

*На правах рукописи*

Золотухин Вячеслав Владимирович

**МЕТОДЫ ТЕОРИИ КОМПРОМИССНЫХ ИГР В  
ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ  
ДВИЖЕНИЕМ**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(авиационная и ракетно-космическая техника)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2012

Диссертация выполнена на кафедре «Вычислительные модели технологических процессов» Московского физико-технического института (государственного университета) «МФТИ».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Исаев Вячеслав Константинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Петросян Леон Аганесович  
доктор физико-математических наук,  
профессор Кузнецов Евгений Борисович

Ведущая организация: ФГУП «Государственный научно-  
исследовательский институт авиационных  
систем» (ГосНИИАС)

Защита состоится 16 марта 2012 года в 12<sup>30</sup> на заседании Диссертационного совета Д 212.125.04 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) «МАИ» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., 4, Ученый совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ.

Отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организации, просим направлять ученому секретарю по указанному адресу в двух экземплярах.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук, доцент



Ротанина М.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Объект исследования.** В диссертационной работе рассматриваются актуальные задачи, которые стоят перед разработчиками современных *систем организации воздушного движения (ОрВД)*. Основной акцент сделан на задаче маневрирования воздушных судов (ВС) с целью предотвращения конфликтных ситуаций в *воздушном пространстве*: столкновений, опасных сближений с другими ВС, а также пересечений вихревых следов окружающих ВС.

**Актуальность темы.** Диссертация посвящена исследованию применимости методов *теории компромиссных игр (Satisficing Game Theory – SGT)*<sup>1</sup> и теории оптимального управления для решения задач построения региональной системы ОрВД на основе *концепции свободного полета*, в частности, обеспечения предотвращения конфликтов между ВС. Задачи организации воздушного движения и предотвращения конфликтов между ВС исследуются в работах Г.С. Бюшгенса, А.Б. Куржанского, Е.А. Федосова, Г.А. Крыжановского, В.В. Купина, П.И. Реутова, Т.Г. Анодиной, В.И. Мокшанова, Л.Е. Рудельсона, В.И. Власова, В.П. Мутовкина, В.В. Соломенцева, О.Н. Назимова, А.Л. Ройзенсона, А.И. Большева, Е.В. Чепель, Я. Ван Доорна, Д. Янга, Б.Х. Давидсона, В.Л. Суханова, С.А. Трофимова, Л.В. Вишняковой, О.В. Дегтярева, В.П. Егоровой, А.В. Кан, В.Н. Канадина, И.Ф. Зубковой, С.Г. Пятко, Э.Я. Фалькова, А.М. Гайфуллина, А.В. Бобылева, В.А. Ярошевского, А.С. Белоцерковского, В.В. Вышинского, В.Л. Кузнецова, П.В. Филонова, В.Г. Бобрякова, В.В. Александрова, О.В. Карсаева, С.В. Кулешова, А.В. Чунтула, J.K. Kuchar, J.C. Hill, J. Krozel и др. В соответствии с современными воззрениями, в диссертации в понятие воздушного конфликта включены не только столкновения ВС, но также опасные сближения и попадания в вихревые следы окружающих ВС. Для конфликтов попадания в вихревой след разработана математическая модель эволюции вихревых возмущений. Реализованные с ее использованием алгоритмы маневрирования ВС для избегания вихревых следов в двух плоскостях являются важными и необходимыми компонентами системы ОрВД, или *комплекса имитационного моделирования ОрВД (КИМ ОрВД)*. Проверка работоспособности алгоритмов проводится в разработанном автором КИМ ОрВД, в основу которого положена концепция свободного полета.

При использовании *концепции свободного полета* ВС представлены в виде независимых взаимодействующих агентов. Агенты преследуют свои собственные цели, однако способны учитывать цели соседних агентов (работы W.C. Stirling, D.H. Wolpert, J.K. Archibald, F. Bellomi). В настоящее время существует четкая тенденция перехода от централизованных систем ОрВД, где решения принимает диспетчер, к децентрализованным, в которых каждое ВС наделяется большими полномочиями, отсутствует централизованный контроль (работы Г.С. Бюшгенса, Б.Х. Давидсона, В.Л. Суханова, С.А. Трофимова, Н.М. Гревцова, T.S. Perry). Снижение нагрузки на диспетчеров при децентрализованном подходе снижает роль человеческого фактора при возникновении воздушных конфликтов.

---

<sup>1</sup> *Stirling W.C. Satisficing Games and Decision Making: With Applications to Engineering and Computer Science.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

При исследовании сложных систем ОрВД особую важность приобретают методы математического и компьютерного моделирования. Ошибки в натурных экспериментах в работающей системе ОрВД могут привести к непоправимым последствиям (катастрофам, человеческим жертвам). Введению новых правил должна в обязательном порядке предшествовать их проверка на КИМ ОрВД. Аналогично, достаточно сложной задачей является обнаружение спутного следа за движущимся ВС, невидимого для обычного глаза. Воздействие спутного следа на ВС исследовалось в работах В.А. Ярошевского, А.М. Гайфуллина, А.С. Белоцерковского, В.В. Вышинского, А.В. Бобылева, G. Huppertz, F. Barbaresco. Для обнаружения вихревого следа в наше время используется дорогостоящее, оборудование, которым, по тем или иным причинам, не может быть оснащен каждый борт. В этом случае, создание эффективной модели эволюции вихревого следа за ВС, надежно апробированной и работающей на бортовом компьютере ВС, может оказаться решением проблемы избегания вихревого следа.

В диссертации ставится и решается задача о разрешении конфликтов ВС с помощью плоских маневров. ВС представляет собой безынерционную точку, управляемую по скорости и направлению, на которые накладываются некоторые ограничения. Для разрешения конфликтных ситуаций в воздухе между ВС применяется основанный на теории компромиссных игр подход для описания процедур принятия решений. С целью полноты охвата всех возможных типов конфликтов подход дополняется разработанной математической моделью вихревых возмущений. Для реализации предложенного компромиссного подхода разработаны методы построения *функций рисков* и *преимуществ* для ВС. Функция риска (ФР) определяет количественную оценку вероятности возникновения конфликтов с окружающими ВС. Функция преимущества (ФП) отражает тенденцию к достижению поставленной цели: применительно к ВС – достижение пункта назначения. Методика построения ФР и ФП в задаче избегания столкновений ВС рассматривалась в работах F. Bellomi, J.K. Archibald. Количественный подход для принятия решений исследовался в работах В.Д. Ногина и В.В. Подиновского<sup>2</sup>.

Родоначальником теории компромиссных игр считается Н.А. Simon, который в своем исследовании<sup>3</sup> предположил, что человек не в состоянии максимизировать имеющиеся у него в наличии ресурсы (в том числе скрытые), вследствие слабой, ненадежной памяти, поэтому не может принять оптимальное решение и неявно использует компромиссное вместо него («*satisficing solution*»). В дальнейшем термин «*satisficing*» стал употребляться в различных областях: экономике, изучении искусственного интеллекта, теории принятия решений. Интенсивное развитие компромиссных игр применительно к проблематике принятия решений произошло в 90-х годах прошлого века (работы W.C. Stirling, В.Е. Kauffman, М.А. Goodrich, R.L. Frost, Е. Rasmusen). Для определения места теории компромиссных игр в диссертации рассматриваются наиболее распространенные математические модели принятия решений в многоагентных средах. 1) Игровая теория фон

---

<sup>2</sup> Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 256 с.

<sup>3</sup> Simon H. A. Rational choice and the structure of the environment // Psychological Review, Vol. 63 No. 2, 129-138., 1956.

Неймана и Моргенштерна<sup>4</sup> и ее подраздел – теория антагонистических дифференциальных игр, которая изучает задачи принятия решений в условиях конфликта нескольких лиц. Решающий вклад в становление последней внесли Н.Н. Красовский, Л.С. Понтрягин, А.И. Субботин, R. Isaacs, M.G. Crandall, А.Б. Куржанский, Ю.С. Осипов, Л.А. Петросян<sup>5</sup>, Ф.Л. Черноусько, L. Berkovitz, P. Bernhard, J.V. Breakwell, W.H. Fleming, G. Leitmann. 2) *Теория социального выбора (Social Choice Theory)* (работы J. Harsanyi, L. Hogg, N.R. Jennings).

**Цель работы.** Разработка математических основ и исследование поведения и характеристик (жизнеспособности, эффективности, применимости) децентрализованной системы ОрВД, основанной на агентном подходе, в котором для принятия решений используется теория компромиссных игр. Разработка методологии ее применения и создание, на этой основе, программного комплекса для моделирования коалиционного взаимодействия ВС с целью предотвращения воздушных конфликтов. Для достижения поставленной цели предлагается:

1. Построить математическую модель управления воздушным движением группы ВС на основе теории компромиссных игр с возможностью разрешения воздушных конфликтов трех видов (столкновений, опасных сближений, попаданий в вихревой след);
2. Для каждого из трех видов конфликтов разработать технику построения функций рисков и преимуществ;
3. Для конфликта попадания в вихревой след разработать математическую модель эволюции вихревого следа. Обосновать адекватность модели, реализовать ее на ЭВМ, провести расчет характеристик вихревых следов для различных типов ВС;
4. Разработать и реализовать алгоритм преодоления воздушных конфликтов с помощью маневров ВС в двух плоскостях.
5. Разработать программный комплекс имитационного моделирования ОрВД на основе многоагентного подхода с использованием SGT и предложенных в работе методов построения функций рисков и преимуществ для воздушных конфликтов трех видов (в основном, в рамках п.4);
6. Провести численные оценки эффективности разработанных методов и КИМ п.5 как основополагающего этапа для построения интеллектуальной системы управления воздушным движением на основе SGT.

**Достоверность результатов.** Достоверность результатов представленных в диссертационной работе подтверждена строгими математическими доказательствами, данными имитационного моделирования, а также сравнением полученных результатов с результатами, приведёнными в научной литературе.

**Методы исследования.** Для решения задачи использовались численные методы, методы линейной алгебры, математической статистики, объектно-ориентированного программирования, паттерны проектирования. Существенным образом в диссертации используются результаты работ исследователей ЦАГИ в

---

<sup>4</sup> von Neumann J., Morgenstern O. The Theory of Games and Economic Behavior // 2nd ed. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press, 1947.

<sup>5</sup> Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр: Учеб. пособие для ун-тов — М.: Высш. шк., Книжный дом «Университет», 1998. — С. 304

области вихревой безопасности: В.В. Вышинского<sup>6</sup>, В.А. Ярошевского<sup>7</sup>, А.В. Бобылева, А.М. Гайфуллина<sup>8</sup>.

**Научная новизна.** Разработаны алгоритмы и численные методы, составляющие в совокупности модель разрешения воздушных конфликтов в рамках SGT-теории при помощи плоских маневров ВС с использованием математической модели эволюции вихревого следа. Разработаны численные методы построения ФР и ФП агентов при использовании SGT-теории. Построена модель прогнозирования размеров и эволюции следа вихревых возмущений, которые генерируются при движении ВС. Для построения модели децентрализованной системы ОрВД предложены и реализованы новый подход и вычислительный комплекс, базирующиеся на SGT-теории.

**Практическая значимость.** Развиваемая в диссертация методика применения SGT-теории может быть эффективной в реальных задачах управления воздушным движением для уменьшения роли человеческого фактора (постепенной замены диспетчеров на автоматизированные системы управления) и стать первым шагом к процессу полной автоматизации полёта ВС. Разработанный алгоритм маневрирования ВС может быть использован при разработке КИМ, тренажеров и перспективных систем ОрВД. Численная программная реализация алгоритма для ускорения использует параллельные вычисления, делая алгоритм более производительным при росте объемов выборки. Полученные результаты наглядно показывают возможность применения алгоритма для разрешения конфликтных ситуаций трех видов, с использованием только маневров в горизонтальной плоскости, без существенного падения показателей эффективности разработанной среды моделирования ОрВД. С другой стороны, очерчен диапазон применения разработанных алгоритмов и выделены те сценарии полета множества ВС, где наблюдается падение эффективности (т.е маневров только в одной горизонтальной плоскости недостаточно для эффективного разрешения конфликтов).

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались автором на научных конференциях «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» в МФТИ (Москва, 2007, 2009–2010гг.); на XVI и XVII Международных конференциях по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2009, 2011гг.); на VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики в апреле 2010г.; на научном семинаре в ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС) в 2010г.; на научном семинаре в ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского» в июне 2011г.; на X Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и

---

<sup>6</sup> Vyshinsky V.V. Flight safety, aircraft vortex wake and airport operational capacity. Trudy TsAGI, vol. 2641, 17pp, 1999.

<sup>7</sup> Ярошевский В.А., Бобылев А.В., Гайфуллин А.М., Свириденко Ю.Н. Влияние вихревого следа на динамику полета пассажирского самолета // Полет. – 2009. – вып. ЦАГИ-90. – С. 93–99.

<sup>8</sup> Гайфуллин А.М., Свириденко Ю.Н. Моделирование аэродинамики самолета в условиях воздействия на него вихревого следа // Материалы XIX школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». – 2008. – С. 46–47.

прикладной механики (Нижний Новгород, 2011г.); на V Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва, 2011г.); на Всероссийском семинаре по проблемам планирования использования воздушного пространства в РФ (ПВВП-2011) в ГосНИИАС в ноябре 2011г.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 13 статьях, в том числе, в трех статьях [1-3] в журналах из Перечня ВАК РФ, и в прочих журналах и трудах научных конференций[4-13].

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения и пяти глав. Нумерация определений, формул, теорем, рисунков и т. д. – двойная и раздельная по главам. Первая цифра означает номер главы, вторая – формулы или утверждения. Объем диссертации 118 страниц. Список литературы включает 158 наименований.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, дан обзор литературы по теме диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описана структура, перечислены полученные в диссертации основные результаты.

**В первой главе** определяются система ОрВД и ее основные характеристики. Приводятся понятия авиационной безопасности и авиационных происшествий, предлагается классификация последних. Представлен инновационный подход к проектированию систем ОрВД с использованием концепции свободного полета.

**Определение 1.** Система ОрВД – система, обеспечивающая организацию воздушного движения (ВД) путем комплексного объединения возможностей людей, информации, технологии, средств и служб на основе использования бортовых, наземных и/или космических систем связи, навигации и наблюдения.

Объектом управления системы ОрВД выступает ВС (точнее, множество ВС).

**Определение 2.** Система *Communication, Navigation, and Surveillance / Air Traffic Management (CNS/ATM)* – глобальная система с функциями связи, навигации, наблюдения, организации ВД.

Недостатки существующих систем ОрВД порождаются факторами:

- ограниченные возможности существующих систем прямой видимости, связанные с распространением радиосигналов, их недостаточной точностью и надежностью,
- трудности с внедрением и обеспечением эксплуатации систем CNS,
- ограниченные возможности речевой связи и отсутствие цифровых систем обмена, обеспечивающих применение автоматизированных систем в бортовом и наземном сегментах ОрВД.

Одним из инновационных подходов к построению систем ОрВД выступает концепция свободного полёта (Airborne Self-separation, или Free Flight, далее FF), подразумевающая существование среды, где пилот наделен полномочиями выбора маршрута в реальном времени без контроля со стороны диспетчера и сам несет ответственность за безопасность и оптимальное проведение полёта. Концепция FF несёт в себе сразу два преимущества. 1) Сокращение затрат, за счёт экономии топлива и большей гибкости воздушного трафика. Локальная оптимизация, осуществляемая ВС, гораздо эффективнее глобальной (диспетчерской). 2) Централизованный подход, с участием человека-диспетчера, имеет низкую

масштабируемость, в связи с ростом воздушного трафика. При использовании концепции FF разрешение конфликта обеспечивает безопасное пространственное разделение ВС и вносит оптимизацию по общему для коалиции ВС параметру. Решение этих задач с десятками ВС не под силу человеку-диспетчеру.

**Во второй главе** представлена математическая модель управления воздушным движением группы  $n$  ВС, которая сведена к компромиссной игре  $n$  агентов с учетом возникновения и необходимости разрешения воздушных конфликтов трех видов: столкновений, опасных сближений, попаданий в вихревые следы. Для каждого вида конфликта разработана методика формирования функций рисков и преимуществ. Детально рассматривается процесс выбора опций агентов (ВС). Приводится общее видение функционирования перспективной системы ОрВД, использующей подход SGT: рассматриваются трудности, с которыми придется столкнуться при её внедрении и использовании. Делается обзор существующих схем разрешения конфликтов.

*Теория компромиссных игр* наделяет каждого игрока двумя ролями. Первая сфокусирована на достижении фундаментальных целей без учета цены их получения. Вторая заключается в сохранении ресурсов игрока (минимизации издержек) безотносительно достижения фундаментальной цели. Каждая роль характеризуется своим функционалом. Функционал, описывающий роль достижения фундаментальной цели – *функция преимуществ (ФП)* игрока  $p_S$ :  $p_S(u) \geq 0$ ,  $\sum_{u \in U} p_S(u) = 1, u \in U$ ,  $p_R(u) \geq 0$ ,  $\sum_{u \in U} p_R(u) = 1, u \in U$ , где  $U$  – множество доступных опций игрока. Функционал, описывающий роль минимизации издержек – *функция риска (ФР)* игрока  $p_R$ :  $p_R(u) \geq 0$ ,  $\sum_{u \in U} p_R(u) = 1, u \in U$ .

Для описания  $n$ -агентной системы введем *совместную* функцию  $2n$  переменных  $p_{SR} = p_{S_1 S_2 \dots S_n R_1 R_2 \dots R_n}(u_1, u_2, \dots, u_n, v_1, v_2, \dots, v_n)$ , где  $S_1 S_2 \dots S_n$  соответствуют набору ролей, в которых функцией полезности выступает  $p_S$ ,  $R_1 R_2 \dots R_n$  соответствуют набору ролей, в которых функцией полезности выступает  $p_R$ ,  $u_i$  – опции, доступные  $i$ -ому агенту для достижения цели,  $v_i$  – опции, доступные  $i$ -ому агенту для уменьшения издержек ( $i=1, \dots, n$ ). Считается

**Определение 3.** Рассмотрим систему  $n$  агентов, и обозначим через  $U_i$  множество опций, доступных для выбора  $i$ -ому агенту,  $i=1, \dots, n$ . Компромиссной игрой будем называть тройку  $\{n, U_1 \times \dots \times U_n, p_{S_1 \dots S_n R_1 \dots R_n}\}$ .

Для решения компромиссной игры необходимо рассчитать *совместные* ФП и ФР, руководствуясь следующими формулами<sup>9</sup>:

$$p_{S_1 \dots S_n}(u_i, \dots, u_n) = \sum_{v_1 \in U_1} \dots \sum_{v_n \in U_n} p_{S_1 \dots S_n R_1 \dots R_n}(u_i, \dots, u_n, v_1, \dots, v_n),$$

$$p_{R_1 \dots R_n}(v_i, \dots, v_n) = \sum_{u_1 \in U_1} \dots \sum_{u_n \in U_n} p_{S_1 \dots S_n R_1 \dots R_n}(u_i, \dots, u_n, v_i, \dots, v_n).$$

Соответственно для индивидуальных предельных значений ФП и ФР агента:

$$p_{S_i}(u_i) = \sum_{u_1 \in U_1} \dots \sum_{u_{i-1} \in U_{i-1}} \sum_{u_{i+1} \in U_{i+1}} \dots \sum_{u_n \in U_n} p_{S_1 \dots S_n}(u_1, \dots, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, \dots, u_n),$$

<sup>9</sup> Stirling W. C. Social utility functions - part I: theory // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 35, no. 4, pp. 522–532, November 2005.



$$p_{R_i}(u_i) = \sum_{u_1 \in U_1} \dots \sum_{u_{i-1} \in U_{i-1}} \sum_{u_{i+1} \in U_{i+1}} \dots \sum_{u_n \in U_n} p_{R_1 \dots R_n}(u_1, \dots, u_{i-1}, u_i, u_{i+1}, \dots, u_n).$$

**Определение 4.** *Решение компромиссной игры уровня  $q$*  – подмножество всех векторов опций, удовлетворяющих условию того, что значение совместной ФП больше либо равно произведению значения совместной ФР на скалярный коэффициент  $q$ :  $\sum_q = \{(u_1, \dots, u_n) \in U_1 \times \dots \times U_n : p_{S_1 \dots S_n}(u_1, \dots, u_n) \geq qp_{R_1 \dots R_n}(u_1, \dots, u_n)\}$ .

Индивидуальное *компромиссное* решение для  $i$ -ого агента получается расчетом предельных значений ФП и ФР:  $\sum_q^i = \{u_i \in U_i : p_{S_i}(u_i) \geq qp_{R_i}(u_i)\}$ . Параметр  $q$  отражает относительный вес между достижением цели и минимизацией издержек: его уменьшение увеличивает размеры множеств индивидуальных компромиссных решений, позволяя агентам «смягчить» правила достижения компромисса.

**Теорема 1.** Пусть опция  $u_i$ , такова, что при ее выборе достигается компромиссное решение для  $i$ -ого агента:  $u_i \in \sum_q^i$ . Тогда  $u_i$  является  $i$ -ым элементом некоторого вектора совместного решения игры:  $(u_1, \dots, u_n) \in \sum_q$ .

**Теорема 2.** При  $q \leq 1$  множество индивидуальных компромиссных решений не будет пустым:  $\sum_q \neq \emptyset$ .

В диссертации методология SGT обобщается<sup>10</sup> для решения задачи разрешения воздушных конфликтов между ВС. Управлением ВС выступают возможные направления движения. Отдельно учитывается природа конфликтной ситуации: для каждого её вида (столкновения, опасного, сближения, пересечения вихревого следа) различаются факторы, влияющие на ФР. Каждому виду конфликта поставлен в соответствие весовой коэффициент. Каждое ВС ранжирует соседние ВС согласно критериям: задержка (чем больше задержка, тем выше приоритет), время полета (чем дольше, тем выше приоритет), после чего составляется список приоритета  $P_i$ , включающий ВС более высокого приоритета, с которыми необходимо разрешить конфликтную ситуацию.

На основании полученной лётной информации каждое ВС рассчитывает  $p_{R_i}$  и  $p_{S_i}$  для каждого альтернативного направления движения  $u_i^i$  и выбирает направление  $u_i^{i*} \in U_i$ , на котором разница между  $p_{S_i}$  и  $p_{R_i}$  максимальна:

$$u_i^{i*} = \arg \max_{u_i^i \in U_i} (p_{S_i}(u_i^i) - p_{R_i}(u_i^i)) \quad (1).$$

На  $p_{S_i}$  оказывают влияние предпочтения других ВС, поэтому,  $p_{S_i}$  формируется из двух составляющих: базовой  $\sigma_{S_i}$  и родительской  $\rho_{S_i}$ :

$$p_{S_i}(u_i^i) = \lambda \sigma_{S_i} + (1 - \lambda) \rho_{S_i}, \text{ где } \lambda = \text{const}; \lambda \in [0; 1] \quad (2).$$

Константа  $\lambda = 1$ , если список приоритета пуст:  $P_i = \emptyset$ .

<sup>10</sup> Bellomi F., Bonato R., Nanni V., Tedeschi A. Satisficing Game Theory for distributed conflict resolution and traffic optimisation: a simulation tool and experimental results // Eurocontrol Innovative Research Workshop, 2007.

Базовая составляющая  $\sigma_{S_i}$  отражает разницу с идеальным направлением движения (напрямую к точке назначения из текущей точки):

$$\sigma_{S_i} = 1 - \frac{\beta}{\pi}, \text{ где } \beta \in [0; \pi] - \text{ угол между идеальным и текущим курсами.}$$

При расчете родительской составляющей  $\rho_{S_i}$  за основу берется угол пересечения лучей, отражающих текущее направление движения ВС и ВС из  $P_i$ :

$$\rho_{S_i} = \sum_{j=1}^N \delta_j \rho_{ij}, N - \text{ число ВС в } P_i, \delta_j - \text{ весовой коэффициент, такой что } \sum_{j=1}^N \delta_j = 1,$$

$\rho_{ij}$  – родительская составляющая для  $j$ -ого ВС из  $P_i$ .

Если лучи не пересекаются, то  $\rho_{ij}$  принимает максимальное значение. Если лучи пересекаются (или накладываются), то значение  $\rho_{ij}$  определяется углом их пересечения  $\alpha \in [0; \pi]$ : при  $\alpha = 0$  значение  $\rho_{ij} = 1$ , при  $\alpha = \pi$  (движение навстречу) значение  $\rho_{ij} = 0$ , с увеличением угла  $\alpha$  от 0 до  $\pi$  значение функции родительской

составляющей линейно убывает:  $\rho_{ij} = 1 - \frac{\alpha}{\pi}$ .

В контексте ОрВД ФР определяет некоторую количественную оценку вероятности возникновения конфликтов с окружающими ВС из  $P_i$  при выборе рассматриваемым ВС одного из допустимых направлений движения  $u_l^i \in U_i$ .

При расчете  $p_{R_i}$  для конфликтов вида столкновение или опасное сближение определяются «конфликтные» ВС из  $P_i$ , которые помещаются в список  $L_i$ , такой что  $|L_i| \leq |P_i|$ . Далее составляется список всех окружающих ВС, вихревой след которых представляет опасность для рассматриваемого ВС. Отметим, что для конфликта вида попадание в вихревой след необходимо рассматривать все ВС, а не только ВС с более высоким приоритетом.

Далее проводится расчет  $p_{R_i}$  всех допустимых направлений движения рассматриваемого ВС:  $p_{R_i} = \sum_j^N f_R(u_j, u_i)$ ,

где  $f_R(u_j, u_i)$  – функция риска пары ВС: при выборе рассматриваемым ВС направления  $u_j$  и движения соседнего ВС по направлению  $u_i$ ;  $N$  – количество ВС.

Для рассматриваемых трех видов конфликтов (столкновение, опасное сближение, пересечение вихревого следа) ФР пары ВС будет иметь вид:

$$f_R(u_j, u_i) = \delta_{collision} f_{collision}(u_j, u_i) + \delta_{separation} f_{separation}(u_j, u_i) + \delta_{vortex} f_{vortex}(u_j, u_i),$$

где  $f_{collision}(u_j, u_i)$  – компонент ФР пары ВС для конфликтов столкновения,  $f_{separation}(u_j, u_i)$  – для конфликтов опасного сближения,  $f_{vortex}(u_j, u_i)$  – для конфликтов попадания в вихревой след. Выражение  $p_{R_i}$  примет вид:

$$p_{R_i} = \sum_j^N \delta_{collision} f_{collision}(u_j, u_i) + \delta_{separation} f_{separation}(u_j, u_i) + \delta_{vortex} f_{vortex}(u_j, u_i) \quad (3)$$

Приведём методику формирования компонентов ФР пары ВС  $f_{conflict}(u_j, u_i)$ , выделив наиболее существенные факторы, влияющие на серьезность конфликта того или иного типа.

### **Потенциальный конфликт типа опасное сближение**

Среди факторов, влияющих на риск возникновения опасного сближения ВС можно выделить время, минимальное расстояние сближения двух ВС (чем меньше расстояние, тем выше риск). Причем, если расстояние мало, то конфликт переходит в категорию столкновения. Пусть зона опасного сближения имеет границы  $[R_{min}; R_{max}]$ , то есть при расстоянии между ВС  $r > R_{max}$  опасности конфликта не возникает вообще, а при  $r < R_{min}$  возникает уже неминуемое столкновение. Тогда, риск опасного сближения с учетом обозначенных факторов можно представить следующим образом:

$$f_{separation}(u_j, u_i, r, t) = \delta_{factor1} g_{factor1}(t) + \delta_{factor2} g_{factor2}(r) = \delta_{factor1} \frac{\xi}{t_{separation}} + \delta_{factor2} g_{factor2}(r)$$

$$\text{где } g_{factor2}(r) = \begin{cases} 0, & r > R_{max} \\ \frac{R_{min}}{r}, & r \in (R_{min}; R_{max}] \\ 1, & r \leq R_{min} \end{cases}$$

### **Потенциальный конфликт типа пересечение вихревого следа**

С уменьшением расстояния до границы следа риск попадания в след растет:

$$g_{factor2}(r) = \begin{cases} 1, & r \leq \mu \\ \frac{\mu}{r}, & r \in (\mu; \infty) \end{cases}, \text{ где } \mu - \text{ расстояние до центра вихревого эллипса (см.}$$

главу 3) (проекция вихревого эллипсоида на плоскость движения ВС), с которым ожидается пересечение.

Фактор, определяемый временем жизни следа, учитывается следующим

образом:  $g_{factor3}(t) = 1 - \frac{t}{t_{decay}}, t \in [0; t_{decay}]$ , где  $t_{decay}$  – время затухания вихря.

Пусть рассматриваемый ВС пересекает ось вихревого следа под углом  $0 \leq \psi \leq \pi$ , тогда риск нахождения в зоне вихревого следа представляется в виде  $g_{factor4} = 1 - \sin \psi$ .

Важным фактором выступает и угол пересечения следа: на основе зависимости (см. главу 3) перегрузок ВС от угла пересечения вихря  $g_{factor5} = g_{factor5}(\psi)$ .

Окончательно, функции для численного расчета факторов, влияющих на степень опасности при попадании ВС в вихревой след, представим в виде:

$$f_{vortex}(u_j, u_i, r, t, \psi) = \delta_{factor1} \frac{\xi}{t} + \delta_{factor2} \frac{\mu}{r} + \delta_{factor3} \left(1 - \frac{t}{t_{decay}}\right) + \delta_{factor4} (1 - \sin \psi) + \delta_{factor5} g_{factor5}(\psi).$$

Основным результатом главы 2 является математическая модель управления воздушным движением группы  $n$  ВС (агентов), которая сведена к компромиссной игре  $n$  агентов с учетом возникновения и необходимости разрешения воздушных

конфликтов трех видов: столкновений, опасных сближений, попаданий в вихревые следы. Для каждого из трех видов конфликтов разработана методика формирования ФР и ФП.

**В третьей главе** рассматривается физика явления образования и эволюции вихревого следа. Проводится анализ существующих вихревых моделей (авторы Rankine, Lamb-Oseen, Hallock-Burnham, Jacquin, Proctor) и делается обзор существующих методов обнаружения вихревых возмущений (Windline, LIDAR, SODAR). Поставлена и решена задача об эволюции вихревого следа за ВС, разработана эллипсоидальная математическая модель следа.

В основе разработанной модели эволюции вихревого следа лежит теория группы исследователей ЦАГИ (А.В. Бобылев, В.А. Ярошевский, А.М. Гайфуллин, В.В. Вышинский, далее теория БГЯСВ, см. сноски [6-8]), которыми была выявлена зависимость структуры вихревого следа от режима полета и параметров ВС. На крейсерском режиме полета ВС образуется двухвихревая система. Образованные вихри опускаются вниз вместе с воздухом в эллиптической капсуле. На положение и интенсивность вихрей влияют процессы:

- горизонтальное перемещение под действием ветра,
- вертикальное опускание,
- деформация вихревого следа и затухание.

Задача об эволюции вихревого следа за ВС ставится следующим образом: ВС совершает полет на заданной высоте с известной скоростью в турбулентной атмосфере, образуя вихревой след. Необходимо определить структуру, местоположение и размеры вихревой зоны в каждый момент времени.

Заданы считаются следующие параметры ВС:

$m$  – масса;

$V$  – скорость;

$l_0$  – размах крыльев;  $s_0$  – габаритная высота;

$T_{step}$  – временной шаг модели (зависит от потребной точности расчета);

$\Gamma_{decay}$  – циркуляция, когда турбулентность вихрей неотличима от фоновой;

Приведем оценку размеров вихревого следа, который создается ВС на этапе крейсерского полета. ВС производит замеры различных параметров (скорости полета, давления, высоты, ветра) при помощи бортовых средств. Пусть, замеры ветра производятся с периодом  $T_{step}$ . Средняя квадратическая погрешность при

проведении  $n$  замеров имеет вид  $\sigma_w = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x)^2}{n-1}}$ , а средняя квадратическая

погрешность среднего арифметического  $\sigma_{avg} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{n}}$ .

При использовании стохастической модели ветра ошибки измерений удовлетворяют закону Гаусса, внешняя оболочка вихря представляет собой эллипсоид с растущими по времени осями. С учетом ошибки ось *вихревого эллипсоида* (ВЭ) изменяется по закону  $a(t) = \sigma_{avg} t$ , где  $t$  – время с момента образования вихря,  $\sigma_{avg}$  – ошибка измерения ветра.

ВЭ имеет ненулевой начальный размер. Оценим величины его осей. Ось ВЭ, лежащая в плоскости рыскания, имеет начальный размер порядка  $l_0$ :

$$a(t) = l_0 + \sigma_{avg} t \quad (4).$$

Начальный размер оси в плоскости тангажа ВЭ полагаем равным  $s_0$ :

$$c(t) = s_0 + \sigma_{avg} t \quad (5).$$

Начальный размер полуоси ВЭ, направленной по движению ВС, полагаем равным  $d_0 = T_{step} V$ :

$$d = d_0 + \sigma_{avg} t, \quad (6).$$

Огибающая внешних оболочек представляет собой поверхность, близкую к эллиптическому конусу. Горизонтальная проекция конуса скошена по отношению к направлению полета ВС при наличии бокового ветра. Ширина проекции пропорциональна расчетной ошибке измерения ветра. Вследствие взаимной индукции вихри опускаются со скоростью (согласно теории БГЯСВ):

$$U = \frac{\Gamma}{2\pi l_0}, \quad (7)$$

где  $\Gamma$  – циркуляция вихрей, убывающая со временем.

*Характерное время* – время, необходимое для опускания пары вихрей на высоту, равную размаху крыла ВС:  $t' = 0.38 \frac{l_0^3 V}{m}$ . Для оценки *времени затухания* используется формула:

$$t_{decay} = 8t' \left( 1 - \frac{\Gamma_{decay}}{\Gamma_0} \right) \quad (8).$$

Значение начальной циркуляции  $\Gamma_0$  найдем, исходя из определения  $t'$  и зная начальную скорость:  $U_0 = \frac{t'}{l_0} = \frac{\Gamma_0}{2\pi l_0} \Rightarrow \Gamma_0 = 2\pi t' l_0$ . За время  $t_{decay}$  ВЭ изменит габариты своих полуосей на величину  $d = \sigma_{avg} t_{decay}$ , опустившись при этом на величину:  $s_{down} = U_{avg} t_{decay} = \frac{\Gamma_{avg}}{2\pi l_0} t_{decay} = \frac{\Gamma_0 + \Gamma_{decay}}{4\pi l_0} t_{decay} = \frac{2\pi t' + \Gamma_{decay}}{4\pi l_0} t_{decay}$ .

Таким образом, вихревой след состоит из последовательности ВЭ, обладает большой протяженностью и сравнительно компактен в поперечном направлении.

Количество ВЭ в вихревом следе составляет  $n = \frac{t_{decay}}{T_{step}}$ .

Рассчитаем местоположение вихрей с учетом их опускания и изменения размера полуоси ВЭ за это же время. Для  $m$ -го ВЭ:

- положение центра:

$$z_{center}(m) = U(t_{min} + mT_{step}), \quad t_{min} = const \quad (9)$$

- положение нижней точки:

$$z_{down}(m) = z_{center} + 0.5c(t_{min} + mT_{step}) = (t_{min} + mT_{step}) \left( U + \frac{\sigma_{avg}}{2} + \frac{s_0}{2(t_{min} + mT_{step})} \right) \quad (10)$$

Основным результатом главы 3 является эллипсоидальная модель эволюции вихревого следа, образованного ВС, которая в соответствии с теорией БГЯСВ

описывает вихревую поверхность при помощи огибающих семейства вихревых эллипсоидов. Модель не противоречит существующим наблюдениям за вихрями, позволяет оценить местоположение, размеры и интенсивность вихрей в определенный момент времени и открыта для последующего развития и уточнения. Приведены результаты расчетов размеров и формы вихревых следов для различных типов ВС с помощью разработанной программы.

**В четвертой главе** решаются задачи выбора оптимального маневра ВС с целью предотвращения столкновения, опасного сближения и уменьшения воздействия на него вихревых следов. Внимание сосредоточено на двух вариантах плоского маневра – в горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) плоскостях. Для них разработаны алгоритмы маневрирования, проведена оценка их эффективности. В ГП при выборе оптимального управления (направления движения ВС) учитывается взаимодействие с окружающими ВС и используется техника SGT, учитывающая типы возникающих конфликтных ситуаций и факторов (см. главу 2). В ВП предлагается использовать метод Брайсона–Миеле, для реализации которого использован метод изолиний и предлагается численный метод поиска экстремума. Количественные и качественные результаты работы алгоритма приведены в главе 5.

Решение задач быстродействия или экономичности маневра методом Брайсона–Миеле сводится к минимизации (максимизации) функционала<sup>11</sup>

$$F = \int_h^H \frac{fG}{V(P-X)} \left( 1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dH} \right) dH, \quad (11)$$

где  $V$  – скорость,  $P$  – сила тяги двигателя,  $X$  – потребная тяга,  $G$  – вес,  $h$  – начальная высота,  $H$  – конечная высота ВС. В (11) значения функций  $F$  и  $f$  зависят от постановки задачи: для задачи быстродействия ( $F=T$ ,  $f=1$ ), для расхода топлива ( $F=m_{fuel}$ ,  $f=q_t$  – почасовой расход топлива), оптимизации дальности – ( $F=L$ ,  $f=V$ ).

Для набора высоты ВС с минимальным расходом топлива задача сводится к поиску минимума функционала:

$$m_{fuel} = \int_h^H \frac{q_t G}{V(P-X)} \left( 1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dH} \right) dH \quad (12)$$

а для оптимального по быстродействию маневра набора высоты (снижения) к минимизации функционала:

$$T = \int_H^h \frac{G}{V(X-P)} \left( 1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dH} \right) dH \quad (13).$$

Постановка задачи о выборе оптимального маневра ВС с целью предотвращения конфликтов трех видов. Рассматривается группа  $n$  ВС (агентов) в горизонтальной ограниченной (прямоугольной) зоне воздушного пространства. Каждое ВС представлено материальной точкой, управляемой по направлению, доступные направления движений  $i$ -ого ВС <sub>$i$</sub>  представлены множеством  $U_i$ . Для каждого ВС заданы точки отправления и назначения на горизонтальной

<sup>11</sup>Федоров Л.П. Результаты исследований летно-технических характеристик самолетов и беспилотных летательных аппаратов. – ЦАГИ, 2008.

плоскости, скорость  $V$  и начальный курс  $u_o$ . Ставится задача обеспечения наискорейшего достижения каждым ВС точки назначения путем выбора в каждый момент времени такого направления движения  $u_i^*$ , где разность между ФП и ФР максимальна (1), при условии избегания конфликтов трех видов. Расчет ФР  $p_{R_i}$  (2) и ФП  $p_{S_i}$  (3)  $i$ -ого ВС, ведется по технике, представленной в главе 2. Заданы:

$(a, b)$  – размеры области воздушного пространства;

$R_i$  – радиус обнаружения (зоны видимости)  $BC_i$ ,  $i \in [1; n]$ ;

$m_i$  – масса  $BC_i$ ;

$V_i$  – скорость  $BC_i$ ;

$t_i$  – начальная временная задержка (для расчета приоритета)  $BC_i$ ;

$T_{step}$  – временной шаг итерации алгоритма;

$q$  – порог разрешения воздушного конфликта (см. определение 4);

$l_0^i, d_0^i, s_0^i$  – габаритные размеры  $BC_i$  (формулы (2)-(4)).

Допущения:

- $BC_i$  доступна информация о полетных данных (скорости, текущем курсе, времени полета, суммарной задержке, траектории за время затухания вихревого следа) соседних ВС в радиусе  $R_i$ ;
- ветер постоянный;
- отсутствуют запрещенные для полета области;
- $m=const$  – движение ВС происходит с постоянной массой.

Появление других ВС в радиусе  $R_i$  ставит вопросы 1) приоритетности среди ВС (учет  $t_i$ ) и 2) учета местоположения ВС и их вихревых следов.

Алгоритм определения оптимального направления выполняется *каждым* ВС путем анализа полетных данных всех ВС в радиусе  $R_i$ . Алгоритм завершается при достижении пункта назначения и состоит из следующих шагов:

1. Проверить попадание  $j$ -ого  $BC_j$  в зону видимости  $R_i$   $BC_i$ : получить данные  $BC_j$  ( $m_j, V_j, u_j$  – текущий курс,  $T_j$  – время полета,  $t_j$  – задержка,  $l_0^j, d_0^j, s_0^j$  – габаритные размеры, траекторию  $BC_j$  за время затухания);
2. Восстановить для  $BC_j$  в зоне видимости  $R_i$  вихревой след при помощи модели следа главы 3: рассчитать время затухания (8), протяженность ( $V_j t$ ), высоту опускания (9), размеры ВЭ, составляющих след (4)–(6).
3. Рассчитать  $p_{R_i}$  и  $p_{S_i}$  согласно (2)–(3) для  $\forall u_l^i \in U_i$  по полученным данным;
4. Выбрать оптимальное направление движения  $u_l^{i*} \in U_i$  по формуле (1) для последующего применения в модели движения  $BC_i$ ;
5. Если все конфликты разрешены, то  $BC_i$  перемещается по направлению  $u_l^{i*} \in U_i$  на расстояние  $d_{step} = V_i T_{step}$ , перейти к шагу 1;
6. Если  $\max_{u_l^i \in U_i} (p_{S_i}(u_l^i) - p_{R_i}(u_l^i)) < q$  – (не удастся избежать конфликта с  $BC_j$  в ГП), то совершить маневр в ВП.

Для маневра в вертикальной плоскости ставится задача выбора оптимального (по быстрдействию или экономичности) маневра  $BC_i$  с целью уменьшения воздействия на него вихревого следа  $BC_j$ :  $BC_j$  пересекает плоскость движения  $BC_i$ , оставляя за собой вихревой след (его проекцию на вертикальную плоскость).

7. Определить траекторию обхода проекции вихревого следа  $BC_j$  в ВП (рис. 1);
8. Выбрать вариант преодоления препятствия (набор высоты или снижение);
9. Назначить критерий оптимальности (по быстродействию или экономичности) траектории в ВП выбором функционала  $\Phi^i$  из (12) и (13);
10. Минимизировать  $\Phi^i$  с помощью метода Брайсона–Миеле. Для численной реализации метода строится поле изолиний в плоскости  $(V, H)$ , а переход между изолиниями производится по локальным нормальным к изолиниям.

Для оценки эффективности работы алгоритма предложен показатель:

$$SE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left( \frac{t_i}{t_{d_i} + t_i} \right), \quad (14)$$

где  $t_i$  – время проведения идеального полёта  $BC_i$ ,  $t_d$  – задержка, возникающая из-за того, что манёвры для разрешения конфликтов вынуждают  $BC_i$  отклоняться от идеальной траектории.

Рассмотрим подробнее выбор траектории преодоления препятствия (проекция вихревого следа), состоящего из набора ВЭ, в ВП (рис. 1). При огибании вертикальных препятствий траектория ВС разбивается на участки набора высоты и снижения. Пусть  $O(x_0, z_0)$  – начальное положение  $BC_i$  в ВП. Алгоритм аппроксимации траектории ВС опорными прямыми состоит из следующих шагов (для варианта облёта вихревой зоны снизу):

Выбрать  $i$ -ый ВЭ ( $VE_i$ ) из семейства ВЭ следа  $BC_j$ ,  $i \in [1; t_{decay} / T_{step}]$ ;

Рассчитать положение центра проекции  $VE_i$  ( $x_{center}, z_{center}$ ) по формуле (9) и нижней точки  $z_{down}(i)$  по формуле (10);

Построить касательную из точки  $O(x_0, z_0)$  к проекции  $VE_i$  на ВП:

$$\begin{cases} \frac{x_i(x_0 - x_{center})}{d^2} + \frac{z_i(z_0 - z_{center})}{c^2} = 1 \\ \frac{(x_0 - x_{center})^2}{d^2} + \frac{(z_0 - z_{center})^2}{c^2} = 1 \end{cases}, \text{ где } (x_b, z_b) - \text{ точка касания } VE_i;$$

Рассчитать для  $VE_i$ :  $\alpha_i$  – угол наклона касательной (шаг 3) к оси  $Ox$ ;

Увеличить  $i = i + 1$ , перейти к шагу 1;

Из касательных, построенных шагах 3-4 выбрать одну с условием  $\max(\alpha_i)$ ;

Установить порог препятствия  $z'_{max} = \max_i |z_{down}(i)|$ ;

Построить траекторию  $BC_i$  избегания вихревого следа из трех участков:

- снижение: движение по касательной  $\max(\alpha_i)$  до пересечения с  $z = z'_{max}$ ,
- движение на эшелоне  $z = z'_{max}$  до окончания вихревой зоны,
- набор высоты: возвращение на прежний эшелон  $z = 0$  (рис. 1).

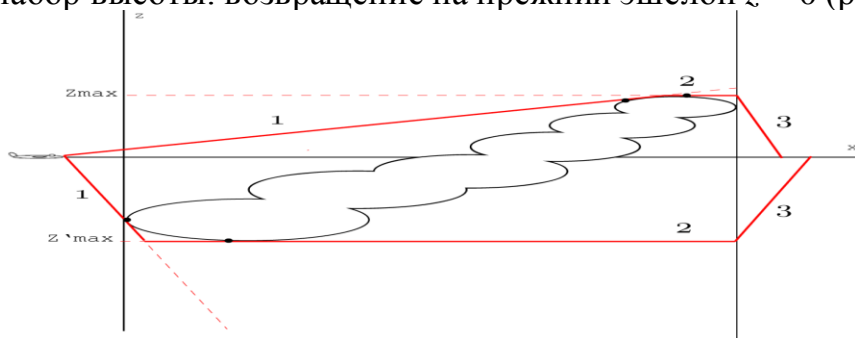




Рис. 1. Построение касательной к семейству ВЭ в вертикальной плоскости. Участки (1,2,3) траектории движения ВС для избегания вихревой зоны и возвращения на прежний курс.

Оптимальные по расходу топлива (быстродействию) траектории численно рассчитываются при помощи метода изолиний: пусть в области  $G(x, y)$  декартовых координат (обычно число Маха  $M$  и высота  $H$ ) заданы (с использованием высотно-скоростных аэродинамических и тяговых характеристик ВС) подынтегральная функция  $\Phi(x, y)$  в (12) или (13). Строится поле изолиний  $\Phi(x, y)$  – множество геометрических мест решений уравнения  $\Phi(x, y) - C_k = 0$ ,  $k = 0, 1, \dots, K$ , где  $C_k$  – некоторая последовательность значений  $\Phi(x, y)$ . Для представления семейства изолиний используем сглаживающие параметрические сплайны.

Численный метод расчета оптимальной траектории по быстродействию (расходу топлива) для изменения ВС с  $h_0$  до  $h_1$  в координатах  $(V, H)$ :

Начальные данные:

$\Phi$  – подынтегральная функция в выражении (12) или (13);

$\Phi^1 \dots \Phi^M$  – семейство построенных выше  $M$  изолиний, где  $\Phi^i(V, H) = C_i$ ;

$A_0(V_0, h_0)$  – начальная точка на плоскости  $(V, H)$ ;

$\Phi^0(V, H) = C_0$  – изолиния, такая что:  $A_0(V_0, h_0) \in (\Phi^0(V, H) = C_0)$ ;

$\Phi^N(V, H) = C_N$  – изолиния ( $N < M$ ), определенная в точках  $P_j(V_j, h_j)$ ;

$L_{TR} = \emptyset$  – список траекторий, изначально пустой;

Допущения:

Все изолинии семейства считаются непрерывными и дифференцируемыми, изолированные точки не учитываются (в случае необходимости производится их сглаживание сплайнами с заданной точностью).

Для решения задачи нахождения экстремума функции  $\Phi$  двух переменных используется алгоритм наискорейшего спуска, согласно которому, необходимо в каждый момент двигаться по градиенту  $\overline{\nabla \Phi^i}$  к изолинии (т.е. по локальным нормальям к линиям уровня)  $\Phi^i(V, H) = C_i$ .

1. Присвоить итерационному индексу  $i=0$ , присвоить точке  $A_i(V_i, h_i) = A_0(V_0, h_0)$ ;
2. Построить в точке  $A_i(V_i, h_i)$  градиент  $\Phi^i(V, H)$ , ортогональный её изолинии, проходящей через эту точку:  $\nabla \Phi^i \perp (\Phi^i(V, H) = C_i)$ ;
3. Вычислить точку пересечения  $A_{i+1}(V_{i+1}, h_{i+1})$ :  $\nabla \Phi^i \cap (\Phi^{i+1}(V, H) = C_{i+1})$ ;
4. Проверить, если  $h_{i+1} \geq h_1$ , то найти корни  $V^*$  уравнения  $\Phi^{i+1}(V_{i+1}, h_1) = C_{i+1}$ ; если корни существуют, то:
  - вычислить длину траектории по изолинии  $\Phi^{i+1}(V_{i+1}, h_1) = C_{i+1}$  от точки  $A_{i+1}(V_{i+1}, h_{i+1})$  до точки  $(V^*, h_1)$ , где  $V^*$  – корень  $\Phi^{i+1}(V_{i+1}, h_1) = C_{i+1}$ ;
  - добавить траектории до каждого корня  $V^*$  в список  $L_{TR}$ ;
  - перейти к шагу 6;
5. Увеличить  $i=i+1$ , перейти к шагу 2;
6. Определить среди всех траекторий в  $L_{TR}$  оптимальную, минимизацией

$$F = \sum_{k=1}^i \Gamma_k C_k, \quad 0 \leq k \leq i, \quad \text{где } \Gamma_k \text{ – длина перемещения по } \Phi^k, \text{ а } C_k \text{ – уровень } \Phi^k.$$

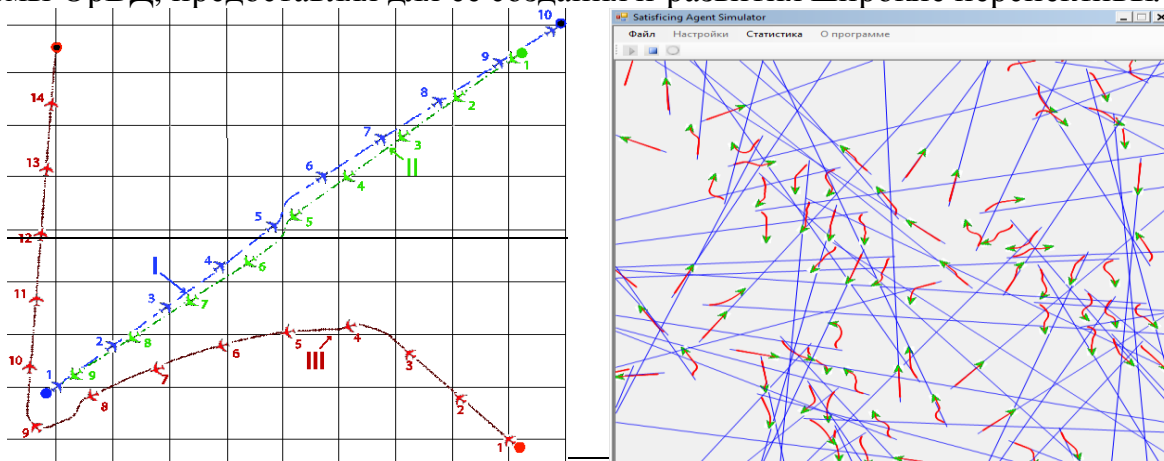
**В пятой главе** описывается работа созданного автором программного комплекса численного моделирования (ПК ОрВД) и исследуется эффективность внедрения концепции FF для ОрВД в ограниченной зоне воздушного пространства. ПК ОрВД позволяет проводить моделирование движения группы ВС в горизонтальной плоскости. ВС, участвующие в процессе моделирования, используют подход SGT для разрешения конфликтных ситуаций. Для разрешения конфликтов между ВС в горизонтальной плоскости применяется приведенный в главе 4 алгоритм. Построение ФП и ФР для ВС, выполняется в соответствии с методами, изложенными в главе 2. ПК ОрВД предоставляет возможности:

- проведение настроек основных характеристик: границ области воздушного пространства, участвующих ВС и факторов, влияющих на траекторию ВС;
- визуализация движения ВС;
- визуализация вихревых следов ВС с использованием модели главы 3;
- сбор полетной информации по каждому ВС для последующего анализа.

Для оценки эффективности работы ПК ОрВД используется показатель (14).

При моделировании движения ВС использовались тестовые сценарии (рис. 2), позволяющие варьировать число и начальное расположение ВС: сценарий встречного движения двух ВС; с общей точкой пересечения курсов нескольких ВС; пересекающихся потоков; случайного начального распределения ВС.

Моделирование показало простоту, высокую производительность и эффективность приведенных алгоритмов и численных методов плоского маневрирования в рамках SGT, без существенного снижения показателей безопасности полета в сравнении с другими схемами разрешения конфликтов<sup>12</sup>. КИМ ОрВД использует лишь часть имеющихся возможностей разрешения конфликтов и может служить прототипом интеллектуальной многоуровневой системы ОрВД, предоставляя для ее создания и развития широкие перспективы.



**Рис. 2. Сценарий с общей точкой пересечения курсов трех ВС (слева):** римскими цифрами обозначены траектории ВС; арабскими – время, прошедшее со старта сценария; кругами соответствующих цветов – локальные точки старта и назначения каждого ВС. **Сценарий случайного распределения 80 ВС (справа):** синими линиями изображены идеальные траектории движения ВС, красными – образованные вихревые следы ВС.

<sup>12</sup> Kuchar J. K., Yang L. C. A review of conflict detection and resolution modeling methods // IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 1, no. 4, pp. 179–189, December 2000.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Математическая модель управления коалиционным воздушным движением группы  $n$  ВС (агентов) сведена к компромиссной игре  $n$  агентов с учетом возникновения и необходимости разрешения воздушных конфликтов трех видов: столкновений, опасных сближений, попаданий в вихревые следы [16].
2. Для каждого из трех видов конфликтов разработана и апробирована методика формирования функций рисков и преимуществ [10-12].
3. Разработана математическая модель эволюции вихревого следа, образованного ВС. Модель следа зависит от параметров ВС, учитывает его перемещение под действием ветра, опускание и диссипацию [3].
4. Предложен способ разрешения конфликтов трех видов с помощью маневров ВС только в двух плоскостях. Для маневров в ГП управлением выступают допустимые направления движения ВС. Для маневров в ВП использован метод Брайсона–Миеле, в котором управлением выступают направление и скорость ВС. Для реализации метода Брайсона–Миеле использован численный метод поиска экстремума с помощью изолиний [2].
5. На языке высокого уровня реализован алгоритм разрешения воздушных конфликтов ВС в соответствии с п.4. с возможностью многопоточного параллельного выполнения [2,3].
6. Разработан программный комплекс для математического моделирования процесса управления воздушным движением с использованием многоагентного подхода на основе SGT (п.1) и предложенных методов построения и оценки функций рисков и преимуществ (п.2). Проведен вычислительный эксперимент по оценке работы системы ОрВД, в ходе которого доказана эффективность применения методов и программного обеспечения, представленных в работе, для построения перспективной региональной интеллектуальной системы ОрВД (на основе концепции FF)[2].

### Публикации в журналах из перечня ВАК

1. *Золотухин В.В., Исаев В.К., Давидсон Б.Х.* Некоторые актуальные задачи управления воздушным движением // Труды МФТИ. – 2009. – Том 1, № 3.– С. 94–114.
2. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Некоторые задачи 2D-маневрирования самолета с целью обеспечения вихревой безопасности // Вестник МАИ. – 2009. – Том 16, №7. – С. 5–10.
3. *Золотухин В.В.* Моделирование вихревых следов в задачах управления воздушным движением // Программные продукты и системы.–2011. – № 1(93).– С. 126–129.

### Публикации в других изданиях

4. *Исаев В.К., Давидсон Б.Х., Золотухин В.В.* Некоторые актуальные системные, математические и информационные задачи управления воздушным движением. Труды 50-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Том 2. – М.: МФТИ, 2007. – С. 141–144.
5. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Некоторые задачи 2D-маневрирования самолета с целью обеспечения вихревой безопасности. Материалы XVI Международной

- конференции по выч. механике и современным прикладным программным системам, май 2009г., Алушта. – М., Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. С. 354–356.
6. *Исаев В.К., Давидсон Б.Х., Хоботов Е.Н, Золотухин В.В.* Подход к построению интеллектуальной многоуровневой системы управления воздушным движением. Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Том 2. – М.: МФТИ, 2009. – С. 158–160.
  7. *Золотухин В.В.* Разрешение конфликтов в распределённых системах ОрВД как задача интеллектуального управления // Тезисы VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – С.89–90.
  8. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Построение плоских маневров воздушных судов для обеспечения безопасности воздушного движения. Материалы VIII Международной конференции по Неравновесным процессам в соплах и струях, 25-31 мая 2010г., Алушта. – М., Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. С. 489–490.
  9. *Золотухин В.В., Исаев В.К.* Использование элементов теории коалиционных игр для предотвращения конфликтов между воздушными судами. Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть III. Аэрофизика и космические исследования. Том 2. – М.: МФТИ, 2010. С. 78–79.
  10. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Основы построения интеллектуальной многоуровневой системы управления воздушным движением на основе концепции Free Flight. Материалы XVII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, май 2011г., Алушта. – М., Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011. С. 749–751.
  11. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Построение плоских маневров воздушных судов для обеспечения безопасности воздушного движения. X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Нижний Новгород, 24-30 августа 2011г. IV том, 2011. С. 441–442.
  12. *Исаев В.К., Золотухин В.В.* Интеллектуальная система управления воздушным движением на основе концепции Free Flight. Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2011): Материалы V международной конференции (3-5 октября 2011г., Москва, Россия). Том I. М.: Учреждение РАН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2011. С. 39-41.
  13. *Золотухин В.В., Исаев В.К.* Применение теории компромиссных игр для построения системы обеспечения безопасности воздушного движения. Российский научно-технический семинар «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ. Сб. трудов. – М.: ФГУП «ГосНИИАС», 2011. – С. 237–244.