

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Муравьев Алексей Станиславович

аспирант

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации»

г. Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация: в статье описан метод математического моделирования процессов управления движением самолетов на площади маневрирования аэропорта, formalизованы основные задачи, конструктивно входящие в модель, а также приведен сравнительный анализ эффективности управления в зоне ответственности диспетчерского пункта руления.

Ключевые слова: моделирование, управление воздушным движением, эффективность управления.

Учитывая рост интенсивности воздушного движения, руководство Российской Федерации совместно с Международной организацией гражданской авиации ведет поиск решений для повышения эффективности и безопасности воздушных перевозок [1]. В связи с этим появилась тенденция перехода от традиционной организации воздушного движения (ОрВД) к концепции гибкого управления движением [2]. Реализация данной концепции требует интеграции отечественной системы в единую мировую систему ОрВД по принципу «от перрона до перрона». Данный принцип подразумевает более эффективное управление воздушным движением (УВД) на всем протяжении маршрута воздушного судна (ВС), включая движение самолета по земле (площади маневрирования аэропорта), с целью повышения безопасности и экономичности воздушного транспорта. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию процесса

формирования бесконфликтных траекторий ВС на этапе захода на посадку [5; 6]. Но без привязки к наземной обстановке невозможно выполнение принципа УВД «от перрона до перрона», в связи с чем возникает необходимость в разработке и описании с достаточной степенью ясности и детализации процессов УВД на площади маневрирования.

Одним из эффективных способов решения задачи является математическое моделирование. Результаты, полученные в ходе этого процесса, могут быть использованы с целью:

- обеспечения и повышения заданной пропускной способности площади маневрирования аэропорта при возрастании потока прилетающих и вылетающих воздушных судов (с соблюдением условий безопасности);
- формирования исходных данных для долгосрочного и среднесрочного планирования УВД, чтобы исключить задержки при вылете ВС и связанные с этим экономические потери.

В статье рассмотрено первое направление применения моделирования – обеспечение и повышение заданной пропускной способности. Воздушное пространство (ВП), затронутое в рамках исследования, характеризуется площадью маневрирования, зоной подхода (не выше высоты нижнего безопасного эшелона и не ниже $H_{бзп}$, с момента начала предпосадочного маневрирования), а также воздушным пространством (до высоты $H=200\text{м}$), занимаемым ВС после взлета и необходимым ему для перехода к установившемуся режиму набора высоты. Целью моделирования является повышение пропускной способности площади маневрирования крупного аэропорта без изменения конфигурации летного поля. Процесс создания модели включает следующие этапы:

- исследование и анализ закономерностей движения ВС на площади маневрирования в часы максимальной интенсивности УВД;
- моделирование потока вылетающих ВС;
- моделирование потока прилетающих ВС;
- моделирование смешанного потока ВС;

– оценка эффективности модели путем сравнения результатов моделирования с данными реального УВД.

Этап оценки проводится на основе данных, полученных в аэропортах Шереметьево (г. Москва) и Пулково (г. Санкт-Петербург) в области обозначенного контура управления. В модели учитывалась неизменность технических средств УВД и структуры ВП, а также особенности регламента планирования и непосредственного управления.

Проведение предварительного исследования интенсивности УВД в этих аэропортах показало, что общий поток ВС целесообразно структурировать и проводить изучение его элементов по отдельности [7]. В частности, два его основных элемента – поток ВС на вылет и поток ВС на прилет – имеют некоторые принципиальные различия, определяющие индивидуальный подход к их изучению. Важным параметром объекта управления (ВС), по средствам которого оно осуществляется, является скорость ВС. Исходя из этого площадь маневрирования делится на элементы с высокоскоростным (магистральные РД и РД быстрого схода – $\max R_D$) и низкоскоростным режимом движения (соединительные РД, перроны – $\min R_D$), а также ВПП (рис.1). Места пересечения этих элементов площади маневрирования являются потенциально конфликтными точками пространства, которые может занимать только одно ВС в данный момент времени.

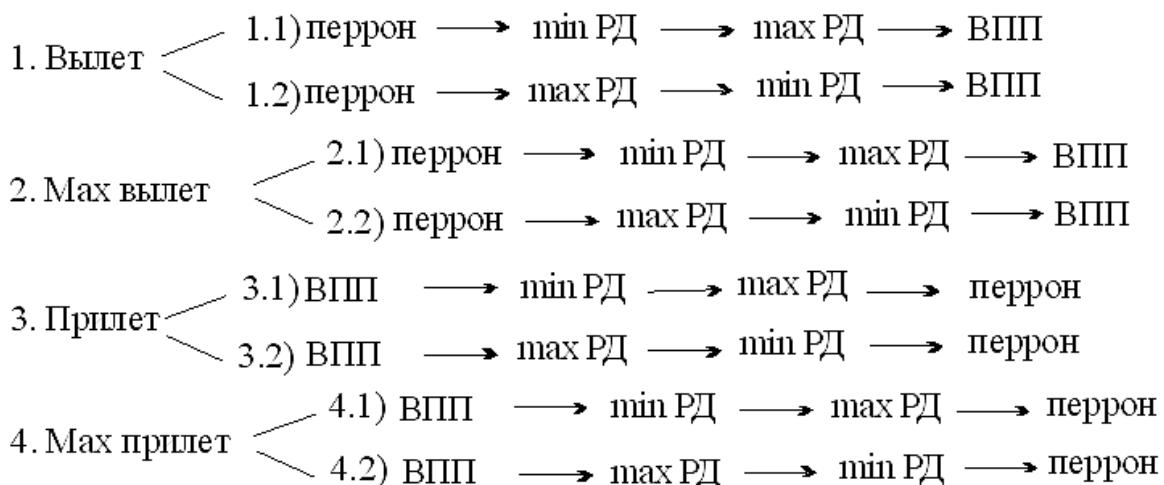


Рис.1. Принцип деления элементов площади маневрирования

Алгоритмы, отработанные при решении этих задач (однородных и без усложнения), далее комбинируются для моделирования задач при смешанной организации УВД (рис. 2). Одним из условий обеспечения безопасности функционирования системы УВД является составной временной показатель – τ , объединяющий в себе время расчета и время выдачи оптимального решения на УВД лицам, принимающим решение (ЛПР). Данный параметр должен быть меньше времени, затрачиваемого на передачу управления воздушным судном между смежными секторами УВД.

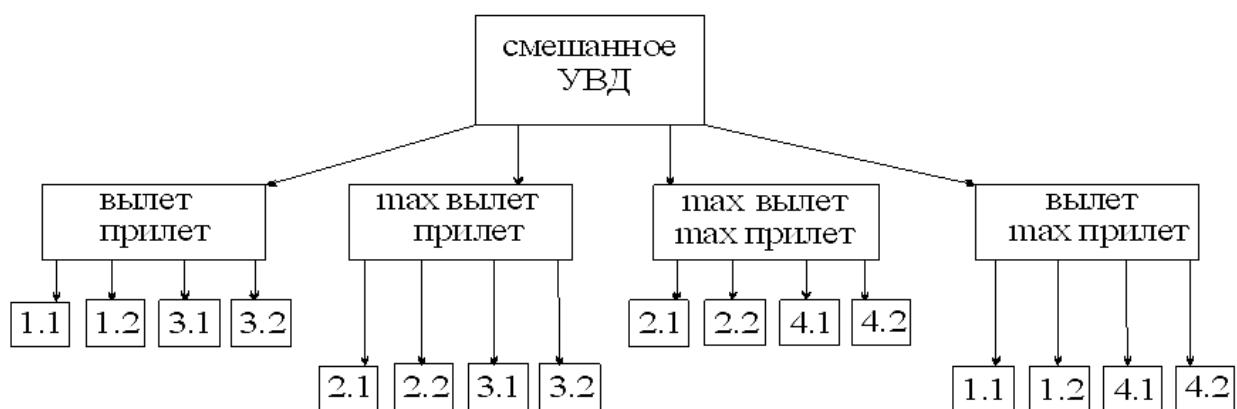


Рис. 2. Схема организации смешанного УВД

Моделирование потока вылетающих ВС. Исходными статистическими данными, на основании которых моделируется УВД, являются скорости ВС на руслении. Характер распределения значений скорости в процессе УВД, показал, что вылетающие ВС имеют большую скорость, в то время как заруливающие после посадки ВС – меньшую. В результате изучения характера распределения значений скорости на различных этапах движения ВС на площади маневрирования выявляется наиболее используемый скоростной интервал на конкретном этапе УВД. На основе выявленных закономерностей обосновываются нормы продольного и бокового эшелонирования на площади маневрирования [8], так как в руководящих документах [3; 4] не всегда есть четкие термины, исключающие двоякость понимания. В рамках решения задачи на вылет необходимо выстроить очередность занятия ВПП и выпустить как можно большее число ВС (N) с мест

стоянок (МС), исключая задержки на площади маневрирования при полном обеспечении безопасности. При выполнении операции взлета полоса занята с момента получения командиром ВС разрешения от ДР на занятие исполнительного старта до набора ВС высоты 200 м. Выполнение взлета у однотипных ВС занимает одинаковое время – $T_{взл}$. Весь процесс, с момента передачи управления до занятия $H=200\text{м}$: $T_{общ}=T_{взл}+T_{дв}+T_{пс}$, где $T_{дв}=V_{ср}/S_{дв}$ (расстояние от МС до предварительного старта), а $T_{пс}=10\text{сек.}$ – время необходимое для выполнения обязательной процедуры остановки на предварительном старте. Интервал начала движения ВС_j за ВС_i:

$$T_{нач.дв_j}=T_{общ_i}-(T_{дв_j}+T_{пс_j}) \quad (1)$$

$T_{нач.дв_2}$ обеспечивает непрерывность потока ВС на площади маневрирования и полную безопасность. Для обеспечения безопасности необходимо обязательное выполнение условия: $|T_{нач.дв_j} - T_{нач.дв_i}| \geq \Delta_{ij}$. Соблюдение данного условия гарантирует ВС от схождения в потенциально конфликтной точке площади маневрирования.

Моделирование потока прилетающих ВС. Основная задача процесса УВД на прилет заключается в моделировании маршрута движения ВС после посадки по бесконфликтной траектории до входа в глиссаду и формировании на этой основе потока ВС для выполнения посадочных операций. Моделирование потока заруливающих ВС, в целом, аналогично схеме выруливания. Однако, если при организации УВД на вылет безопасность существенно не зависела от времени входа ВС в зону ответственности ДР (ВС находится на перроне), то при посадочных операциях интервал входа ВС в контур управления строго ограничен. Процесс управления на этапе конечного захода на посадку требует наибольшей концентрации внимания от всех участников УВД, ввиду дефицита времени на исправление возможных отклонений. Экстремальными точками, ограничивающими часть ВП, находясь в котором на ВС практически прекращается управляемое воздействие со стороны органов УВД, являются точка начала снижения

для входа в глиссаду (ТВГ) и рубеж освобождения ВПП после пробега. Для обеспечения непрерывности и безопасности УВД должно выполняться условие ограничения количества ВС на глиссаде: $N_{\text{гл}} \leq N_{\text{гл max}}$ определяющее также формирование потока ВС на посадку. Данный параметр, зависит от средней скорости ВС на глиссаде ΔV_{at} , определяемый на основе средней скорость прохода порога ВПП V_{at} – рассчитывается от минимальной, в 1.3 раза превышающей скорость сваливания в посадочной конфигурации при максимальной сертифицированной посадочной массе ВС категории D (ВС 1-го класса), согласно классификации ИКАО:

$$\frac{V_{at \max} - V_{at \min}}{2} + V_{at \min} = \Delta V_{at}. \quad (2)$$

Далее определяется максимальное количество ВС на глиссаде:

$$\left(\frac{s_{\text{твг}}}{\Delta V_{at}} \right) / \Delta t_{\text{гл min}} = N_{\text{гл max}} \quad (3)$$

где $s_{\text{твг}}$ – длина глиссады;

$\Delta t_{\text{гл min}}$ – минимальный интервал продольного эшелонирования на глиссаде.

Следующим этапом моделирования является обеспечение освобождения ВПП после посадки. Для достижения этой цели рассчитывается параметр: $T_{\text{осв}}$ – время освобождения ВПП после касания, складываемый из времени пробега и схода с полосы:

$$t_{\text{прб}} + t_{\text{сх}} = T_{\text{осв}} \quad (4)$$

При условии выполнения ограничения:

$$\begin{aligned} T_{\text{осв}} - \Delta t_{\text{гл}} &= \Delta t_{\text{осв}}, \\ \Delta t_{\text{осв}} &\leq 0, \end{aligned} \quad (5)$$

являющегося основным параметром обеспечения безопасности, и не требующим дополнительного вмешательства в контур управления. Данный эффект достигается использованием РД быстрого схода с ВПП. В противном случае $\Delta t_{\text{осв}} >$, и необходимо торможение ВС на ВПП до скорости руления. В таком случае, вместо (5) вводится ограничение: $\Delta t_{\text{гл}} > \Delta t_{\text{гл min}}$, с целью увеличения посадочных интервалов.

Моделирование смешанного потока ВС. В целях моделирования смешанного УВД за основу была принята конфигурация летного поля с двумя параллельно расположенными ВПП и перронами по обе стороны (аэропорт Шереметьево). Рассмотрим наиболее сложную ситуацию – max вылет и max прилет. При осуществлении взлетных операций с одной ВПП, а посадочных – с другой, и отсутствии необходимости занятия полосы для проруливания, общая модель выглядит как:

$$\frac{\{T_{общ} i + \sum_{j=1}^{N-1} T_{нач.дв_j} + T_{взл_j}\}}{T_{нач.дв_j}} + \frac{\{T_{общ} k + \sum_{n=1}^{M-1} \Delta t_{гл min} + T_{осв n} + T_{рул n}\}}{\Delta t_{гл min}} = L_{общ}, \quad (6)$$

где N – общее число фактически вылетающих ВС;

M – общее число фактически прилетающих ВС;

$L_{общ}$ (ВС) – показатель эффективности функционирования модели.

При дальнейшем усложнении ДВО, выражающемся в неизбежности создания потенциально конфликтных ситуаций одним потоком ВС для другого, в исходную модель вносятся поправки, зависящие от характера создаваемых потенциально конфликтных ситуаций. Учитывая, что находящие на посадку ВС имеют приоритет перед выруливающими для взлета, модель принимает иной вид. УВД в случае пересечения посадочного курса потоком ВС на вылет:

$$\frac{T_{общj} + \sum_{j=1}^{N-1} T_{нач.дв_j} + \left(\sum_{f=1}^F T_{нач.дв_f} + \frac{\Delta t_{гл min}}{2} \right) + T_{взл_j}}{T_{нач.дв_j}} + \frac{T_{общ} k + \sum_{n=1}^{M-1} \Delta t_{гл min} + T_{осв n} + T_{рул n}}{\Delta t_{гл min}} = L_{общ} \quad (7)$$

где N – нечетные ВС на вылет;

F – четные ВС на вылет.

Оценка эффективности модели. С этой целью использовалась статистика аэропорта Шереметьево, приводимая относительно такого показателя эффективности УВД, как максимальное количество взлетно-посадочных операций в час (ВПО/ч), наблюдаемая в «часы пик» сезона увеличения авиаперевозок. В частности, за период с 01 по 03 июля 2011 года органы УВД Шереметьевского центра Московской воздушной зоны, зафиксировали максимальную часовую пропускную способность – 47 ВПО/ч, вылетов – 23, прилетов – 24. В то время как по плану ожидалась интенсивность – 22 ВПО/ч.

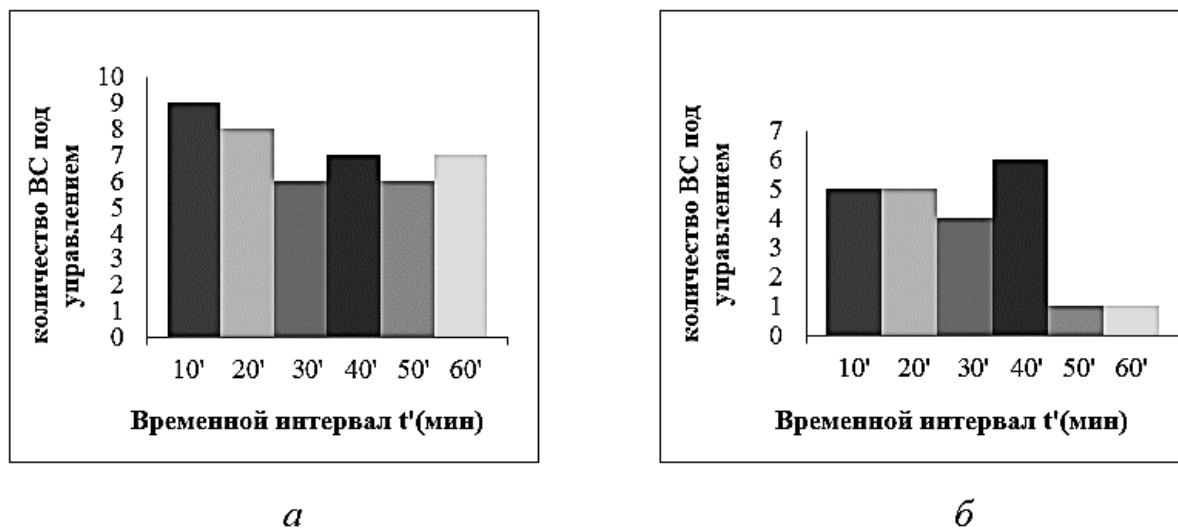


Рис. 3. Фактическая и плановая интенсивность УВД

Гистограммы отражают фактически обеспеченную пропускную способность (рис.3, а), наблюданную за временной интервал 1 час и запланированную интенсивность полетов на тот же период времени (рис.3, б).

Оцениваемая модель, при неизменной схеме площади маневрирования, обеспечила показатель: $N_{\text{общ}} = 75 \text{ ВПО/ч}$ (рис.4, а). А в случае моделирования с применением РД быстрого схода в схеме рабочей площади аэродрома: $N_{\text{общ}} = 100 \text{ ВПО/ч}$ (рис.4, б).

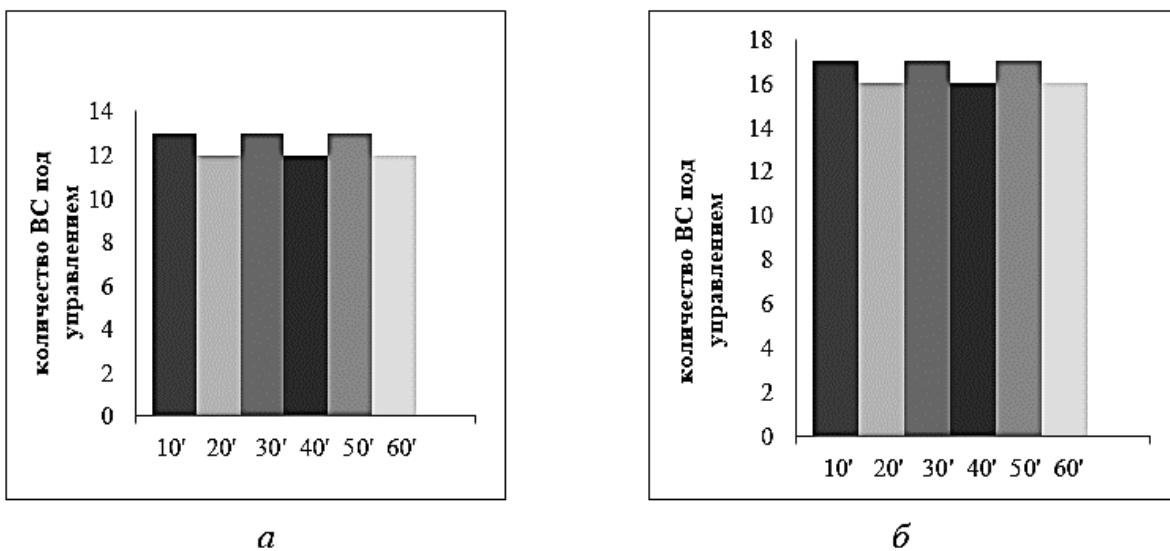


Рис. 4. Интенсивность УВД по результатам моделирования

Таким образом, математическая модель позволяет решать следующие задачи УВД:

- повышение пропускной способности площади маневрирования в пиковые часы нагрузок без нарушения требований безопасности;
- снижение негативных последствий от задержек и изменений, объективно возникающих в процессе осуществления УВД;
- выработка рекомендаций по среднесрочному планированию регулярных рейсов гражданской авиации в крупных аэропортах.

В процессе реализации на практике возможно использование модели для создания программного обеспечения, способного выполнять функции системы поддержки принятия решения диспетчера руления. Это позволит рассчитать оптимальный маршрут и время начала движения ВС для выруливания или оптимальный маршрут заруливания после посадки для достижения непрерывного и безопасного УВД, а также сокращения экономических издержек авиакомпаний.

Статья представлена доктором технических наук, профессором Крыжановским Г.А.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 29 декабря 2007 года №1974-р «О концепции федеральной целевой программы «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009 – 2015 годы)».
2. Глобальный аeronавигационный план. Документ ИКАО 9750 AN / 963. Изд. третье. 2007.
3. Федеральные авиационные правила. Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации: Приказ Минтранса России от 31 июля 2009 года №128.
4. Инструкция по организации движения спецтранспорта и средств механизации на аэродроме Шереметьево: Приказ ОАО «МАШ» от 16 марта 2007 года №146.

5. Алешин Б.С. Оценка реализуемости и безопасности траекторий самолета с помощью бортовой математической модели / Б.С. Алешин, С.Г. Баженов, В.Г. Лебедев, Е.Л. Кулида // Проблемы управления. – 2013. – №4 – С. 64–71.
6. Баженов С.Г. Формирование бесконфликтных траекторий предпосадочного маневрирования с учетом ограничений на маневренные возможности самолета / С.Г. Баженов, В.Г. Лебедев, Е.Л. Кулида // Проблемы управления. – 2012. – №2 – С. 70–75.
7. Солодухин В.А. Математическое моделирование процесса УВД на площади маневрирования / В.А. Солодухин, А.С. Муравьев // Четвертая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 401–404.
8. Муравьев А.С. Методы оценки пропускной способности элементов площади маневрирования / А.С. Муравьев // Четвертая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления: Материалы 4-й Всероссийской мультиконференции. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 355–360.