

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
ГосНИИ ГА

SCIENTIFIC BULLETIN
OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF CIVIL AVIATION (GosNII GA)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ (№ 333)

№ 22

Москва

2018

ББК 39.5

НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

№ 22 (333)

Научный вестник ГосНИИ ГА включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, сформированный в соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793.

Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation is included in the List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences, formed in accordance with the order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of 25 July 2014 no. 793.

Учредитель. Издатель. Редакция:

Федеральное государственное унитарное предприятие
Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
125438, Москва, ул. Михалковская, д. 67, корп. 1

Founder, Publisher, Editorial board:

Federal State Unitary Enterprise The State Scientific Research Institute of Civil Aviation
Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation

Подписной индекс в Объединенном Каталоге
«Пресса России» 70663
© ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2018

УДК 656.7.052

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОВЕЕРНОЙ СХЕМЫ БЕСКОНФЛИКТНОГО СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

С.И. КУМКОВ¹, С.Г. ПЯТКО², М.М. ОВЧИННИКОВ¹

¹ИММ УрО РАН им. Н.Н. Красовского, Екатеринбург, Российская Федерация

²ОАО «Концерн ПВО «Алмаз–Антей», г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследуются алгоритмы и моделирующая программа управления бесконфликтным слиянием шести потоков в модельной усложненной структуре организации воздушного пространства с двумя разнесенными веерными схемами в аэродромной зоне. Исследуемая структура траекторий и режимов движения воздушных судов (на траекториях подхода и на веерных схемах) задавалась в соответствии с рекомендациями Руководящих материалов по Московской Воздушной Зоне и с Рекомендациями EUROCONTROL, ICAO и NASA. На всей траектории движения каждого судна реализовывался “режим подхода с непрерывным снижением”, как наиболее оптимальный по топливным затратам. Для обеспечения бесконфликтности слияния при повышенной плотности прибывающих потоков, наряду с введенными веерными схемами, активно используются стандартные схемы предварительной задержки. Безопасное пространственное движение судов (на траекториях подхода и на веерных дугах ожидания) обеспечивается соответствующим вертикальным эшелонированием. Бесконфликтность в точке общего слияния потоков обеспечивается выдерживанием требуемого безопасного продольного временного интервала. На первой веерной схеме производится предварительное слияние четырех прибывающих потоков. Вторая схема выполняет предварительное слияние остальных двух потоков, прибывающих с другого направления. Далее два потока сливаются в общий бесконфликтный предпосадочный поток. Алгоритмы бесконфликтного слияния разрабатывались на основе решения соответствующей задачи управления динамическими системами. Управление осуществляется задержкой судов на схемах предварительной задержки и на дугах ожидания, а также вариацией скоростного режима движения судна (увеличением или уменьшением скорости его движения в допустимых технологических пределах). Алгоритмы направлены на минимизацию суммарного времени задержки судов всех сливаемых потоков. Результаты решения выдаются диспетчеру в форме рекомендаций для обоснованного оперативного принятия им решений на коррекцию движения судов. Результаты исследований предназначены для использования в диспетчерских тренажерах и перспективных автоматизированных системах УВД.

Ключевые слова: воздушные суда, прибывающие потоки, бесконфликтное слияние, веерные схемы задержки и слияния, минимальное суммарное время задержки, алгоритмы слияния.

INVESTIGATION OF TWO-STRUCTURAL POINT-MERGE SCHEME FOR NON-CONFLICT MERGING OF ARRIVING AIRCRAFT FLOWS

S.I. KUMKOV¹, S.G. PYATKO², M.M. OVCHINNIKOV¹

¹Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

²Joint-Stock Company “Concern “Almaz – Antey”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper deals with algorithms and simulation program for non-conflict merging of six arriving flows of aircrafts. A model complicated structure of air space is considered with two separated point-merge schemes placed in the approach and aerodrome zones. The structure and corresponding velocity regimes (both on the approach trajectories and point-merge schemes) are formed on the basis of practical Recommendations on Organization of the Moscow Air Space and ones of the EUROCONTROL,

ICAO, and NASA. Over all trajectory of each aircraft, the “Continuous Descending Approach” regime was used as the optimal on the fuel expenditures. For providing the non-conflict merging of arriving aircraft flows under their increased density, both the standard preliminary delay schemes and the point-merge ones are used. The safe spatial motion of aircrafts (both on the approach trajectories and point-merge schemes) is provided by corresponding vertical separation. The non-conflict joining of all flows at the merging point is provided by organization of the given longitudinal safe time intervals. On the first scheme, the preliminary merging of four arriving flows is performed. The second scheme implements preliminary merging of other two flows arriving from other directions. Further, two preliminary merged flows are joined into the common non-conflict pre-landing flow. The algorithms of the non-conflict merging were elaborated on the basis of solving a corresponding problem for control by dynamic systems. The control is implemented by the aircraft delay on the preliminary delay schemes and point-merge ones and by variation of the aircraft velocity motion (by its acceleration or deceleration in the admissible technological intervals). The elaborated algorithms minimize the summary delay (and delay–time) of all aircrafts of all merging flows. The found solutions are given to the ATC operator in the form of recommendations for verified and operative making his decisions on corrections of the aircraft motions. Results of investigation are aimed to application in the operators’ trainers and perspective automated systems of air traffic control.

Keywords: aircrafts, arriving flows, non-conflict merging, point–merge schemes, delays, minimal summary delay–time, merging algorithms.

Введение

В работе проведено исследование модельной усложненной расширенной схемы организации воздушного движения с управлением предварительным бесконфликтным слиянием четырех потоков воздушных судов (ВС) на своей веерной схеме и двух потоков с предварительным бесконфликтным слиянием на другой веерной схеме. Окончательное бесконфликтное объединение предварительно слитых потоков выполняется на специальной точке слияния перед началом посадки. При разработке алгоритмов и программного пакета модельный пример строился на основе рекомендаций по данным Московской Воздушной Зоны [1, 2]. Учитывались также общие рекомендации EUROCONTROL, ICAO и NASA по построению веерных схем [3–6] и предыдущий опыт исследования схем такого типа. Алгоритмы слияния потоков предназначены для выработки рекомендаций диспетчеру по оптимальности (минимум времени задержки) управления слиянием потоков в бесконфликтную предпосадочную очередь. При этом диспетчер может учитывать предлагаемую рекомендацию по коррекции движения управляемого ВС.

Модельный пример структуры предварительного слияния прибывающих потоков

Для исследования задавалась усложненная модельная структура с двумя веерными схемами, удаленными от района аэродрома. Такой тип организации воздушного пространства применяется в случае невозможности размещения веерных схем (дуг) ожидания и слияния потоков непосредственно в районе аэродрома [3–6]. Общая схема подходов, веерных схем и посадки потоков в рассматриваемом модельном примере приведена на рис. 1.

Показаны траектории подходов со схемами предварительной задержки, две веерные схемы предварительного слияния, траектории завершения подходов и захода на посадку от точек DEKAN и NIKOS веерных схем предварительного объединения: Северной (четыре потока KARMA, NAMIN, BOGDA и KERUS) и Южной (два потока ОКТОВ и SUKOT). Точки предварительного слияния отмечены кружками. При этом от пунктов предварительного слияния эти два потока должны следовать в зону посадки к пункту предпосадочного слияния DD322, точка общего слияния отмечена увеличенным крестиком.

Задача бесконфликтного слияния должна решаться на двух уровнях: предварительном (слияние на веерных схемах) и глобальном (слияние в общей точке на предпосадочной прямой).

Движение судов потоков от входов в общую зону УВД до посадки выполняется по их типовым модельным полетным планам с заданием координат, высот пролета контрольных пунктов траекторий и номинальных скоростных режимов движения. Движение описывается системами дифференциальных уравнений в соответствии с ГОСТ [7].

Подробная схема завершения подходов, захода на посадку и объединения Северного и Южного потоков в итоговой точке слияния DD322 показана на рис. 2.

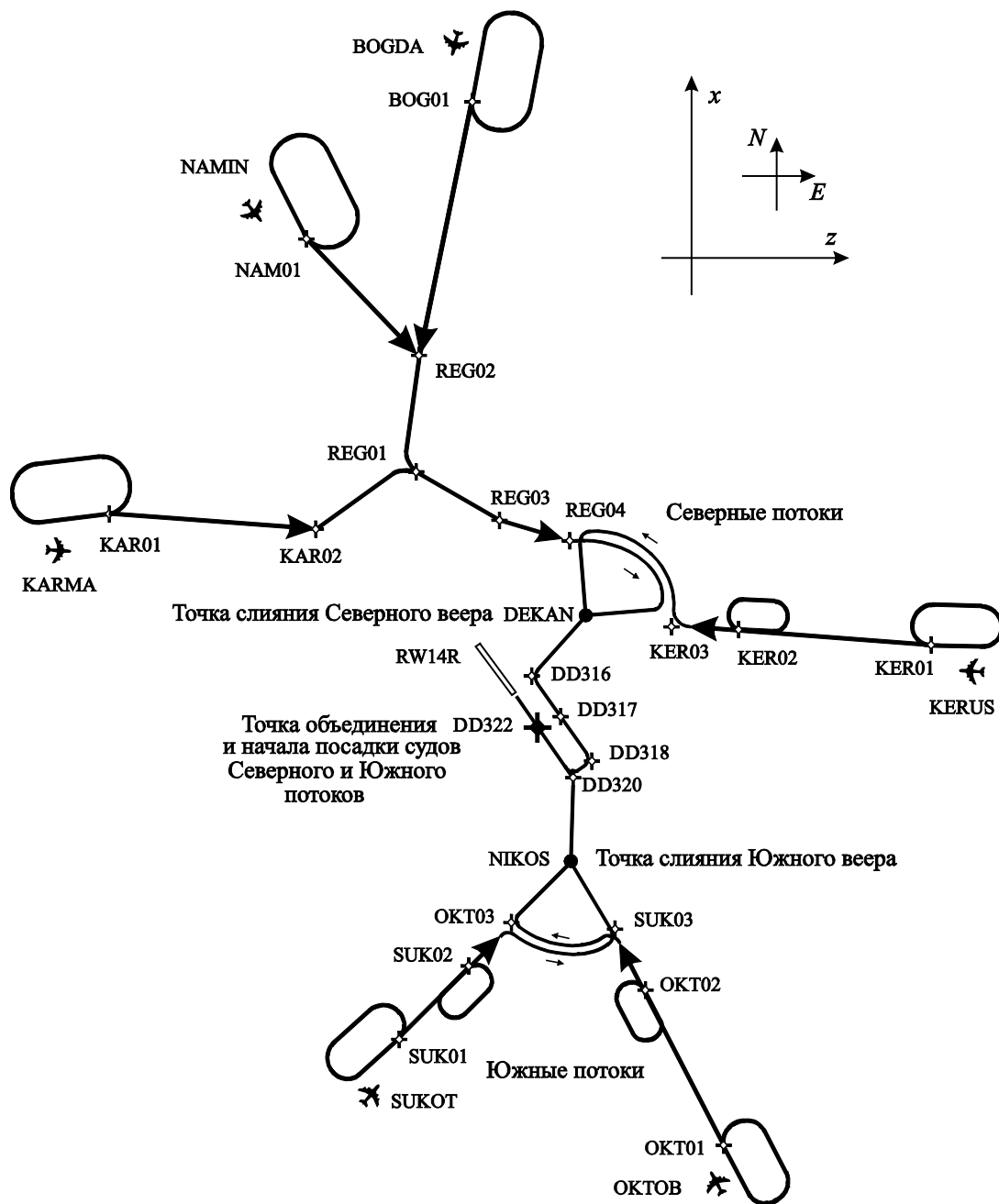


Рис. 1. Модельный пример. Общая схема подходов, слияния, веерных схем и посадки потоков

Алгоритмы управления бесконфликтным слиянием потоков

Общая структура алгоритмов управления слиянием представлена на рис. 3. Циклически по времени выполняются следующие операции и вычисления.

1) Опрос входа новых судов на контроль (рис. 1, входные точки KAR01, NAM01, BOG01, KER01, OKT1 и SUK01 потоков на границе рассматриваемой зоны УВД) и добавление судов, вошедших в очередь на слияние.

2) Прогнозирование моментов прибытия судов в точку слияния (DD322, рис. 1 и 2) по номинальным скоростным режимам движения в соответствии с полетными планами.

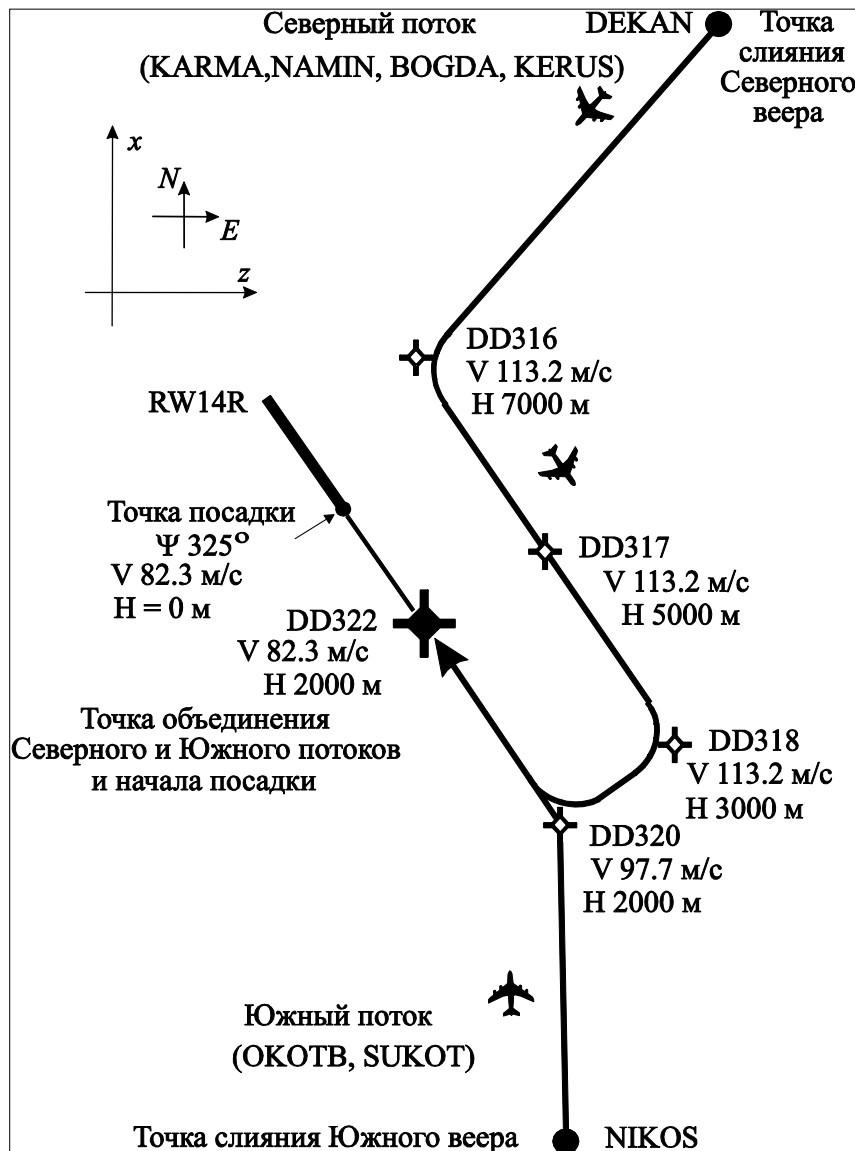


Рис. 2. Модельный пример; схема завершения подходов, захода на посадку и объединения Северного и Южного слитых потоков

3) Выявление конфликтности между судами с учетом моментов их прибытия в точку слияния. Возможная конфликтность обнаруживается в случае, если интервал между соседними судами оказывается меньше заданного временного безопасного продольного эшелонирования. При этом выделяется очередное судно, подлежащее задержке, или судно, увеличением (или замедлением) скорости, движения которого возможно разрешение обнаруженной конфликтной ситуации.

- 4) Выполняется расчет минимально необходимой задержки или ускорения конфликтующих судов.
- 5) Производится перевычисление расчетных времен прибытия судов (с учетом расчетных задержек, ускорения или замедления).
- 6) Выполняется проверка наведения возможных конфликтов в каждом потоке и в уже сформированной очереди судов.
- 7) Вырабатываются и визуализируются рекомендации диспетчеру по управлению судами.

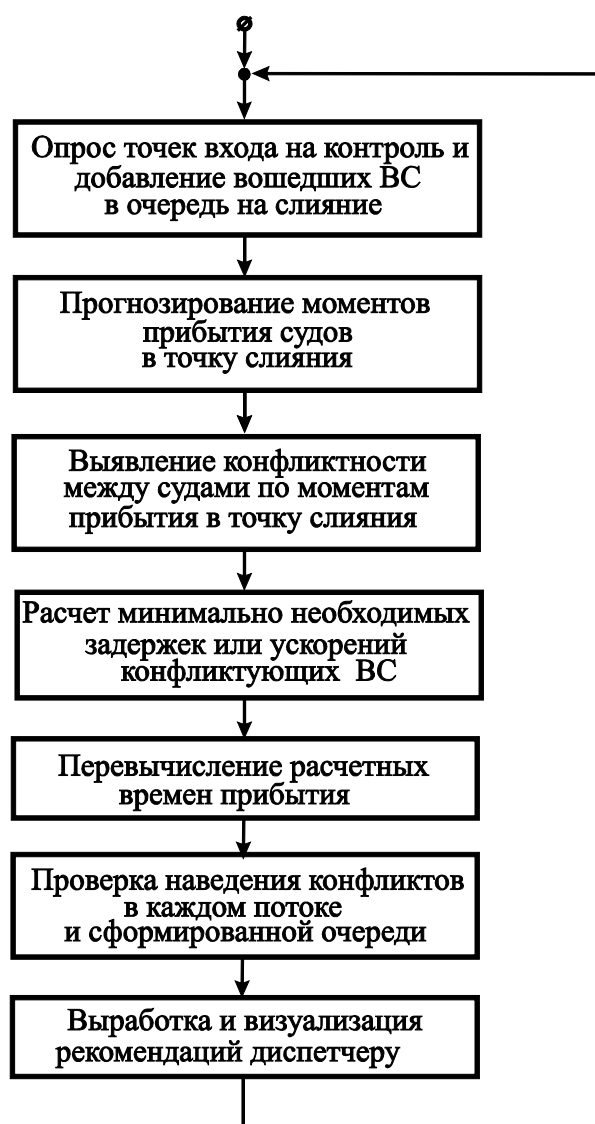


Рис. 3. Общая схема цикла работы алгоритмов слияния в бесконфликтную очередь.

Одним из основных требований к разрабатываемым алгоритмам является минимизация времени задержки каждого судна от момента его входа на контроль до прибытия в точку слияния потоков. В этой связи, в соответствии с положениями руководящих документов по Технологии работы диспетчеров УВД [8,9], разработаны гибкие алгоритмы управления слиянием. При их разработке учитывались результаты предыдущего исследования работы верных схем [10], где была показана их перспективность по сравнению со стандартными схемами предварительной задержки для бесконфликтного слияния прибывающих потоков.

Предусматривается возможность устранения конфликта как выполнением задержки последующего ВС (в конфликтующей паре), так и ускорением предыдущего ВС (в данной паре) путем увеличения его скорости движения. Реализация необходимой задержки может выполняться и последующим ВС в конфликтующей паре путем замедления его скорости. Такое увеличение (или замедление) выполняется в пределах допустимых технологических интервалов скоростного режима движения управляемого судна. Важным моментом (рис. 3) является постоянная циклическая проверка возможности возникновения конфликтных ситуаций (внешние ветровые воздействия на суда, разбросы пилотирования) или их наведения при реализации скорректированного движения судов (задержек и ускорений). Эта проверка выполняется как в каждом из рассматриваемых потоков, так и в уже сформированной очереди.

Таким образом, в алгоритме управления движением (рис. 1 и 2) необходимые задержки судов в основном реализуются на стандартных схемах предварительной задержки (ожидания) с возможностью их точной доводки на дугах ожидания соответствующих веерных схем. Кроме того, необходимая величина времени прибытия каждого судна в точку общего слияния DD322 обеспечивается изменением его скоростного режима на нужных отрезках траектории движения.

Результаты моделирования слияния потоков в усложненной схеме

Разработанные алгоритмы были сведены в программный моделирующий пакет. Фрагмент диалогового окна моделирования со сложившейся воздушной обстановкой показан на рис. 4а. Отображается часть модельной организации воздушного пространства. Показаны траектории движения судов всех потоков, контрольные пролетные пункты, Северная веерная схема с дугами ожидания, часть Южной веерной схемы, соответствующая ВПП. Суда отмечены маркерами и снабжены формулярами с модельной информацией: условный номер судна (с названием потока и моментом входа на контроль), скорость и высота движения.

На рис. 4б показан фрагмент динамической шкалы текущих времен прибытия контролируемых судов в общую точку слияния DD322. Дискрет шкалы равен 20 с. Данный фрагмент иллюстрирует обеспечение безопасного эшелонирования ВС BOGDA252 (после его соответствующей задержки на дуге ожидания) относительно ВС KERUS502. Из рис. 4а видно, что уже обеспечено бесконфликтное движение ВС NAMIN0 относительно ВС SUKOT802 и ВС ОКТОВ802 — относительно предыдущего ВС NAMIN0.

Работа алгоритмов слияния при дальнейшем развитии обстановки иллюстрируется на рис. 4в. Обеспечена бесконфликтность движения последовательности судов BOGDA252, KARMA752, KERUS1404 и NAMIN902 как внутри слитого Северного потока после прохождения точки слияния DEKAN, так и с судами слитого Южного потока (суда SUKOT2004 и ОКТОВ2004). При этом внутри Южного потока также обеспечена бесконфликтность после прохождения точки слияния NIKOS.

На динамической шкале прибытия (рис. 4б) видно гарантированное разнесение маркеров моментов прибытия всех указанных судов. На рис. 4в маркеры показывают, что по текущему моменту своего прибытия ВС KERUS2306 конфликтует с впереди прибывающим ВС BOGDA1154. Но после соответствующей задержки ВС KERUS2306 этот конфликт будет также разрешен. Минимальный интервал безопасного продольного эшелонирования в потоках и над точками слияния DEKAN, NIKOS и DD322 задавался 120 с.

Моделирование показало, что при обрабатываемых шести потоках (рис. 1) и формально заданной суммарной интенсивности прилета потоков 30 судов/час, коллапс пропускной способности (т.е. ситуация невозможности бесконфликтного вписывания судов в предпосадочную очередь) наступает примерно через полчаса работы аэропорта.

При суммарной интенсивности порядка 24 судов/час начинают интенсивно нагружаться входные схемы предварительной задержки (рис. 1). Коллапс наступает примерно через час работы аэропорта.

Предельно допустимая суммарная интенсивность составляет 19–20 судов/час, и нормальное функционирование аэропорта (с гарантированным обеспечением бесконфликтности) осуществляется в течение неограниченного времени моделирования – до 30 часов непрерывной работы.

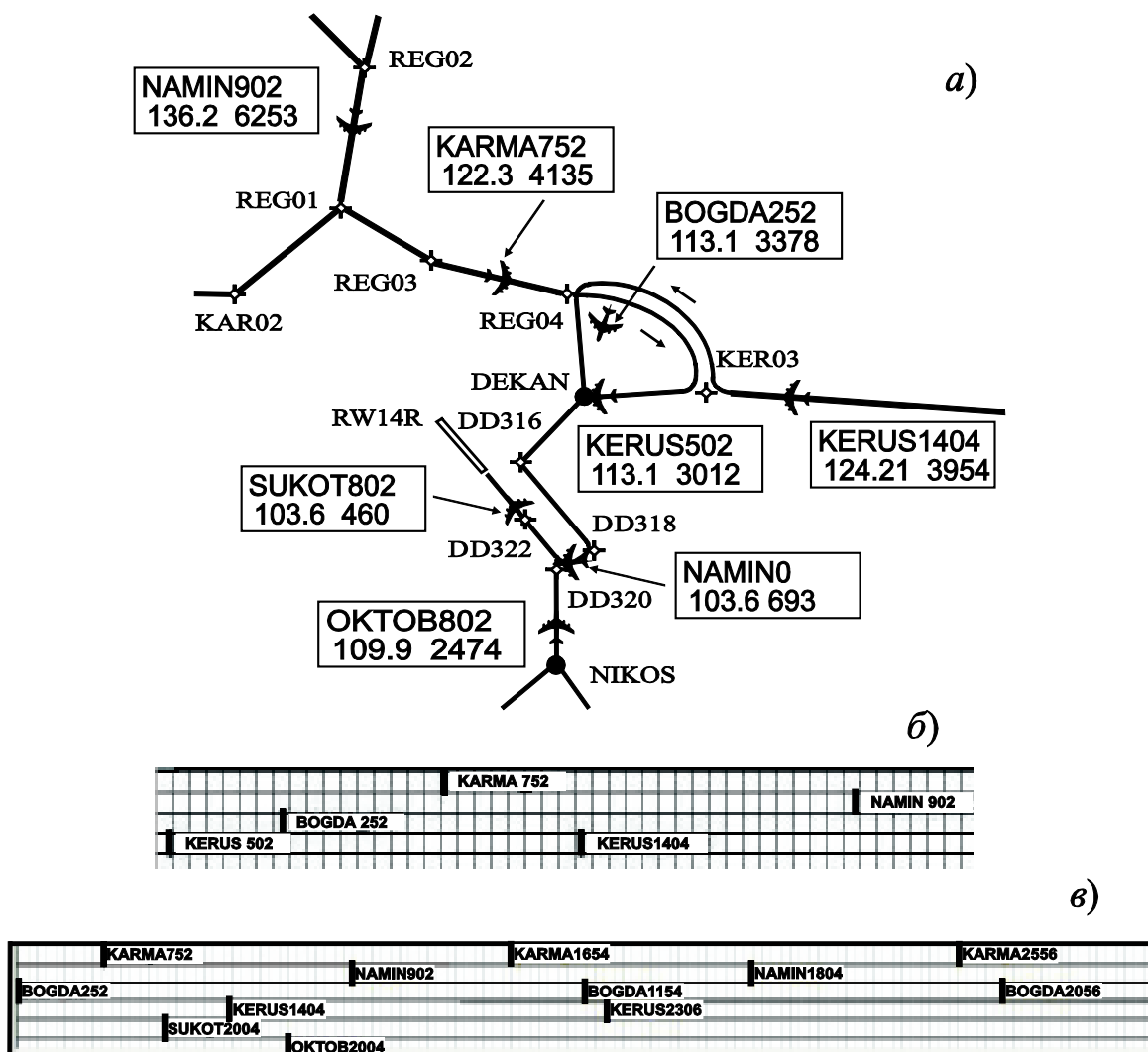


Рис. 4. Работа алгоритмов слияния; а) фрагмент диалогового окна диспетчера; б) и в) обеспечение бесконфликтного движения и слияния судов всех потоков.

Выводы

Разработаны алгоритмы бесконфликтного слияния в посадочную очередь нескольких прибывающих потоков воздушных судов. Алгоритмы работают в усложненной схеме организации воздушного пространства с предварительным слиянием на отдельной верной схеме четырех потоков, предварительным слиянием на отдельной верной схеме остальных двух потоков и последующим объединением этих потоков в бесконфликтную посадочную очередь.

Критерием работы алгоритмов является минимизация суммарного времени задержки прибывающих судов от момента входа на контроль (в рассматриваемую зону УВД) до прибытия в общую точку слияния всех потоков на предпосадочной прямой.

Моделирование с реальными числовыми данными подтверждает успешную работу алгоритмов и позволяет оценить пропускную способность аэропорта и допустимую суммарную критическую интенсивность (плотность) прибывающих потоков.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-01-00410.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект структуры воздушного пространства МУДР. Стандартные маршруты прибытия. Версия 03 ПСВП МУДР 8.5.1 (таблицы). ГосНИИ ГА. Москва, 2016.
2. Проект структуры воздушного пространства МУДР. Схемы захода на посадку. Версия 04 ПСВП МУДР 8.5.1 (схемы). ГосНИИ ГА, Москва, 2016.
3. Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent. Operation Services and Environment Definition // Report, July 2010. Eurocontrol Experimental Center, Bretigny-sur-Orge. http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2008/003_Point_Merge_OSED_V2.0.pdf.
4. Point Merge — a New Approach to Air Traffic Control at Dublin // EOLAS Magazine, February, 2012.
5. Boursier L., Favennec B., Hoffman E., Trzmiel A., Vergne F., and K. Zeghal. Merging Arrival Flows without Heading Instructions // Proceedings of the USA/Europe Air Traffic Management R\D Seminar, Barcelona, Spain, July 2007.
6. Air Traffic Management Technology Demonstration-1 (ATD-1). NASA Report FS-2011-10-01-ARC.
7. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. Москва, Госстандарт, 1980.
8. Королев Е. Н. Технологии работы диспетчеров управления воздушным движением. – Москва, Воздушный транспорт, 2000.
9. Пятко С.Г., Красов А.И. (ред.) Автоматизированные системы управления воздушным движением. Санкт-Петербург, Изд. Политехника, 2004.
10. Кумков С.И., Пятко С.Г., Спиридонов А.А. Исследование стандартной и веерной схем задержки воздушных судов в зоне подхода // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 20(331). С. 63-73.

REFERENCES

1. Project structure of Moscow air space. Standard arrivals. Version 03 8.5.1 (tables). GosNII GA. Moscow, 2016. (In Russian).
2. Project structure of Moscow air space. Schemes of landing approaches. Version 04 8.5.1 (schemes). GosNII GA. Moscow, 2016. (In Russian).
3. Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent. Operation Services and Environment Definition. Report, July 2010. Eurocontrol Experimental Center, Bretigny-sur-Orge. http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2008/003_Point_Merge_OSED_V2.0.pdf.
4. Point Merge — a New Approach to Air Traffic Control at Dublin. EOLAS Magazine, February, 2012.
5. Boursier L., Favennec B., Hoffman E., Trzmiel A., Vergne F., and K. Zeghal. Merging Arrival Flows without Heading Instructions. Proceedings of the USA/Europe Air Traffic Management R\D Seminar, Barcelona, Spain, July 2007.
6. Air Traffic Management Technology Demonstration-1 (ATD-1). NASA Report FS-2011-10-01-ARC.
7. GOST 20058-80. Dynamics of flying vehicles in atmosphere. Terminology, definitions, notations. Moscow, GOSSTSN DART, 1980. (In Russian).
8. Korolev E.N. Work technologies for ATC operators. Moscow, Vozdushnyi transport Publ., 2000.
9. Pyatko S.G., Krasov A.I. (eds.) Automated systems for air traffic control. Sankt-Petersburg, Polytekhnik, 2004. (In Russian).

10. Kumkov S.I., Pyatko S.G., Spiridonov A.A. Investigation of standard and point-merge schemes for delaying aircrafts in the approach zone. Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 2018, no. 20(331), p.p.63-73. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кумков Сергей Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского Отделения Российской Академии Наук, ул. Софьи Ковалевской, 16, 620990, Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: kumkov@mm.uran.ru

Пятко Сергей Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Советник генерального директора, ОАО «Концерн ПВО «Алмаз–Антей», ул. Вереysкая, 41, 121471 Москва, Российская Федерация; e-mail: psg_atc@gmail.com

Овчинников Михаил Михайлович, магистр, старший программист, Институт математики и механики Уральского отделения РАН им. Н.Н. Красовского Уральского Отделения Российской Академии Наук, ул. Софьи Ковалевской, 16, 620990, Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: ovchinnikov.m.m@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Kumkov Sergey I., Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientists, Associate Prof., Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Sophia Kovalevskaya Street, 16, 620990 Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kumkov@mm.uran.ru

Pyatko Sergey G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Adviser of the General Director of the Joint–Stock Company “Concern “Almaz – Antey”, Verejskaya Street, 41, 121471, Moscow, Russian Federation; e-mail: psg_atc@gmail.com

Ovchinnikov Mikhail M., Magister, Leading Programmer, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Sophia Kovalevskaya Street, 16, 620990 Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: ovchinnikov.m.m@gmail.com