП}$, $l = \overline{1, N_{STAR}}$, N_{STAR} – количество маршрутов прибытия моделируемого(ых) аэродрома(ов). Каждый маршрут s_{lSTAR} характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{lSTAR} = (s_{lSTAR WP}, s_{lSTAR route}, s_{lSTAR хар}, s_{lSTAR ЗО}), \quad (1.19)$$

где $s_{lSTAR WP}$ – точки пути, которые состоят из контрольных или промежуточных точек района аэродрома, $s_{lSTAR route}$ – участки маршрута прибытия, $s_{lSTAR хар}$ – параметры, характеризующие использование маршрута при прилете ВС на аэродром, $s_{lSTAR ЗО}$ – ЗО на маршруте прибытия.

Маршруты захода на посадку представляют вектор \bar{s}_{app} :

$$\bar{s}_{app} = (s_{1app}, s_{2app}, \dots, s_{rapp}, \dots, s_{N_{app}}), \quad (1.20)$$

где $\bar{s}_{app} \in S_{ВП}$, $r = \overline{1, N_{app}}$, N_{app} – количество маршрутов захода на посадку моделируемого(ых) аэродрома(ов). Каждый маршрут $s_{r,app}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{r,app} = (s_{r,app WP}, s_{r,app route}, s_{r,app хар}), \quad (1.21)$$

где $s_{r,app WP}$ – точки пути, которые состоят из контрольных или промежуточных точек района аэродрома, $s_{r,app route}$ – участки маршрута захода на посадку, $s_{r,app хар}$ – параметры, характеризующие использование маршрута при прилете ВС на аэродром.

Далее определим инфраструктуру аэродрома \bar{s}_a . Вектор, который характеризует инфраструктуру аэродрома:

$$\bar{s}_a = (\bar{s}_{ВПП}, \bar{s}_{РД}, \bar{s}_{МС}), \quad (1.22)$$

где $\bar{s}_{ВПП}$ – система ВПП моделируемого(ых) аэродрома(ов), $\bar{s}_{РД}$ – сеть рулежных дорожек (РД) моделируемого(ых) аэродрома(ов), $\bar{s}_{МС}$ – МС моделируемого(ых) аэродрома(ов).

Система ВПП $\bar{s}_{ВПП}$ определяется вектором:

$$\bar{s}_{ВПП} = (s_{1ВПП}, s_{2ВПП}, \dots, s_{tВПП}, \dots, s_{N_{ВПП}}), \quad (1.23)$$

где $\bar{s}_{ВПП} \in S_a$, $t = \overline{1, N_{ВПП}}$, $N_{ВПП}$ – количество ВПП аэродромов моделируемого(ых) аэродрома(ов), S_a – моделируемый аэродром. Каждая ВПП $s_{tВПП}$ характеризуются следующим набором элементов:

$$s_{tВПП} = (s_{t тип ВПП}, s_{t геом.разм. ВПП}, s_{t хар.исп. ВПП}), \quad (1.24)$$

где $s_{t тип ВПП}$ – тип покрытия ВПП (асфальтная, грунтовая и т.д.), $s_{t геом.разм. ВПП}$ – геометрические размеры ВПП, $s_{t хар.исп. ВПП}$ – характеристики использования ВПП.

Сеть РД $\bar{s}_{РД}$ определяется вектором:

$$\bar{s}_{РД} = (s_{1РД}, s_{2РД}, \dots, s_{pРД}, \dots, s_{N_{РД}}), \quad (1.25)$$

где $\bar{s}_{РД} \in S_a$, $p = \overline{1, N_{РД}}$, $N_{РД}$ – количество РД моделируемого(ых) аэродрома(ов). Каждая РД $s_{pРД}$ определяется следующим набором элементов:

$$s_{pРД} = (s_{p тип РД}, s_{p геом.разм. РД}, s_{p хар.исп. РД}), \quad (1.26)$$

где $s_{p тип РД}$ – тип РД, характеризующий предназначение (магистральная РД, съезд с ВПП и т.д.), $s_{p геом.разм. РД}$ – геометрические размеры РД, $s_{p хар.исп. РД}$ – характеристики использования РД. МС $\bar{s}_{МС}$ определяются вектором:

$$\bar{s}_{МС} = (s_{1МС}, s_{2МС}, \dots, s_{qМС}, \dots, s_{N_{МС}}), \quad (1.27)$$

где $\bar{s}_{МС} \in S_a$, $q = \overline{1, N_{МС}}$, $N_{МС}$ – количество МС на моделируемом(ых) аэродроме(ах). Каждое МС $s_{qМС}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{qМС} = (s_{q обор.МС}, s_{q тип.МС}, s_{q исп.тип.ВС}, s_{q сп.зан}), \quad (1.28)$$

где $s_{q\text{обор.МС}}$ – наличие оборудования (телетрапа) на МС, $s_{q\text{тип.МС}}$ – тип МС (сквозная, конечная), $s_{q\text{исп.тип.ВС}}$ – возможность использования МС различными типами ВС, $s_{q\text{сп.зан}}$ – способ занятия МС (на собственных двигателях, буксировка).

1.2.2. Условия использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Выбор одного из альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома производится при задании условий применения вариантов, возможно, в виде множества.

Полетные данные:

$$\bar{y} = (y_{\text{ЛТХ ВС}}, y_{\text{планы.полетов}}), \tag{1.29}$$

где $y_{\text{ЛТХ ВС}}$ – ЛТХ моделируемых ВС ($y_{\text{ЛТХ ВС}} \in Y_{\text{ЛТХ ВС}}$, где $Y_{\text{ЛТХ ВС}}$ – множество ЛТХ ВС).

Моделируемый(ые) поток(и) ВД $y_{\text{планы.полетов}}$. Поток ВД представляет собой множество ВС, которые характеризуются планами полетов, а также ЛТХ ($y_{\text{планы.полетов}} \in Y_{\text{планы.полетов}}$, где $Y_{\text{планы.полетов}}$ – множество потоков ВД).

Условия выполнения полетов:

$$\bar{\omega} = (\omega_{\text{метео}}, \omega_{\text{ОИВП}}), \tag{1.30}$$

где $\omega_{\text{метео}}$ – моделируемые метеоусловия ($\omega_{\text{метео}} \in \Omega_{\text{метео}}$, где $\Omega_{\text{метео}}$ – множество метеоусловий), $\omega_{\text{ОИВП}}$ – моделируемые ограничения использования воздушного пространства (ОИВП) ($\omega_{\text{ОИВП}} \in \Omega_{\text{ОИВП}}$, где $\Omega_{\text{ОИВП}}$ – множество ОИВП).

Технология работы диспетчера:

$$\bar{v} = (v_{\text{команды}}, v_{\text{алгоритм}}), \tag{1.31}$$

где $v_{\text{команды}}$ – команды, которые диспетчер применяет при разрешении ПКС, $v_{\text{алгоритм}}$ – алгоритмы, характеризующие последовательность применения команд при разрешении ПКС.

Алгоритмы управления потоками ВС:

$$u = (u_{\text{упр.взд}}, u_{\text{упр.зем}}), \tag{1.32}$$

где $u_{\text{упр.взд}}$ – алгоритмы управления и средства поддержки диспетчера при управлении потоком ВД (“воздух”), $u_{\text{упр.зем}}$ – алгоритмы управления и средства поддержки диспетчера при управлении движением ВС по поверхности аэродрома (“земля”).

1.3. Система ограничений по показателям эффективности. В качестве ограничений задаются целевые значения показателей, которым должен удовлетворять выбранный вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома:

$$\bar{c} = (c_a, c_b, c_{\text{ПВП}}, c_{\text{ПА}}, c_{\text{окр.сп}}), \tag{1.33}$$

где c_a – средняя задержка при вылете и прибытии в аэропорт, c_b – целевые значения уровня безопасности при выполнении полетов (количество ПКС, требуемый уровень безопасности при оценке рисков инцидентов), $c_{\text{ПВП}}$ – норматив пропускной способности секторов УВД, коэффициент временной загруженности диспетчеров, $c_{\text{ПА}}$ – заданная целевая ПА, $c_{\text{окр.сп}}$ – заданный уровень шумовых воздействий, вредных выбросов в окружающую среду.

1.3.1. Ограничения по показателям эффективности для пользователей ВП. Для пользователей ВП один из главных показателей – пунктуальность. Следовательно, ограничением при моделировании является средняя задержка, которая характеризуется вектором $\bar{c}_{\text{ср.задер}} = (\bar{c}_{\text{задер.выл}}, \bar{c}_{\text{задер.прил}})$, где $\bar{c}_{\text{задер.выл}}$ – вектор, состоящий из показателей средней задержки на вылете из моделируемого(ых) аэродрома(ов):

$$\bar{c}_{\text{задер.выл}} = (c_{\text{задер.выл1a}}, c_{\text{задер.выл2a}}, \dots, c_{\text{задер.выл1a}}, \dots, c_{\text{задер.выл } N_a}), \tag{1.34}$$

где $c_{\text{задер.прил}}$ – вектор, состоящий из показателей средней задержки на прилете на моделируемый(ые) аэродром(ы):

$$\bar{c}_{\text{задер.прил}} = (c_{\text{задер.прил}1a}, c_{\text{задер.прил}2a}, \dots, c_{\text{задер.прил}ta}, \dots, c_{\text{задер.прил}Na}), \quad (1.35)$$

где $t = \overline{1, N_a}$, N_a – количество моделируемых аэродромов, $c_{\text{задер.выл}ta}$ – средняя задержка на вылете из t -го аэродрома, $c_{\text{задер.прил}ta}$ – средняя задержка на прилете на t -й аэродром.

Ограничения для пользователей ВП записываются системой неравенств:

$$\begin{cases} c_{\text{задер.выл}} = B_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{задер.выл}}^*, \\ c_{\text{задер.прил}} = B_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{задер.прил}}^*, \end{cases} \quad (1.36)$$

где $c_{\text{задер.выл}}^*$ – допустимая задержка на вылете из моделируемого(ых) аэродрома(ов), $c_{\text{задер.прил}}^*$ – допустимая задержка на прилете на моделируемый(ые) аэродром(ы).

В общем виде ограничения по задержкам можно представить как:

$$c_{\text{ср.задер}} = B(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{задер}}^*, \quad (1.37)$$

где $c_{\text{задер}}^*$ – допустимая задержка на вылете и прилете из/в моделируемый(ые) аэродром(ы).

1.3.2. Ограничения по показателям безопасности. Ограничения по показателям безопасности выполнения полетов характеризуются значением c_6 , который представляет рассчитанный уровень безопасности полетов в моделируемой структуре ВП и определяется неравенством

$$c_6 = F(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{TLS}}^*, \quad (1.38)$$

где c_{TLS}^* – целевой уровень безопасности полетов (target level safety – TLS).

1.3.3. Ограничения по показателям ПВП. Ограничения по ПВП характеризуются вектором $\bar{c}_{\text{ПВП}} = (\bar{c}_{\text{ПВП}1}, \bar{c}_{\text{ПВП}2})$, где $\bar{c}_{\text{ПВП}1}$ – вектор показателей интенсивности ВД в секторах диспетчерского управления:

$$\bar{c}_{\text{ПВП}1} = (c_{\text{загр.1сек}}, c_{\text{загр.2сек}}, \dots, c_{\text{загр.}i\text{сек}}, \dots, c_{\text{загр.}N\text{сек}}), \quad (1.39)$$

$c_{\text{ПВП}2}$ – вектор временной загрузки диспетчерских позиций:

$$\bar{c}_{\text{ПВП}2} = (c_{\text{врем.загр.1сек}}, c_{\text{врем.загр.2сек}}, \dots, c_{\text{врем.загр.}i\text{сек}}, \dots, c_{\text{врем.загр.}N\text{сек}}), \quad (1.40)$$

где $i = \overline{1, N_{\text{сек}}}$, $c_{\text{загр.}i\text{сек}}$ – интенсивность ВД в i -м секторе ОВД, $c_{\text{врем.загр.}i\text{сек}}$ – временная загрузка диспетчера в i -м секторе ОВД.

Пропускная способность в части ограничений представляется следующей системой неравенств:

$$\begin{cases} c_{\text{ПВП}1} = \Phi_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{НПС}}^*, \\ c_{\text{ПВП}2} = \Phi_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{КЗ}}^*, \end{cases} \quad (1.41)$$

где $c_{\text{НПС}}^*$ – заданные или рассчитанные нормативы пропускной способности (НПС) секторов, $c_{\text{КЗ}}^*$ – допустимый временной коэффициент загрузки (КЗ) диспетчера.

1.3.4. Ограничения по показателям ПА. В части ПА ограничением является $c_{\text{ПА}}$ – количество ВПО на моделируемом(ых) аэродроме(ах) и обозначается вектором:

$$\bar{c}_{\text{ПА}} = (c_{\text{ВПО}1a}, c_{\text{ВПО}2a}, \dots, c_{\text{ВПО}ta}, \dots, c_{\text{ВПО}Na}), \quad (1.42)$$

где $t = \overline{1, N_a}$, $c_{\text{ВПО}ta}$ – количество ВПО на t -м аэродроме.

Ограничения по ПА характеризуются следующим неравенством:

$$c_{\text{ПА}} = R(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \geq c_{\text{ВПО}}^*, \quad (1.43)$$

где $c_{\text{ВПО}}^*$ – заданное целевое количество ВПО на моделируемом(ых) аэродроме(ах), которое может быть определено, как минимальное допустимое количество операций.

1.3.5. Ограничения по показателям влияния на окружающую среду. Ограничения по влиянию на окружающую среду является $c_{\text{шум}}$ – рассчитываемый уровень шумовых воздействий в районе моделируемых аэродромов:

$$\bar{c}_{\text{шум}} = (c_{\text{шум}1a}, c_{\text{шум}2a}, \dots, c_{\text{шум}ta}, \dots, c_{\text{шум}N_a}), \tag{1.44}$$

где $t = \overline{1, N_a}$, $c_{\text{шум}ta}$ – уровень в районе t -го аэродрома.

Ограничение находим следующим образом:

$$c_{\text{шум}} = U(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{шум}}^*, \tag{1.45}$$

где $c_{\text{шум}}^*$ – заданный уровень шумовых воздействий в районе моделируемых аэродромов. Уровни определяются ГОСТами и нормативными документами [9], порядок их расчета рекомендуется, в том числе, и ИКАО [10].

1.4. Математическая постановка задачи. Необходимо решить задачу многомерной условной оптимизации, где по каждой группе показателей требуется оптимизировать (максимизировать или минимизировать) критерий.

Задача формулируется следующим образом: при заданных алгоритмах управления потоками ВС и средствах поддержки диспетчера u найти наилучший вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома $\hat{s}^* = (\hat{s}_{\text{ВП}}, \hat{s}_a)$ среди альтернативных вариантов, при котором показатели обращаются в максимум/минимум, с учетом накладываемых ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_a = W_1(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ W_6 = W_2(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ W_{\text{ОрВД}} = W_3(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ W_{\text{ПВП}} = W_4(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \rightarrow \max_s^*, \\ W_{\text{ПА}} = W_5(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \rightarrow \max_s^*, \\ W_{\text{ср}} = W_6(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ c_a = B(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{задер}}^*, \\ c_6 = F(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{ТЛС}}^*, \\ c_{\text{ПВП1}} = \Phi_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{НПС}}^*, \\ c_{\text{ПВП2}} = \Phi_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{КЗ}}^*, \\ c_{\text{ПА}} = R(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \geq c_{\text{ВПО}}^*, \\ c_{\text{шум}} = U(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{w}, \bar{v}) \leq c_{\text{шум}}^*, \end{array} \right. \tag{1.46}$$

где \rightarrow^* – операция оптимизации вектора по каждой группе показателей.

1.5. Алгоритм решения многокритериальной задачи выбора наилучшего варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Данная задача представляет собой задачу структурного синтеза, которая для сложных технических систем (система ОрВД является сложной организационно-технической системой) решается на практике путем выбора из ограниченного ряда спроектированных вариантов структуры на основе оценки их эффективности.

Пусть задано дискретное множество $S = \{\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j, \dots, \bar{s}_M\}$ спроектированных альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, удовлетворяющих ограничениям, заданным далее, где $\bar{s}_j = (\bar{s}_{\text{ВП}j}, \bar{s}_{aj})$, M – число разработанных специалистами по организации ВП

вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Каждый вариант $\bar{s} \in S$ характеризуется большим количеством компонентов (сеть ВТ, секторы диспетчерского управления, маршруты вылета, прибытия, захода на посадку и т.д.) и оценивается по показателям, которые могут противоречить друг другу. Таким образом, многокритериальная задача оптимизации сводится к задаче сравнения вариантов между собой и выбора наилучшего варианта по заданным частным критериям. Данная задача может быть решена двумя способами.

Первый способ заключается в расчете показателей по каждой группе и определении множества решений, оптимальных по Парето. Тогда решением будут варианты структуры ВП и инфраструктуры аэродрома $\bar{s}^* \in S$, если не существует другого решения $\bar{s} \in S$ среди анализируемых альтернатив, значения показателей эффективности которых $W_i(\bar{s})$ при переходе к этим вариантам для любого i -го показателя смогли бы превзойти значения показателей эффективности $W_i(\bar{s}^*)$ выбранного решения из множества решений, оптимальных по Парето, где $i = \overline{1, N}$, N – количество частных критериев (показателей). Каждый оптимальный по Парето вариант \bar{s}^* может быть определен в виде табличного или графического представления с рассчитанными значениями по каждому показателю. Однако поскольку в данной задаче требуется найти единственный наилучший вариант структуры ВП, то по оптимальным по Парето решениям применяется экспертная оценка. Эксперты оценивают эффективные решения и определяют один из множества оптимальных по Парето вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

Другим путем является сведение задачи к решению одной или последовательности однокритериальных задач. Традиционными методами здесь выступают метод свертки критериев, оптимизация главного локального критерия, метод последовательных уступок. Метод свертки критериев применять в данном случае не представляется возможным из-за субъективности назначения заинтересованными сторонами параметров (коэффициентов) свертки. Метод главного критерия также не приемлем ввиду сложности выбора из всех показателей эффективности одного единственного критерия и назначения ограничений на другие показатели эффективности, требуемые к выполнению. Наиболее предпочтительным является использование метода последовательных уступок.

Таким образом, второй способ заключается в выборе одного оптимального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома из дискретного множества $S = \{\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j, \dots, \bar{s}_M\}$ с использованием метода последовательных уступок. При этом экспертами определяется приоритетность показателей: согласно требованиям ИКАО, наиболее важным будет показатель W_6 , за ним в порядке убывания важности следуют показатели эффективности для пользователей ВП W_a , затем показатели пропускной способности $W_{ПВП}$, $W_{ПА}$ и далее – остальные группы показателей $W_{ср}$, $W_{ОрВД}$. Поскольку показатели эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома W_6 , W_a , $W_{ПВП}$, $W_{ПА}$, $W_{ОрВД}$, $W_{ср}$ в свою очередь представляют собой векторы, то предлагается упорядочить:

блоки матрицы (1.1) по важности блока:

$$(W_6, W_a, W_{ПВП}, W_{ПА}, W_{ОрВД}, W_{ср})^T;$$

критерии каждого блока по важности, например, для первого блока, содержащего пять критериев: $W_6 = (W_{риски}, W_{ННЭ}, W_{ПКС}, W_{конфл.схем}, W_{инт.ВП})^T$, для второго блока, содержащего шесть критериев: $W_a = (W_{а.топл.эф}, W_{а.налет}, W_{протяж.марш}, W_{ортодр}, W_{а.зад}, W_{врем.рул})^T$, и так далее по остальным блокам.

Далее рассматривается алгоритм решения задачи с определенными по группам показателей приоритетами.

Шаг 1. На первом этапе решается задача выбора наилучшего решения из дискретного множества альтернативных вариантов $S = \{\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j, \dots, \bar{s}_M\}$ для наиболее важной группы показателей по безопасности выполнения полетов W_6 (первый блок):

Шаг 1.1. Среди возможных вариантов выбрать вариант (варианты) в результате решения однокритериальной задачи

$$W_{риски}(\bar{s}) \rightarrow \min,$$

где $\bar{s} \in S$. Обозначим через $W_{риски}^{\min}$ полученное минимальное значение наиболее важного критерия первой группы (оценка рисков).

Шаг 1.2. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{риски}} > 0$ по критерию $W_{\text{риски}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации

$$W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.47)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение второго по важности критерия $W_{\text{ННЭ}}^{\min}$.

Шаг 1.3. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{ННЭ}} > 0$ по критерию $W_{\text{ННЭ}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации:

$$W_{\text{ПКС}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии:

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ННЭ}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.48)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение третьего по важности критерия $W_{\text{ПКС}}^{\min}$ (количество ПКС).

Шаг 1.4. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{ПКС}} > 0$ по критерию $W_{\text{ПКС}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации:

$$W_{\text{конфл.схем}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ННЭ}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \\ W_{\text{ПКС}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ПКС}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ПКС}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.49)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение третьего по важности критерия $W_{\text{конфл.схем}}^{\min}$ (конфликтность схем маневрирования).

Шаг 1.5. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{конфл.схем}} > 0$ по критерию $W_{\text{конфл.схем}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации:

$$W_{\text{инт.ВПП}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ННЭ}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \\ W_{\text{ПКС}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ПКС}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ПКС}}, \\ W_{\text{инт.ВПП}}(\bar{s}) \leq W_{\text{инт.ВПП}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{инт.ВПП}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.50)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение третьего по важности критерия $W_{\text{инт.ВПП}}^{\min}$ (нарушений временных интервалов на ВПП).

Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{инт.ВПП}} > 0$ и сформировать вектор найденных при решении подзадач минимальных значений критериев $W_6^{\min} = (W_{\text{риски}}^{\min}, W_{\text{ННЭ}}^{\min}, W_{\text{ПКС}}^{\min}, W_{\text{конфл.схем}}^{\min}, W_{\text{инт.ВПП}}^{\min})^T$ и вектор уступок $\bar{\Delta}_6 = (\bar{\Delta}_{\text{риски}}, \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \bar{\Delta}_{\text{ПКС}}, \bar{\Delta}_{\text{конфл.схем}}, \bar{\Delta}_{\text{инт.ВПП}})^T$.

Шаг 2. Рассматривается следующая по приоритету группа показателей для эксплуатантов ВП W_a (авиакомпаний).

Аналогично процедуре, описанной на шаге 1, решается задача

$$W_a(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$W_6(\bar{s}) \leq W_6^{\min} + \bar{\Delta}_6, \quad \bar{s} \in S. \quad (1.51)$$

Знак неравенства в (1.51) здесь и далее понимается покоординатно.

В результате для группы показателей для эксплуатантов ВП формируется вектор уступок $\bar{\Delta}_a > 0$. По второй группе показателей дополнительные ограничения на выбор альтернативных решений, для которых оценка не должна превышать $W_a^{\min} + \bar{\Delta}_a$, накладываются на следующем шаге.

Шаг 3. Анализируется группа показателей по ПВП $W_{\text{ПВП}}$.

Аналогично шагам 1 и 2 решается задача максимизации по группе показателей по ПВП: $W_{\text{ПВП}} \rightarrow \max$. При этом задается последовательность задач однокритериальной максимизации критерия $W_{\text{ПВП}}^{(i)}(\bar{s}), i = 1, 2, 3$, при условиях

$$\begin{cases} W_6(\bar{s}) \leq W_6^{\min} + \bar{\Delta}_6, \\ W_a(\bar{s}) \leq W_a^{\min} + \bar{\Delta}_a, \\ \bar{s} \in S, \end{cases} \quad (1.52)$$

к которым последовательно добавляются ограничения вида $W_{\text{ПВП}}^{(i-1)}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{(i-1)\max} - \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}^{(i-1)}$.

В результате вводится уступка $\bar{\Delta}_{\text{ПВП}} > 0$, а оценка альтернативных решений по данной группе показателей на следующем шаге не должна быть меньше $W_{\text{ПВП}}^{\max} - \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}$.

Шаг 4. Рассматривается группа показателей ПА $W_{\text{ПА}}$. Решается следующая задача: $W_{\text{ПА}} \rightarrow \max$. Аналогично шагу 3 вводится уступка $\bar{\Delta}_{\text{ПА}} > 0$, а оценка по группе показателей на следующем шаге не должна быть меньше $W_{\text{ПА}}^{\max} - \bar{\Delta}_{\text{ПА}}$. При этом при выборе должны учитываться ограничения:

$$\begin{cases} W_6(\bar{s}) \leq W_6^{\min} + \bar{\Delta}_6, \\ W_a(\bar{s}) \leq W_a^{\min} + \bar{\Delta}_a, \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.53)$$

Шаг 5. Приводится уже менее приоритетные группы показателей. Альтернативные варианты оцениваются по группе показателей по окружающей среде $W_{\text{ср}}$: $W_{\text{ср}} \rightarrow \min$. Формируется уступка $\bar{\Delta}_{\text{ср}} > 0$, оценка на следующем шаге не должна превышать $W_{\text{ср}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ср}}$. При этом учитываются ограничения:

$$\begin{cases} W_6(\bar{s}) \leq W_6^{\min} + \bar{\Delta}_6, \\ W_a(\bar{s}) \leq W_a^{\min} + \bar{\Delta}_a, \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}, \\ W_{\text{ПА}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПА}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПА}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.54)$$

Шаг 6. Последняя по приоритету группа показателей – эффективность для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$. На данном этапе выбирается уже единственное решение:

$$W_{\text{ОрВД}} \rightarrow \min.$$

При этом по последней группе показателей должны учитываться следующие ограничения:

$$\begin{cases} W_6(\bar{s}) \leq W_6^{\min} + \bar{\Delta}_6, \\ W_a(\bar{s}) \leq W_a^{\min} + \bar{\Delta}_a, \\ W_{\text{ВП}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ВП}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ВП}}, \\ W_{\text{ПА}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПА}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПА}}, \\ W_{\text{ср}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ср}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ср}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (1.55)$$

Выбранное решение может не быть оптимальным по Парето, поэтому эксперт проверяет выбранный вариант на оптимальность по Парето.

2. Математические модели для расчета показателей эффективности системы ОрВД. Задача оценки альтернативных вариантов структуры ВП решается с использованием комплекса имитационного моделирования системы организации воздушного движения (КИМ ОрВД) [11–13], который был разработан в интересах российского провайдера аэронавигационных услуг ФГУП “Госкорпорация по ОрВД”. В составе комплекса реализованы расчетные и имитационные модели для вычисления показателей. Выбор метода расчета для разных показателей зависит от области и процессов моделирования. Исследования показателей эффективности выполнения полетов и пропускной способности верхнего ВП ориентированы на применение расчетного моделирования, соответственно математические модели вычисления показателей основаны на расчетном моделировании. Оценка процессов в диспетчерской зоне района аэродрома и на поверхности аэродрома производится преимущественно с помощью имитационного моделирования. Таким образом, модели вычисления показателей используют данные от имитационных моделей. Далее представлено описание математических моделей расчета показателей, реализованных в составе КИМ ОрВД.

2.1. Модели расчета показателей безопасности полетов W_6 . Группа показателей безопасности полетов определяется следующим вектором, который состоит из показателей:

$$W_6 = (W_{\text{ПКС}}, W_{\text{ННЭ}}, W_{\text{инт. ВПП}}, W_{\text{конфл. схем}}, W_{\text{риски}})^T. \quad (2.1)$$

2.1.1. Количество ПКС $W_{\text{ПКС}}$. Под ПКС понимается ситуация, требующая вмешательства диспетчера, когда прогнозируется нарушение одновременно вертикальных и горизонтальных норм эшелонирования между ВС.

Расчет потенциальных конфликтных ситуаций производится на основе прогноза 4D-траекторий полета ВС – детализированных планов полета, включая такие этапы полета, как взлет, набор высоты, полет по маршруту, снижение, посадка. Для вычисления показателя используется расчетно-аналитическое моделирование. На вход в модель расчета показателя подаются запланированные пользователями ВП планы полетов.

Для любого рейса $f \in L$, где L – заданный поток ВС, который состоит из m рейсов, 4D-траектория определяется вектором:

$$x^f = (x_1^f, \dots, x_i^f, \dots, x_n^f), \quad \forall f \in L,$$

где n – количество точек траектории.

Для увеличения точности расчетов каждый участок маршрута интерполируется с заданным шагом Δt для определения текущего местоположения ВС, исходя из прогноза полета по построенной 4D-траектории. Местоположение ВС задается четырьмя координатами:

$$x_i^f = (lat_i^f, long_i^f, alt_i^f, t_i^f),$$

где lat_i^f – широта ВС f в i -й точке траектории, измеряемая в градусах, $long_i^f$ – долгота ВС f в i -й точке траектории, alt_i^f – высота ВС f в i -й точке траектории, t_i^f – время нахождения ВС в i -й точке траектории.

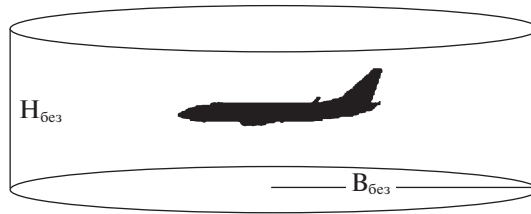


Рис. 2. Зона безопасности ВС

	На одном эшелоне	Одно ВС изменяет эшелон	Оба изменяют эшелоны
Пересечение	C1	C2	C3
Догон	C4	C5	C6
Встречный курс	C7	C8	C9

Рис. 3. Типы ПКС

Все характеристики рассчитаны в соответствии с заданной горизонтальной и вертикальной скоростью полета ВС на участках маршрута. Метеоусловия и отклонения ВС от линии пути не учитываются.

Нормы эшелонирования характеризуются параметрами зоны безопасности вокруг каждого ВС f . На рис. 2 изображена зона безопасности вокруг каждого ВС, которая представляет собой цилиндр с радиусом $R_{без}$ и высотой $H_{без}$:

Определим ПКС между двумя любыми ВС в заданном потоке ВД. Для двух любых ВС $f, g \in L, f \neq g$, ПКС $w_{f,g}^{ПКС}$ определяется:

$$w_{f,g}^{ПКС} = \begin{cases} 1, & (t_i^f = t_j^g) \wedge (D_{i,j}^{f,g} \leq 2R_{без}) \wedge (|alt_i^f - alt_j^g| < H_{без}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.2)$$

где f – первое ВС, участвующее в ПКС; g – второе ВС, участвующее в ПКС; $D_{i,j}^{f,g}$ – ортодромия между двумя ВС в i -й точке траектории ВС f и в j -й точке траектории ВС g . Тогда показатель “Количество ПКС” находится следующим образом:

$$W_{ПКС} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{ПКС}, \quad \forall f, g \in L, f \neq g. \quad (2.3)$$

Ортодромия между двумя ВС $f, g \in L$, рассчитывается как

$$D_{i,j}^{f,g} = R_{зем}(\arccos[\sin(lat_i^f)\sin(lat_j^g) + \cos(lat_i^f)\cos(lat_j^g)\cos(long_j^g - long_i^f)]). \quad (2.4)$$

На рис. 3 изображены девять типов определяемых ПКС. Показатель может рассчитываться как для всех ПКС, так и для каждого типа.

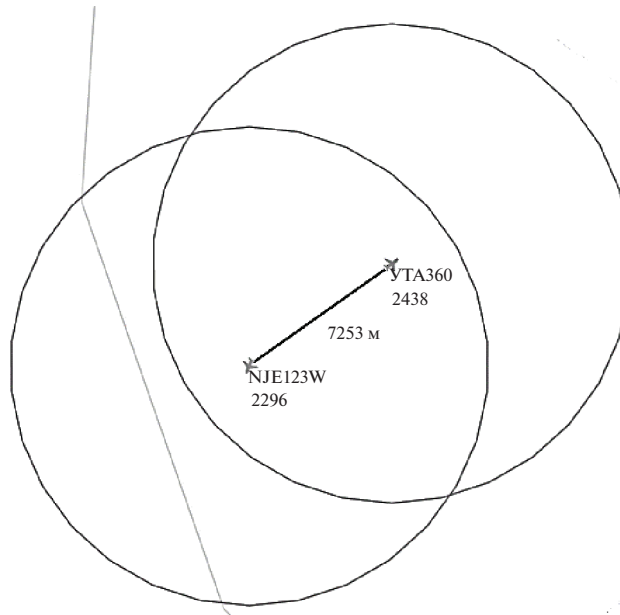


Рис. 4. ННЭ

2.1.2. Нарушения норм эшелонирования $W_{\text{ННЭ}}$. ННЭ между двумя ВС происходит, когда нарушаются одновременно горизонтальные и вертикальные нормы эшелонирования. В отличие от ПКС данный показатель фиксирует уже свершившиеся конфликты.

Для расчета показателя $W_{\text{ННЭ}}$ применяется имитационное моделирование управляемых полетов ВС как в диспетчерской зоне района аэродрома, так и на маршруте ОВД. На вход в имитационную модель поступают потоки ВД, которые состоят из плановых данных. В процессе моделирования траектории и планы полетов ВС актуализируются (обновляются) по мере изменения воздушной обстановки в соответствии с их ЛТХ, а также влиянием внешних воздействий на ВС, как, например, вмешательство диспетчера при разрешении ПКС. В составе модели диспетчера имитируются временные затраты на выполнение операций по сопровождению и контролю за ВС, а также алгоритмы разрешения ПКС.

Показатель рассчитывается на основе данных о местоположении ВС, т.е. на базе его вектора состояний. Обнаружение ННЭ производится с заданным шагом, настраиваемым исследователем, в процессе моделирования. Нарушения фиксируются, когда имитационная модель диспетчерского управления не позволяет разрешить все ПКС ввиду сложности воздушной обстановки. На рис. 4 отображено нарушение горизонтальных и вертикальных норм эшелонирования между двумя ВС в процессе имитационного моделирования.

Расчет производится аналогично показателю $W_{\text{ПКС}}$ – количеству ПКС, где определяется одновременное нарушение вертикальных и горизонтальных норм. Разница заключается в том, что ННЭ рассчитываются по фактическому местоположению ВС в процессе имитационного моделирования, а ПКС вычисляются на основе прогнозной траектории ВС с использованием расчетного моделирования. Таким образом, показатель $W_{\text{ННЭ}}$ определяется следующим образом: для двух любых ВС $f, g \in L, f \neq g$, в момент запуска процедуры обнаружения конфликтов t ННЭ

$$w_{f,g}^{\text{ННЭ}} = \begin{cases} 1, & (D_{i,j}^{f,g} \leq 2R_{\text{бес}}) \wedge (|alt^f - alt^g| < H_{\text{бес}}) \wedge (t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.5)$$

где $t_{\text{нач}}$ – время начала моделирования потока ВС, $t_{\text{кон}}$ – время окончания моделирования.

Тогда $W_{\text{ННЭ}}$ определяется следующим образом:

$$W_{\text{ННЭ}} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{\text{ННЭ}}, \quad \forall f, \quad g \in L, \quad f \neq g. \quad (2.6)$$

Показатель позволяет оценить как существующую, так и перспективную структуру ВП в условиях прогнозных интенсивных потоков ВД и на этапе моделирования выявить “узкие” места в структуре, где требуется повышенное внимание диспетчеров с целью обеспечения норм горизонтального и вертикального эшелонирования.

2.1.3. Количество нарушений временных интервалов на ВПП $W_{\text{инт.ВПП}}$. Одним из показателей группы “Безопасность полетов” является нарушение интервалов на ВПП. Показатель рассчитывается в процессе имитационного моделирования и предназначен для прогноза/фиксации нарушения минимальных временных интервалов на одной либо системе ВПП. В случае прогноза показатель вычисляется на основе плановых времен взлета и посадки ВС на моделируемом(ых) аэродроме(ах). Плановые времена взлета и посадки рассчитываются исходя из заданных пользователем предпочтений. Это может быть прогнозный поток с увеличенной интенсивностью ВД, когда плановое количество ВПО превышает пропускную способность системы ВПП, либо определенные системой планирования времена с соблюдением требований по минимальным интервалам.

Пусть заданы поток вылетающих ВС $U \subset L$ и поток прибывающих ВС $V \subset L$. ВС $f \in U$ имеет время вылета $t_{\text{выл}}^f$ с моделируемого аэродрома, где $t_{\text{выл}}^f \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$. Здесь $t_{\text{нач}}$ – время начала моделирования, $t_{\text{кон}}$ – время окончания моделирования. ВС $g \in V$ имеет время прилета $t_{\text{прил}}^g$ на моделируемый аэродром, $t_{\text{прил}}^g \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$.

В зависимости от массы ВС делятся на категории турбулентности: легкие (L), средние (M), тяжелые (H) и супертяжелые (J). В статье рассматривается матрица для четырех категорий турбулентности, однако количество категорий может быть увеличено при рекатегоризации. Заданная матрица $M_{4 \times 4}$ минимальных интервалов между ВПО, строки которой соответствуют категориям турбулентности ВС, выполняющего ВПО первым, а столбцы – категориям турбулентности ВС, выполняющего ВПО вторым. Элементами $m_{p,q}$ матрицы M в общем виде являются минимальные допустимые временные интервалы между двумя последовательными ВПО ВС с категориями турбулентности, соответствующими строке с номером p и столбцу с номером q (рис. 5). Таким образом, матрица M определяет допустимые по безопасности интервалы между ВС на ВПП (системе ВПП).

Определим четыре матрицы: $M_{\text{arr.arr}}, M_{\text{dep.dep}}, M_{\text{arr.dep}}, M_{\text{dep.arr}}$, где arr – прилетающие ВС, dep – вылетающие ВС. Элементами матриц являются соответственно $m_{p,q}^{\text{arr.arr}}, m_{p,q}^{\text{dep.dep}}, m_{p,q}^{\text{arr.dep}}, m_{p,q}^{\text{dep.arr}}$. Элементы задают минимальные допустимые временные интервалы между двумя прилетающими $g_p^i, g_q^j \in V, i \neq j$, или вылетающими ВС $f_p^i, f_q^j \in U, i \neq j$.

При моделировании ВПО на аэродроме для двух любых $f_i, f_j \in L, i \neq j$, которые выполняют последовательно ВПО на ВПП, причем, f_i – ВС, выполняющее первым операцию на ВПП (взлет/посадка), f_j – ВС, выполняющее вторым операцию на ВПП (взлет/посадка), нарушение интервалов на ВПП (системе ВПП) $w_{f,g}^{\text{инт.ВПП}}$ определяется как

$$w_{f,g}^{\text{инт.ВПП}} = \begin{cases} 1, & (t_{\text{выл}}^{f_j,p} - t_{\text{выл}}^{f_i,q} < m_{p,q}^{\text{dep.dep}}) \vee (t_{\text{прил}}^{g_j,p} - t_{\text{прил}}^{g_i,q} < m_{p,q}^{\text{arr.arr}}) \vee \\ & \vee (t_{\text{выл}}^{g_j,p} - t_{\text{выл}}^{f_i,q} < m_{p,q}^{\text{dep.arr}}) \vee (t_{\text{выл}}^{f_j,p} - t_{\text{прил}}^{g_i,q} < m_{p,q}^{\text{arr.dep}}), \quad f_i, f_j \in U, \quad g_i, g_j \in V, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Показатель “Количество нарушений временных интервалов на ВПП” запишем следующим образом:

$$W_{\text{инт.ВПП}} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{\text{инт.ВПП}}, \quad \forall f, \quad g \in L, \quad f \neq g. \quad (2.8)$$

2.1.4. Количество конфликтных схем маневрирования $W_{\text{конфл.схем}}$. Маршруты вылета, прибытия и захода на посадку как на один аэродром, так и на несколько близкорасположенных аэродромов проектируются с учетом бесконфликтности потоков ВС. Однако на этапе проектирования могут не учитываться ЛТХ всех типов ВС, что может привести к возникновению ННЭ при выполнении полетов двумя ВС по разным маршрутам.

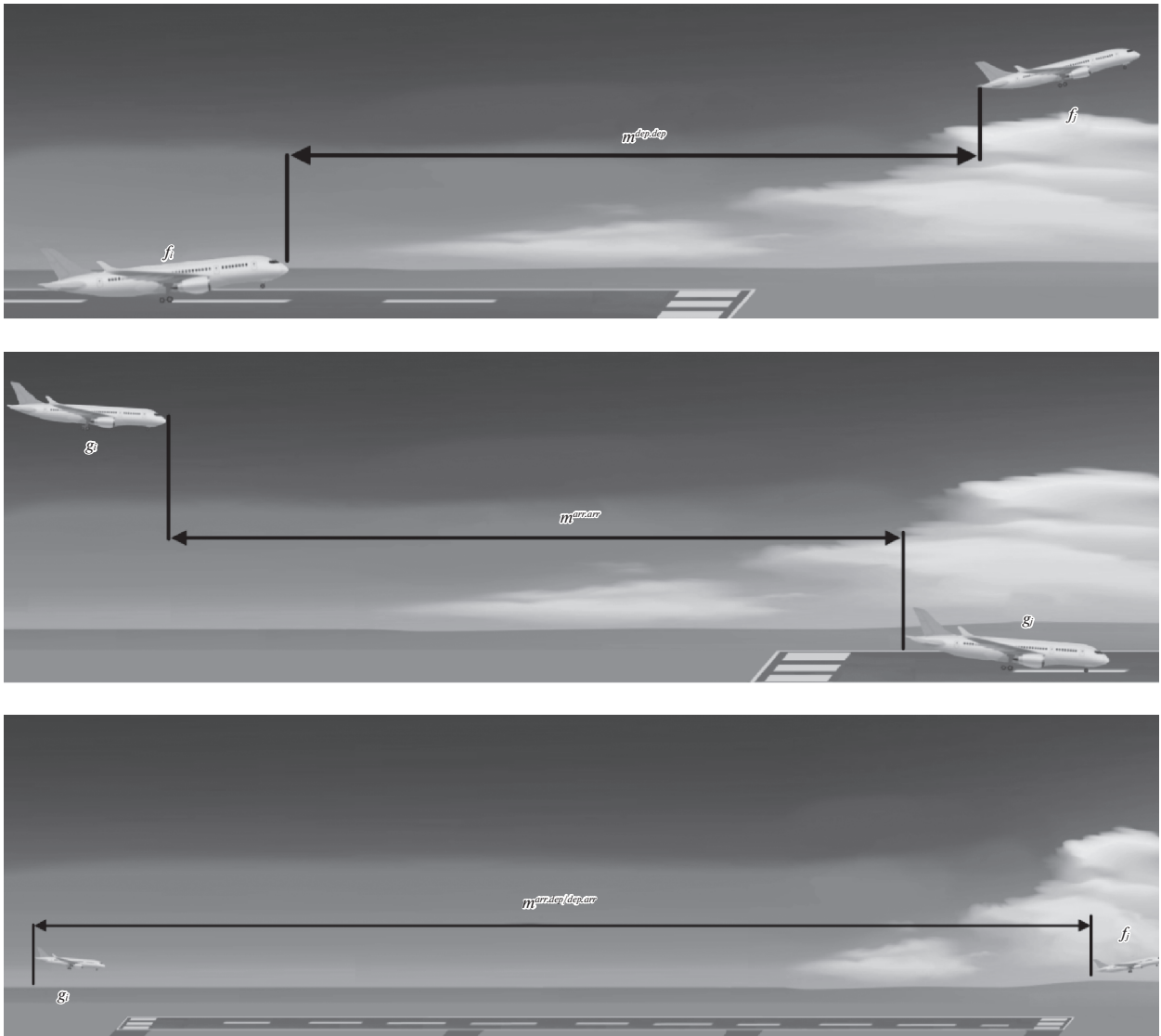


Рис. 5. Временные интервалы на ВПП

Конфликт между маршрутами определяется, когда фиксируется ННЭ между ВС, выполняющими полет по разным схемам маневрирования с учетом допустимых отклонений ВС в боковой плоскости, а также ограничений в вертикальной плоскости. Вычисление данного показателя производится с использованием расчетно-аналитического моделирования на основе фактических 4D-траекторий ВС. Пример обнаруженного конфликта на маршрутах вылета с разных аэродромов приведен на рис. 6.

Пусть $f_p^{i,k}$ – p -й рейс, который выполняет полет по i -му маршруту прибытия на k -й аэродром, $g_q^{j,l}$ – q -й рейс, который выполняет полет по j -му маршруту вылета из l -го аэродрома. Тогда конфликт между схемами маневрирования запишем как

$$w_{i,j,l,k}^{\text{конфл.схем}} = \begin{cases} 1, (w_{g_p^{i,k}, g_q^{j,l}}^{\text{инт.ВПП}} = 1, \forall g_p^{i,k}, g_q^{j,l}, p \neq q, i \neq j, l \neq k) \vee \\ \vee (w_{f_p^{i,k}, f_q^{j,l}}^{\text{инт.ВПП}} = 1, \forall f_p^{i,k}, f_q^{j,l}, p \neq q, i \neq j, l \neq k) \vee \\ \vee (w_{f_p^{i,k}, g_q^{j,l}}^{\text{инт.ВПП}} = 1, \forall f_p^{i,k}, g_q^{j,l}, l \neq k), \\ 0 \text{ иначе.} \end{cases} \quad (2.9)$$

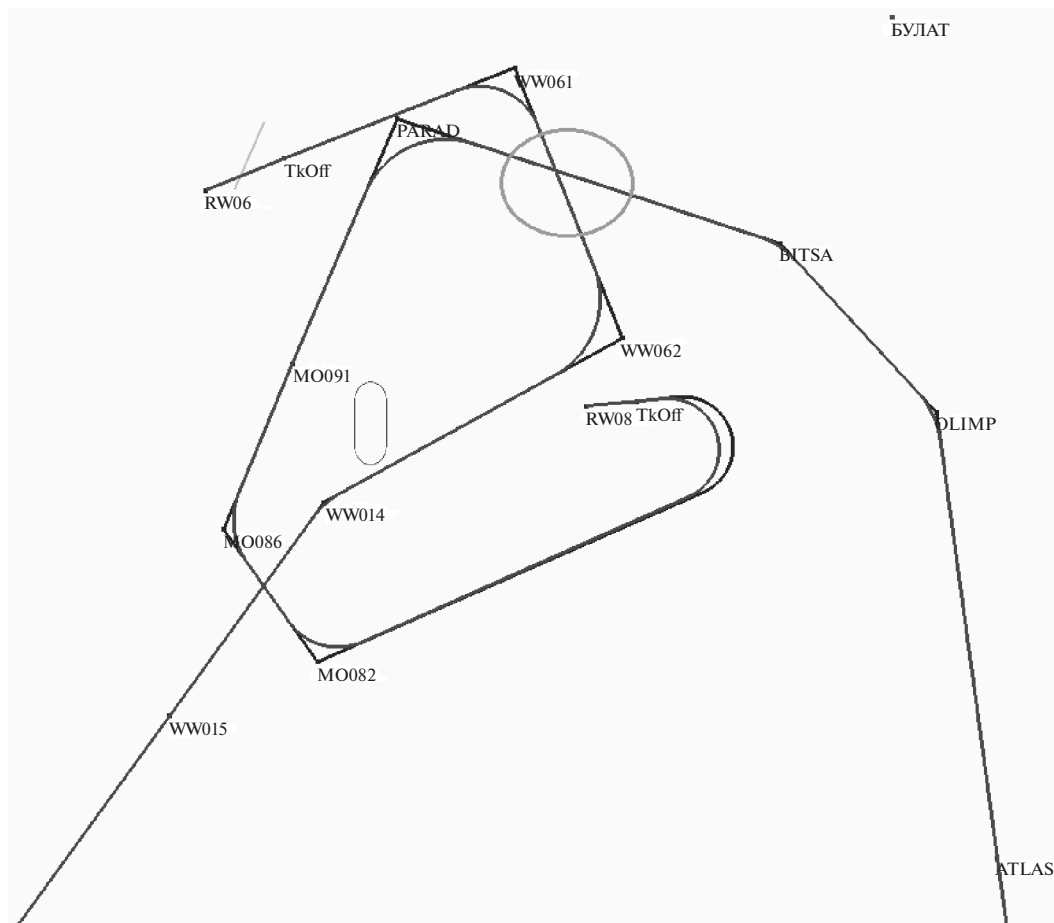


Рис. 6. Конфликт на маршрутах вылета с разных аэродромов

Показатель $W_{\text{конфл.схем}}$ находится следующим образом:

$$W_{\text{конфл.схем}} = \sum_{i,j,l,k} w_{i,j,l,k}^{\text{конфл.схем}}. \quad (2.10)$$

2.1.5. Оценка рисков $W_{\text{риски}}$. Задача оценки рисков для безопасности полетов, согласно документам ИКАО [14, 15], сводится к определению частоты возникновения опасных событий (ННЭ, опасных сближений, столкновений) на час полета. Для оценки рисков применяются различные методы математического моделирования, в том числе как аналитическое моделирование, так и имитационное моделирование. Больше распространение получили аналитические модели. Имитационные модели основаны на моделировании как воздушной обстановки, так и диспетчерской модели для разрешения ПКС.

В комплексе имитационного моделирования реализованы две модели (аналитическая и имитационная) для решения данной задачи. Более подробная информация о методах и реализации моделей в составе комплекса приведена в [16–19].

2.2. Модели расчета показателей эксплуатационной эффективности для пользователей ВП W_a . Эффективность для пользователей ВП (авиакомпаний) характеризуется вектором, состоящим из следующих показателей:

$$W_a = (W_{\text{а.зад}}, W_{\text{протяж.марш}}, W_{\text{а.налет}}, W_{\text{а.топл.эф}}, W_{\text{ортодр}}, W_{\text{врем.рул}})^T. \quad (2.11)$$

2.2.1. Задержки $W_{\text{а.зад}}$. Задержки являются одним из основных показателей для пользователей ВП. Показатель характеризует не только экономическую эффективность, но и пунктуальность выполнения полетов, а также участвует в расчете других показателей эффективности и ПВП, и ПА [20, 21].

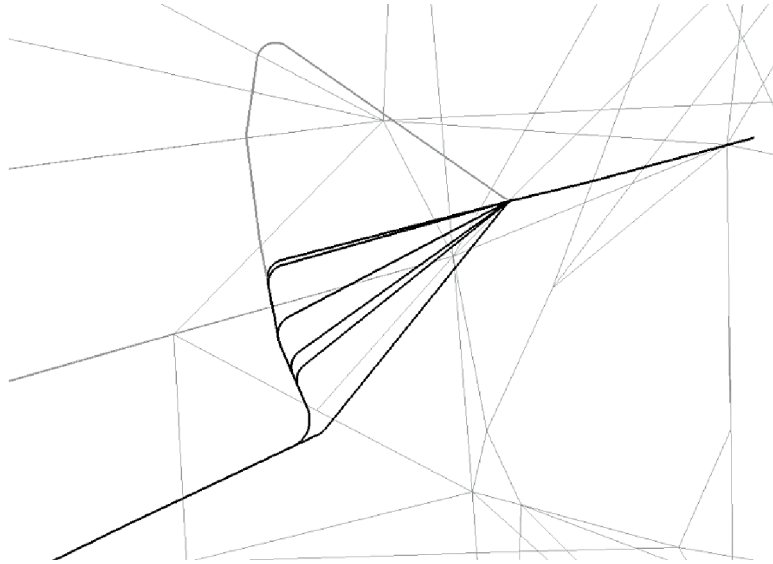


Рис. 7. Регулирование ВС на прилете

Показатель вычисляется с использованием имитационной модели управляемых полетов ВС в диспетчерской зоне района аэродрома или районе нескольких близкорасположенных аэродромов – районе аэроузла. На вход модели поступают запланированные/предпочитаемые пользователями маршруты. В процессе моделирования имитационная модель построения бесконфликтной очереди на прилет и вылет обеспечивает безопасные в вертикальной и горизонтальной плоскости интервалы между ВС за счет применения мер регулирования, что в свою очередь изменяет (в основном удлиняет) маршрут ВС или задерживает его на аэродроме. Издержками в данном случае становятся задержки, которые возникают у ВС относительно исходного времени вылета или прибытия. По результатам моделирования фиксируются фактические времена вылета и прибытия.

Для любого ВС $f \in L$, где f – прилетающее или вылетающее ВС, задержка $w^{\text{зад}}$ определяется как

$$w^{\text{зад}} = \begin{cases} t_{\text{факт}}^f - t_{\text{план}}^f, & t_{\text{факт}}^f - t_{\text{план}}^f > \varepsilon, \\ 0 & t_{\text{факт}}^f - t_{\text{план}}^f \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (2.12)$$

где $t_{\text{план}}$ – плановое время прибытия, а $t_{\text{факт}}$ – фактическое время прибытия, если ВС f прилетает и $t_{\text{план}}$ – плановое время вылета, а $t_{\text{факт}}$ – фактическое время вылета, если ВС f вылетает, ε – погрешность расчета задержки.

Показатель задержки по всем моделируемым рейсам $W_{\text{а.зад}}$ задается средней $W_{\text{а.зад}}^{\text{сред}}$ и максимальной задержками $W_{\text{а.зад}}^{\text{макс}}$.

$$W_{\text{а.зад}}^{\text{сред}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i^{\text{зад}}, \quad (2.13)$$

$$W_{\text{а.зад}}^{\text{макс}} = \max_i (w_i^{\text{зад}}), \quad (2.14)$$

где m – количество рейсов в моделируемом потоке ВС.

В зависимости от задачи задержки могут рассчитываться отдельно по вылетным и прилетным рейсам. Также может задаваться период расчета средней задержки, например средняя или максимальная часовая задержка.

На рис. 7 представлен пример удлинения траектории ВС в горизонтальной плоскости в случае применения меры регулирования имитационной моделью диспетчерского управления, что приводит к возникновению задержки на прилете.

2.2.2. Протяженность маршрута $W_{\text{протяж.марш}}$. Показатель определяет протяженность промоделированной траектории полета. Протяженность рассчитывается с использованием имитационного моделирования и характеризует только горизонтальную составляющую эффективности траектории. Однако данный показатель позволяет оценить дальность полета, что может являться критерием при выборе структуры ВП.

Протяженность маршрута вычисляется на основе фактической траектории, по результатам имитационного моделирования. Маршрут включает в себя удлинения/спрямления, которые получаются с помощью регулирования имитационной моделью диспетчерского управления.

Для любого ВС $f \in L$ протяженность в пределах моделируемой области $w_f^{\text{протяж}}$ определяется как

$$w_f^{\text{протяж}} = l_{\text{end}}^f - l_{\text{begin}}^f, \quad (2.15)$$

где l_{begin} – протяженность маршрута при входе ВС в моделируемую область ВП, l_{end} – протяженность маршрута при выходе ВС из моделируемой области.

Следует сказать, что для рейсов, вылетающих из аэродромов в пределах моделируемой области, $l_{\text{begin}} = 0$, а для прилетающих рейсов l_{end} будет совпадать с протяженностью полного маршрута движения ВС.

Показатель “Протяженность маршрута” определяется как среднее значение на один рейс в пределах моделируемой области:

$$W_{\text{протяж.марш}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{протяж}}. \quad (2.16)$$

Кроме средней протяженности возможен расчет и протяженности по каждому рейсу для анализа показателя по направлениям полета.

2.2.3. Налет (продолжительность полета) $W_{\text{а.налет}}$. Время полета рассчитывается в процессе имитационного моделирования и характеризует структуру ВП в качестве одного из показателей эффективности для пользователей ВП (авиакомпаний).

В отличие от протяженности маршрута показатель учитывает вертикальную эффективность на наборе высоты и при снижении ВС, а также разрешенные эшелоны на маршруте ОВД. Как и протяженность, время полета рассчитывается исходя того, что полет ВС производится в соответствии с индексом эффективности, который вычисляется по максимальной дальности и топливной эффективности.

Налет $w_f^{\text{налет}}$ для любого ВС $f \in L$ в пределах моделируемой области определяется как

$$w_f^{\text{налет}} = t_{\text{end}}^f - t_{\text{begin}}^f, \quad (2.17)$$

где t_{begin} – время влета в моделируемую область, t_{end} – время вылета ВС из моделируемой области.

Показатель “налет” для всего потока ВС рассчитывается как среднее значение на рейс:

$$W_{\text{а.налет}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{налет}}. \quad (2.18)$$

Налет и протяженность маршрута подходят для проведения сравнительного анализа двух вариантов структур ВП, где важен выигрыш/проигрыш одного варианта относительно другого, а не абсолютная оценка.

2.2.4. Расход топлива $W_{\text{а.топл.эф}}$. Показатель топливной эффективности представляет собой расчет количества затраченного в процессе моделирования авиационного топлива. Расчет производится в процессе имитационного моделирования управляемых полетов ВС. Моделирование полета ВС осуществляется по модели BADA [22], которая содержит ЛТХ по всем типам ВС, в том числе и данные по расходованию топлива в зависимости от режима полета, взлетному весу ВС, выбранному эшелону полета, скорости набора высоты и снижения и др.

Расчет выполняется по фактической 4D-траектории полета ВС с учетом изменения его веса в процессе моделирования. Начальный взлетный вес задается исходя из критерия максимальной дальности полета, а также задаваемой загрузки и запаса топлива.



Рис. 8. Ортодромичность маршрута. O – пункт отправления, D – пункт назначения

Для любого ВС $f \in L$ расход топлива в пределах рассматриваемой области полета запишем следующим образом:

$$w_f^{\text{расход.топл}} = \sum_{i=1}^n \Delta w_i^f, \quad (2.19)$$

где Δw_i^f – расход топлива ВС на i -м участке 4D-траектории ВС, n – количество элементарных участков, определяемых ЛТХ ВС и режимом полета.

Показатель “Расход топлива” определяется средним значением на рейс:

$$W_{\text{а.топл.эф}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{расход.топл}}. \quad (2.20)$$

Для оценки структуры ВП расход топлива рассчитывается в пределах моделируемой области. Показатель отдельно может вычисляться только для вылетных или прилетных рейсов.

2.2.5. Ортодромичность маршрута $W_{\text{ортодр}}$. Показатель определяет горизонтальную неэффективность на маршруте и является одним из ключевых показателей Евроконтроля [23] и ИКАО [24] по оценке ключевых характеристик системы ОрВД.

Расчет горизонтальной неэффективности основан на сравнении протяженности маршрута и кратчайшего расстояния между начальной и конечной точками маршрута, либо его части. Кроме оценки ортодромичности рассматриваемой части маршрута, показатель предназначен также для оценки вклада части маршрута в эффективность всего маршрута. Ортодромичность маршрутов в составе КИМ ОрВД вычисляется с помощью расчетно-аналитического моделирования на основе планов полетов. Для расчета применяются планы полетов, которые подаются авиакомпаниями в систему планирования использования ВП, либо фактические данные по результатам полетов. Исследуется только полет в верхнем ВП, полет по маршрутам вылета, прибытия и захода на посадку остается за рамками показателя.

На рис. 8 схематично представлена ортодромия маршрута и фактическая траектория маршрута, которая является длиннее, чем ортодромия.

Показатель $W_{\text{ортодр}}$ рассчитывается для всего потока ВД для любой исследуемой области $j \in S_{\text{ВП}}$ и определяется в процентном отношении:

$$W_{\text{ортодр}} = \frac{\sum_f L_j^f - \sum_f H_j^f}{\sum_f H_j^f} \% = \left(\frac{\sum_f L_j^f}{\sum_f H_j^f} - 1 \right) \%, \quad f \in L, \quad (2.21)$$

где L_j^f – фактическое расстояние по маршруту полета рейса f в исследуемой области j , H_j^f – достигнутое расстояние по маршруту полета рейса f в исследуемой области j .

Достигнутое расстояние H_j^f определяется как проекция исследуемой части маршрута на ортодрому этого маршрута и характеризует “вклад” исследуемой части маршрута в общую протяженность.

2.2.6. **Время руления ВС по поверхности аэродрома $W_{\text{врем.рул}}$.** Время руления ВС по поверхности аэродрома характеризует эффективность выполнения операций при вылете и прилете на поверхности аэродрома, когда ВС при вылете выполняет руление от МС до исполнительного старта, а при прилете – от съезда с ВПП до МС [25].

Показатель рассчитывается в процессе имитационного моделирования управляемого движения ВС по поверхности аэродрома и включает в себя время на выполнение операций на поверхности аэродрома, таких, как буксировка, запуск двигателей, противообледенительная обработка и др. Также в этот показатель включены задержки на МС, перроне, при рулении из-за интенсивного трафика на аэродроме, время ожидания на предварительном старте из-за занятости ВПП.

Для любого ВС, выполняющего руление по аэродрому, время руления определяется как

$$w_f^{\text{руление}} = \begin{cases} t_{\text{АТОТ}} - t_{\text{АОВТ}}, & \forall f \in U, \\ t_{\text{АИБТ}} - t_{\text{АЛДТ}}, & \forall g \in V, \end{cases} \quad (2.22)$$

где $t_{\text{АТОТ}}$ – фактическое время вылета (АТОТ – actual take-off time), $t_{\text{АОВТ}}$ – фактическое время начала движения ВС от МС (АОВТ – actual off-blocks time), $t_{\text{АИБТ}}$ – фактическое время занятия ВС МС (АИБТ – actual in-blocks time), $t_{\text{АЛДТ}}$ – фактическое время прилета (АЛДТ – actual landing time).

Показатель “Время руления” для всего потока рассчитывается как среднее значение на рейс:

$$W_{\text{врем.рул}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{руление}}. \quad (2.23)$$

Для сравнительной оценки двух или более вариантов инфраструктуры аэродрома используется среднее время руления. Однако могут также применяться и максимальные значения для выявления причин увеличения времени руления и места задержки. Для вылета и прилета время руления также может рассчитываться отдельно.

2.3. **Модели расчета показателей эффективности для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$.** Группа показателей, которая характеризует использование элементов структуры ВП, задается вектором:

$$W_{\text{ОрВД}} = (W_{\text{загр.уч.ВТ}}, W_{\text{загр.точек.ВП}}, W_{\text{эш}}, W_{\text{исп.3О}}, W_{\text{МС}})^T. \quad (2.24)$$

2.3.1. **Показатель неравномерности загруженности участков ВТ $W_{\text{загр.уч.ВТ}}$.** Загруженность участка ВТ определяется количеством ВС, которые входят на участок ВТ в интервал времени [26]. Как правило, интервал времени оценки загрузки равен одному календарному часу.

Показатель предназначен для выявления неравномерности распределения трафика через сеть ВТ, а также обнаружения наиболее загруженных участков ВТ. Интенсивность ВД на участках ВТ определяется с использованием расчетно-аналитического моделирования на основе плановых или фактических полетных данных. Каждый участок состоит из точки “входа” на участок и точки “выхода” в соответствии с направлением полета ВС.

Загрузка любого i -го участка ВТ $s_{i,\text{участок.ВТ}} \in \mathcal{S}_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$:

$$w_{f, s_{i,\text{участок.ВТ}}}^{\text{загр.уч.ВТ}} = \begin{cases} 1, & s_{i,\text{участок.ВТ}}^f \in [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.25)$$

где $t_{i,\text{участок.ВТ}}^f$ – время входа ВС на участок $s_{i,\text{участок.ВТ}}$ (время пролета первой точки участка), t_{begin} – начало интервала времени оценки, t_{end} – конец интервала времени оценки.

Показатель загруженности i -го участка ВТ на интервале времени оценки для всего потока ВС L определяется:

$$W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, S_i \text{ участка.ВТ}}^{\text{загр.уч.ВТ}} \quad (2.26)$$

Загруженность всех участков ВТ задается вектором:

$$(W_{\text{загр.уч.ВТ}}^1, \dots, W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i, \dots, W_{\text{загр.уч.ВТ}}^n)^T,$$

где n – количество участков ВТ в структуре ВП.

Показатель неравномерности загруженности участков ВТ рассчитывается как среднеквадратичное отклонение:

$$W_{\text{загр.уч.ВТ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i - M(W_{\text{загр.уч.ВТ}}))^2}{n}}, \quad (2.27)$$

где

$$M(W_{\text{загр.уч.ВТ}}) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i}{n}. \quad (2.28)$$

Для анализа неравномерности на основе полученных данных о загруженности рассчитываются также другие статистические характеристики, такие, как медиана, максимальное значение, минимальное значение, первый и третий квартили и др. Анализ производится с использованием построенных диаграмм по рассчитанным характеристикам. Интервал времени оценки $[t_{begin}, t_{end})$ может задаваться в виде календарного часа, а также целых суток.

2.3.2. Показатель неравномерности загруженности точек ВП
 $W_{\text{загр.точек.ВП}}$. Загруженность точки ВП определяется количеством ВС, которые пролетают точку в интервал времени оценки.

Как и в ситуации с участками ВТ, показатель оценивает неравномерность распределения потока ВС. Показатель позволяет выявить точки повышенной сложности, в которых пересекаются интенсивные потоки ВД, что в свою очередь может приводить к увеличению количества ПКС и повышенной нагрузке диспетчера.

Загрузка любой i -й точки ВТ $S_{i \text{ точка.ВП}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{begin}, t_{end})$ определяется как

$$W_{f, S_{i \text{ точка.ВП}}}^{\text{загр.точки.ВП}} = \begin{cases} 1, & t_{S_{i \text{ точка.ВП}}}^f \in [t_{begin}, t_{end}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.29)$$

где $t_{S_{i \text{ точка.ВП}}}^f$ – время пролета точки $S_{i \text{ точка.ВП}}$, t_{begin} – начало интервала времени оценки, t_{end} – конец интервала времени оценки.

Показатель загруженности i -й точки ВП на интервале времени оценки для всего потока ВС L определяется:

$$W_{\text{загр.точки.ВП}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, S_i \text{ точка.ВП}}^{\text{загр.точки.ВП}}. \quad (2.30)$$

Загруженность по всем точкам ВП задается в виде вектора:

$$(W_{\text{загр.точки.ВП}}^1, \dots, W_{\text{загр.точки.ВП}}^i, \dots, W_{\text{загр.точки.ВП}}^n)^T,$$

где n – количество точек в структуре ВП.

Показатель неравномерности загруженности точек ВП рассчитывается как среднеквадратичное отклонение:

$$W_{\text{загр.точек.ВП}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{\text{загр.точки.ВП}}^i - M(W_{\text{загр.точки.ВП}}))^2}{n}}, \quad (2.31)$$

где

$$M(W_{\text{загр.точки.ВП}}) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{загр.точки.ВП}}^i}{n}. \quad (2.32)$$

Анализ загруженности точек ВП выполняется по результатам расчета статистических характеристик и построения на их основе диаграмм для визуального анализа в КИМ ОрВД.

2.3.3. Показатель использования ВС неэффективных эшелонов $W_{\text{эш}}$. Показатель позволяет оценить, какие эшелоны полета использовали ВС в исследуемой структуре ВП.

Оценка производится с помощью расчетно-аналитического моделирования на основе планов полетов. Для фактических плановых данных показатель рассчитывается по выполненным полетам и фиксирует реальное использование эшелонов. Если исследуется новая структура ВП, то показатель позволяет выявить потенциальную эффективность структуры в части доступности экономических эшелонов. Каждый участок ВТ состоит из одного или нескольких диапазонов доступных для полета эшелонов с вертикальным разделением, равным 300 м (~1000 футов).

Использование любого i -го эшелона полета h_i любым рейсом $f \in L$ определяется:

$$w_f^{i\text{эш}} = \begin{cases} 1, & \text{alt}_k^f = h_i, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.33)$$

где alt_k^f – высота (эшелон) полета ВС f на k -м участке маршрута.

Показатель использования ВС для i -го эшелона полета для всего потока ВД

$$W_{\text{эш}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{i\text{эш}}. \quad (2.34)$$

Количество использований эшелонов при моделировании задаются вектором:

$$(W_{\text{эш}}^1, \dots, W_{\text{эш}}^i, \dots, W_{\text{эш}}^n)^T,$$

где n – количество использованных эшелонов, $W_{\text{эш}}^i$ – количество использований i -го эшелона.

Показатель использования ВС неэффективных эшелонов на рейс определяется:

$$W_{\text{эш}} = \frac{\sum_{i=1}^n \max(h_{\text{опт}} - h_i, 0) W_{\text{эш}}^i}{\sum_{i=1}^n W_{\text{эш}}^i}, \quad (2.35)$$

где $h_{\text{опт}}$ – оптимальный эшелон полета для исследуемого потока ВС.

Оптимальный эшелон и исследуемый поток ВС может делиться по типам ВС, а также дальности полета ВС [27].

2.3.4. Использование ЗО $W_{\text{исп.ЗО}}$. Показатель позволяет определить распределение потока ВС по ЗО в процессе моделирования.

ЗО назначаются имитационной моделью диспетчерского управления при формировании бесконфликтной очереди прибывающих и вылетающих ВС. Применение ЗО, как правило, имеет самый низкий приоритет при назначении меры регулирования для создания безопасных интервалов между ВС. Задержки в ЗО характеризуют гибкость структуры ВП при создании бесконфликтной очереди прибывающих ВС.

Показатель использования ЗО определяется как

$$W_{\text{исп.ЗО}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{исп.ЗО}}, \quad (2.36)$$

где $w_{f_j}^{\text{исп.ЗО}}$ – количество кругов в ЗО j -м ВС, $f \in L$.

В процессе исследований может также анализироваться загруженность отдельных ЗО, а также загруженность потоком прибывающих ВС на определенный аэродром.

2.3.5. Показатель неэффективности использования МС $W_{\text{МС}}$. Показатель характеризует доступность МС на аэродроме для прибывающих и вылетающих ВС.

МС назначаются ВС в зависимости от предпочтений авиакомпаний, правил обслуживания оператора аэродрома, загрузки аэродрома и технологии работы наземных служб по управлению движением на поверхности аэродрома. Показатель позволяет оценить фактическое или запланированное использование МС на моделируемом аэродроме. Оценка производится по результатам имитационного моделирования управляемого движения ВС по поверхности аэродрома.

Пусть k_i – количество занятых МС на аэродроме в i -й момент времени, $k_{\text{опт}}$ – оптимальное значение количества занятых МС, которое позволяет обслуживать ВС на пределе ПА с учетом необходимых для этого ресурсов. Тогда неэффективность применения МС

$$W_{\text{МС}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - k_{\text{опт}})^2}{n}}, \quad (2.37)$$

где n – количество интервалов времени.

В случае анализа данных по планированию распределения ВС по МС показатель позволит определить как превышение доступных МС, так и низкую загруженность аэродрома в части ресурсов по стоянкам. При анализе фактических данных показатель необходимо рассматривать вместе с задержками и временем руления ВС по поверхности аэродрома.

2.4. Модели расчета показателей ПВП ($W_{\text{ПВП}}$). 2.4.1. Показатель равномерности временной загрузки диспетчера $W_{\text{врем.загр.дисп}}$. Временная загруженность диспетчера – время, требуемое диспетчеру для выполнения всех операций по контролю и УВД в своем секторе.

Показатель может определяться как по результатам расчетно-аналитического моделирования предпочтительно для “грубой” оценки верхнего ВП, так и по результатам имитационного моделирования с учетом работы модели диспетчерского управления [28].

Временная загруженность рассчитывается как сумма относительных временных затрат P_i на выполнение операций контроля и УВД диспетчером в единицу времени. Затраты P определяются вектором:

$$P = (P_1, \dots, P_8),$$

где P_1 – затраты на принятие ВС на сопровождение в сектор, P_2 – затраты на сопровождение ВС при смене эшелона, P_3 – затраты на обнаружение и разрешение ПКС, P_4 – затраты на передачу ВС в другой сектор, P_5 – затраты на назначение маршрута прибытия, P_6 – затраты на команду по спрямлению ВС “Direct To”, P_7 – затраты на периодический анализ воздушной обстановки. Затрата на выполнение k -й операции на интервале оценки $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$

$$P_k = \begin{cases} \tau_k, & t_{p_k} \in [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.38)$$

где τ_k – заданная исследователем длительность выполнения операции. Суммарные относительные затраты по i -й группе затрат

$$P_i = \frac{1}{t_{\text{инт}}} \sum_k p_k^i, \quad (2.39)$$

где $t_{\text{инт}} = t_{\text{end}} - t_{\text{begin}}$ – продолжительность интервала оценки.

Временная загруженность j -го сектора на интервале оценки $[t_{begin}, t_{end})$

$$W_{\text{врем.загр.дисп}}^j = \sum_{i=1}^8 P_i^j. \quad (2.40)$$

Тогда показатель равномерности временной загруженности диспетчера по всем секторам диспетчерского управления в исследуемом варианте структуры ВП определяется следующим образом:

$$W_{\text{врем.загр.дисп}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (W_{\text{врем.загр.дисп}}^j - M(W_{\text{врем.загр.дисп}}))^2}{n}}, \quad (2.41)$$

где n – количество интервалов оценки по всем секторам.

2.4.2. Показатель загрузки секторов без превышения НПС сектора $W_{\text{сек}}$. Показатель загрузки секторов задает количество ВС, которые входят в сектор диспетчерского управления в единицу времени. Загрузка секторов может рассчитываться как на этапе планирования с использованием расчетно-аналитических моделей для анализа баланса потребности в выполнении полетов и ПВП, так и по результатам имитационного моделирования для анализа фактической (модельной) интенсивности ВД.

Загрузка любого i -го сектора $s_{i\text{сек}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{begin}, t_{end})$ определяется как

$$w_{f, s_{i\text{сек}}}^{\text{сек}} = \begin{cases} 1, & t_{s_{i\text{сек}}}^f [t_{begin}, t_{end}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.42)$$

где $t_{i\text{сек}}^f$ – время взлета рейса f в сектор $s_{i\text{сек}}$, t_{begin} – начало интервала времени оценки, t_{end} – конец интервала времени оценки.

Показатель загруженности i -го сектора на интервале времени оценки

$$W_{\text{сек}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, s_{i\text{сек}}}^{\text{сек}}. \quad (2.43)$$

Загруженность по секторам на интервале времени оценки задается в виде вектора:

$$(W_{\text{сек}}^1, \dots, W_{\text{сек}}^i, \dots, W_{\text{сек}}^n)^T,$$

где n – количество секторов в структуре ВП.

Показатель загрузки секторов без превышения НПС рассчитывается как

$$W_{\text{сек}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (W_{\text{НПС}}^i - W_{\text{сек}}^i)}, \quad (2.44)$$

где $W_{\text{НПС}}^i$ – НПС i -го сектора. Норматив рассчитывается, согласно [29].

Загрузка каждого сектора может рассчитываться как среднее значение по всему сектору, так и по сектор-часам.

2.5. Модели расчета показателей ПА $W_{\text{ПА}}$. Группа показателей, которая характеризующая ПА, задается вектором:

$$W_{\text{ПА}} = (W_{\text{ВПО}}, W_{\text{пересеч}})^T. \quad (2.45)$$

2.5.1. Количество ВПО $W_{\text{ВПО}}$. ПА определяется количеством ВПО, которые способен обслужить аэродром в единицу времени. За единицу времени принимается 1 ч.

Показатель является базовым как для определения эффективности использования инфраструктуры аэродрома, так и для эффективности использования ВП, преимущественно в диспетчерской зоне района аэродрома. Существует методика расчета технической возможности аэродрома [30], которая основана на состоянии инфраструктуры аэродрома (состояние покрытия ВПП, расположение и др.), средних значений по интенсивности ВД, метеоусловиях. Однако

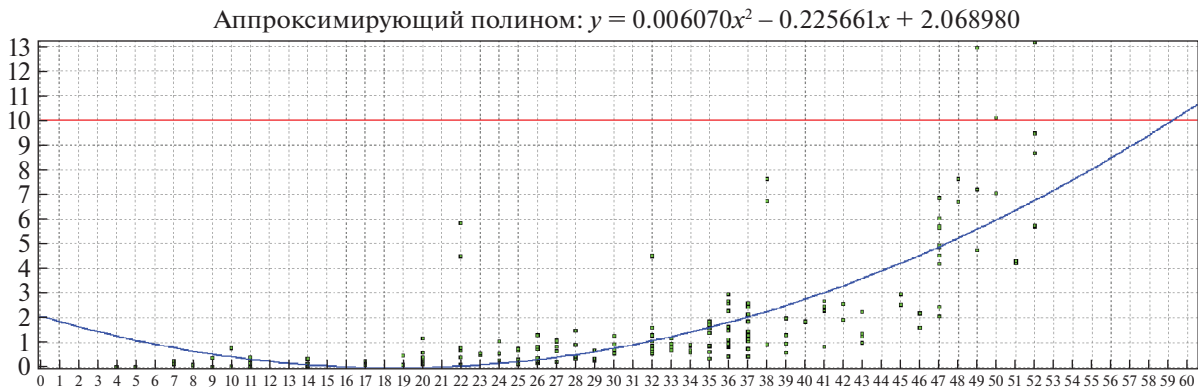


Рис. 9. Количество ВПО

данная методика не позволяет учесть ограничения, которые накладывает структура ВП, загруженность диспетчера, а также динамику развития ситуации на поверхности аэродрома, например скопление очереди ВС на предварительном старте. В составе КИМ ОрВД реализована методика расчета ПА (количества ВПО) на основе допустимого уровня задержек как в воздухе, так и на земле. Оценка количества ВПО производится с использованием имитационного моделирования полетов ВС в диспетчерской зоне района аэродрома и движения ВС по поверхности аэродрома.

Количество ВПО в i -й интервал времени

$$W_{\text{ВПО}}^i = \sum_j w_{j\text{ВПО}}^i, \tag{2.46}$$

где $w_{j\text{ВПО}}^i$ – вылет или прилет j -го ВС в i -й интервал времени.

Полученные часовые значения количества ВПО проходят статистическую обработку. На рис. 9 представлен пример проведения статистической обработки путем построения аппроксимирующего полинома, где по оси абсцисс – интенсивности часовых значений ВПО, по оси ординат – задержки. Точками отмечены часовые реализации интенсивностей на аэродроме и соответствующие им задержки. Полином строится на основе значений часовых интенсивностей на аэродроме, полученных по результатам имитационного моделирования.

Максимальное количество ВПО определяется исходя из пересечения кривой полинома и допустимого уровня задержки, задаваемого исследователем, который обозначается горизонтальной прямой (рис. 9). Более подробное описание методики расчета количества ВПО представлено в [31].

2.5.2. Количество аэродромных операций без пересечения ВПП $W_{\text{пересеч}}$. ПА определяется не только количеством ВПО, но и количеством операций по пересечению ВПП при рулении ВС по площади маневрирования.

Минимизация операций по пересечению ВПП позволяет снизить задержки на вылете и прилете за счет создания дополнительных интервалов времени для выполнения ВПО. Показатель определяется по результатам имитационного моделирования управляемого движения ВС по поверхности аэродрома.

Количество аэродромных операций без пересечения ВПП в i -й интервал времени

$$W_{\text{пересеч}} = W_{\text{пересеч}}^{\text{const}} - \sum_j w_{j\text{пересеч}}^i, \tag{2.47}$$

где $W_{\text{пересеч}}^{\text{const}}$ – заданный уровень максимального допустимого количества пересечения ВПП в интервал времени, $w_{j\text{пересеч}}^i$ – пересечение ВПП j -м ВС в i -й интервал времени.

2.6. Модели расчета показателей влияния на окружающую среду $W_{\text{ср}}$. Запишем группу показателей, которая характеризует влияние на окружающую среду:

$$W_{\text{ср}} = (W_{\text{шум}}, W_{\text{CO}_2})^T. \tag{2.48}$$

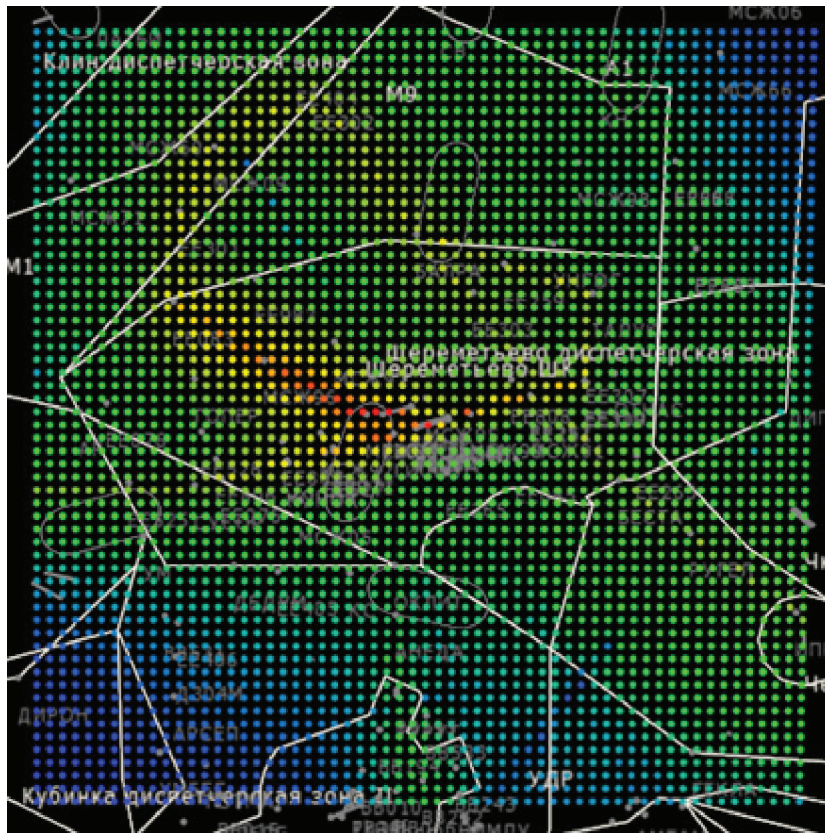


Рис. 10. Визуализация шумового воздействия

2.6.1. Шумовые воздействия $W_{\text{шум}}$. Расчет шумовых воздействий выполняется в районе аэродрома на основе индексов шума в точках земной поверхности в дневное, вечернее и ночное время.

Оценка уровня шума в последнее время приобретает актуальность ввиду близкой застройки жилых кварталов к аэродромам и ростом интенсивности ВД. Расчет производится по результатам имитационного моделирования управляемых полетов ВС в районе аэродрома или аэроузла и реализуется в соответствии с методикой [10]. Для оценки строятся контуры шума (значения индекса шума) вокруг аэродрома. При этом должен учитываться не только факт пролета ВС, но и его характеристики, такие, как тип ВС, режим мощности двигателей, расположение двигателей и др.

Эквивалентный взвешенный уровень звука в точке определяется как

$$W_{\text{шум}} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{E,i} + \Delta_i}{10}} \right), \quad (2.49)$$

где T_0 – период, для которого рассчитывается контур шума, $L_{E,i}$ – уровень звука единичного воздействия, N – количество событий, Δ_i – весовой коэффициент i -го события (в соответствии со временем суток).

Уровень шума единичного воздействия

$$L_{E,i} = L_{E,\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\phi) - \Lambda(\beta, l) + \Delta_F, \quad (2.50)$$

где $L_{E,\infty}(P, d)$ – базовые уровни шума, на основе данных по характеристикам ВС, где P – режим мощности, d – кратчайшее расстояние от точки наблюдения до участка траектории полета, $\Delta_V, \Delta_I(\phi), \Lambda(\beta, l), \Delta_F$ – корректировки значений.

На рис. 10 представлена тепловая карта с рассчитанными значениями уровней звука в районе аэродрома Шереметьево.

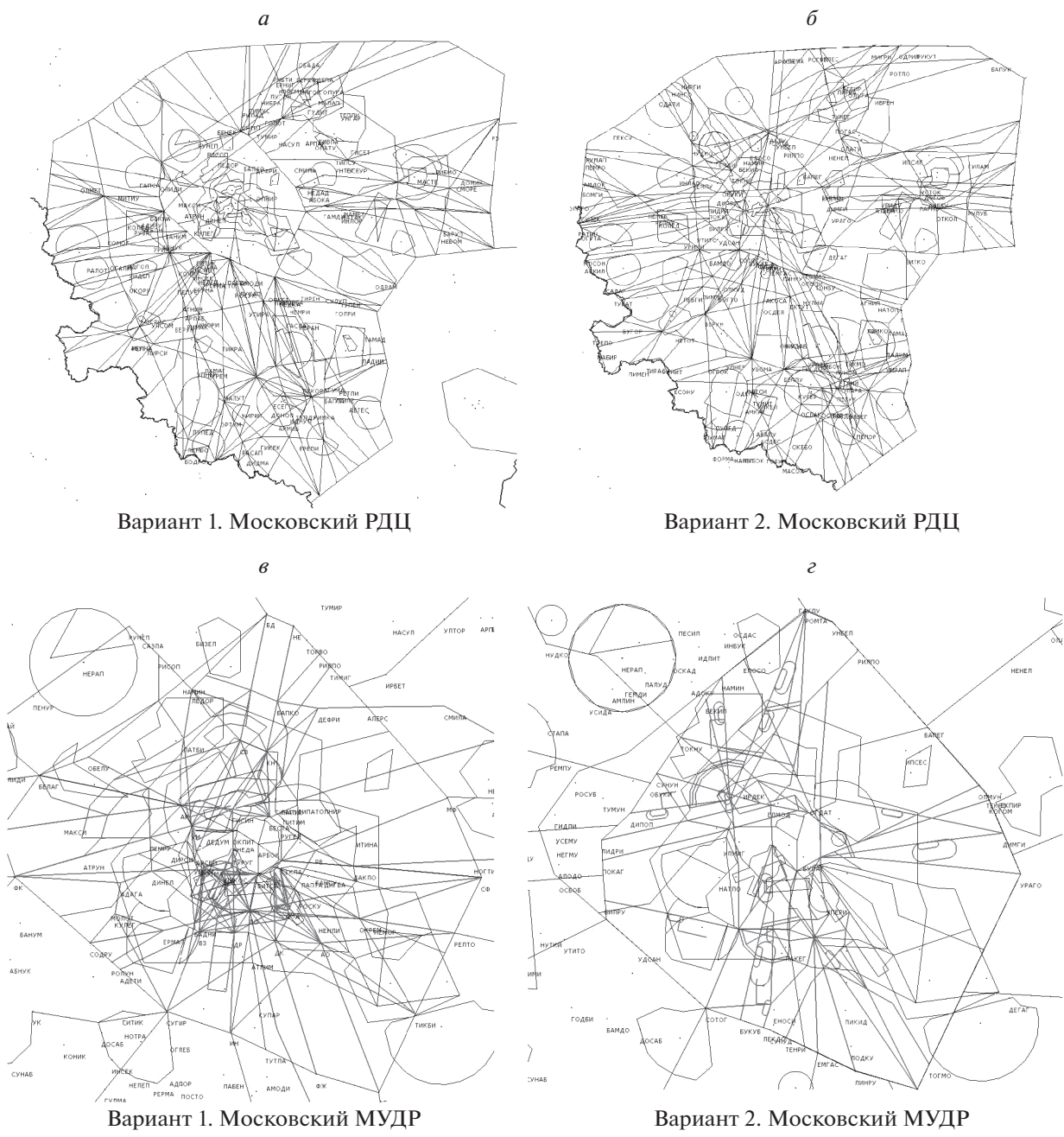


Рис. 11. Варианты структуры ВП

2.6.2. Выбросы вредных веществ W_{CO_2} . Показатель определяет массу выбросов вредных веществ CO_2 в окружающую среду. В перечень нормируемых ИКАО загрязняющих атмосферу веществ входят: окись углерода, несгоревшие углеводороды, оксиды азота, дым, а также парниковые газы: метан, двуокись углерода и др. Однако наибольший “вклад” в загрязнение окружающей среды вносит двуокись углерода (CO_2). Таким образом далее будет рассматриваться расчет именно этого газа.

Расчет производится по результатам имитационного моделирования на основе трековой информации по результатам выполнения полетов ВС, согласно [32]. Масса выбросов CO_2 i -го ВС рассчитывается как

$$M_{CO_2}^i = 3.12M_T^i, \tag{2.51}$$

где M_T^i – масса израсходованного топлива i -м ВС.

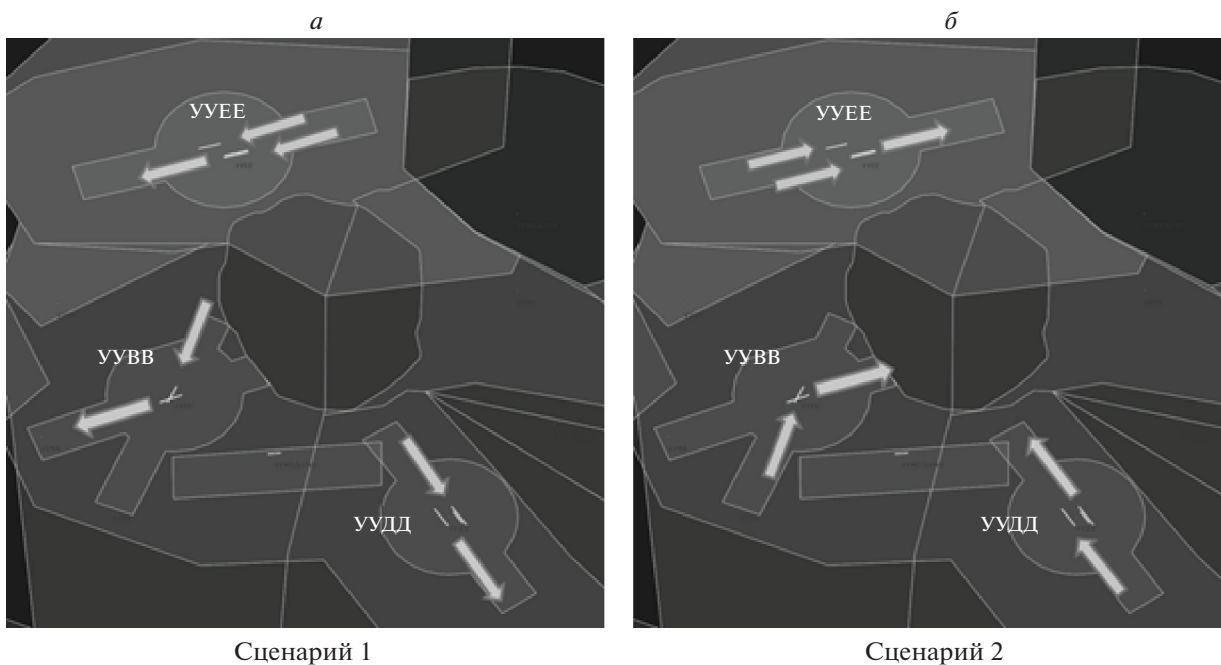


Рис. 12. Сценарии моделирования

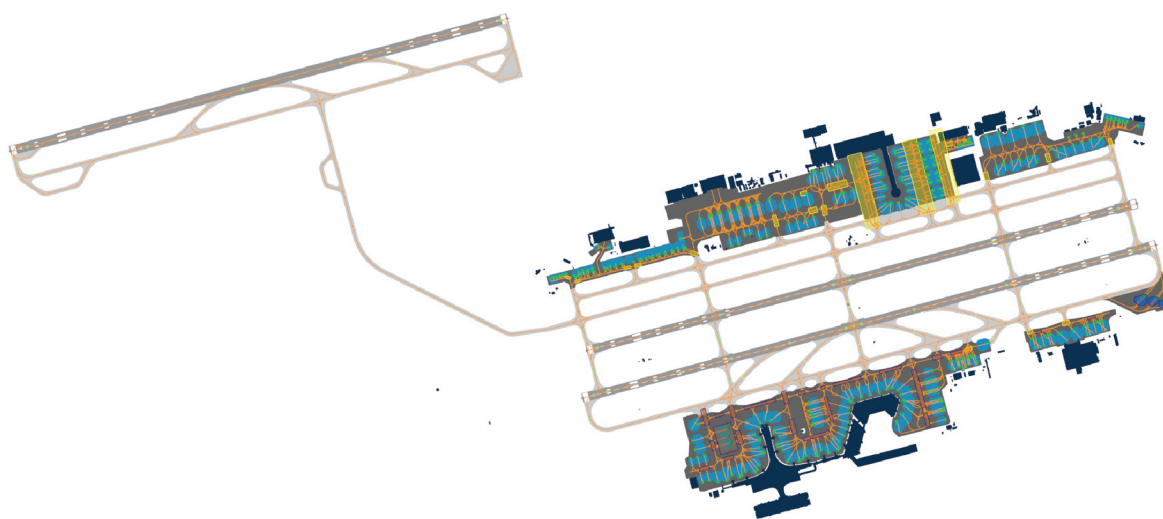


Рис. 13. Аэродром Шереметьево

Показатель по всем ВС определяется следующим образом:

$$W_{CO_2} = \sum_i M_{CO_2}^i \quad (2.52)$$

3. Сравнительный анализ вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродромов на примере

3.1. Описание структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. В качестве примера приводится сравнительная оценка трех вариантов структуры ВП Московской зоны единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД), включая Московский районный диспетчерский центр (РДЦ) и Московский узловой диспетчерский район (МУДР). Вариант 1 и 2 – перспективные структуры ВП Московской зоны, разработанные в целях повышения



Рис. 14. Количество ПКС: вариант 1 – 522, вариант 2 – 323

пропускной способности и эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома. Вариант 3 – действующая структура ВП Московской зоны ЕС ОрВД, рассматривается в качестве базового варианта. Далее приводятся результаты исследований по расчету перспективных вариантов, полученные на КИМ ОрВД. На рис. 11 изображены два варианта перспективной структуры Московской зоны ЕС ОрВД:

На рис. 11, *а* и *б* показаны два варианта структуры верхнего ВП в зоне обслуживания Московского РДЦ, включая ВТ и точки ВП, границы секторов УВД. На рис. 11, *в* и *г* рассмотрены два варианта структуры МУДР, который состоит из маршрутов вылета и прибытия на три основных аэродрома Московского аэроузла: Шереметьево (код аэропорта ИКАО – УУЕЕ), Домодедово (код аэропорта ИКАО – УУДД) и Внуково (код аэропорта ИКАО – УУВВ), границ секторов подхода, круга, а также границ диспетчерских зон районов аэродрома. На рис. 12 стрелками изображены направления вылета и прилета для двух вариантов структуры ВП в зависимости от направления ветра для трех аэродромов: Шереметьево (УУЕЕ), Внуково (УУВВ), Домодедово (УУДД). На рис. 13 для примера представлена инфраструктура аэродрома Шереметьево с третьей ВПП.

3.2. Потоки ВД. Для проведения исследований двух вариантов структуры ВП был выбран суточный фактический 24-часовой поток ВД с наибольшей интенсивностью ВД за летний период, когда наблюдается увеличение трафика в южном направлении из-за сезона отпусков.

3.3. Результаты исследований. Как было сказано в разд. 1, группа показателей безопасности полетов определяется несколькими показателями. В подразд. 3.3. описаны примеры расчета показателей в рамках исследований по сравнительной оценке двух вариантов структур ВП.

3.3.1. Количество ПКС $W_{\text{ПКС}}$. На рис. 14 изображена диаграмма с количеством ПКС в двух вариантах структуры ВП. В первом столбце приведено общее количество ПКС, во втором и третьем – ПКС в зоне обслуживания районного диспетчерского центра (РДЦ) и аэродромного диспетчерского центра (АДЦ) соответственно. Как видно из диаграммы, в варианте 2 количество ПКС меньше как в РДЦ, так и в АДЦ.

На рис. 15 представлено распределение ПКС по секторам в двух вариантах структуры ВП.

Вариант 1 отличается большим количеством ПКС. В варианте 2 структуры ВП наблюдается значительное число ПКС в меньшем количестве секторов.

3.3.2. Задержки $W_{\text{а.зад}}$. На рис. 16 введен график с распределением суммарных задержек в двух вариантах структуры ВП в течение суток. По оси абсцисс приведены часовые интервалы, по оси ординат – суммарные задержки по прилету и вылету (в минутах).

Как видно из графика, задержки в варианте 1 значительно превышают задержки в варианте 2 в каждом часе.

На рис. 17 рассмотрено распределение средних значений задержек (в минутах) на основных аэродромах МУДР.

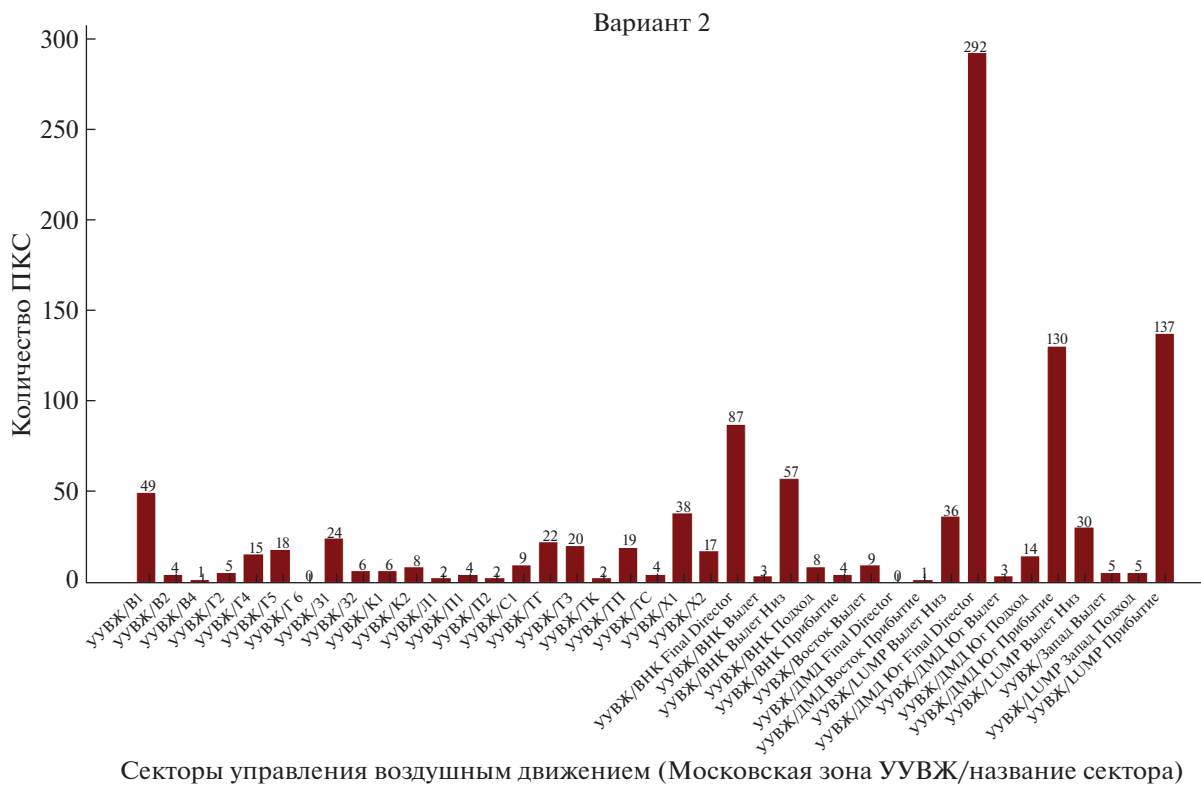
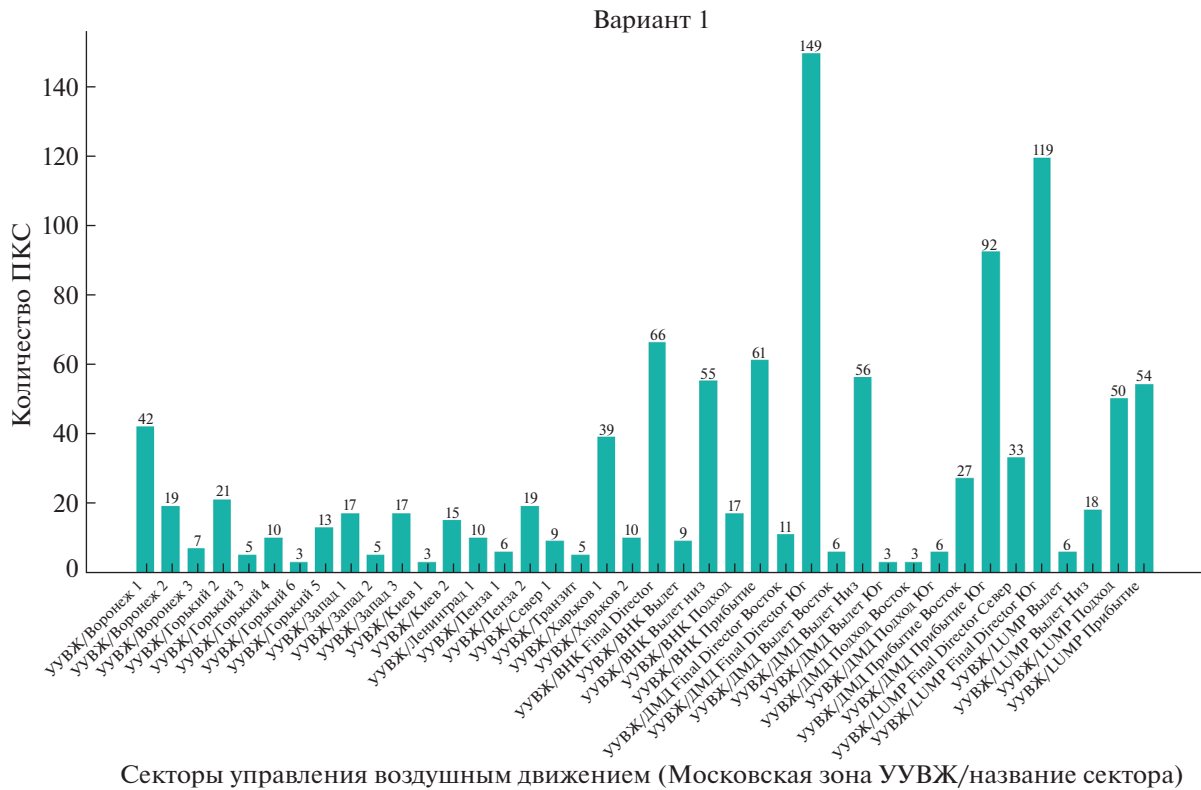


Рис. 15. Распределение ПКС по секторам УВД Московской зоны ЕС ОрВД (УУВЖ)

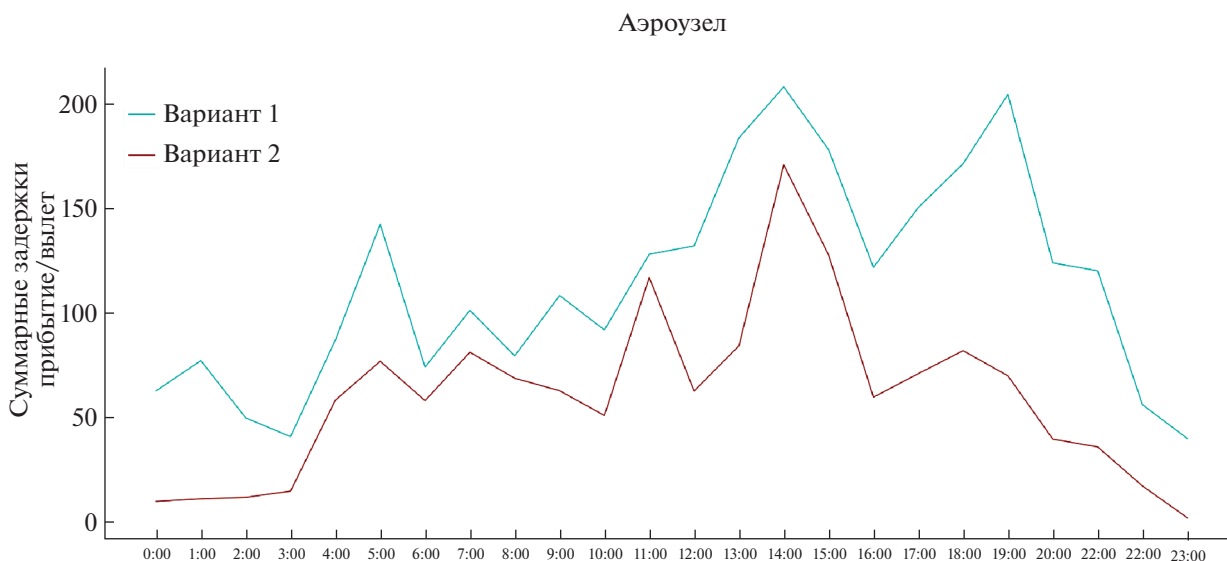


Рис. 16. Суммарные задержки

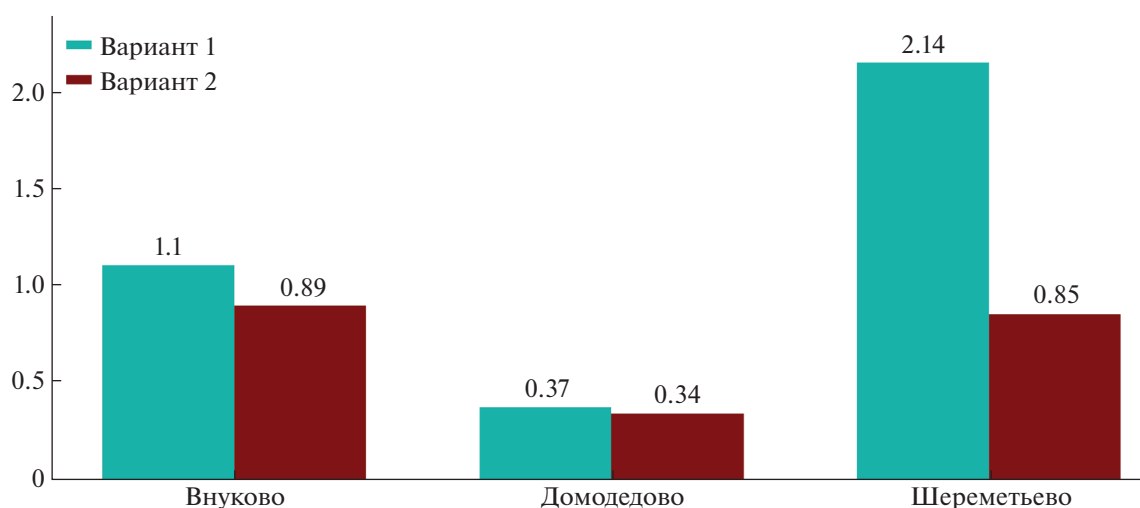


Рис. 17. Распределение задержек по аэродромам

Задержки на аэродроме Шереметьево в варианте 1 превышают задержки в варианте 2. Увеличение задержек в варианте 1 связано с обеспечением более гибких мер при формировании очереди на прилет и вылет. Моделирование движения ВС по поверхности аэродрома Шереметьево для варианта 2 не увеличивает задержки.

3.3.3. Ортодромичность маршрутов $W_{ортодр}$. Одним из показателей, характеризующих эффективность для пользователей ВП, является ортодромичность маршрутов. На рис. 18 представлена диаграмма с результатами расчета показателя для двух вариантов структуры ВП отдельно для вылетающих и прилетающих на основные аэродромы МУДР ВС.

Маршрутная часть полета в верхнем ВП в варианте 2 является менее эффективной по протяженности, чем в варианте 1.

3.3.4. Время руления ВС по поверхности аэродрома $W_{врем.рул}$. На рис. 19 приведен показатель “Время руления ВС по поверхности аэродрома”. На рис. 19, а и б – время руления на вылете для двух вариантов структуры ВП, на рис. 19, в и г – время руления на прилете для этих же вариантов. По оси абсцисс – модельное время, по оси ординат – время руления.

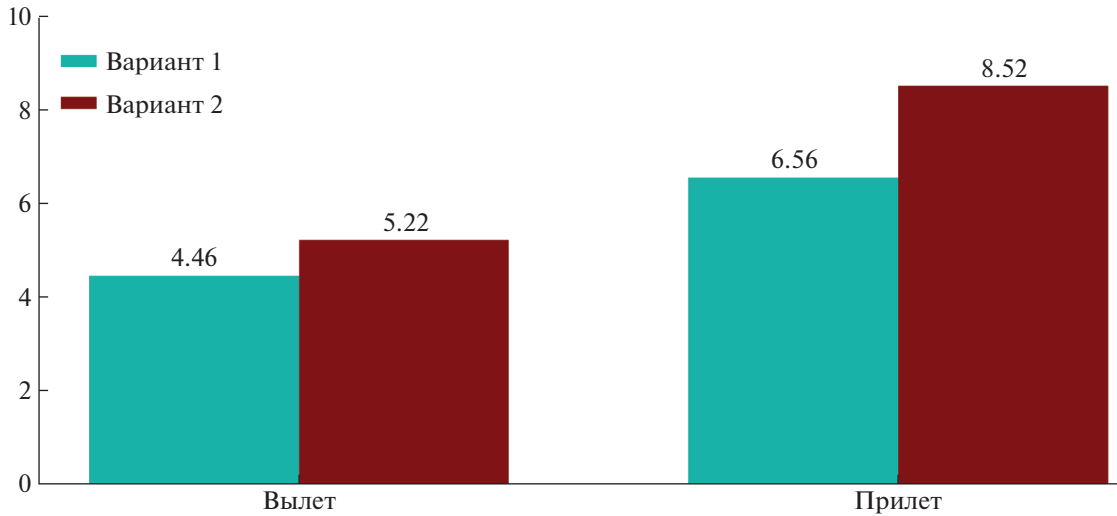


Рис. 18. Ортодромичность маршрутов (в процентах)

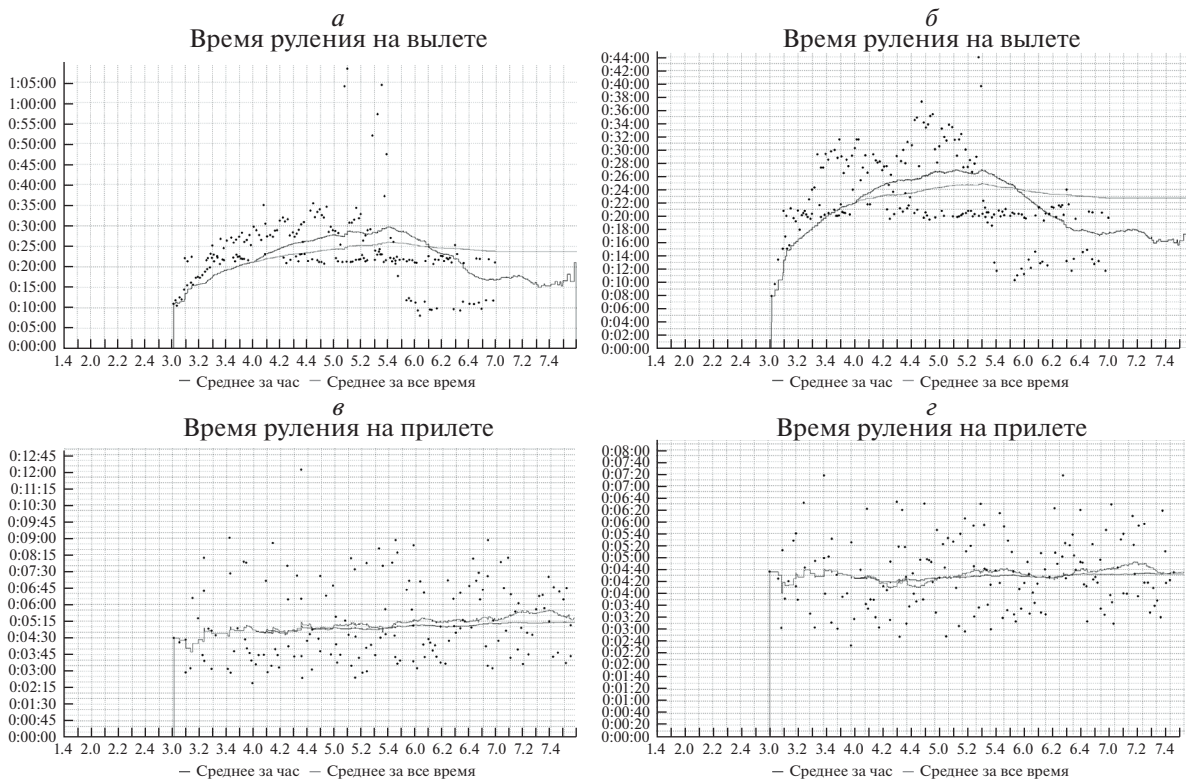


Рис. 19. Время руления на аэродроме Шереметьево

Для двух вариантов время руления на вылете составляет в среднем около 24 мин, однако в варианте 1 в пиковые часы время руления достигает 30 мин. Время руления на прилете составляет порядка 5 мин для двух вариантов.

3.3.5. Количество ВПО на поверхности аэродрома $W_{ВПО}$. На рис. 20 изображены диаграммы с количеством ВПО на аэродроме Шереметьево. Черным цветом на графиках изображено количество вылетов и прилетов за час, по оси абсцисс – “скользящий” час. Как видно из рисунка, в варианте 1 в пиковые часы интенсивность составляет 120 ВПО в час, в варианте 2 – только 115 ВПО в час.

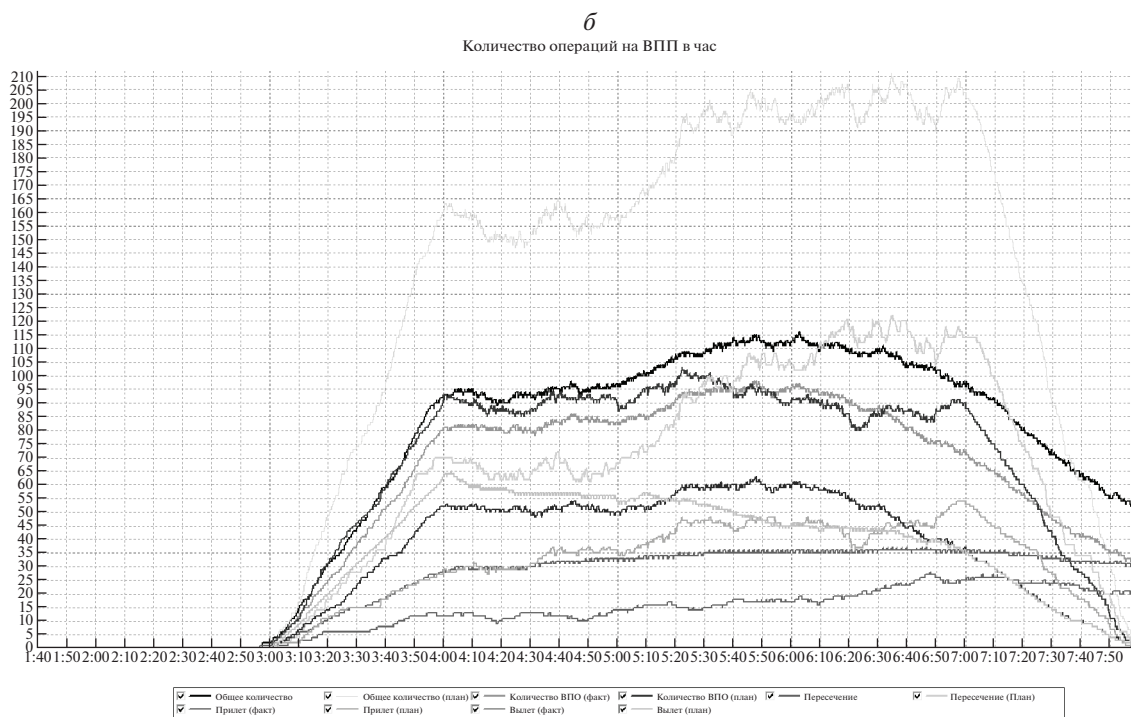
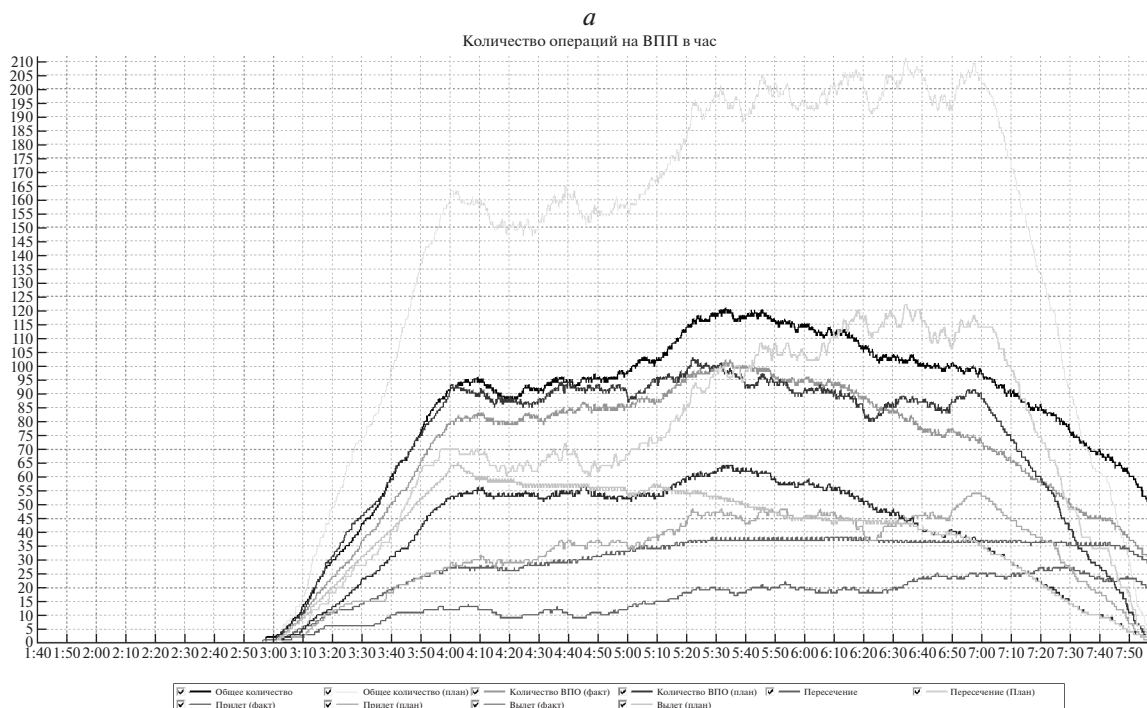


Рис. 20. Количество ВПО

3.4. Выводы по результатам исследований. В примере проводилось сравнение трех вариантов структуры ВП с учетом моделирования движения ВС по поверхности аэродрома Шереметьево. В рамках группы по безопасности W_6 был произведен расчет и анализ показателя “Потенциальные конфликтные ситуации” $W_{ПКС}$. По группе для пользователей ВП W_a были проанализированы следующие показатели: “Ортодромичность маршрута” ($W_{ортодр}$), “Задержки” ($W_{а.зад}$) и “Время руления ВС по поверхности аэродрома” ($W_{врем.рул}$). По группе ПВП $W_{ПВП}$

Таблица. Результаты исследований

Группа показателей	Показатель	Вариант		
		1	2	3
Безопасность (W_6)	ПКС ($W_{\text{ПКС}}$)	522	323	600
Эффективность для пользователей ВП (W_a)	Ортодромичность маршрута ($W_{\text{ортодр}}$), %	7	8.5	9
	Задержки ВС ($W_{\text{а.зад}}$), мин	Внуково – 1.1	Внуково – 0.89	Внуково – 2
		Домодедово – 0.37	Домодедово – 0.34	Домодедово – 3.5
	Шереметьево – 2.14	Шереметьево – 0.85	Шереметьево – 5	
ПВП ($W_{\text{ПВП}}$)	Время руления ВС по поверхности аэродрома Шереметьево ($W_{\text{врем.рул}}$), мин	30	24	35
	Равномерность временной загрузки диспетчера ($W_{\text{врем.загр.дисп}}$)	0.05	0.09	0.03
	Загрузка секторов без превышения НПС сектора ($W_{\text{сек}}$), сектор/час на каждое ВС	0.31	0.34	0.25
ПА ($W_{\text{ПА}}$)	Количество ВПО ($W_{\text{ВПО}}$), ВПО в час	66	64	55
Эффективность для системы ОрВД ($W_{\text{ОрВД}}$)	Неравномерность загрузки участков ВТ ($W_{\text{загр.уч.ВТ}}$), ВС в час	24.4	23	28
	Неравномерность загрузки точек ВП ($W_{\text{загр.точек.ВП}}$), ВС в час	28.85	26.6	31
	Использование ЗО ($W_{\text{исп.ЗО}}$), кругов на каждое ВС	1.5	1	2.5
Влияние на окружающую среду ($W_{\text{ср}}$)	Выбросы вредных веществ (W_{CO_2}), тыс. кг/сут.	34450	31235	38340

рассматривались показатели, связанные с загруженностью диспетчерской позиции: “Равномерность временной загрузки диспетчера” ($W_{\text{врем.загр.дисп}}$), “Загрузка секторов без превышения НПС сектора” ($W_{\text{сек}}$). В части показателей ПА $W_{\text{ПА}}$ анализировался показатель “Количество ВПО” ($W_{\text{ВПО}}$). По группе показателей эффективности для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$ были рассчитаны следующие показатели: “Неравномерность загрузки участков ВТ” ($W_{\text{загр.уч.ВТ}}$), показатель “Неравномерность загрузки точек ВП” ($W_{\text{загр.точек.ВП}}$), “Использование ЗО” ($W_{\text{исп.ЗО}}$). В части группы показателей влияния на окружающую среду $W_{\text{ср}}$ рассматривался показатель: “Выбросы вредных веществ” (W_{CO_2}).

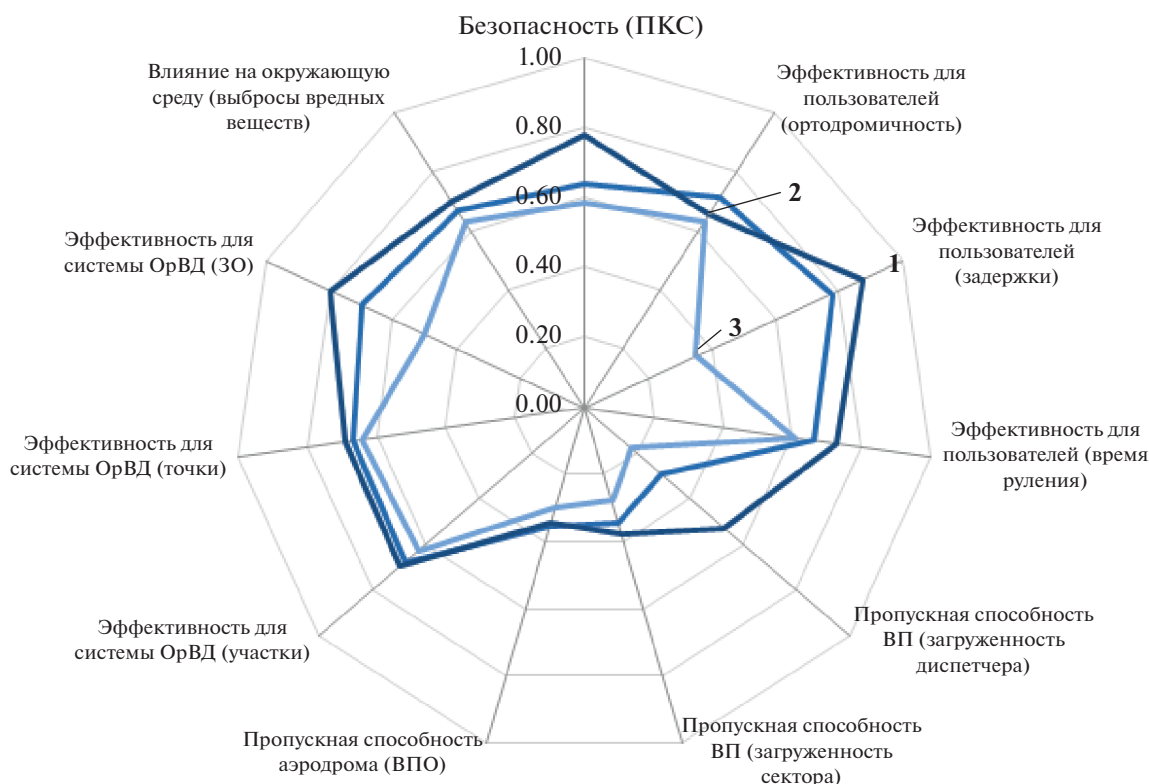


Рис. 21. Графическое представление результатов расчета показателей по трем вариантам структуры ВП и инфраструктуры аэродрома

По результатам моделирования были получены следующие значения показателей по трем вариантам структуры ВП и инфраструктуры аэродрома (таблица).

На рис. 21 дано графическое представление исследуемых вариантов.

Для графического представления все показатели были нормированы к значениям от 0 до 1 следующим образом:

$$x_i^* = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \tag{3.1}$$

где x_i – значение показателя до нормирования. За минимальное значение x_{\min} принималось значение, равное 0, за максимальное x_{\max} – сумма по всем значениям показателей. Так как по некоторым группам показателей необходимо минимизировать критерий, а по другим максимизировать, то для удобства графического представления часть результатов показателей, которые необходимо было минимизировать, была инверсирована путем вычитания из единицы.

Анализ полученных результатов (рис. 21) показывает, что оба варианта перспективной структуры превосходят базовый вариант структуры (вариант 3) и принадлежат множеству Парето. Из сравнительного анализа перспективных вариантов видно, что вариант 2 предпочтительнее по всем показателям, кроме ортодромичности и ПА: разница по ортодромичности составила 1.5%, а по пропускной способности – 2 ВПО в час. На основании мнений экспертов выбирается вариант 2, поскольку такая разница по двум показателям является допустимой и не ухудшает значительно данные показатели и может быть нивелирована с помощью:

оптимизации маршрутной сети ВТ за счет применения зональной навигации, что приведет к снижению горизонтальной неэффективности маршрутов – показателя ортодромичности;

совершенствования технологических процессов, например применения сокращенных интервалов на посадке, а также внедрения системы согласованного совместного принятия решения на аэродроме, что в свою очередь приведет к увеличению ПА.

Заключение. Постоянный рост интенсивности ВД как в РФ, так и во всем мире приводит к необходимости модернизации структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Модернизация струк-

туры ВП и инфраструктуры аэродрома в системе ОрВД является сложным процессом, где необходимо учитывать множество правил и ограничений. Результаты проектирования структуры ВП должны проверяться на соответствие нормативным документам. На этапе разработки концептуального проекта может быть создан ряд альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродромов, которые будут являться лишь допустимыми и отвечать типовым принципам проектирования. Однако проверить варианты сразу на эффективность с учетом процессов ОрВД и их динамики без математического моделирования не представляется возможным, тем более когда у каждого участника процесса ОрВД имеются свои предпочтения и свои показатели эффективности.

В статье рассмотрена задача выбора одного из альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома на основе их сравнительного анализа по разным группам показателей эффективности. Предложен критерий эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома, представляющий собой вектор, который состоит из групп показателей эффективности, отражающих интересы различных участников процесса ОрВД: авиакомпаний, операторов аэропортов, провайдеров аэронавигационных услуг, авиационных властей и др. По каждой группе приведены показатели, по которым сравниваются варианты с помощью количественного анализа методами математического моделирования. Рассмотрены математические модели расчета показателей эффективности по каждой из групп, отражающих интересы отдельных участников ОрВД. В постановке задачи представлены условия применения, в которых функционируют альтернативные варианты, определяющие потоки ВС в трафике, а также метеоусловия выполнения полетов, технологии работы диспетчеров. Приведены ограничения, которые вытекают из требований по безопасности и пропускной способности и позволяют отбросить варианты, не удовлетворяющие условиям задачи.

Решение данной задачи дает возможность оценить рассматриваемые варианты с точки зрения каждого из участников процесса ОрВД, а также проанализировать как действующие варианты структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, так и концептуальные проекты, созданные при их модернизации для безопасного и эффективного функционирования в условиях увеличенной интенсивности ВД.

В статье представлен иллюстрирующий пример оценки двух вариантов структур ВП Московской зоны ЕС ОрВД и инфраструктуры аэродрома Шереметьево.

В следующей работе будет рассмотрен КИМ ОрВД, на базе которого и производится численная сравнительная оценка альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродромов, входящие в него имитационные и расчетные модели, позволяющие моделировать воздушную обстановку и движение ВС по поверхности аэродрома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д.* Автоматизация управления воздушным движением. М.: Транспорт, 1992.
2. Глобальный аэронавигационный план (ГАНП, Doc 9750), ИКАО. Монреаль, 2019.
3. Федеральная целевая программа “Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009–2020 годы)”: утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 1 сентября 2008 г. № 652.
4. Руководство по глобальным характеристикам аэронавигационной системы (Doc 9883), ИКАО, 1-е изд. Монреаль, 2009.
5. Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД (Doc 9854), ИКАО. Монреаль 2005.
6. GANP Portal. KPI Overview, ICAO. Montreal, 2021.
7. Recommended Key Performance Indicators for Measuring ANSP Operational Performance. CANSO. The Netherlands, March, 2015.
8. Methodologies for Calculating Delays/Improvement Opportunity Pools By Phase of Flight. CANSO. The Netherlands, May, 2013.
9. ГОСТ 22283-2014. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения, МКС 49.100. М., 01.01.2015.
10. Рекомендуемый метод расчета контуров шума вокруг аэропортов (Doc 9911), ИКАО, 2-е изд. Монреаль, 2018.
11. *Попов А.С., Вишнякова Л.В., Десярев О.В.* Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) // Тр. Всероссийск. научно-практической конф. по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС). М., 2012.

12. *Попов А.С., Вишнякова Л.В., Сикачев В.Ю.* Имитационное моделирование системы организации воздушного движения // Седьмая всероссийская научно-практическая конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности “Имитационное моделирование. Теория и практика” (ИММОД-2015). М., 2015.
13. Описание реализованных в комплексе имитационного моделирования при модернизации решений и алгоритмов функциональных моделей и программных модулей КИМ ОрВД // ФГУП “Госкорпорация по КИМ ОрВД”. М., 2017.
14. Safety Management Manual (SMM) Doc 9859 AN/474. Third Edition, ICAO. Montreal, 2013.
15. Единые принципы моделирования риска столкновения в обоснование “Руководства по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689)”. Циркуляр ИКАО 319-AN/181 13 ИКАО. Монреаль, 2009.
16. *Обухов Ю.В., Попов А.С., Орлов В.С., Котова А. О.* Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов // Тр. МАИ. 2015. № 81.
17. *Обухов Ю.В., Вишнякова Л.В.* Решение задачи оценки безопасности полетов с помощью метода имитационного моделирования // Изв. РАН. ТиСУ. 2018. № 6.
18. *Котова А.О., Зубкова И.Ф., Обухов Ю.В.* Особенности человека-оператора в модели диспетчерского обслуживания воздушного движения в составе имитационной модели оценки безопасности полетов // Тр. ГосНИИАС. Сер.: Вопросы авионики. 2018. № 1(34). С. 41–61.
19. *Обухов Ю.В., Сикачев В.Ю., Попов А.С.* Оценка безопасности полетов в одном из вариантов перспективной структуры Московского районного центра с применением имитационного моделирования // Тр. ГосНИИАС. Сер.: Вопросы авионики. 2018. № 2(35). С. 3–17.
20. Additional ASMA Time Performance Monitoring and Reporting – Level 1/2 (Edition Number: 00-04. Category: Performance Monitoring and Reporting. Eurocontrol). Brussels, 24.02.2015
21. *Lee P., Smith N., Homola J., Brasil C., Buckley N., Cabral C., Chevalley E., Parke B., Hyo-Sang Yoo.* Reducing Departure Delays in LaGuardia Airport with Departure-Sensitive Arrival Spacing (DSAS)// Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015). Lisbon, 2015.
22. Base of aircraft database (BADA) Product Management Document EEC Technical/Scientific Report No. 2009-008 Eurocontrol. Brussels, 2019.
23. Performance Indicator – Horizontal Flight Efficiency Level 1 and 2 documentation of the Horizontal Flight Efficiency key performance indicator (Edition Number: 01-00. Category: Performance Monitoring and Reporting – Level 1/2 . Eurocontrol). Brussels, 23.05.2014.
24. Рамки эффективности работы для Европейского региона, Doc 030 Eur-030. Монреаль, 2020.
25. Additional Taxi-Out Time Performance Indicator document Level 1/2 (Edition Number: 00-04. Category: Performance Monitoring and Reporting. Eurocontrol). Brussels, 24.02.2015.
26. Методика оценки эффективности предложений по изменению трассовой структуры ВП с использованием КИМ ОрВД // Рабочий документ. ФГУП “Госкорпорация по ОрВД”. М., 2008.
27. Analysis of en-route vertical flight efficiency. Technical report on the analysis of en-route vertical flight efficiency (Edition Number: 00-04. Category: Performance Monitoring and Reporting. Eurocontrol). Brussels, 19.01.2017.
28. Правила расчета ПКС и временной загруженности диспетчера РЦ // Рабочий документ. ФГУП “ГосНИИАС”, ФГУП “Госкорпорация по ОрВД”. М., 2010.
29. Методика определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения // Приказ Росавиации от 7 ноября 2012 г. № 757.
30. Методика расчета технической возможности аэропортов // Приказ Минтранса РФ от 24 февраля 2011 г. № 63.
31. *Попов А.С., Минаенко В.Н.* Оценка ПС аэродромного ВП с использованием имитационного моделирования на примере аэропорта Сочи // Тр. конф. ФГУП ГосНИИАС “Моделирование авиационных систем”. М., 2013.
32. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации // Министерство транспорта РФ 27 октября 2008 г.