

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 (№ 331)

№ 20

Москва
2018

ББК 39.5

НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

№ 20 (331)

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 каталоге Роспечати 70663
© ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2018

Редакционная коллегия

- Главный редактор** - заслуженный работник транспорта РФ, д-р техн. наук, проф. В.С. Шапкин (ФГУП ГосНИИ ГА)
- Зам. главного редактора** - д-р экон. наук С.С. Демин (ФГУП ГосНИИ ГА)
- Ответственный секретарь** - канд. техн. наук А.И. Плешаков (ФГУП ГосНИИ ГА)

Члены редакционной коллегии

- Е.С. Вайцехович, канд. техн. наук (ОАО «Минский завод гражданской авиации № 407», Минск, Беларусь);
- С.А. Грачев, канд. техн. наук (филиал «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- М.С. Громов, канд. техн. наук (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- С.В. Далецкий, заслуженный работник транспорта РФ, д-р техн. наук (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- Б.В. Зубков, д-р техн. наук, профессор (МГТУ ГА, Москва, Российская Федерация);
- В.Б. Козловский, д-р техн. наук, профессор (ОАО «НПК ПАНХ», Краснодар, Российская Федерация);
- Е.А. Куклев, заслуженный работник высшей школы, д-р техн. наук, профессор (СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Российская Федерация);
- В.Я. Кушельман, д-р техн. наук (филиал «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- Г.Е. Масленникова, д-р техн. наук (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- В.В. Никонов, д-р техн. наук, профессор (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- Ю.В. Попов, д-р техн. наук (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- Н.Н. Сиротин, заслуженный деятель науки РФ, д-р техн. наук, профессор (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация);
- А.М. Сорокин, д-р инж. наук (ООО «AVIATEST», Рига, Латвия);
- О.Ю. Страдомский, заслуженный работник транспорта, канд. техн. наук, (ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация).

тел./факс: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

Плата за публикацию в Научном вестнике ГосНИИ ГА с аспирантов и студентов не взимается

Editorial Board

- Chief editor** - Shapkin V.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director, GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Deputy chief editor** - Demin S.S., Dr. Econ. Sci., Deputy General Director, GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Responsible Secretary** - Pleshakov A.I., Cand. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, GosNII GA, Moscow, Russian Federation

The members of the Editorial Board

Vaitsehovich E.S., Cand. Sci. (Eng.), "Minsk Plant of Civil Aviation No. 407", Minsk, Belarus

Grachev S.A., Cand. Sci. (Eng.), Branch "R&D Institute of Air Navigation" of GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Gromov M.S., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Daletskiy S.V., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Zubkov B.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, MSTU CA, Moscow, Russian Federation

Kozlovskiy V.B. Dr. Sci. (Eng.), Professor, JSC "PANH Helicopters", Krasnodar, Russian Federation

Kuklev E.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State University CA, Saint-Petersburg, Russian Federation

Kushelman V.Ya., Dr. Sci. (Eng.), Branch "R&D Institute of Air Navigation" of GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Maslennikova G.E., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Nikonov V.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Popov Yu.V., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Sirotin N.N., Dr. Sci. (Eng.), Professor, GosNII GA, Moscow, Russian Federation

Sorokin A.M., Dr. Sci. (Eng.), "AVIATEST" Ltd., Riga, Latvia

Stradomskiy O.Yu., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation

tel./fax: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

Postgraduates and students are not charged for the publication of articles in the Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation.

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

УДК 656.7.052:351.814.335.82

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАНДАРТНОЙ И ВЕЕРНОЙ СХЕМ ЗАДЕРЖКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ЗОНЕ ПОДХОДА

С.И. КУМКОВ¹, С.Г. ПЯТКО², А.А. СПИРИДОНОВ¹

¹*Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского, Уральское Отделение
Российской Академии Наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

²*ООО “Фирма “Новые информационные технологии в авиации (НИТА)”,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Аннотация. Исследованы характеристики алгоритмов задержки и бесконфликтного слияния потоков воздушных судов в стандартных и веерных схемах предварительной задержки. Рассматривается управление слиянием трех потоков судов в зоне подхода применительно к модельному фрагменту структуры прибывающих потоков. Стандартные схемы задержки имеют структуру широко применяемых на практике схем типа “тромбон”. Для сравнения используются разработанные авторами модифицированные схемы задержки “развернутый полутромбон” веерного типа, созданные на основе рекомендаций EUROCONTROL и ICAO. Рассмотрены особенности реализации требуемой задержки в схемах каждого типа. Структуры схем описаны в плане и в пространстве. Модельные траектории, эшелоны, скоростные режимы движения судов и плотности прибывающих потоков соответствуют практическим данным по организации воздушного движения в Московской Воздушной Зоне. Разработанные алгоритмы обеспечивают бесконфликтное слияние и минимальность суммарных необходимых задержек судов всех потоков. Для каждого типа схем оценены затраты времени задержки судов как в каждом потоке, так и суммарные задержки судов по всей исследуемой группе. Сравнительное моделирование проведено при различных интенсивностях прибытия судов в потоках. Показано, что схемы типа “развернутый полутромбон” обеспечивают примерно втрое меньшую суммарную величину задержек. Такие схемы перспективны для использования в качестве схем предварительной задержки для слияния нескольких потоков судов в зоне подхода. Результаты исследований предназначены для использования в диспетчерских тренажерах и перспективных автоматизированных системах УВД.

Ключевые слова: зона подхода, воздушные суда, прибывающие потоки, бесконфликтное слияние, схемы задержки, стандартные схемы, модифицированные веерные схемы, суммарная задержка, минимизация задержки.

INVESTIGATION OF STANDARD AND POINT-MERGE SCHEMES OF AIRCRAFT DELAY IN APPROACH ZONE

S.I. KUMKOV¹, S.G. PYATKO², A.A. SPIRIDONOV¹

¹*Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics Ural Branch
Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation*

²*New Information Technologies in Aviation, Llc, Sankt-Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The paper presents investigation of properties of algorithms for delay and non-conflict merging of aircraft flows in standard and point-merge schemes of preliminary delay. Control of merging three aircraft flows is implemented in the approach zones. Investigation is performed on a model fragment of structure of arriving flows. The standard schemes have structure of the “trombone” type that is now widely used in the air traffic control practice. For comparison, the modified point-merge schemes of the “turned half-trombone” type are investigated; such schemes were constructed by authors on the basis of general recommendations of EUROCONTROL and ICAO. Structures of these schemes are described in the plane and space. Specifics of implementing the delays in schemes of both types are investigated. The model trajectories, flight levels, velocities of aircraft motions, and densities of the arriving flows are chosen similar to practical ones in the Moscow Air Space. Elaborated algorithms provided the non-conflict merging and minimal-necessary

summary delay-time of all aircraft flows. These delays are estimated both in each flow and in the whole collection of arriving aircrafts. It was found that histograms of the delay-time distribution are not normal (Gaussian). Comparative simulation was performed under various intensities of arriving flows. It was shown that the delay schemes of the “turned half-trombone” type are perspective, since they provide approximately three times smaller values of the summary delay. So, they can be recommended for application to preliminary delay of aircraft flows in the approach zones. Results of investigations are aimed to using in the operators’ trainers and perspective automated systems of air traffic control.

Keywords: approach zone, aircrafts, arriving flows, non-conflict merging, delay schemes, standard schemes, modified point-merge schemes, summary delay time, minimization of delay.

Введение

Целью настоящих исследований является разработка алгоритмического и программного обеспечения для перспективных автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД). В настоящее время в практике УВД [1,2] для бесконфликтного слияния потоков воздушных судов широко применяются стандартные схемы предварительной задержки типа тромбон. Такие схемы имеют простую структуру и при малом числе сливаемых потоков легки для понимания диспетчером обстановки и принятия им решений по управлению воздушными судами (ВС).

Однако данные схемы обладают рядом существенных недостатков, которые крайне затрудняют их использование при увеличении числа сливаемых потоков и повышении плотности. Главными из них являются:

— ограниченность снизу необходимого времени задержки величиной времени полного разворота ВС на 360 градусов;

— сложность реализации диспетчером бесконфликтного вывода ВС (с такой схемы предварительной задержки) в единый слитый поток с заданным безопасным продольным временным эшелонированием.

В режиме визуального контроля и ручного управления указанные недостатки затрудняют принятие диспетчером оптимальных решений по минимизации как времени задержки ВС в каждом потоке, так и суммарного времени задержки сливаемых потоков.

В качестве альтернативы исследуется и предлагается для практического использования схема предварительной задержки типа *развернутый полутромбон*. Такой тип схемы был разработан на основе общей идеологии EUROCONTROL, ICAO и NASA построения веерных схем задержки ВС [3–7] применительно к предварительному слиянию потоков еще в зонах подхода. Минимизация затрат времени здесь достигается возможностью *непрерывного* управления задержкой до минимально необходимой величины с прямым учетом заданного допустимого безопасного интервала в сливаемой очереди.

Алгоритмы бесконфликтного слияния и управления задержками судов исследовались на модельном примере схемы организации движения и слияния потоков в зоне подхода. За основу брались рекомендации по организации воздушного движения Московской Воздушной Зоны [8,9] с реальными данными движения судов по их полетным планам (заданные траектории и скоростные режимы). Движение судов описывалось системами дифференциальных уравнений в соответствии с рекомендацией ГОСТ [10].

Работа алгоритмов исследовалась как на стандартных схемах типа тромбон, так и при использовании предлагаемых схем типа *развернутый полутромбон*. Результаты моделирования подтверждают перспективность использования схемы *развернутый полутромбон* для предварительной задержки при слиянии нескольких потоков ВС. На основе общих рекомендаций EUROCONTROL, ICAO и NASA (по построению веерных дуговых схем предварительной задержки в зонах подхода) разработана двухплечевая структура типа *развернутый полутромбон*. Такая схема занимает в плане вдвое меньший объем воздушного пространства в зоне УВД при одинаковом запасе максимальной задержки.

Разработанные алгоритмы предназначены для выдачи рекомендаций диспетчеру по оптимальному (минимум времени задержки) управлению слиянием потоков в бесконфликтную очередь при их предварительном слиянии еще в зоне подхода. Диспетчер имеет возможность как воспользоваться предлагаемой рекомендацией по управлению задержками судов, так и самостоятельно принимать решение по коррекции движения выбранного судна. Для использования в диспетчерских тренажерах разработан программный пакет сравнительной визуализации движения воздушных судов.

Стандартные и веерные схемы задержки

Бесконфликтное слияние исследуется на модельном примере траекторий трех потоков в зоне подхода (рис. 1). У контрольных точек нанесены номинальные данные траекторий движения (координаты x , z приводятся в некоторой единой условной системе координат УВД, указываются также высота пролета h и номинальная скорость пролета V).

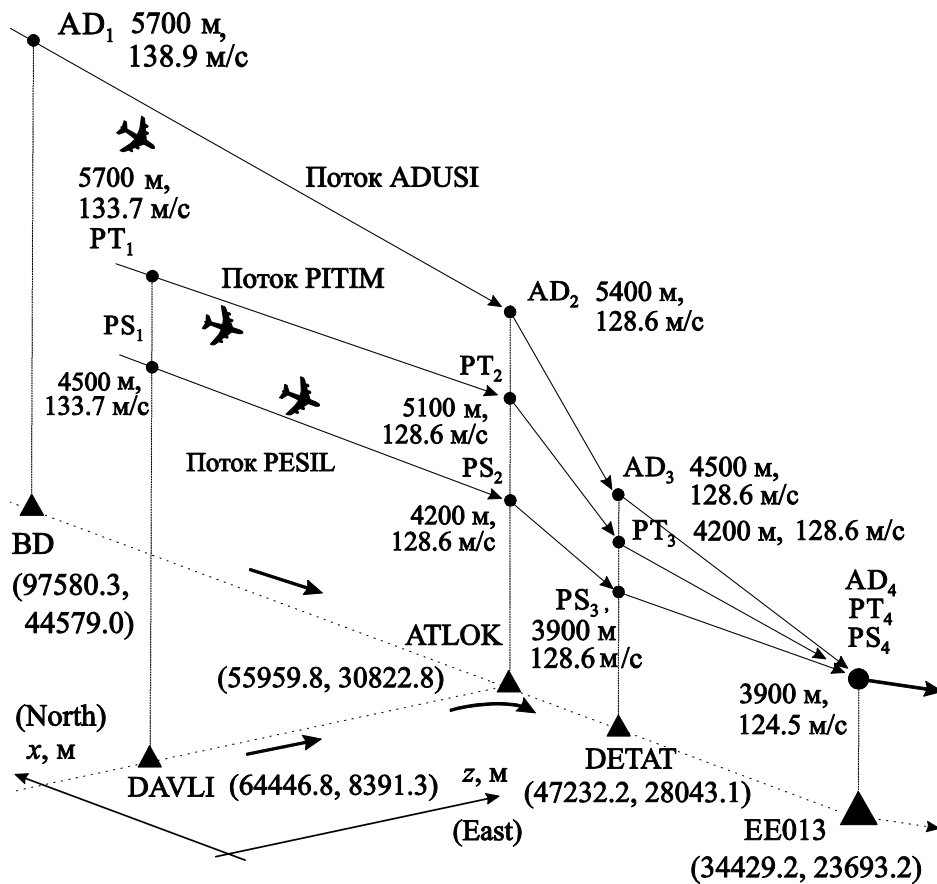


Рис. 1. Модельный пример траекторий подхода и слияния трех потоков судов

Стандартные схемы задержки. Рис. 2 иллюстрирует пример структуры и пространственного расположения стандартной схемы предварительной задержки потока ADUSI. Значения координат, высот и номинальных скоростей пролета приведены на рисунке. Здесь ATLOK — точка возврата на траекторию полетного плана; увеличенный треугольник — точка (DETAT) общего слияния потоков. Общий вид в плане траекторий подхода трех потоков со стандартными схемами показан на рис. 3. Схемы выбраны и помещены на траекториях подхода в соответствии с материалами [1,2,8,9].

Веерные схемы задержки, развернутый полутромбон. Идея использования схем предварительной задержки типа дуга в зонах подхода содержится в общих рекомендациях [3–7]. Отметим следующий важный момент. В этих материалах рассматривается схема, состоящая из одной достаточно длинной дуги (рис. 4а). Однако при заданных больших

величинах максимального запаса задержки (например, до 15–20 минут) такая схема может занимать очень большой объем пространства в зоне УВД.

Поэтому для исследования была разработана двухплечевая структура (рис. 4б и рис. 5)

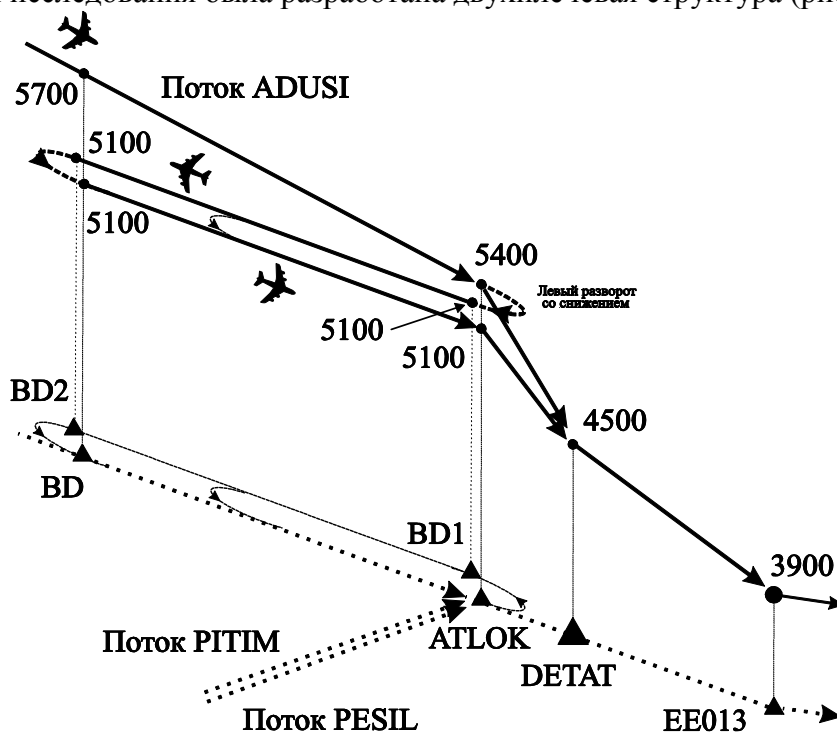


Рис. 2. Поток ADUSI; стандартная схема задержки; увеличенный треугольник — точка общего слияния потоков

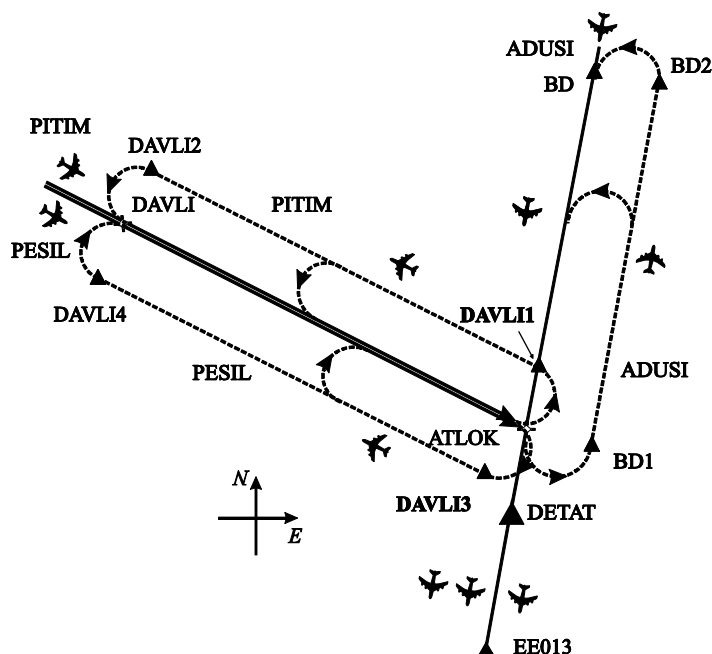


Рис. 3. Модельный вариант стандартных схем задержки; общий вид в плане

типа развернутый полутромбон, занимающая в плане вдвое меньший объем воздушного пространства в зоне УВД при одинаковом запасе максимальной задержки. Кроме того, для ее описания требуется задавать меньшее число контрольных пунктов. Здесь ATLOK — точка возврата на траекторию полетного плана; увеличенный треугольник — общая точка слияния потоков.

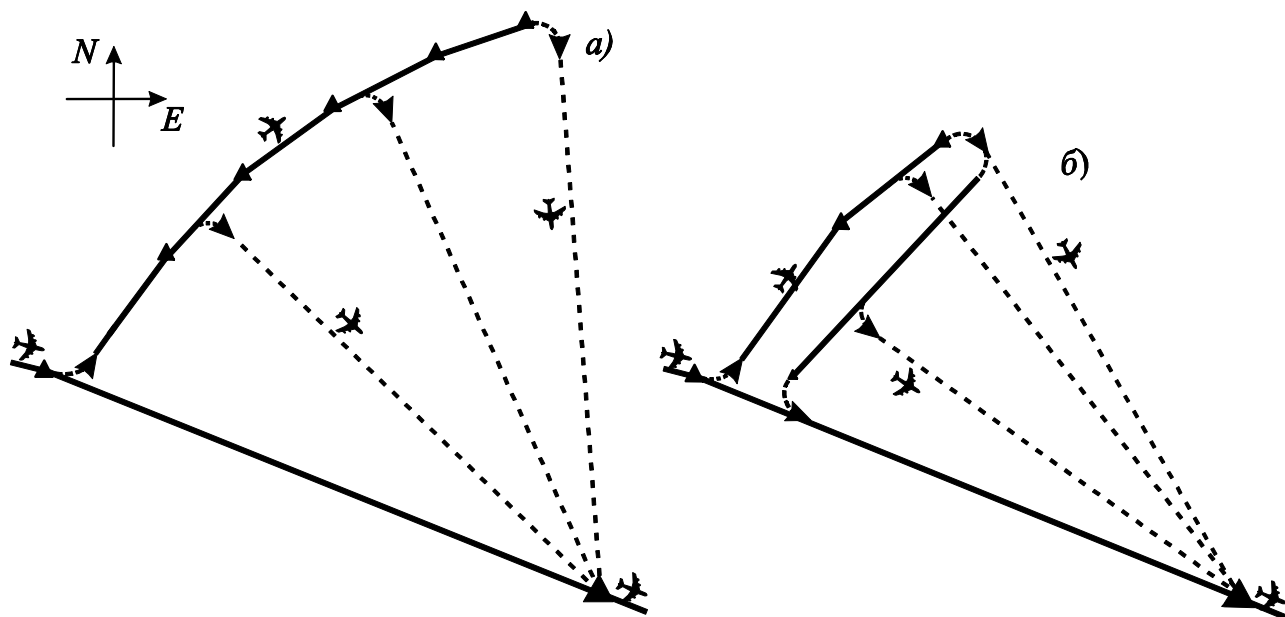


Рис. 4. Исходный (а) и принятый (б) варианты веерной схемы предварительной задержки в зоне подхода; увеличенный треугольник — точка возврата на траекторию полетного плана

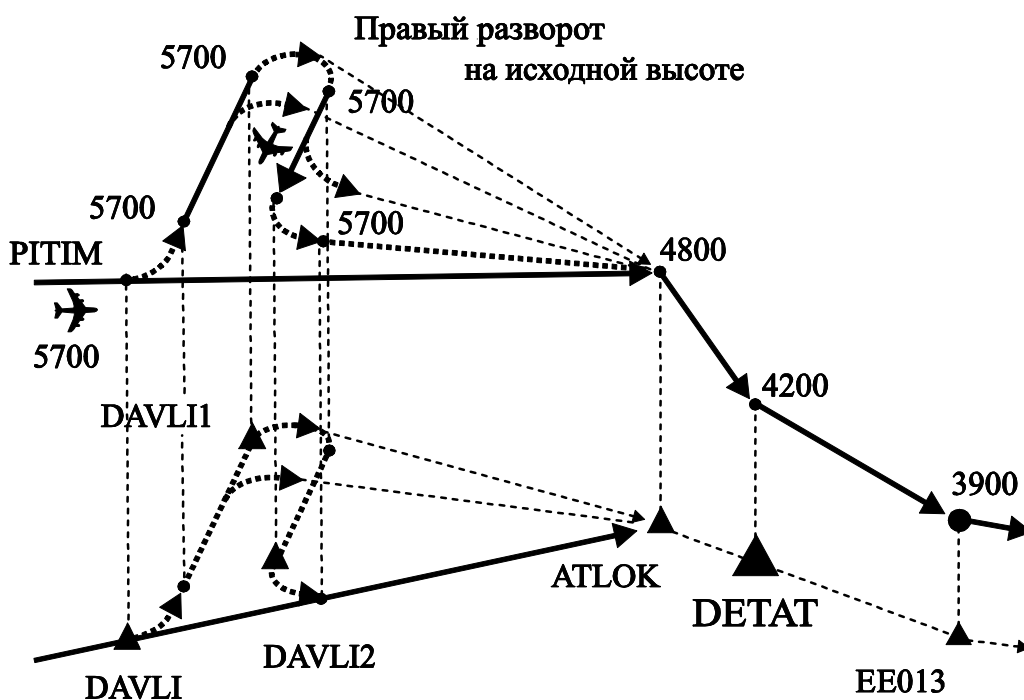


Рис. 5. Веерная схема предварительной задержки в зоне подхода потока PITIM

При движении судна по такой схеме выполняется следующая последовательность маневров судна:

- разворот на 90 градусов с траектории полетного плана на первое плечо задержки;
- после реализации нужной величины задержки на первом плече (или после разворота на втором плече) выполняется простой разворот на соответствующую точку возврата, расположенную на номинальной траектории полетного плана;
- по окончании разворота дальнейшее движение (с первого или второго плеча) выполняется со снижением до заданной высоты над точкой возврата.

Общий вид в плане веерных схем задержки трех потоков показан на рис. 6

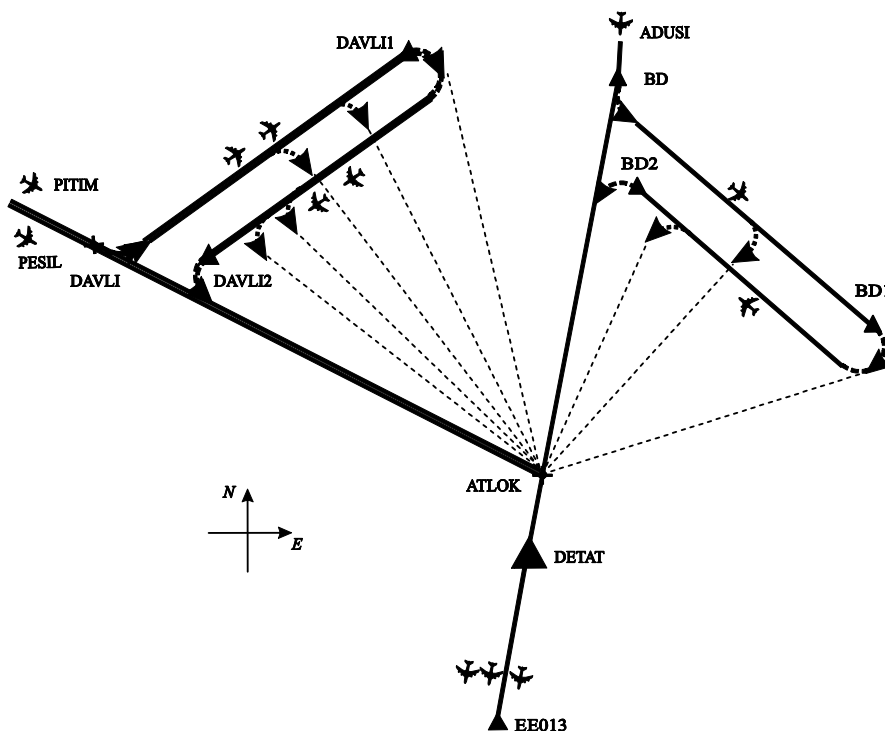


Рис. 6. Вариант верных схем задержки на трех потоках; общий вид в плане

Алгоритмы расчета оптимальной задержки и формирования бесконфликтной слитой очереди

Алгоритмы управления слиянием работают циклически по времени; выполняются следующие операции и вычисления.

1) Анализируется вход судов на контроль (на входные точки BD и DAVLI потоков на границе рассматриваемой зоны УВД, рис. 1) и выполняется добавление новых ВС в очередь на слияние.

2) Рассчитываются номинальные моменты прибытия судов в точку слияния EE013 (рис. 1) по номинальным скоростным режимам движения в соответствии с полетными планами.

3) По прогнозируемым моментам прибытия судов в точку слияния EE013 фиксируются возможные конфликтные ситуации между судами (если временные интервалы между ними оказываются меньше заданного временного безопасного продольного эшелонирования). При этом выделяется очередное судно, подлежащее задержке, или судно, повышением (или замедлением) скорости движения которого возможно разрешение обнаруженной конфликтной ситуации.

4) Рассчитывается минимально необходимая (т.е. оптимальная) задержка или ускорение судов в конфликтующей паре.

5) С учетом расчетных задержек или ускорений обрабатываемых ВС выполняется пересчет их времен прибытия.

6) Циклически проверяется возможность возникновения (или наведения) конфликтов в каждом потоке и в уже сформированной очереди судов.

7) На основе указанных расчетов вырабатываются и визуализируются рекомендации диспетчеру по управлению судами.

Напомним, что 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 [1,2], разработаны гибкие алгоритмы управления. Предусматривается возможность устранения конфликта как

выполнением минимально необходимой задержки последующего ВС (в конфликтующей паре), так и необходимым 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 является постоянная циклическая проверка возможности возникновения конфликтных ситуаций или их наведения при реализации скорректированного движения судов (задержек и ускорений).

Результаты моделирования работы алгоритмов слияния

Разработанные алгоритмы были сведены в программный моделирующий пакет в стандартной системе [11].

Стандартные схемы задержки. Прежде всего, изучался предельный вариант данных по условиям работы схемы:

— плотность каждого потока при входе на контроль, 360 с, т.е. с 6 минутным интервалом; таким образом, в этом варианте моделируется предельная номинальная интенсивность прибытия судов 10 судов/час в каждом потоке; суммарная номинальная интенсивность составляет 30 судов/час;

— эшелонирование, заданный безопасный временной интервал между судами при их объединении в точке слияния EE013 составляет 120 с;

— интервал времени моделирования задавался 21600 с, т.е. 6 часов работы диспетчерской смены.

Результаты моделирования по указанному предельному варианту с номинальной плотностью прибытия 30 судов/час характеризуются следующими данными.

Поток ADUSI: обработано судов 54, задержано 54, судов с прерванным подходом 2, минимальная (по всем судам потока) задержка 320 с, максимальная (по всем судам) задержка 660 с, суммарная задержка судов в потоке 30512 с.

Поток PITIM: обработано судов 55, задержано 54, судов с прерванным подходом 2, минимальная (по всем судам потока) задержка 0 с, максимальная (по всем судам) задержка 673 с, суммарная задержка судов в потоке 29504 с.

Поток PESIL: обработано судов 55, задержано 55, судов с прерванным подходом 2, минимальная (по всем судам потока) задержка 323 с, максимальная (по всем судам) задержка 703 с, суммарная задержка судов в потоке 30373 с.

Суммарно по всем потокам (стандартные схемы): обработано судов 164, задержано 163, судов с прерванным подходом 6, суммарная задержка судов по всем потокам 90389 с. Видно, что с учетом моделируемых случайных разбросов моментов входа судов на контроль

обслужено 164 судна. Из них 163 были задержаны, причем 6 судов не удалось вписать в слитую очередь (их подходы были прерваны). Общая задержка в потоках ADUSI, PITIM и PESIL составляла, соответственно, 30512 с, 29504 с и 30373 с. Суммарная задержка по трем потокам достигла катастрофической величины 90389 с. Величина задержки имеет очень большой разброс. На рис. 7 показан пример гистограммы количественного распределения задержек судов потока PESIL при моделировании на стандартных и веерных схемах. Гистограммы потоков ADUSI и PITIM имеют аналогичный вид.

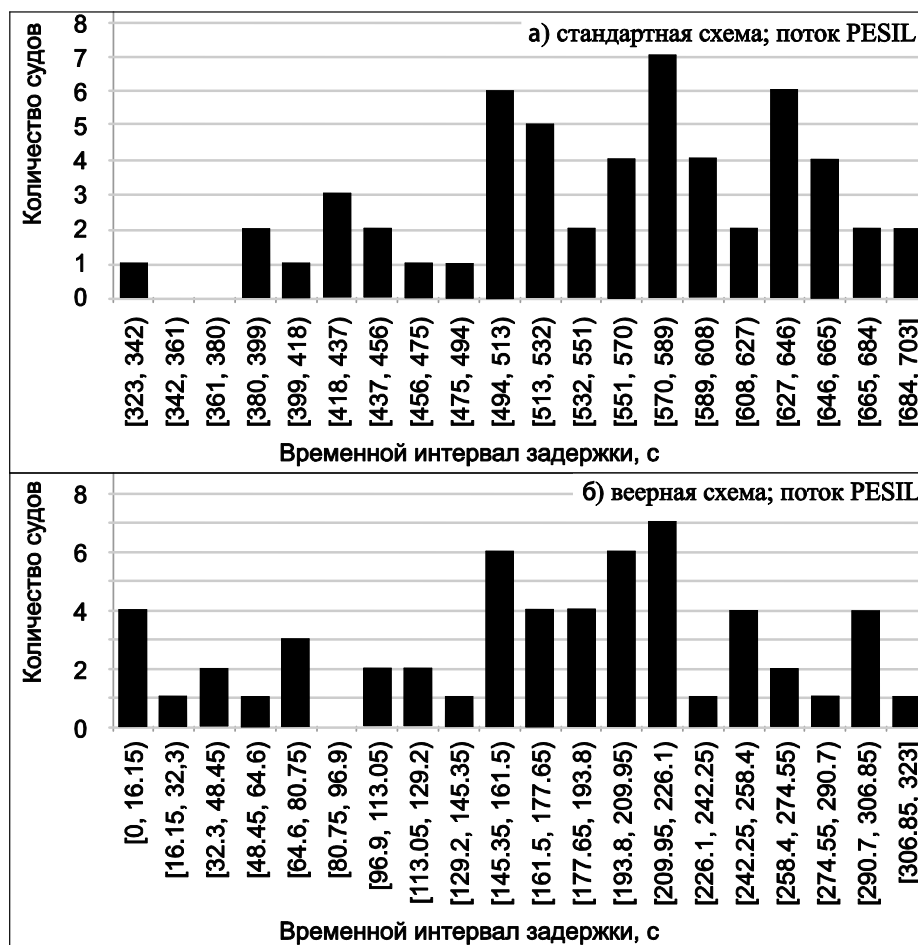


Рис. 7. Гистограмма количественного распределения задержек судов потока PESIL; а) моделирование на стандартных схемах; б) моделирование на веерных схемах

Таким образом (рис. 7а), моделирование подтверждает ожидаемый серьезный недостаток стандартных схем предварительной задержки с их ориентацией вдоль номинальной трассы движения. Недостаток обусловлен необходимостью выполнения судном полного обратного разворота даже при небольшой величине требуемой задержки. При этом моменты прибытия неоправданно увеличиваются на время полного разворота до 5 минут. При этом в стандартных схемах нарушается требуемая минимальность задержки каждого судна и неприемлемо возрастают суммарные задержки судов потоков.

Веерные схемы задержки. Для устранения указанных дополнительных (не оптимальных) задержек, присущих стандартным схемам, были взяты за основу веерные схемы в соответствии с рекомендациями EUROCONTROL, ICAO и NASA; учитывалась также практическая информация [8,9]. Эти схемы предварительной задержки были модифицированы. По своей сути, новая предложенная идея реализует компактный (по размерам в плане) вариант двойной дальней веерной дуги ожидания, которая обеспечивает примерное концентрическое движение задерживаемого ВС относительно точки возвращения на номинальную траекторию.

При моделировании с веерными схемами был взят одинаковый с моделированием по стандартным схемам вариант данных. Результаты по указанному предельному варианту с номинальной плотностью прибытия 30 судов/час характеризуются следующими данными.

Поток ADUSI: обработано судов 58, задержано 58, суда с прерванным подходом отсутствуют; минимальная (по всем судам потока) задержка 4 с, максимальная (по всем судам) задержка 316 с, суммарная задержка судов в потоке 10404 с.

Поток PITIM: обработано судов 57, задержано 56, суда с прерванным подходом отсутствуют; минимальная (по всем судам потока) задержка 0 с, максимальная (по всем судам) задержка 333 с, суммарная задержка судов в потоке 10344 с.

Поток PESIL: обработано судов 56, задержано 55, суда с прерванным подходом отсутствуют; минимальная (по всем судам потока) задержка 0 с, максимальная (по всем судам) задержка 323 с, суммарная задержка судов в потоке 9699 с.

Суммарно по всем потокам (веерные схемы): обработано судов 171, задержано 169, суда с прерванным подходом *отсутствуют*, суммарная задержка по всем потокам 30447 с. Видно, что с учетом моделируемых случайных разбросов моментов входа судов на контроль, обслужено большее число судов — 171 судна. Из них 169 судов были задержаны, причем все суда были успешно бесконфликтно доведены до точки общей точки слияния — суда с прерванным подходом отсутствуют.

Отметим, что в случае работы веерных схем примерно в три раза снизились общие задержки по потокам (ADUSI — 10404 с, PITIN — 10344 с, PESIL — 9699 с). Суммарная задержка по трем потокам снизилась до 30447 с. Величины задержек в потоках по каждому судну также принципиально уменьшились, что видно на примере гистограммы распределения задержки ВС потока PESIL (рис. 7б); гистограммы распределения задержек в потоках ADUSI и PITIM имеют аналогичный характер..

Сравнительный анализ характеристик стандартной и веерной схем

Сравнительные данные задержек по результатам моделирования приведены в сводных данных для стандартных (рис. 8а) и веерных (рис. 8б) схем при разных значениях суммарной плотности прибытия потоков 12, 18, 24 судов/час и при предельной величине 30 судов/час. При этом, соответственно, плотности прибытия в каждом потоке составляют: 4 судна/час, номинальный темп прибытия 900 с; 6 судов/час, номинальный темп прибытия 600 с; 8 судов/час, номинальный темп прибытия 450 с; предельный, 10 судов/час, номинальный темп прибытия 360 с.

Суммарная плотность прибытия, судов/час	а) стандартные схемы				б) веерные схемы			
	12	18	24	30	12	18	24	30
Суммарная задержка, с	8100	14472	63211	90389	13	2135	4899	30447
Поток ADUSI, с	1600	6748	20612	35512	0	818	1350	10404
Поток PITIM, с	3818	4562	20920	29504	0	998	1352	10344
Поток PESIL, с	1938	3906	21679	30373	13	319	2197	9699

Рис. 8. Количественные сравнительные данные задержки судов потоков при разной суммарной плотности прибытия: а) в стандартных схемах; б) в веерных схемах

Анализ этой информации показывает, что исключение неоправданных трат времени на развороты (присутствующих в стандартных схемах) и введение возможности непрерывного регулирования времени задержки (в веерных схемах) существенно снижают суммарные задержки в сливаемых потоках.

При проведении моделирования в схемах обоих типов вероятностным входным фактором являлось случайное рассеяние (с равномерным распределением) моментов прихода на контроль судов всех потоков. Примеры гистограмм количественного распределения времени задержки судов потоков (рис. 7) показывают, что результирующие законы распределений весьма далеки от нормальных — Гауссовских, которые часто предлагается использовать при исследовании потоков воздушных судов.

Выводы

Выполнено сравнительное исследование работы алгоритмов слияния в стандартных и улучшенных веерных схемах предварительной задержки и слияния трех потоков судов в зоне подхода применительно к модельному фрагменту структуры прибывающих потоков.

При различных суммарных интенсивностях прибывающих потоков оценены затраты времени задержки судов на их слияние.

Моделирование показало, что применение (в соответствии с рекомендациями EUROCONTROL, ICAO и NASA) модифицированной веерной технологии на схемах предварительной задержки обладает важными преимуществами перед существующими стандартными схемами. Веерные схемы могут быть рекомендованы для дальнейшего исследования и практического применения.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Е. Н. Технологии работы диспетчеров управления воздушным движением. М.: Воздушный транспорт, 2000.
2. Пятко С.Г., Красов А.И. (ред.) Автоматизированные системы управления воздушным движением. Санкт-Петербург: Политехника, 2004.
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. URL: 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. EUROCONTROLTV. Point Merge. Fast-time simulation of Point Merge indicates significant improvements.
URL: https://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_1_PM.html
8. Проект структуры воздушного пространства МУДР. Стандартные маршруты прибытия. Версия 03 ПСВП МУДР 8.5.1 (таблицы). М: ГосНИИГА, 2016.
9. Проект структуры воздушного пространства МУДР. Схемы захода на посадку. Версия 04 ПСВП МУДР 8.5.1 (схемы). М: ГосНИИГА, 2016.
10. ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. М: Госстандарт, 1980.
11. Qt Documentation Qt 4.7.x. URL: <http://doc.crossplatform.ru/qt/4.7.x/qt4doc.html>

REFERENCES

1. Korolev E.N. Work technologies for ATC operators. Moscow, Vosdushnyi transport, 2000.
2. Pyatko S.G., Krasov A.I. (eds.) Automated systems for air traffic control. Sankt-Petersburg: Polytekhnika, 2004.
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. EUROCONTROLTV. Point Merge. Fast-time simulation of Point Merge indicates significant improvements. https://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/EEC_News_2008_1_PM.html
8. Project structure of Moscow air space. Standard arrivals. Version 03 8.5.1 (tables). Moscow, GosNII GA Publ, 2016.
9. Project structure of Moscow air space. Schemes of landing approaches. Version 04 8.5.1 (schemes). Moscow, GosNII GA Publ, 2016.
10. GOST 20058–80. Dynamics of flying vehicles in atmosphere. Terminology, definitions, notations. M, Gosstandart Publ., 1980.
11. Qt Documentation Qt 4.7.x. <http://doc.crossplatform.ru/qt/4.7.x/qtdoc.html>

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.

Спиридонов Арсений Александрович, бакалавр, старший программист, Институт математики и механики Уральского отделения РАН им. Н.Н. Красовского Уральского Отделения Российской Академии Наук, ул. Софьи Ковалевской, 1, 620990, Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: spiridonov.arseniy@gmail.com.

ABOUT THE AUTHORS

Kumkov Sergey I., Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientists Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS, S. Kovalevskaja Street, 16, 620990, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kumkov@mm.uran.ru.

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

Spiridonov Arseniy A., Bachelor, Developer, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of UrB RAS, S. Kovalevskaja Street, 16, 620990, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: spiridonov.arseniy@gmail.com.