

Том 24, № 04, 2021

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 24, No. 04, 2021

Издается с 1998 г.

Москва
2021

Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. ф.-м. н., советник ректората МГТУ ГА, Москва, Россия;

Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, проф., д. филос. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Туркин И.К., проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Калугин В.Т., проф., д. т. н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. ф.-м. н., проф. МФТИ, Москва, Россия;

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, проф., д. т. н., первый заместитель генерального директора Национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия;

Боев С.Ф., проф., д. т. н., д. э. н., генеральный директор Межгосударственной акционерной корпорации «Вымпел», Москва, Россия;

Дамиан Ривас Ривас, проф., PhD, проф. Университета Севильи, Севилья, Испания;

Сюй Хаудзюнь, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хянань, Китай;

Франческа де Кресценцио, профессор, кафедра промышленной инженерии, Болонский университет, Болонья, Италия;

Владимир Немец, PhD, Транспортный факультет Яна Пернера, кафедра воздушного транспорта, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская Республика;

Станислав Сзабо, PhD, Факультет авиационной техники, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Сайт: <http://avia.mstuca.ru>

E-mail: vestnik@mstuca.aero

Тел.: +7 (499) 459-07-16

Плата за публикацию в Научном Вестнике МГТУ ГА с аспирантов не взимается

Chief Editorial Board

- Editor-in-chief:** *Boris Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-chief:** *Vadim Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana Naumova*, Associate Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina Poleshkina, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Members of the Chief Editorial Board:

Anatoly I. Kozlov, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Olga D. Garanina, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Igor K. Turkin, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Vladimir T. Kalugin, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Dmitry S. Lukin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Vacily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, The National Research Center "Zhukovsky Institute" Moscow, Russia;

Sergey F. Boev, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation "Vimpel", Moscow, Russia;

Damian Rivas Rivas, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

Xu Haojun, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

Francesca De Crescenzo, Professor, Department of Industrial Engineering DIN, University of Bologna, Bologna, Italy;

Vladimir Němec, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic;

Stanislav Szabo, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic.

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акинишин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президенте РАН, Москва, Россия;

Бачкало Б.И., проф., д. т. н., в. н. с. ЦНИИ ВВС МО РФ, Щелково, Россия;

Брусов В.С., проф., д. т. н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Бышинский В.В., проф., д. т. н., проф. МФТИ, г. н. с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

Горелик А.Г., проф., д. ф-м. н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

Гузий А.Г., д. т. н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр», Москва, Россия;

Давидов А.О., доцент, д. т. н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

Красильщик И.С., проф., д. ф-м. н., проф. МНУ, Москва, Россия;

Кубланов М.С., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов В.Л., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов С.В., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Нечаев Е.Е., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Пантелеев А.В., проф., д. ф-м. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., проф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татаринов В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, Россия;

Харитонов С.А., проф., д. т. н., зав. каф. НГТУ, Новосибирск, Россия;

Ходаковский В.А., заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д. т. н., Рига, Латвия;

Чинючин Ю.М., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Шахтарин Б.И., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. т. н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Юрков Н.К., заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д. т. н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

Editorial Council

Oleg V. Abramov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Viktor V. Vyshinsky, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

Andrey G. Gorelik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Anatoliy G. Guziy, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

Albert O. Davidov, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

Michael S. Kublanov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Valeriy L. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey V. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Aleksandr I. Logvin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

Evgeniy E. Nechaev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Andrey V. Panteleev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Victor M. Rukhlinskiy, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

Aleksey V. Samokhin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Valentin A. Sarychev, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St.Petersburg, Russia;

Viktor N. Tatarinov, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

Saygid U. Uvaysov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia;

Sergey A. Kharitonov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

Vladimir A. Hodakovsky, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Boris I. Shakhtarin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Nikolay K. Urkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТ

Баталов К.А., Кулаков М.В., Чехов И.А.

Исследование технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения
и аэродромно-технической службы аэропорта 8

Brailko A.A., Gromov O.V., Litinsky G.I., Gromov V.K.

Mathematical modeling of the process of functioning of objects and technical means of ensuring
airfield control 20

Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Malygin V.B.

Multidimensional routing with the increased navigation accuracy with the maintenance of flight
notifications of the flight vehicles 30

Самуленков Ю.И., Филатова Я.А., Грузд А.Д.

Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания
воздушных судов 38

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Бусурин В.И., Мулин П.В.

Оптимизация балансировочного угла поворота в интомоторной группы
электроконвертоплана 50

Туркин И.К., Рогов Д.А., Грачев В.А.

Реакция предварительно нагруженной оболочки вращения с жесткой носовой частью
аппарата на ударную волну в жидкости 61

CONTENTS

TRANSPORT

Batalov K.A., Kulakov M.V., Chekhov I.A.

Research of the cooperation technology between the air traffic control service and the aerodrome service 8

Brailko A.A., Gromov O.V., Litinsky G.I., Gromov V.K.

Mathematical modeling of the process of functioning of objects and technical means of ensuring airfield control 20

Goncharenko V.I., Lebedev G.N., Malygin V.B.

Multidimensional routing with the increased navigation accuracy with the maintenance of flight notifications of the flight vehicles 30

Samulenkov Yu.I., Filatova Ya.A., Gruzd A.D.

Aircraft maintenance system simulation mathematical model construction 38

AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Busurin V.I., Mulin P.V.

Optimization of the trimming tilting angle of the electric tiltrotor propeller group 50

Turkin I.K., Rogov D.A., Grachev V.A.

Reaction of the preloaded rotation shell with the rigid nose part of the apparatus to a shock wave in the liquid 61

ТРАНСПОРТ

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

УДК 351.814.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-8-19

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛУЖБЫ
ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ
И АЭРОДРОМНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ АЭРОПОРТА**

К.А. БАТАЛОВ¹, М.В. КУЛАКОВ¹, И.А. ЧЕХОВ¹

*¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

В статье рассмотрен процесс взаимодействия службы обслуживания воздушного движения и аэродромно-технической службы аэропорта. В рамках анализа были рассмотрены процедуры взаимодействия при осмотре взлетно-посадочной полосы (ВПП) перед началом выполнения полетов, выполнением взлета и посадки воздушного судна, которые охватывают целый ряд совместных операций. Для каждой процедуры оценены затраты времени задержки воздушных судов. Оценка производилась путем синтеза хронологии взаимодействия служб в реальных условиях. На основе собранных данных построены блок-схемы взаимодействия служб обеспечения полетов аэропорта и службы обслуживания воздушного движения. Для наглядного сравнения существующей и предлагаемой модели взаимодействия служб были построены сетевые технологические графики взаимодействия служб на основе математической модели графа. Сетевой технологический график устанавливает последовательность событий обеспечения вылета одного воздушного судна, выполняющего регулярный рейс авиакомпании. В обеспечении вылета в рамках данного исследования задействованы служба обслуживания воздушного движения и аэродромно-техническая служба. Взаимодействие с производственно-диспетчерской службой аэропорта и экипажем воздушного судна носят условный характер, так как они в данном случае не влияют на технологию взаимодействия. Граф – это определенный набор точек (вершин), соединенных между собой линиями (ребрами). В случае нашего исследования вершины – это события (выполненные работы). Направленные отрезки (линии) – работы, связывающие события между собой. При оценке процесса взаимодействия при прилете и вылете рассматривались два случая: ВПП занята и ВПП свободна. ВПП могла быть занята по различным причинам: при нахождении на ней техники, людей или животных, а также при наличии стаи птиц. Исследование технологии взаимодействия проводилось в течение 12 месяцев выполнения регулярных полетов в аэропортах Жуковский и Остафьево на основе суточных планов полетов.

Ключевые слова: обслуживание воздушного движения, воздушное судно, аэродром, пропускная способность, взаимодействие органов обслуживания воздушного движения, аэродромно-техническая служба, осмотр ВПП.

ВВЕДЕНИЕ

Аэропорт – это сложно организованная система, каждый из элементов которой отвечает за определенные операции. По мере развития мировой авиации эта система вместе со своими элементами совершенствовалась и приобретала современные очертания. Развиваясь, элементы системы совершенствовали связи между собой. Уровень отлаженности связей между элементами и совершенство применяемых технологий определяют эффективность использования воздушного пространства (ИВП) и ресурсные затраты авиакомпаний, а также безопасность полетов. В данном исследовании рассматривается декомпозиция авиатранспортной системы на два элемента: службу обслуживания воздушного движения (ОВД) и аэродромно-техническую службу аэропорта (АТС) [1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для графического описания процесса взаимодействия рассматриваемых служб аэропорта используется блок-схема, в которой отдельные лица или службы изображаются в виде блоков, соединенных между собой линиями, указывающими направление взаимодействия. Линии подразделяются по типу связи между блоками: радиосвязь, связь по телефону, какое-либо действие или устный доклад (команда).

В рамках анализа, а также для дальнейшей разработки технологии взаимодействия служб обеспечения полетов аэропорта целесообразно использовать математическую модель графа [2, 3]. Маршрутом называется череда последовательно соединенных вершин x_i и ребер e_i .

$$x = x_0, e_0, x_1, e_1, \dots, e_{n-1}, x_n = g,$$

где $e_i = (x_i, x_{i+1})$, x – начало маршрута, g – конец маршрута.

В маршруте e и x могут повторяться. Если все e различны, то маршрут называется «цепь». В цепи x могут повторяться. В том случае когда все x отличаются, она называется «простая цепь».

Последовательность вершин на рис. 1 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_6, x_4, x_5$ есть маршрут из x_1 в x_5 , а вершины x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 определяют простой путь из x_1 в x_5 .

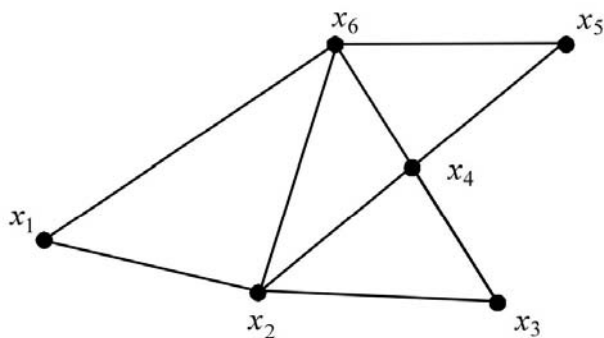


Рис. 1. Маршрут в графе
Fig. 1. Route in the graph

Безусловно, затраченное время на каждую отдельную работу, показанную на сетевом графике, можно определить математическим путем, зная несколько вводных. Но данные, полученные в реальных условиях, несут в себе больше достоверности и отвечают главной цели – оценить и улучшить процесс.

Чтобы качественно оценить эффективность технологии взаимодействия, рассмотрен такой параметр, как время. Был произведен сбор аналитической информации по затраченному времени службами ОВД, АТС и ПДС на выполнение 9-ти различных видов работ. Перечень исследуемых работ показан в табл. 1. Исключение случайных событий обеспечил существенный объем выборки – 12 месяцев выполнения полетов.

На первом этапе производились хронометрические исследования процесса обеспечения вылета воздушного судна (ВС) при условии, что взлетно-посадочная полоса (ВПП) свободна. На основании собранных данных строился сетевой график с использованием математической модели – графа. Сетевой график представлен на рис. 3.

На втором этапе производились хронометрические исследования процесса обеспечения вылета ВС при условии, что ВПП занята. На основании собранных данных строился сетевой

график, представленный на рис. 5. ВПП была заблокирована по различным причинам: техника, люди, животные, птицы.

Сетевой технологический график устанавливает последовательность событий обеспечения вылета одного ВС, выполняющего регулярный рейс авиакомпании. Обеспечением вылета в рамках данного исследования занимаются два действующих лица: служба ОВД и АТС. Влияние службы ПДС и экипажа ВС на данный процесс носят условный характер, потому что от них в данном случае не зависит технология взаимодействия между службами ОВД и АТС.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В аэропортах с переменной интенсивностью воздушного движения в перерывах между часами пик необходимо выполнять контрольный осмотр ВПП. Осмотр выполняется АТС с целью проверки ВПП на наличие птиц, животных, людей и посторонних предметов. В момент осмотра ВПП считается занятой, на диспетчерском пункте (ДП) включается табло «ВПП ЗАНЯТА». После осмотра специалист АТС докладывает по громкоговорящей связи (ГГС) об освобождении ВПП и ее состоянии, а руководитель полетов делает соответствующую запись в журнале учета состояния летного поля. Диспетчером УВД выключается табло «ВПП ЗАНЯТА» [4, 5]

При вылете ВС отсутствует строгая необходимость освободить ВПП не позднее определенного момента. Правильная технология взаимодействия подразумевает освобождение ВПП непосредственно перед разрешением экипажу ВС занять исполнительный старт (ИС). Рассмотрим подробнее технологию взаимодействия служб ОВД и АТС при обеспечении вылета гражданского ВС.

Есть два варианта начала процедуры вылета в технологии взаимодействия служб обеспечения полета:

- ПДС докладывает диспетчеру ДПР о готовности ВС к выталкиванию с места стоянки и запуску двигателей, а также сообщает точку запуска для ВС;
- экипаж ВС запрашивает у диспетчера ДПР погоду на аэродроме (при отсутствии ATIS).

Далее экипаж ВС запрашивает у диспетчера ДПР разрешение на выталкивание и запуск двигателей. Диспетчер ДПР выдает разрешение экипажу ВС, параллельно вызывает ответственного лица (ОЛ) АТС для осмотра ВПП. ОЛ АТС в момент вызова на ВПП может находиться в любой части аэродрома, что приводит к тому, что выезд машины АТС на ВПП занимает неопределенное время.

Экипаж ВС после запуска запрашивает у диспетчера ДПР разрешение на занятие предварительного старта. Диспетчер ДПР разрешает экипажу ВС руление, сообщает маршрут руления, ВПП, используемую для взлета и при необходимости указывает следовать за машиной сопровождения.

ОЛ АТС после осмотра освобождает ВПП по ближайшей рулежной дорожке, докладывает диспетчеру ДПР об освобождении ВПП и ее состоянии. Руководитель полетов записывает в журнал учета состояния летного поля время осмотра ВПП, ОЛ АТС и новое состояние ВПП. В случае обнаружения ОЛ АТС на ВПП птиц или животных предпринимаются меры по их устранению. Это занимает от 3 до 10 минут.

Если ВС уже заняло предварительный старт, то оно будет ожидать вылета в течение этого времени, что приводит к снижению пропускной способности ВПП и аэродрома, увеличению количества топлива, необходимого для выполнения рейса, и к загрязнению окружающей среды.

В случае обнаружения на ВПП посторонних предметов ОЛ АТС устраняет и сохраняет их для дальнейшего расследования, о чем обязательно докладывает РП.

Широко распространена устоявшаяся практика: ОЛ АТС осматривает ВПП вплоть до занятия ВС исполнительного старта. Экипаж докладывает о готовности к взлету. ОЛ АТС слы-

шит этот доклад и ускоряет осмотр ВПП. Диспетчер ДПР также ускоряет процесс осмотра. При такой практике формально выполнены все требования технологии осмотра ВПП: ВПП осмотрена, запись сделана в журнал, взлет ВС не задержан. Но фактически осмотр произведен некачественно из-за давления со стороны экипажа ВС или диспетчера ДПР. В другом случае ОЛ АТС может выполнить осмотр ВПП в том режиме, в котором он считает необходимым. Тогда, помимо задержки ВС, возможно, придется переносить время вылета в плане полета, так как экипаж ВС не уложится в 30-минутное окно для взлета [6]. Важно помнить: любая спешка – это прямая угроза безопасности полетов.

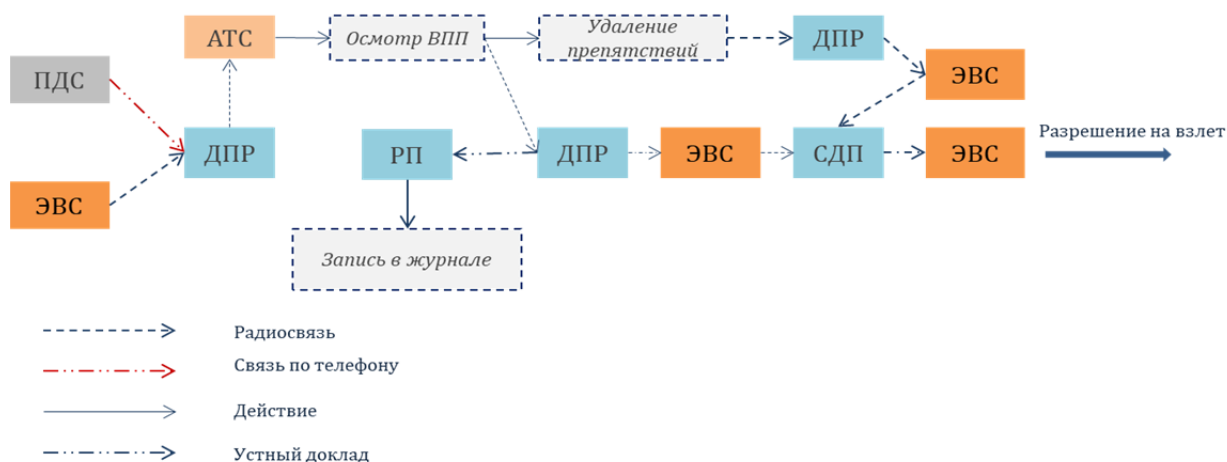


Рис. 2. Технология взаимодействия служб ОВД и АТС при вылете ВС
Fig. 2. Technology of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft departure

На рис. 2 показана блок-схема модели существующей технологии взаимодействия органов ОВД и АТС при обеспечении вылета одного регулярного рейса авиакомпании. При этом ВПП свободна от любых препятствий. Перечень исследуемых работ показан в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Таблица параметров технологического графика взаимодействия службы ОВД и АТС при вылете ВС (ВПП свободна)

Table of the parameters for the operation network of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft departure (RWY is clear)

п/п	Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин
		нач.	кон.	
1	Звонок от ПДС	0	1	1
2	Связь с машиной АТС	1	2	3
3	Выезд машины АТС на ВПП	2	3	5
4	Осмотр ВПП	3	4	20
5	Буксировка	1	5	3
6	Запуск двигателей	5	6	5
7	Руление на ПС	6	7	4
8	Руление на ИС	7	8	1
9	Взлет	8	9	0,4

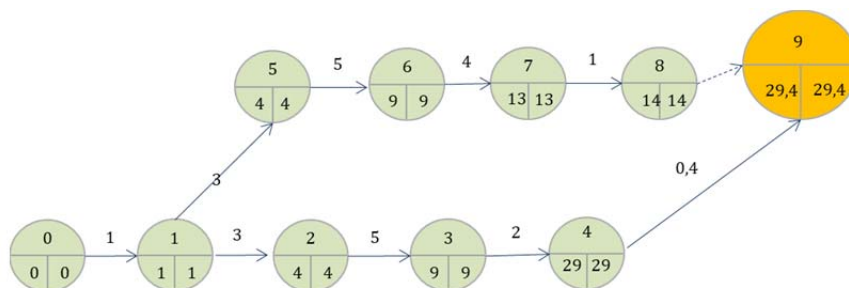


Рис. 3. Сетевой технологический график взаимодействия службы ОВД и АТС при вылете ВС (ВПП свободна)
Fig. 3. Operation network of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft departure (RWY is clear)

На рис. 3 мы видим, что средний критический путь обеспечения вылета ВС составляет 29,4 минуты, а среднее время занятия самолетом исполнительного старта (ИС) составляет 14 минут. Таким образом, задержка ВС, полностью готового к взлету, составляет 15,4 минуты.

Таблица 2
Table 2

Таблица параметров технологического графика взаимодействия службы ОВД и АТС
при вылете ВС (ВПП занята)

Table of the parameters for the operation network of cooperation between the ATM service and ATC
during aircraft departure (RWY is occupied)

п/п	Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин		
		нач.	кон.			
1	Звонок от ПДС	0	1	1		
2	Связь с машиной АТС	1	2	3		
3	Выезд машины АТС на ВПП	2	3	5		
4	Осмотр ВПП	3	4	29		
5	Буксировка	1	5	3		
6	Запуск двигателей	5	6	5		
7	Руление на ПС	6	7	4		
8	Руление на ИС	7	8	1		
9	Взлет			8	9	0,4

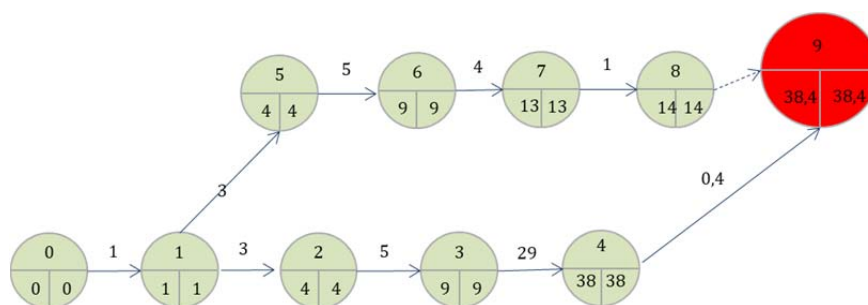


Рис. 4. Сетевой технологический график взаимодействия службы ОВД и АТС при вылете ВС (ВПП занята)
Fig. 4. Operation network of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft departure (RWY is occupied)

На рис. 4 мы видим, что средний критический путь обеспечения вылета ВС составляет 38,4 минуты, а среднее время занятия самолетом исполнительного старта (ИС) составляет 14 минут. Задержка взлета самолета в таком случае – 21,4 минуты. Таким образом, план полета

корректировать не придется, так как установленное окно для вылета ВС – это 30 минут [7]. Но средняя задержка ВС при обнаружении препятствий на ВПП – 21,4 минуты. При этом существенно снижается пропускная способность ВПП, растут эксплуатационные и топливные расходы авиакомпании.

В табл. 3 представлен средний расход топлива различных типов ВС на земле в кг/мин [8, 9].

Таблица 3
Table 3

Расход топлива ВС на земле
Aircraft fuel consumption on the ground

Тип ВС	Расход топлива на земле, кг/мин
F900	9
F7X, E170/175/190/195, АН-24/26	10
АН-12	30
ЯК-42	15
В737	11
A318/319/320/321	10,3

Большинство авиаперевозчиков использует авиационный керосин ТС-1 – ракетное топливо (РТ). Он используется в гражданской и государственной авиации. Средняя стоимость данного топлива на рынке – 40 руб/л [10–12]. Средний расход топлива всех типов ВС составляет 11,7 кг/мин.

При прилете ВС диспетчер СДП дает устное указание диспетчеру ДПР осуществить осмотр ВПП путем вызова ОЛ АТС по внутриаэропортовой связи. Диспетчер ДПР, в зависимости от своей загруженности, вызывает ОЛ АТС для осмотра ВПП с указанием причины: прибытие ВС через 20 минут [13–15].

Для тщательного осмотра ВПП машина АТС должна двигаться со скоростью примерно 30 км/ч, особенно если она движется совместно с тележкой для измерения коэффициента сцепления. ВПП длиной 4600 м машина АТС со скоростью движения 30 км/ч осмотрит за 20 минут, что не позволяет освободить ВПП за 5 минут до посадки ВС. Поэтому ОЛ АТС, как правило, осматривает ВПП гораздо быстрее, что сказывается на качестве осмотра.

В случае обнаружения на ВПП посторонних лиц или предметов, ОЛ АТС предпринимает соответствующие действия для освобождения ВПП. Время работы машины АТС на ВПП может варьироваться от 5 до 15 минут в зависимости от сложности. ВС, прибывающее на аэродром, продолжает полет по траектории и не уходит в зону ожидания, т. к. нельзя спрогнозировать, освободится ли ВПП к моменту посадки ВС или нет [15–17].

На практике ВС, выполняющее заход на посадку, продолжает заход до высоты принятия решения (ВПР). Экипаж ВС находится в ожидании разрешения на посадку или указания ухода на второй круг от диспетчера СДП. Если ОЛ АТС не успевает завершить работы на ВПП и освободить ее, ВС уходит на второй круг.

Безусловно, ситуация с блокированием ВПП и уходом ВС на второй круг является хорошим примером грамотно отработанной технологии взаимодействия службы ОВД и АТС в случае обнаружения на ВПП посторонних лиц или предметов. Безопасность полетов в таком случае была бы обеспечена. Но нередко встречаются ситуации, когда было возможно заблаговременно освободить ВПП или даже превентивными мерами не допустить ее блокировки [18].

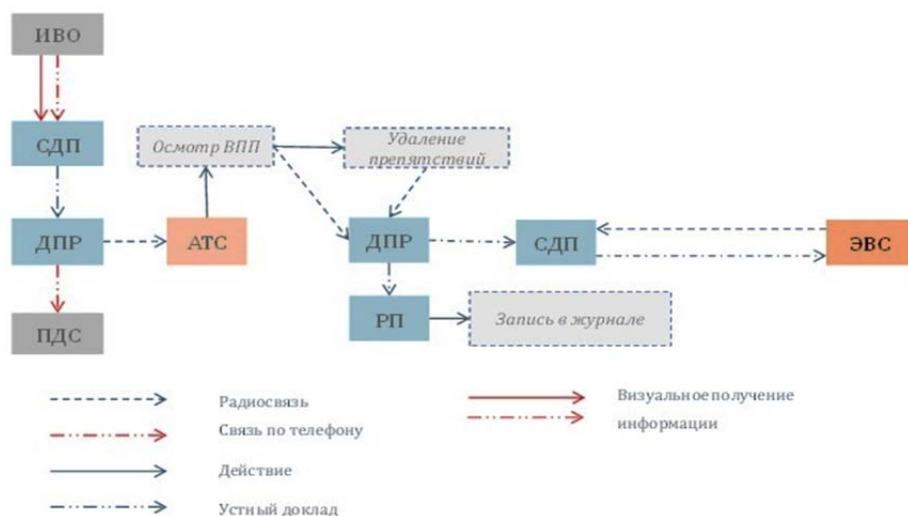


Рис. 5. Технология взаимодействия служб ОВД и АТС при прилете ВС
Fig. 5. Technology of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft arrival

На рис. 5 показана блок-схема модели существующей технологии взаимодействия органов ОВД и АТС при обеспечении прилета одного регулярного рейса авиакомпании. При этом ВПП свободна от любых препятствий. Был произведен сбор аналитической информации по затраченному времени службами ОВД, АТС и ПДС на выполнение девяти различных работ. Перечень исследуемых работ показан в табл. 4 [19, 20].

Таблица 4
Table 4

Таблица параметров технологического графика взаимодействия службы ОВД и АТС при прилете ВС (ВПП свободна)

Table of the parameters for the operation network of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft arrival (RWY is clear)

п/п	Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин
		нач.	кон.	
1	Связь с экипажем ВС	0	1	1,5
2	Связь диспетчеров между собой	1	2	0,5
3	Связь с машиной АТС	2	3	3
4	Выезд машины АТС на ВПП	3	4	5
5	Осмотр ВПП	4	5	5
6	Связь диспетчеров между собой	5	6	0,5
7	Посадка ВС	6	7	1
8	Освобождение ВПП	7	8	0,4

Из табл. 4 видно, что машина АТС произвела осмотр ВПП в 4 раза быстрее, чем при вылете ВС. Это устоявшаяся практика, так как вылет возможно задержать, а прилет – нет. Осмотр ВПП длиной в 5600 м невозможно произвести на должном уровне в течение 5 минут.

Если экипаж ВС, доложивший время своего прибытия через 17 минут после установления связи с диспетчером, прибудет вовремя, то машина АТС успеет освободить ВПП. Если ВС прибудет раньше (спрямление, попутный ветер), то диспетчером будет дана команда экипажу ВС по уходу на второй круг.

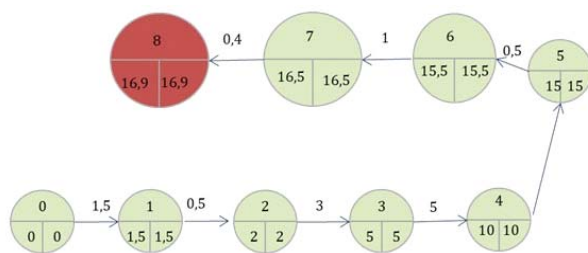


Рис. 6. Сетевой технологический график взаимодействия службы ОВД и АТС при прилете ВС (ВПП свободна)
Fig. 6. Operation network of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft arrival (RWY is clear)

Длина критического пути для данного процесса составила 16,9 минуты.

Таблица 5
Table 5

Таблица параметров технологического графика взаимодействия службы ОВД и АТС
при вылете ВС (ВПП занята)

Table of the parameters for the operation network of cooperation between the ATM service and ATC
during aircraft departure (RWY is occupied)

п/п	Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин
		нач.	кон.	
1	Связь с экипажем ВС	0	1	1,5
2	Связь диспетчеров между собой	1	2	0,5
3	Связь с машиной АТС	2	3	3
4	Выезд машины АТС на ВПП	3	4	5
5	Осмотр ВПП	4	5	15
6	Уход на второй круг	5	6	5
7	Связь диспетчеров между собой	6	7	0,5
8	Посадка ВС	6	7	1
9	Освобождение ВПП	7	8	0,5

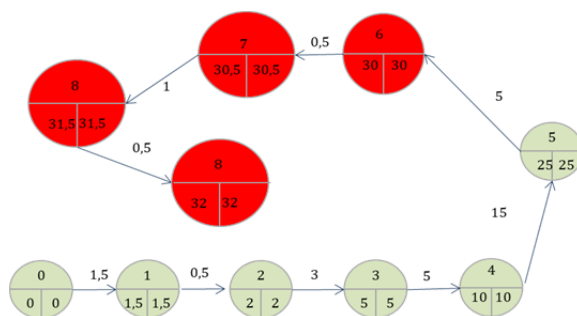


Рис. 7. Сетевой технологический график взаимодействия службы ОВД и АТС при прилете ВС (ВПП занята)
Fig. 7. Operation network of cooperation between the ATM service and ATC during aircraft arrival (RWY is occupied)

На рис. 7 мы видим, что средний критический путь обеспечения прилета ВС составляет 32 минуты, при этом ВС выполнило уход на второй круг. Задержка посадки ВС в таком случае – 5 минут. Также это является дополнительным стресс-фактором для экипажа. При этом существенно снижается пропускная способность ВПП, растут эксплуатационные и топливные расходы авиакомпании. Безопасность полетов также снижается, т. к. любой уход на второй круг является дополнительным фактором стресса для экипажа.

ВЫВОДЫ

Выполнено исследование технологии взаимодействия служб ОВД и АТС при осмотре ВПП перед вылетом и прилетом ВС. Исследование показало, что существующая технология взаимодействия имеет ряд существенных недостатков, влияющих на пропускную способность аэродрома, расход топлива ВС, а также на безопасность полетов.

1. Анализ технологии взаимодействия при обеспечении вылета одного регулярного рейса выявил возможность задержки ВС при свободной ВПП на 15,4 минуты. Задержка образуется по ряду причин, связанных с невозможностью заблаговременного осмотра ВПП ОЛ АТС.

2. При занятой ВПП задержка ВС может составить 21,4 минуты, а среднее время занятия самолетом исполнительного старта составляет 14 минут.

3. Анализ технологии взаимодействия при обеспечении прилета ВС показал возможную задержку на 5 минут в случае ухода ВС на второй круг. Уход ВС на второй круг по причине занятой ВПП несет дополнительные топливные расходы для авиакомпании. Задержка образуется вследствие того, что фактическое время, выделяемое ОЛ АТС на осмотр ВПП, недостаточно для выполнения ее осмотра до посадки ВС, что приводит к снижению качества осмотра ВПП и уровня безопасности полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков М.В., Чехов И.А. Анализ технологии взаимодействия органов ОВД на рубежах приема-передачи управления // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 23–33. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-23-32
2. Берцун В.Н. Математическое моделирование на графах. Часть 1: учеб. пособие. Томск: Изд-во НТЛ, 2006. 88 с.
3. Kuznetsova N.B. Transmission of information and communication as a human factor crucial in aircraft maintenance // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2017. № 2. С. 240–246.
4. Козлов А.С. Человеческий фактор и система обеспечения безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 182. С. 84–88.
5. Степнова А.И. Анализ эффективности программы совместной тренажерной подготовки авиадиспетчеров и пилотов / А.И. Степнова, С.М. Степанов, В.В. Борсоева, В.А. Борсоев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5. С. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42
6. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 328 с.
7. Артюхович М.В., Феоктистова О.Г. Роль инженерно-технического персонала в обеспечении безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 204. С. 39–43.
8. Золотых В.И. О состоянии безопасности полетов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 3 (3). С. 59–67.
9. Плотников Н.И. Ресурсы пилота. Надежность: монография. Новосибирск: ЗАО ИПЦ «АвиаМенеджер», 2013. 264 с.
10. Лушкин А.М. Методика оценивания уровня безопасности полетов по совокупности авиационных событий // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 162. С. 125–130.
11. Евстигнеев Д.А. Подготовка авиационного персонала в области человеческого фактора: метод. указания по изучению дисциплины. Ульяновск: УВАУ ГА, 2009. 65 с.

12. **Борисов В.Е.** Определение вероятности безошибочной работы диспетчера / В.Е. Борисов, В.В. Борсоев, С.М. Степанов, А.И. Степнова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 47–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55
13. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / В.А. Борсоев, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо / Под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.
14. **Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д.** Автоматизация управления воздушным движением: учебник для вузов / Под ред. А.А. Кузнецова. М.: Транспорт, 1992. 279 с.
15. **Зубков Б.В., Рыбалкин В.В.** Человеческий фактор и безопасность полетов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 1994. 68 с.
16. **Лебедев А.М.** Метод расчета ожидаемого предотвращенного ущерба от авиационных происшествий: монография. Ульяновск: УВАУ ГА, 2007. 155 с.
17. **Кузьмина Н.М., Ридли М.К.** Об автоматическом построении в информационных системах гражданской авиации онтологий предметной области по корпусу текстов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 21. С. 122–131.
18. **Попов Ю.В., Авдеев Н.Н.** Кластерный анализ пилотов, которые совершили авиационные события // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 25. С. 87–93.
19. **Далецкий С.С., Далецкий С.В., Плешаков А.И.** Терминологическое обеспечение технической эксплуатации гражданской авиационной техники // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15 (326). С. 40–47.
20. **Кошкин Р.П.** Математические модели процессов создания и функционирования поисковоаналитических информационных систем гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 5 (316). С. 39–48.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Баталов Кирилл Александрович, аспирант МГТУ ГА, старший полетный диспетчер, авиакомпания «Россия», kirbatalov@mail.ru.

Кулаков Михаил Викторович, аспирант МГТУ ГА, диспетчер УВД, ЛИИ им. М.М. Громова, mihail-sev@mail.ru.

Чехов Игорь Анатольевич, кандидат военных наук, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, cheigov@rambler.ru.

RESEARCH OF THE COOPERATION TECHNOLOGY BETWEEN THE AIR TRAFFIC CONTROL SERVICE AND THE AERODROME SERVICE

Kirill A. Batalov¹, Mikhail V. Kulakov¹, Igor A. Chekhov¹
¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article considers the process of cooperation between the ATC and airport operation services. The analysis considers the procedures of cooperation while inspecting a runway before performing flights, aircraft departure and arrival that encompass the entire range of coordinated operations. For each procedure, the costs of aircraft delays are calculated. The assessment was carried out by synthesizing the chronology of services cooperation in real conditions. On the basis of the collected data flowcharts of services cooperation to ensure flights of an airport and the ATM services were built. To provide a visual comparison of the existing and proposed models of services cooperation the networks of services cooperation were built based on the mathematical model of the graphic chart. The operation network establishes the sequence of events to provide departure of one aircraft operating a

scheduled flight of an airline. Within the given study the ATC service and the aerodrome service are involved to ensure a departure. Cooperation between the operation and dispatch service of the airport and an aircraft crew is conditional because in this case they do not impact the technology of cooperation. The network is a particular set of dots (summits) interconnected by lines (links). In the case of our study, circles are events (performed work). Directional segments (lines) are work connecting events to each other. While assessing the process of cooperation during arrival and departure, two cases were considered: the runway is occupied or clear. The runway could be occupied for different reasons: available vehicles, people, animals or flocks of birds on the runway. The study of the cooperation technology was carried out for 12 months of making scheduled flights at Zhukovsky and Ostafievo airports on the basis of every day flight plans.

Key words: Air Traffic Control, aircraft, airfield, capacity, cooperation of air traffic service units, aerodrome operation service, RW inspection.

REFERENCES

1. Kulakov, M.V. and Chekhov, I.A. (2018). *Analysis of the coordination technology between ATC at the boundaries of control exchange*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 5, pp. 23–33. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-23-32 (in Russian)
2. Bercun, V.N. (2006). *Matematicheskoye modelirovaniye na grafakh. Chast 1: uchebnoye posobiye* [Mathematical modelling on graphs. Part 1: Tutorial]. Tomsk: Izdatelstvo NTL, 88 p. (in Russian)
3. Kuznetsova, N.B. (2017). *Transmission of information and communication as a human factor crucial in aircraft maintenance*. Crede Experto: transport, society, education, language, no. 2, pp. 240–246.
4. Kozlov, A.S. (2012). *The human factor like the main element in system of safety of flight*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 182, pp. 84–88. (in Russian)
5. Stepanova, A.I., Stepanov, S.M., Borsoeva, V.V. and Borsoev, V.A. (2019). *Analysis of effectiveness of the program of joined air traffic controllers and pilots training*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 5, pp. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42 (in Russian)
6. Shumilov, I.S. (2006). *Aviatsionnyye proisshestviya. Prichiny vozniknoveniya i vozmozhnosti predotvrashcheniya* [Aviation accidents. Causes and possibilities of prevention]. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 328 p. (in Russian)
7. Artyukhovich, M.V. and Feoktistova, O.G. (2014). *The role of the technical staff in the flight safety*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 204, pp. 39–43. (in Russian)
8. Zolotyykh, V.I. (2017). *On the aviation units flights safety state problem*. Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika, no. 3 (3), pp. 59–67. (in Russian)
9. Plotnikov, N.I. (2013). *Resursy pilota. Nadezhnost: Monografiya* [Pilot resources. Reliability: Monograph]. Novosibirsk: ZAO IPTS «AviaMenedzher», 264 p. (in Russian)
10. Lushkin, A.M. (2010). *Method of estimation of flight safety level on set of air events*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 162, pp. 125–130. (in Russian)
11. Yevstigneyev, D.A. (2009). *Podgotovka aviatsionnogo personala v oblasti chelovecheskogo faktora: metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu distsipliny* [The aviation crew training in human factor: Training manual]. Ulyanovsk: UVAU GA, 65 p. (in Russian)
12. Borisov, V.E., Borsoeva, V.V., Stepanov, S.M. and Stepanova, A.I. (2018). *The probability determination of error-free air traffic controller operation*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 3, pp. 47–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55 (in Russian)
13. Borsoyev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin Pkhon Chzho. (2018). *Prinyatiye resheniya v zadachakh upravleniya vozdushnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision making in tasks of the air traffic control. Methods and algorithms], in Nechaev Ye.Ye. (Ed.). Moscow: Radiotekhnika, 432 p. (in Russian)

14. Anodina, T.G., Kuznetsov, A.A. and Markovich, E.D. (1992). *Avtomatizatsiya upravleniya vozdushnym dvizheniyem: uchebnik dlya VUZ* [Automation of air traffic control: Textbook for Universities], in Kuznetsov A.A. (Ed.). Moscow: Transport, 279 p. (in Russian)
15. Zubkov, B.V. and Ribalkin, V.V. (1994). *Chelovecheskiy faktor i bezopasnost poletov: uchebnoye posobiye* [Human factor and flight safety: Tutorial]. Moscow: MGTU GA, 68 p. (in Russian)
16. Lebedev, A.M. (2007). *Metod rascheta ozhidayemogo predotvrashchennogo ucherba ot aviatsionnykh proissheshtviy: Monografiya* [The method of calculating the expected avoided damage from the accident: Monography]. Ulyanovsk: UVAU GA, 155 p. (in Russian)
17. Kuzmina, N.M. and Ridley, M.K. (2018). *About automatic construction in information systems of civil aviation ontology of the subject field on the corps of texts*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 21, pp. 122–131. (in Russian)
18. Popov, Yu.V. and Avdeev, N.N. (2019). *The cluster analysis of pilots who made aviation events*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 25, pp. 87–93. (in Russian)
19. Daletskiy, S.S., Daletskiy, S.V. and Pleshakov, A.I. (2016). *Terminological providing technical operating civil aviation*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 15 (326), pp. 40–47. (in Russian)
20. Koshkin, R.P. (2014). *The mathematical models of the processes with establishment and operation of search and analytical information systems in the field of civil aviation*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 5 (316), pp. 39–48. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kirill A. Batalov, Post Graduate, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Chief Flight Dispatcher, Rossiya Airlines, kirbatalov@mail.ru.

Mikhail V. Kulakov, Post Graduate, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Air Traffic Controller, Gromov FRI, mihail-sev@mail.ru.

Igor A. Chekhov, Candidate of Military Sciences, Associate Professor of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, cheigov@rambler.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

21.03.2021
22.07.2021

Received
Accepted for publication

21.03.2021
22.07.2021

УДК 621.89+665.6

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-20-27

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FUNCTIONING OF OBJECTS AND TECHNICAL MEANS OF ENSURING AIRFIELD CONTROL

A.A. BRAILKO¹, O.V. GROMOV², G.I. LITINSKY², V.K. GROMOV²

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

²*LLC "Tupolev Service", Zhukovski, Russia*

ABSTRACT

In the process of performing a complex of works on refueling of civil aviation aircraft, one of the key issues is to ensure flight safety by controlling the quality of aviation fuel directly during refueling operations. Currently, to ensure the purity of the refueled jet fuel, water separators with filter elements of a normalized degree of purification are installed on the aircraft refueling facilities, the operation of which in the working area provides normalized indicators of cleaning jet fuel from water and mechanical impurities. As practice shows, in the process of refueling aircraft, for various objective and subjective reasons, sometimes there are stochastic situations in which quality indicators go beyond the limits established by regulatory documentation and are not deterministic, and the subsequent state of such a system is described by values that characterize an extremely low level of jet fuel purification with negative consequences for flight safety. This paper presents a mathematical description of the functioning of water separator filters in the working area, where standardized indicators of the quality of aviation fuel are provided during the refueling of aircraft. The article deals with the issue of blocking the refueling of aircraft in the event of the appearance of non-normalized technical documentation indicators of the quality of aviation fuel, which arise due to a number of different factors that lead to negative cause-and-effect relationships for flight safety. Based on the mathematical description, an approach to creating a system for protecting and blocking the refueling process under the working name "Barrier" is proposed. Of the greatest interest for the study are typical water separator filters installed on refueling vehicles as terminal technical devices for fuel purification during refueling of aircraft.

Key words: filter water separator, filter element, cleaning products, normalized and non-normalized quality indicators, working area, mathematical field, pressure drop, mathematical model, mathematical software, least squares method, working fluid of jet and turbojet engines of aircraft.

INTRODUCTION

The subject of study in the present paper is the working area of the filter elements of the filter water separators as the jet fuel cleaning products¹, installed at refueling facilities as the terminal technical facilities adjacent to the aircraft tanks².

The purpose of the research is to develop the basics of the mathematical model of system for protecting the refueling facilities from the fuel quality indicators exceeding the working area, both by pressure drop ΔP , and consumption Q based on manufacturer's technical documentation for the cleaning products.

The authors have set the problem – to use the suggested mathematical description in the mathematical software of the on-board digital controller capable of blocking the refueling process while meeting the fuel quality stochastic criteria, as working fluid of jet and turbojet aircraft engines [1].

The working hypothesis is accepted in the research, as a statistically distributed proposal about the difference between the mathematical fields [2] of non- and working area of filter elements, due to the standardized diff of the fuel quality indicators, divided by the aircraft refueling process blocking

¹ GOST R 18.12.03-2018. (2018). Technology of the Aviation Fueling. Filtering Equipment in Aviation Fuel Supply. General Technical Requirements. Moscow: Standartinform, 23 p. (in Russian).

² ICAO Doc 9859. (2018). Safety Management Manual. 4th ed. Montreal, ICAO, 218 p.

borders, along with the ways of solving the given problem due to the hypothetic connection of the research subject and the proposed actions.

Statement of the research problem: to give the mathematical description of the working areas of terminal fuel cleaning products filter elements while functioning in the working zone as the predictive process, and as the random and unpredictable process forming the borderline of blocking the aircraft refueling process in order to distinguish them. In terms of control optimization – this is the area of boundaries of derivation of the signals for the refueling process rejection.

The relevance of the following topic is in the necessity of developing the algorithms, as the set of instructions, based on the revealed correspondence of the processes under investigation and the description of the input and output data.

The input data must be entered into the filter elements as the technical data and be used for solving the given problems. *The output data* must be presented as the outgoing signal for the refueling process rejection, as footage on the refueling facilities controller display and as a piece of information in database.

DISCUSSION OF TEST DATA

Let us present the standard limited pressure drop ΔP dependence of fuel consumption Q , which is processed for analysis [3, 4] and attached to the batch of filter elements by the manufacturer, in order to carry out the research of the predictive process and describe the mathematical relationship.

On account of the data for the research, the working area is a multitude of freehand curves, let us consider the processes of fuel cleaning in that area as the *predictive* ones, and describe them with explicit dependences. Let us use the method of straight-line approximation, which allows us to study the numerical characteristics, along with the qualitative behavior of the subject of the research (fig. 1), for the mathematical description of the processes in the working area.

Let us use the technical documentation data of the filter element factory of origin³, in order to study the function by the straight-line approximation method [5, 6]. The working area is in the set of the following α and b points of the simple equations:

1. For the maximum limit: 0.95...2.0;
2. For the minimum limit: 0.06...0.3.

As the current valuations of the cleaning products parameters may be present in any valuation in the working area, let us use the equations of line function, for the aircraft fueler onboard controller software, which we will present in the form of [7]:

$$\gamma = \alpha \cdot x + b \quad (1)$$

Thus, the solution of the equation is the searching such α and b coefficients, that all the required working area points were most closely to the approximating line.

Let us use the least squares method, its content is minimization of sum of squared deviations of some functions from the required variables, meaning that the sum of squared deviations of the point valuations from the approximating line is present in the minimal valuation [8–10], meaning that:

$$F(\alpha, b) = \sum_{i=1}^n (\gamma_i - (\alpha \cdot x + b))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

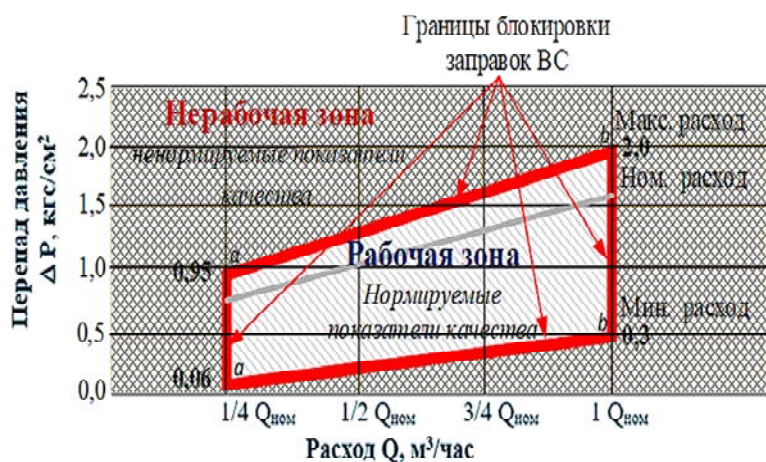
Solving on the given problem is in finding the extreme point of function of the two variables.

³ Filters-water separators for fuel horizontal FVGk and FVGk-U. The unit is a scientific and production association. Research and testing, development and manufacture, installation and commissioning of fuel supply equipment and filtration equipment. Available at: <http://www.agregatnp.ru/production/korpusy/fvg.html> (accessed: 10.04.2021). (in Russian)

It is clear from the noted below Figure 1, that the points α and b we are interested in are in the working area. Thus, the solution of the integral function (1, 2) will be in following expression in general terms:

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx, \quad (3)$$

where: α and β are the limits of integral.



Terms:

Границы блокировки заправки – aircraft refueling blocking boundaries,
Нерабочая зона – non-working area,
Ненормируемые показатели качества – non-regulated quality indexes,
Рабочая зона – working area,
Макс. расход – Maximum consumption,
Ном. расход – Nominal consumption,
Мин. расход – Minimum consumption,
Расход Q , м³/час – Consumption m³/hr,
Перепад давления ΔP кгс/см² – Pressure drop ΔP kp/cm²

Fig. 1. Typical dependence of the maximum allowable pressure drop ΔP on the jet fuel consumption Q

The software of data for limiting pressure drop in the working zone is based on these mathematical conclusions, the results are presented as the operating efficiency freehand curves. The signal of blocking the aircraft refueling is formed by hitting the limited valuations of consumption and pressure drop parameters.

There is also a fragment of monitor and a line of forming the optimized signal of maximum continuous consumption of facilities of filtration (the grey line) (fig. 2). The consumption and pressure drop optimization is carried out in order to increase the filter element resource up to 30% of the maximum consumption regime.

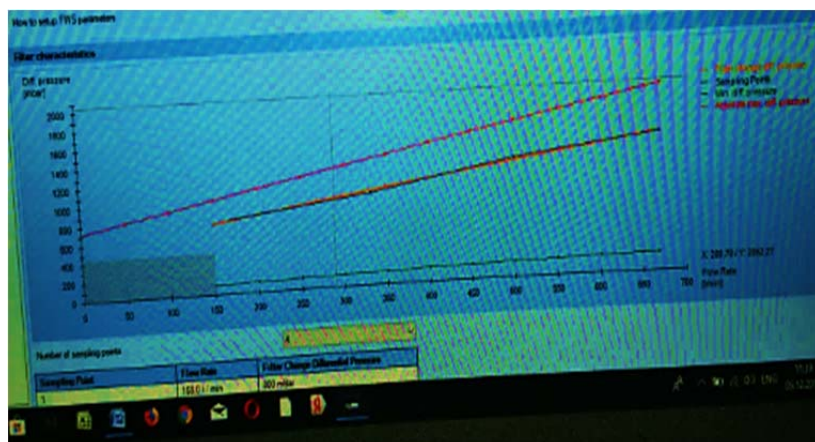


Fig. 2. A fragment of the monitor with the calculated performance characteristics of the filter elements of the water separator filter

The optimization of the parameters of the facilities of filtration is also crucial for choosing the power unit of the aircraft refueling vehicles within design process, because such an approach allows us to use both the resource of the power unit itself and the resources of torque forwarding mechanism for the technologic compartment of the aircraft refueling vehicle in the optimal way while refueling the aircraft.

However, the fuel quality indicators exceeding the working area is probable in any direction while servicing by objective and subjective reasons, in other words, there is an opportunity of transition into nondeterministic or stochastic (random) processes. It makes sense to present such processes as a stochastic matrix, by which we will describe the working regimes of the facilities of filtration beyond the working area and input the results for further software calculation (fig. 3).

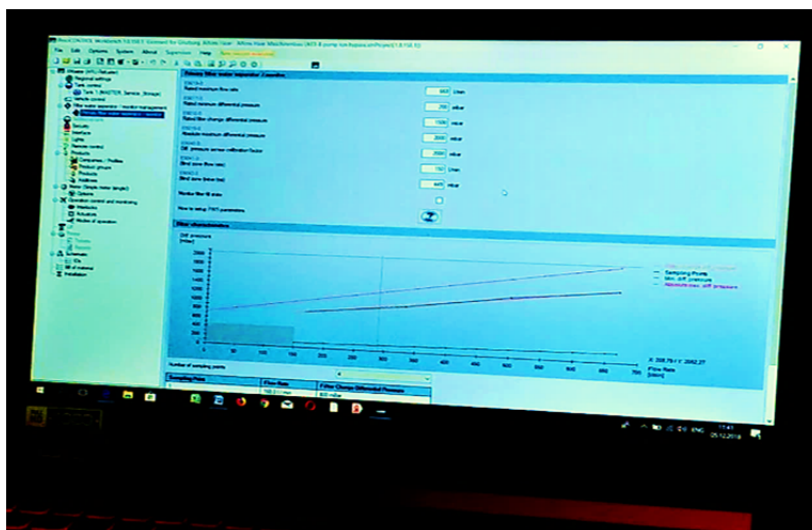


Fig. 3. Input of the data array on the pressure drop limits according to the technical documentation for the filter element

As it is known, the stochastic matrix is the matrix of transition probability as the starting point for the theory of stochastic processes [4] in Markovian network [11, 12]. In this case the matrix $P = (P_{ij})$, where i и $j = 1, 2 \dots$ is stochastic and is [13]:

$$P_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j = 1, 2 \dots \text{и} \sum_{j=1}^{\infty} P_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (4)$$

where: $\forall$ – mathematical sign For All.

According to that we find the discriminant of the algebraic numeric field [3, 14, 15] of the working area and its numeric invariant, we will use its feature of changing the size of the algebraic numeric field in order to form the signals of managing the facilities of filtration with the opposite sign. Thus, the research showed us, that, the following discriminant of the numeric field beyond the working area is in proportion to square number of the working area and provides the branch of the prime numbers. The further invariant development [16] shows us, that, if roof equations in the working area are in the basis of the stochastic matrix, the rest of the valuations will be different in terms of the sign and value.

RESEARCH RESULTS APPLICATION

The next step is uploading of the mathematic software into the onboard estimated data digital controller for the filter elements in the fuel cleaning facilities. Let us notice in the process, that while the periodical change of the filter elements, it is necessary to pay attention to the characteristics of their

working area, and in case of divergence detection it is necessary to reformat the mathematical software into the experimental data, otherwise the "Barrier" system of protection from insertion of the non-standard fuel will work incorrectly.

The procedure of data input into the onboard digital controller is exactly an engineering technological operation with the help of USB-technologies [17, 18] and is not of academic novelty, nevertheless the authors have seen fit in mentioning about it here.

CONCLUSIONS

According to the research results, let us make a conclusion, as the exceeding the working area by the fuel cleaning products quality indicators while refueling the aircraft is the crucial factor, there is an opportunity of forming the signal of rejection of the aircraft refueling operations for the onboard digital controllers, by using the results of mathematical modelling of process of forming the filter element working area, which will become a kind of a barrier from insertion of the non-standard fuel into the aircraft tankage.

REFERENCES

1. **Bordunov, V.D. and Eliseev, B.P.** (2015). *The legal policy strategy of the application 19 of annex "safety management" practice*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 216, pp. 5–10. (in Russian)
2. **Burbaki, N.** (1965). *Algebra. Chast 2: Mnogochleny i polya. Uporyadochennyye gruppy: Monografiya* [Algebra. Part 2. Polynomials and fields. Ordered groups: Monograph]. Translated from French by V.Ye. Govorov, Yu.I. Manin, A.V. Mikhalev and others, in Yu.I. Manin (Ed.). Moscow: Nauka, 298 p. (in Russian)
3. **Brailko, A.A.** (2018). *Metod nepreryvnogo monitoringa chistoty aviato-pliva v tekhnologicheskoy skheme toplivoobespecheniya vozdukhnykh sudov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Method of continuous monitoring of aviation fuel purity in the technological scheme of aircraft fuel supply. Dissertation for the Candidate of Technical Sciences]. Moscow: MGTU GA, 134 p. (in Russian)
4. **Rybakov, K.V.** (1982). *Aviatsionnyye filtry dlya topliv, masel, gidravlicheskiykh zhidkostey i vozdukh: uchebnoye posobiye* [Aviation filters for fuels, oils, hydraulic fluids and air: Tutorial]. Moscow: Mashinostroyeniye, 103 p. (in Russian)
5. **Vinogradov, V.N., Gay, E.V. and Rabotnov, N.S.** (1987). *Analiticheskaya approksimatsiya dannykh v yadernoy i neytronnoy fizike* [Analytical approximation of data in nuclear and neutron physics]. Moscow: Energoatomizdat, 128 p. (in Russian)
6. **Laurent, P.J.** (1975). *Approksimatsiya i optimizatsiya* [Approximation and optimization]. Translated from French by Yu.S. Zavyalov, R.A. Zvyagina, B.I. Kvasov, B.I. Shmyrev, in G.Sh. Rubinshteyn, N.N. Yanenko (Eds.). Moscow: Mir, 496 p. (in Russian)
7. **Magnus, Ya.R., Katyshev, P.K. and Peresetsky, A.A.** (2007). *Ekonometrika. Nachalnyy kurs: uchebnoye posobiye* [Econometrics. Initial course: Tutorial]. 8th ed., ispravlennoye. Moscow: Delo, 504 p. (in Russian)
8. **Ayvazyan, S.A.** (2001). *Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki. Tom 2* [Applied statistics. Fundamentals of econometrics. Vol. 2]. Moscow: Uniti-Dana, 432 p. (in Russian)
9. **Vinogradov, I.M. (ed.).** (1979). *Matematicheskaya entsiklopediya. V 5 tomakh. Tom 2: D'Alemberta operator – Kooperativnaya igra* [Encyclopedia of Mathematics. In 5 vols. Vol. 2: D'Alembert operator – Cooperative game]. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 552 p. (in Russian)
10. **Mitin, I.V. and Rusakov, V.S.** (2012). *Analiz i obrabotka eksperimentalnykh dannykh: uchebnoye posobiye* [Experiment data analysis and processing: Tutorial]. 5th ed. Moscow: MGU, 44 p. (in Russian)

11. Kelbert, M.Ya. and Sukhov, Yu.M. (2010). *Veroyatnost i statistika v primerakh i zadachakh. Tom 2: Markovskiye tsepi kak otpravnaya tochka teorii sluchaynykh protsessov i ikh prilozheniya* [Probability and statistics in examples and problems. Vol. 2: Markov chains as a starting point in the theory of random processes and their applications]. Moscow: MTSNMO, 295 p. (in Russian)
12. Markov, A.A. (1906). *Rasprostraneniye zakona bolshikh chisel na velichiny, zavisyashchiye drug ot druga* [Extension of the large numbers law to quantities that depend on each other]. *Izvestiya fiziko-matematicheskogo obshchestva pri Kazanskom universitete*, 2nd series, vol. 15, pp. 135–156. (in Russian)
13. Landau, E. (2010). *Osnovy analiza. Deystviya nad tselyimi, ratsionalnymi, irratsionalnymi, kompleksnymi chislami. Dopolneniye k uchebnikam po differentsialnomu i integralnomu ischisleniyu* [Fundamentals of analysis. Actions on integers, rational, irrational, complex numbers. Supplement to textbooks on differential and integral calculus]. 3rd ed. Moscow: KomKniga, 184 p. (in Russian)
14. Burbaki, N. (1963). *Ocherki po istorii matematiki* [Essays on the history of mathematics]. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 292 p. (in Russian)
15. Bourbaki, N. (1994). *Elements of the history of mathematics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 301 p. DOI: 10.1007/978-3-642-61693-8
16. Diedennone, J., Kerrol, J. and Mumford, D. (1974). *Geometricheskaya teoriya invariantov* [Geometric theory of invariants]. Moscow: Mir, 278 p. (in Russian)
17. Mueller, S. (2007). *Upgrading and Repairing PCs*. 17th ed. Moscow: Williams, 1504 p. (in Russian)
18. Hultzebosch, Yu. (2009). *USB v elektronike* [USB in electronics]. 2nd ed., ispravlennoye. St. Petersburg: BKHV-Petersburg, 224 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anatoly A. Brailko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Anatoliy.Brailko@vnukovo.ru.

Oleg V. Gromov, Candidate of Economic Sciences, Adviser to the General Director of LLC "Tupolev Service", o.gromov@sorge.pro.

Grigory I. Litinsky, General Director of LLC "Tupolev Service", jobgregor2@gmail.com.

Vladimir K. Gromov, Adviser to the General Director of LLC "Tupolev Service", v.k.gromov@gmail.com.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ АВИАТОПЛИВА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЗАПРАВОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А.А. Браилко¹, О.В. Громов², Г.И. Литинский², В.К. Громов²

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²ООО «Туполев Сервис», г. Жуковский, Россия

В процессе выполнения комплекса работ по заправке воздушных судов (ВС) гражданской авиации одним из ключевых вопросов является обеспечение безопасности полетов путем контроля качества авиатоплива непосредственно при выполнении заправочных операций. В настоящее время для обеспечения чистоты заправляемого авиатоплива на средствах заправки ВС устанавливаются фильтры-водоотделители с фильтроэлементами нормируемой степени очистки,

функционирование которых в рабочей зоне обеспечивает нормированные показатели очистки авиатоплива от воды и механических примесей. Как показывает практика, в процессе заправки ВС, по разным объективным и субъективным причинам, иногда возникают стохастические ситуации, при которых показатели качества выходят за пределы установленных нормативной документацией и не являются детерминированными, а последующее состояние такой системы описывается величинами, которые характеризуют заведомо низкий уровень очистки авиатоплива с негативными последствиями для безопасности полетов. В данной работе представлено математическое описание функционирования фильтров-водоотделителей в рабочей зоне, где обеспечиваются нормированные показатели качества авиатоплива в процессе заправки ВС. В статье рассмотрен вопрос блокировки заправки ВС в случае появления не нормированных технической документацией показателей качества авиатоплива, возникающих в силу ряда различных факторов, приводящих к негативным для безопасности полетов причинно-следственным связям. На основе математического описания предложен подход к созданию системы защиты и блокировки процесса заправки под рабочим наименованием «Барьер». Наибольший интерес для исследования представляют типовые фильтры-водоотделители, устанавливаемые на средствах заправки как окончательные технические устройства очистки топлива при заправках ВС.

Ключевые слова: фильтр-водоотделитель, фильтрующий элемент, средства очистки, нормированные и ненормированные показатели качества, рабочая зона, математическое поле, перепад давления, математическая модель, математическое обеспечение, метод наименьших квадратов, рабочее тело реактивных и турбореактивных двигателей воздушных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бордунов В.Д., Елисеев Б.П.** Стратегия правовой политики применения приложения 19 «Управление безопасностью полетов» // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 216. С. 5–10.
2. **Бурбаки Н.** Алгебра. Часть 2: Многочлены и поля. Упорядоченные группы: монография / Пер. с фр. В.Е. Говорова, Ю.И. Манина, А.В. Михалева и др., под ред. Ю.И. Манина. М.: Наука, 1965. 298 с.
3. **Браилко А.А.** Метод непрерывного мониторинга чистоты авиатоплива в технологической схеме топливообеспечения воздушных судов: дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 2018. 134 с.
4. **Рыбаков К.В.** Авиационные фильтры для топлив, масел, гидравлических жидкостей и воздуха: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1982. 103 с.
5. **Виноградов В.Н., Гай Е.В., Работнов Н.С.** Аналитическая аппроксимация данных в ядерной и нейтронной физике. М.: Энергоатомиздат, 1987. 128 с.
6. **Лоран П.Ж.** Аппроксимация и оптимизация / Пер. с фр. Ю.С. Завьялова, Р.А. Звяжиной, Б.И. Квасовой, В.И. Шмырева, под ред. Г.Ш. Рубинштейн, Н.Н. Яненко. М.: Мир, 1975. 496 с.
7. **Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А.** Эконометрика. Начальный курс: учеб. пособие. 8-е изд., испр. М.: Дело, 2007. 504 с.
8. **Айвазян С.А.** Прикладная статистика. Основы эконометрики. Т. 2. М.: Юнити-Дана, 2001. 432 с.
9. Математическая энциклопедия. В 5 т. Т. 2: Д'Аламбера оператор – Кооперативная игра / Под ред. И.М. Виноградова. М.: Советская энциклопедия, 1979. 552 с.
10. **Митин И.В., Русаков В.С.** Анализ и обработка экспериментальных данных: учеб. пособие. 5-е изд. М.: МГУ, 2012. 44 с.
11. **Кельберт М.Я., Сухов Ю.М.** Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. М.: МЦНМО, 2010. 295 с.
12. **Марков А.А.** Распространение закона больших чисел на величины, зависящие друг от друга // Известия физико-математического общества при Казанском университете. 2-я серия. 1906. Т. 15. С. 135–156.

13. Ландау Э. Основы анализа. Действия над целыми, рациональными, иррациональными, комплексными числами. Дополнение к учебникам по дифференциальному и интегральному исчислению. 3-е изд. М.: КомКнига, 2010. 184 с.

14. Бурбаки Н. Очерки по истории математики. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 292 с.

15. Bourbaki N. Elements of the history of mathematics. Berlin: Springer, Heidelberg, 1994. 301 p. DOI: 10.1007/978-3-642-61693-8

16. Дьёденноне Ж., Керрол Дж., Мамфорд Д. Геометрическая теория инвариантов. М.: Мир, 1974. 278 с.

17. Мюллер С. Модернизация и ремонт ПК. 17-е изд. М.: Вильямс, 2007. 1504 с.

18. Хульцебош Ю. USB в электронике. 2-е изд., испр. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 224 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Браилко Анатолий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, Anatoliy.Brailko@vnukovo.ru.

Громов Олег Владимирович, кандидат экономических наук, советник генерального директора ООО «Туполев Сервис», o.gromov@sorge.pro.

Литинский Григорий Иванович, генеральный директор ООО «Туполев Сервис», jobgregor2@gmail.com.

Громов Владимир Константинович, советник генерального директора ООО «Туполев Сервис», v.k.gromov@gmail.com.

Поступила в редакцию 10.04.2021
Принята в печать 22.07.2021

Received 10.04.2021
Accepted for publication 22.07.2021

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-28-37

MULTIDIMENSIONAL ROUTING WITH THE INCREASED NAVIGATION ACCURACY WITH THE MAINTENANCE OF FLIGHT NOTIFICATIONS OF THE FLIGHT VEHICLES

V.I. GONCHARENKO¹, G.N. LEBEDEV¹, V.B. MALYGIN²

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

The study was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grants № 19-08-00010, № 20-08-00652

The article covers the problem the multidimensional routing of flights for the transportation of cargo and mail, with the condition of the corresponding equipment presence for performing navigation of increased precision to obtain the possibility of the formation flights under any weather conditions. The given circumstances are capably essential to reduce load while using the airspace, which will make it possible to achieve transportation independent of its saturation. While planning the routes it is also necessary to consider the interests of different interested groups, which are often opposite to one another. In the view of the different directivity of the tasks in question, the solution can require the sorting as excessively as large, so the smaller quantity of possible situations (versions of the solution), the lower the level of the calculation of these versions is, and the greater their quantity is. The exact example of multidimensional routing, which is affected by the interests of operational nature and the interests of the urgency of the performance of the claims, expressed by weight coefficients, is depicted in this work. The only version in favour of the general production process, which is obtained with the help of a genetic algorithm, is a solution of this problem. It was necessary to introduce some designations and assumptions, the enumeration of which can be supplemented. Optimal solution can be obtained both by the enumeration of the solution versions and with the help of the genetic algorithm, which is allowed for a smaller number of iterations, to obtain suboptimal in real time, which corresponds to the conditions of the task solution. In that the example dynamic priorities are assigned, based on multiplicative form by expert evaluation, which form criteria for the ranking of request for each step of route planning. As a result, there are the exact versions of the solution, which correspond to the interests of different groups and the version, obtained with the help of a genetic algorithm, which satisfy the opposite interests of these groups. All versions of the solution are proved to be different, which indicates the need of applying the objective and substantiated apparatus for making the decision, which the genetic algorithm actually is. The proposed mathematical apparatus has prospects for implementation.

Key words: multidimensional routing, high-precision navigation, genetic algorithm (GA).

INTRODUCTION

The main subject of research in this work is the genetic algorithm (GA) efficiency evaluation while using multidimensional routing.

Planning of the optimal routes of the group flights of unmanned aircraft, along with the small aircraft, is the multiobjective problem. The subject of research is the GA effectiveness evaluation for multidimensional routing of the aircraft with corresponding airborne equipment for area navigation RNAV, based on the GNSS satellite system. The formation flights are not performed in commercial aviation so far. The situation may be fundamentally changed provided that high-precision navigation, enough for the execution of the formation flights under all weather conditions, is used. Such flights may be executed for cargo and mail delivery. At the same time, the solo flights of the given type may significantly overload the air traffic service, and that will have a negative impact on the passenger aircraft flights. The establishment of the aircraft flight routes multidimensional optimization mechanism considering the possibility of grouping the routes into the separate formations while considering the interests of the involved commercial service providers and air traffic security services is required at this regard [1, 2, 3].

There is a wide range of factors, influencing the efficiency evaluation while planning considering the contradictory interests of the contracting authorities and perpetrators [4, 5]. Besides that, there is the opportunity of considering rapidly the requests not only for the free aircraft, on the ground, but also for the aircraft, actually performing the delivery [6, 7]. Thus, the objective of the present study is the formation of the approach to multidimensional routing of the aircraft flights on requests, based on compatibility of GA with the allocation of request targets between the free and busy aircraft, the condition of which is known at every step of planning.

PROBLEM STATEMENT

1. It is considered, that the requests for airspace management occur randomly [7, 8] and can be divided into 3 types:

- advance (are formalized every morning before planning);
- urgency (occur after planning);
- priority (requests while performing the flight).

The number n of these requests exceeds the number N of the aircraft.

$$N \ll n < 10 \quad (1)$$

2. The destinations are located randomly corresponding to the Poisson distribution [7], or in the separate areas of high density.

3. Every request is characterized by the known parameters: the number of the request (m), the coordinates X_i ; Z_i of the i -th initial point of departure and the coordinates X_j ; Z_j of the j -th terminal point of arrival, and also the maintenance holdover time τ_m for priority provision.

4. The number N of the aircraft and their current coordinate points X_i ; Z_i either on the stand, or in flight in real time are given.

5. The increased navigation accuracy is required for flight security support in the aircraft formation. The flight of the aircraft formation is regarded as one aircraft by the air traffic control and there is no oversaturation of the airspace.

6. It is necessary to:

- form the efficient approach to the multidimensional routing, based on the combination of the genetic algorithm (GA) with the operation of allocation of targets between the free and busy aircraft at each step of the priority requests;
- estimate the efficiency of the suggested approach in comparison with the known routing algorithms.

THE SUGGESTED APPROACH TO THE SOLUTION OF THE PROBLEM

Planning of the optimal routes is performed in two steps:

1. Forming of the initial "elite" of the multidimensional routes, chosen from the variants, predetermined while performing the multiple calculation with the different priority request criteria of performing the application at each step of planning. The criteria may consider the contradicting interests of the air traffic control services in terms of the exclusion of overloading the airspace [9], and also the commercial interests.

2. At the first step of managing the requests the calculation of the dynamic priority Π_j is carried out on a formula:

$$\Pi_j = \max_{j=1 \dots N} \left[\frac{r_{min}}{r_{ij}} + \eta_1 \right] \left[\frac{\tau_j}{\tau_{max}} + \eta_2 \right], \quad (2)$$

where: r_{ij} – the distance between the beginning of the route by the j -th application and the estimated staging point of the i -th route;

r_{min} – minimal distance between the points;

τ_j – the holdover time of the application in the lineup;

τ_{max} – the maximum allowed holdover time;

η_1 и η_2 – weighting coefficients of the term signification (the less the η_1 , the more significant the first term is, provided that $\eta_1 + \eta_2 = 1$).

Thus, the normed parameter valuations are included into the formula (2) terms. It is necessary to notice, that the allocation of the route requests is performed at a single step of the planning simultaneously. Here it is necessary to distinguish the two cases:

– the number $\psi > 1$ of the free aircraft is large, which always happens before the beginning of planning [10, 11, 12];

– the number $\psi = 1$ which corresponds to the request on one aircraft. In this case the choice of the request for each route is made from the complete set of requests. Whether the results of the choice on different routes do not correspond to each other, the choice will be considered to be successful, otherwise – the request is performed by the aircraft, which is closer to the starting point. As a result each request is performed by the only aircraft. In the second case the aircraft is chosen on a formula (2), on a competitive basis.

Thus, whether the number of variants of the weighting coefficients η_1 and η_2 appointment on the criterion (2) is M , $M N$ of routes forming the initial elite for the next step of calculations [13]. There are two subjective variants of the weighting coefficients $\eta_1 = 0.2$ и $\eta_2 = 0.8$ used in this work.

At the second step M the formed routes for each aircraft are used in the GA, in which each route is divided into the set of blocks (legs), consisting of two and more points of destination. This allows us to perform breeding of the blocks, taken from the different variants, along with the "mutation" due to partial rearrangement, changing their order. As a result, the expanded set of the "descendants" of the initial "elite" is formed. After that they perform the operation of the "genetic breeding", there is the integral criterion of planning efficiency J_0 considering the interests of the groups which is necessary for the criterion. It is suggested to use the minimizing penalty function, estimating the degree of imperfection of the system both for the contracting authorities and perpetrators, and the principle of demand (the quantity of the requests) and proposal (the number of the free aircraft) balance. We set the normed valuations of holdover time and route length, along with the matched weighting coefficients $m_3 = m_4$.

$$J_v = \min_{v=1 \dots MN} \left[\left(\max_{i=1 \dots N} \frac{\eta_i}{T_{max}} (v) + m_3 \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^N L_i(v)}{L_{max}} + m_4 \right) \right], \quad (3)$$

where: J_0 – the integral penalty function;

v – the number of the variant after breeding and mutation;

T_{max} – the maximum holdover time of performing the request;

L_{max} – the maximum integrated route length of all the aircraft;

$L_i(v)$ – the length of every route in the i -th variant;

$\max \eta_i(v)$ – the maximum equipment downtime of the application in line in the v -th variant.

The multiplicative form (3) corresponds to the minimum assured penalty result principle. The calculation shows us that the number of evolution steps by (3) is not large.

Example: let us consider the following problem of routing of formation of the three aircraft flight from departure point to the arrival point (24 all together) corresponding to the requests for the area of 250 square kilometers as it is shown in (fig. 1).

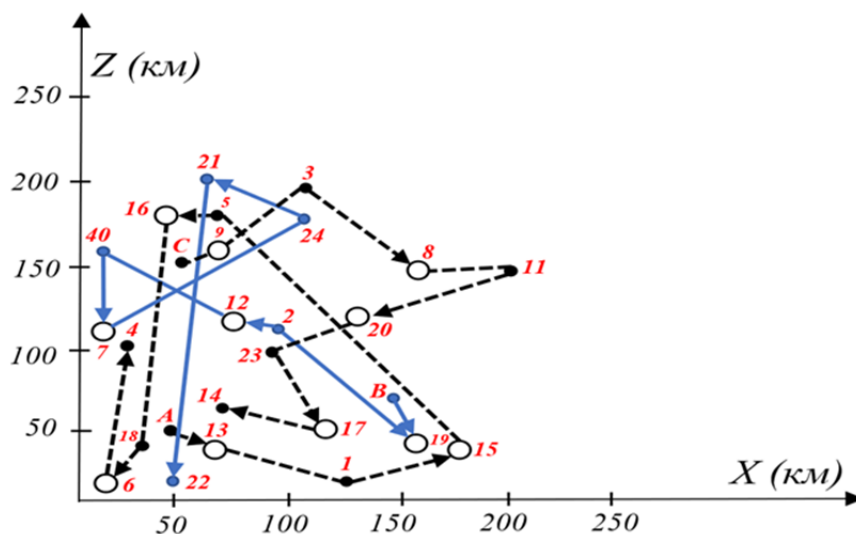


Fig. 1. A picture of the location of the serviced points on a given territory.
Sign O – departure point according to the application

Initially there were 12 requests, there are the coordinates of the departure point $X_i; Z_i$ in each of them and the corresponding arrival point $X_j; Z_j$, as it is shown in Table 1. Setting of all the 24 points on the territory corresponds to the poisson appointment of the random variable and is of irregular character [14]. Initially, the aircraft are located in the points with the coordinates $X_A = 50; Z_A = 50; X_B = 150; Z_B = 50; X_C = 50; Z_C = 150$.

Table 1

Original departure and departure points data

№ of application	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ of the departure point	6	7	8	9	12	13	15	16	17	19	20	21
$X_{i(km)}$	10	20	170	70	80	70	190	50	120	160	130	70
$Z_{i(km)}$	10	110	130	150	120	20	30	170	50	30	120	200
№ of the arrival point	4	24	11	3	10	1	5	18	14	2	23	22
$X_{j(km)}$	30	90	200	150	10	130	70	50	70	100	120	60
$Z_{j(km)}$	120	170	140	180	160	10	170	0	70	120	150	10

Let us consider that receipt of requests is the subject of the poisson appointment, and the hold-over time in general queue is not identical [15, 16], but is known (τ_j) (Table 2).

Table 2

Holding time for requests

J	6	7	8	9	12	13	15	16	17	19	20	21
τ_j min	152	150	149	148	146	130	120	90	87	84	80	68

Let us use formula (2) for solving the routing problem for the two variants of requests of the dynamic priorities $\eta_1 = 0.2$ and $\eta_2 = 0.8$. There are three aircraft and 12 requests with corresponding

characteristics (see Table 1) at the first step $k = 1$. We choose the requests of the largest holdover time and the least distance, and receive the requests 6 and 13 for the first Aircraft₁(6;13), and, respectively, for Aircraft₂(13;15;19), Aircraft₃(5;9;16). The calculations show us, that the requests 13; 19; 9 are in the "elite", respectively, for the points 1, 2, 3 (see Table 1). At the second and subsequent steps one of the three aircraft is vacated before the other ones, and the calculations are performed considering this circumstance. For one, at $k = 2$ Aircraft₁ is the first one to be vacated, 7 is the following request for it – (Aircraft₁²-7). The requests for (Aircraft₂³-12), (Aircraft₃⁴-8) are determined in the similar way. There is a variant of the chosen routes at $\eta_1 = 0.2$ (see Figure 1) in Table 3.

Table 3

Optimal route configuration at $\eta_1 = 0.2$

Aircraft ₁	A	13	1	15	5	16	18	6	4
Aircraft ₂	B	19	2	12	10	17	24	21	22
Aircraft ₃	C	9	3	8	11	20	23	17	14

Let us perform the calculations while $\eta_2 = 0.8$ in the similar way, and summarize the results in Table 4.

Table 4

Optimal route configuration at $\eta_1 = 0.8$

Aircraft ₁	A	6	4	7	24	12	10	21	22
Aircraft ₂	B	17	14	16	18	13	1	19	2
Aircraft ₃	C	9	3	8	11	20	23	15	5

Significant differences in the results in Tables 3 and 4 show us the principal opportunity of using the GA for solving such problems, due to the fact that the initial "elite" consists of the "different ancestors" which do not have the same features. In order to carry out the genetic selection let us divide each route into two blocks – (the beginning and the end) belonging to the two requests. Then let us breed the four blocks by the principle "every block is merged with each of the rest ones" for each of the aircraft, as a result the total amount of rearrangements forms 9 variants. Let us choose one variant out of 9 of a minimal penalty function with the criterion (3), while considering the valuations of $T_0 = \tau_0 = 30$ min, approximately corresponding to the minimal holdover time of performing the request while the equality of demand and proposal interests. Considering the measures of the maximum holdover time and the total length of the routes T_{max} and L_{max} let us make the calculations for each of the 9 variations. As a result there are the new routes for all the Aircraft₁, Aircraft₂, Aircraft₃, different from the valuations in Tables 3 and 4.

Table 5

Optimal route configuration in genetic selection

Aircraft ₁	A	6	4	7	24	17	14	15	5
Aircraft ₂	B	12	10	21	22	13	17	19	2
Aircraft ₃	C	9	3	8	11	20	23	15	18

Using the GA in this problem showed us that:

- for variant 1 – the maximum holdover time took $T_{max} = 187$ out of all the 12 valuations for all the three routes, and the path length was $L_1 = 27$, $L_2 = 29$, $L_3 = 30$ respectively. The mean observation of the operational costs $T_{avg.} = 29$, and integral penalty function $J_v = 13020$;
- for variant 2 – $T_{max} = 165$, $T_{avg.} = 34$, $J_v = 12500$;
- while genetical selection – $T_{max} = 155$, $T_{avg.} = 36$, $J_v = 11470$.

CONCLUSIONS

In case of the small number of requests and managing the aircraft at their full search (corresponding to the setting of the given problem) the total amount of combinations exceeds 1500 variants. In the suggested approach to solving the problem with the help of the GA the number of variants does not exceed 100.

Using the GA provides us with the opportunity to choose the optimal variant of reducing the time of delay while insignificantly enlarging the operational costs considering both free and busy aircraft.

The total positive effect of formation flight planning optimization is not high enough due to the random way of locating the points on the territory. In case the part of the routes overlaps the ones published in the AIP, the probability of the formation flights will significantly rise.

REFERENCES

1. **Dixon, L.C.W. and Szegő, G.P. (eds.).** (1975). *Towards global optimization*. Proceedings of a Workshop at the University of Cagliari, Italy, October 1974. Amsterdam-Oxford, North-Holland Publ, 472 p. DOI: 10.1002/zamm.19790590220
2. **Ichida, K. and Fujii, Y.** (1979). *An interval arithmetic method for global optimization*. Computing, vol. 23, no. 1, pp. 85–97. DOI: 10.1007/BF02252616
3. **Hansen, E.R.** (1979). *Global optimization using interval analysis: The one-dimensional case*. Journal of Optimization Theory and Applications, vol. 29, no. 3, pp. 331–344. DOI: 10.1007/BF00933139
4. **Sobol, E.M. and Statnikov, R.B.** (1981). *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of efficient parameters in tasks with many criteria]. Moscow: Nauka, 110 p. (in Russian)
5. **Gopalakrishnan, K. and Balakrishnan, H.** (2021). *Control and optimization of air traffic networks*. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, vol. 4, pp. 397–424. DOI: 10.1146/annurev-control-070720-080844
6. **Saaty, T.L.** (1961). *Elements of Queuing Theory*. McGraw-Hill, New York, 423 p.
7. **Mikhaylin, D.A., Alliluyeva, N.V. and Rudenko, E.M.** (2018). *Comparative analysis of the effectiveness of genetic algorithms the routing of the flight, taking into account their different computational complexity and multicriteria tasks*. Trudy MAI, no. 98, 22 p. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (accessed: 13.03.2021). (in Russian)
8. **Ozlem, S.M.** (2015). *Optimum arrival routes for flight efficiency*. Journal of Power and Energy Engineering, no. 3, pp. 449–452. DOI: 10.4236/jpee.2015.34061
9. **Lugovaya, A.V. and Kononov, A.E.** (2017). *Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87 (in Russian)
10. **Lebedev, G. and Malygin, V.** (2019). *Formation of private performance criteria A-CDM taking into account the interests of the participants in the decision-making process in a dynamic environment*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 6, pp. 44–54. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54 (in Russian)

11. Aliev, T.I. (2009). *Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem* [Bases of the discrete systems' simulation]. St. Petersburg: SPbGU ITMO, 363 p. (in Russian)

12. Goncharenko, V.I., Rozhnov, A.V. and Tseplov, G.I. (2018). *Planirovaniye i koordinatsiya marshrutov polota bespilotnykh aviatsionnykh sistem v interesakh organizatsii i otsenki kachestva sistem podvizhnoy svyazi* [Planning and the coordination of the flight courses for unmanned aviation systems in the interest of organization and quality control of the mobile systems]. *Raspre-delennyye kompyuternyye i telekommunikatsionnyye seti: upravleniye, vychisleniye, svyaz: materialy 21-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (DCCN-2018)* [The distributed computer and telecommunication networks: control, calculation, the connection: proceedings of the 21st international scientific conference (DCCN-2018, Moscow)]. Moscow: RUDN, pp. 220–229. (in Russian)

13. Evdokimenkov, V.N., Krasilschikov, M.N., Sebryakov, G.G. and Lyapin, N.A. (2019). *Algoritmy i programmno-matematicheskoye obespecheniye bortovoy komponenty raspredelennoy sistemy intellektualnogo upravleniya gruppoy bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Algorithms and mathematical programmed software of an airborne component of the distributed system for intellectual control with the group of unmanned flying vehicles]. *Metody i modeli iskusstvennogo intellekta i ikh prilozheniya v kompyuternoy lingvistike, neyrofiziologicheskikh issledovaniyakh i meditsine. Fundamentalnyye problemy gruppovogo vzaimodeystviya robotov: materialy XII Multikonferentsii po problemam upravleniya (MKPU-2019)* [Methods and models of artificial intelligence and their applications in computational linguistics, neurophysiological research and medicine. Fundamental problems of group interaction of robots: proceedings of the XII Multiconference on Control Problems (MKPU-2019)]. Rostov-on-Don: Yuzhnyy federalnyy universitet, pp. 141–143. (in Russian)

14. Rebrov, V.A., Rudelson, L.E. and Chernikova, M.A. (2007). *A model of flight request collection and processing in the flight scheduling problem*. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 46, no. 3, pp. 429–443.

15. Kim, N.V. and Krylov, I.G. (2012). *Using a group of unmanned aerial vehicle in the task of monitoring*. *Trudy MAI*, no. 62, 11 p. Available at: <http://trudymai.ru/upload/iblock/bbb/gruppovoe-primenenie-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf?lang=en&issue=62> (accessed: 13.03.2021). (in Russian)

16. Andreev, M.A., Miller, A.B., Miller, B.M. and Stepanyan, K.V. (2012). *Path planning for unmanned aerial vehicle under complicated conditions and hazards*. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, vol. 51, no. 2, pp. 328–338.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vladimir I. Goncharenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Director of the Institute of Military Education, Moscow Aviation Institute (National Research University), vladimir-gonch@mail.ru.

Georgy N. Lebedev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Automatic and Intellectual Management Systems Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), kaf301@mail.ru.

Vyacheslav B. Malygin, Head of the Training Centre of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mbv898@ya.ru.

МНОГОМЕРНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ С ПОВЫШЕННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ЗАЯВОК НА ПОЛЕТЫ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.И. Гончаренко¹, Г.Н. Лебедев¹, В.Б. Малыгин²

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ
(гранты № 19-08-00010, № 20-08-00652)

В статье решается задача многомерной маршрутизации полетов летательных аппаратов для перевозки грузов и почты, которые при условии наличия соответствующего оборудования для выполнения навигации повышенной точности получают возможность выполнения групповых полетов в любых погодных условиях. Данное обстоятельство способно существенно снизить нагрузку при использовании воздушного пространства, что позволит осуществлять перевозки независимо от его загруженности. В то же время при планировании маршрутов требуется учитывать интересы различных заинтересованных групп, зачастую имеющих противоположные интересы. В силу разной направленности решаемых задач решение может потребовать перебора как непомерно большого, так и малого количества возможных ситуаций (вариантов решения), чем ниже уровень учета этих вариантов, тем больше их количество. В работе представлен конкретный пример многомерной маршрутизации, на которую оказывают влияние интересы эксплуатационного характера и интересы срочности исполнения заявок, которые выражены весовыми коэффициентами. Решением такой задачи является единственный вариант в пользу общего производственного процесса, который получен с помощью использования генетического алгоритма. Для этого потребовалось ввести ряд обозначений и допущений, перечень которых может дополняться. Оптимальное решение может быть получено как простым перебором вариантов решения, так и при помощи генетического алгоритма, который позволяет за меньшее число итераций, в реальном масштабе времени получить субоптимальное, отвечающее условиям задачи решение. В приведенном примере экспертным путем назначаются динамические приоритеты на основе мультипликативной формы, которые формируют частные критерии для ранжирования заявок на каждом шаге планирования маршрутов. В результате получены конкретные варианты решения, отвечающие интересам разных групп, и вариант, полученный при помощи применения генетического алгоритма, удовлетворяющий противоположным интересам этих групп. Все варианты решения оказались различными, что говорит о необходимости применения объективного и обоснованного аппарата принятия решения, которым является генетический алгоритм. Предлагаемый математический аппарат имеет перспективы внедрения.

Ключевые слова: многомерная маршрутизация, навигация повышенной точности, генетический алгоритм (ГА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dixon L.C.W., Szegö G.P. (eds.). Towards global optimization // Proceedings of a Workshop at the University of Cagliari, Italy October 1974. Amsterdam-Oxford: North-Holland Publ, 1975. 472 p. DOI: 10.1002/zamm.19790590220
2. Ichida K., Fujii Y. An interval arithmetic method for global optimization // Computing. 1979. Vol. 23, no. 1. Pp. 85–97. DOI: 10.1007/BF02252616
3. Hansen E.R. Global optimization using interval analysis: The one-dimensional case // Journal of Optimization Theory and Applications. 1979. Vol. 29, no. 3. Pp. 331–344. DOI: 10.1007/BF00933139
4. Соболев Е.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
5. Gopalakrishnan K., Balakrishnan H. Control and optimization of air traffic networks // Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems. 2021. Vol. 4. Pp. 397–424. DOI: 10.1146/annurev-control-070720-080844

6. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения / Пер. с английского Е.Г. Коваленко, под ред. И.Н. Коваленко, Р.Д. Когана. М.: Советское радио, 1965. 510 с.
7. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2018. № 98. 22 с. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (дата обращения: 13.03.2021).
8. Ozlem S.M. Optimum arrival routes for flight efficiency // Journal of Power and Energy Engineering. 2015. No. 3. Pp. 449–452. DOI: 10.4236/jpee.2015.34061
9. Луговая А.В., Коновалов А.Е. Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87
10. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Формирование частных критериев эффективности А-СДМ с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 44–54. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54
11. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
12. Гончаренко В.И., Рожнов А.В., Теплов Г.И. Планирование и координация маршрутов полета беспилотных авиационных систем в интересах организации и оценки качества систем подвижной связи // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь: материалы 21-й Международной научной конференции (DCCN-2018). Москва 17–21 сентября 2018 г. М.: РУДН, 2018. С. 220–229.
13. Евдокименков В.Н. Алгоритмы и программно-математическое обеспечение бортовой компоненты распределенной системы интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов / В.Н. Евдокименков, М.Н. Красильщиков, Г.Г. Себряков, Н.А. Ляпин // Методы и модели искусственного интеллекта и их приложения в компьютерной лингвистике, нейрофизиологических исследованиях и медицине. Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов: материалы XII Мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019). Дивноморское – Геленджик 23–28 сентября 2019 г. Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2019. С. 141–143.
14. Ребров В.А., Рудельсон Л.Е., Черникова М.А. Модель сбора и обработки заявок на полеты в задаче планирования авиарейсов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 3. С. 97–111.
15. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2012. № 62. 11 с. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/bbb/grupповое-primenenie-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf?lang=ru&issue=62> (дата обращения: 13.03.2021).
16. Андреев М.А. Планирование траектории беспилотного летательного аппарата в сложных условиях при наличии угроз / М.А. Андреев, А.Б. Миллер, Б.М. Миллер, К.В. Степанян // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 166–176.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончаренко Владимир Иванович, доктор технических наук, директор Военного института Московского авиационного института (национального исследовательского университета), vladimirgonch@mail.ru.

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), kaf301@mail.ru.

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением Московского государственного технического университета гражданской авиации, mbv898@ya.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

15.05.2021
22.07.2021

Received
Accepted for publication

15.05.2021
22.07.2021

УДК 629.734/.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49

ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Ю.И. САМУЛЕНКОВ¹, Я.А. ФИЛАТОВА¹, А.Д. ГРУЗД¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Развитие авиационной транспортной системы характеризуется усложнением взаимодействующих объектов, многокритериальностью решаемых задач, трудностями принятия управленческих решений. Например, на современных среднемагистральных воздушных судах устанавливается до 25 000 датчиков контроля работоспособности изделий функциональных систем, применяются многочисленные наземные инструментальные методы и средства оценки технического состояния. Это требует разработки методов, алгоритмов определения и контроля критериев предельного состояния наблюдаемых изделий и функциональных систем авиационной техники. В связи с этим существенное значение приобретают аналитические модели прогнозной оценки технического состояния авиационной техники, расчет режимов технического обслуживания воздушных судов и обеспечения запасными частями и материалами. В работе предложена схема моделирующего алгоритма системы технического обслуживания парка воздушных судов и нахождение оптимального количества состояний воздушных судов математической модели с целью исключения второстепенных и субъективных факторов. Базисом предлагаемой аналитической модели является метод статистического моделирования на основе марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем. Предлагаемый метод сводится к синтезу некоторого моделирующего алгоритма исследуемого процесса, имитирующего поведение и взаимодействие элементов сложной системы и случайных возмущающих факторов. Отличительной чертой представленного алгоритма является определение основных расчетных зависимостей вероятностей и интенсивностей перехода с учетом требований современной нормативной базы по надежности в технике и определения технического состояния. Анализ результатов исследования основных расчетных зависимостей в условиях функционирования системы технического обслуживания воздушных судов подтвердил высокую степень корреляции времени нахождения в состоянии оценки технического состояния в зависимости от диагностической концепции. Предлагаемая имитационная модель может быть использована для прогнозной оценки технического состояния воздушных судов, авиационных газотурбинных двигателей и функциональных систем.

Ключевые слова: техническое обслуживание воздушных судов, имитационное математическое моделирование, слабоформализуемые многокомпонентные системы, минимально допустимая точность диагностирования, техническое состояние, концепция технического обслуживания воздушных судов, марковские и полумарковские процессы.

ВВЕДЕНИЕ

В гражданской авиации России обеспечение летной годности воздушных судов (ВС) осуществляется посредством наземного и технического обслуживания ВС¹. Система технического обслуживания ВС представляет собой множество взаимодействующих между собой объектов обслуживания (летательные аппараты), средств технического обслуживания (средства наземного обслуживания общего и специального применения, инструмент и контрольно-проверочная аппаратура), документацию технического обслуживания (ТО) (программа ТО, руководство по эксплуатации и др.) и исполнителей, поддерживающих и обеспечивающих качество и уровень заданных эксплуатационно-технических характеристик объектов системы ТО ВС². При разработке и утверждении программы ТО ВС, единого документа, определяющего

¹ Воздушный кодекс РФ от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ: Принят Государственной Думой 19 февраля 1997 года: Одобрен Советом Федерации 5 марта 1997 года [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс – справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения: 14.03.2021).

² МТ РФ Приказ от 25.09.2015 № 285 «Об утверждении ФАП "Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим техническое обслуживание гражданских воздушных судов. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридических лиц, индивидуальных предпринимателей»

эффективность системы ТО ВС, необходимо учитывать совершенство конструкции летательного аппарата, эксплуатационную технологичность, режимы ТО ВС, концепцию и методы ТО, квалификацию персонала и др.^{3,4,5,6}

Современные исследователи эргатических систем относят сложные системы «человек – машина» к слабоформализуемым системам и процессам [1]. Математическая модель таких систем включает некоторый алгоритм F вычисления параметров состояния объекта Y по входным детерминированным и стохастическим параметрам U и X , и, следовательно, можно записать $Y = F(X, U)$ [2]. К таким слабоформализуемым системам следует отнести и систему технической эксплуатации (ТЭ) воздушных судов, и техническое обслуживание (ТО) ВС как часть ТЭ.

Таким образом, в связи с отсутствием аналитического математического аппарата для сложных систем «человек – машина» широкое применение нашли вероятностно-статистические модели. Анализ современных подходов к имитационному моделированию систем ТО ВС и их компонентов показывает, что, как правило, такие модели строятся как на основе давно известных и широко применяемых методов системы массового обслуживания, метода динамики средних, алгоритмов на основе марковских процессов [3, 4], так и, например, на основе методологии IDEF3 (Integrated DEFinition for Process Description Capture Method) и нотации DFD (Data Flow Diagrams) [5].

При статистических подходах к построению моделирующих алгоритмов систем ТО ВС производится агрегатирование некоторого математического моделирующего аппарата и подсистемы, моделирующей детерминированные и вероятностные входные параметры. В этом случае имитация стохастических входных параметров может быть выполнена при помощи случайных чисел [6, 7].

Как правило, эффективность системы ТО ВС реализуется и оценивается через процесс технической эксплуатации (ПТЭ). ПТЭ ВС в общем случае включают в себя летно-техническую эксплуатацию, наземное и техническое обслуживание авиационной техники (АТ), технологические процессы наземного и технического обслуживания, аэродромное обеспечение полетов и технического обслуживания АТ, инженерно-авиационное обеспечение и др. [5, 8].

Широкое распространение при исследовании системы ТО ВС получил марковский процесс с дискретными состояниями системы и непрерывным временем переходов из состояния в состояние системы. Модель ПТЭ представляется следующим образом: состояния ПТЭ задаются через состояния ВС (рис. 2), находятся времена пребывания в состояниях ТО со своими функциями распределения, что позволяет оценивать эффективность режимов ТО ВС. Окончание нахождения в одном из состояний системы характеризуется мгновенным переходом в иное состояние, причем переход в другое состояние можно описать определенной интенсивностью и вероятностью перехода [7, 8]. Таким образом, осуществляется процесс системы ТО ВС в целом. При построении такой модели функционирования сложной многокомпонентной системы ТО ВС в качестве метода исследования может быть использован статистический анализ состояний

телей, осуществляющих техническое обслуживание гражданских воздушных судов, требованиям федеральных авиационных правил"» (Зарегистрировано в Минюсте России 22.10.2015 № 39409) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс – справочно-правовая система. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187899/ (дата обращения: 14.03.2021).

³ МР-03-001 по одобрению программ ТО ВС, зарегистрированных в государственном реестре гражданских ВС Российской Федерации. Министерство транспорта РФ. Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация), 2014. 35 с.

⁴ АТА MSG-3 Основные положения по разработке требований к плановому техническому обслуживанию самолета. Совместный документ изготовителя и авиакомпании. Изменение 2003.1. 2003, 87 с.

⁵ Эксплуатация воздушных судов. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Часть I: Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. 9-е изд. // ИКАО, 2010. 10 с.

⁶ Летная годность воздушных судов. Приложение 8 к Конвенции о международной гражданской авиации. 11-е изд. // ИКАО, 2010. 230 с.

ВС и переходов реального ПТЭ. При этом статистический анализ ПТЭ выполняется в два этапа. На первом этапе исследуются состояния процесса, а на втором – вложенная цепь, которая образует процесс «моментов перехода». Считается, что вложенная цепь обладает марковскими свойствами, а на состояниях развиваются временные процессы, близкие по структуре к процессам восстановления. На основании этого констатируется факт полумарковости ПТЭ ВС.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ ТО ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Анализ результатов работы математической модели позволяет проследить распределение фонда времени по состояниям процесса технической эксплуатации и оценить трансформацию выбранных показателей эффективности системы ТО ВС.

Для оценки эффективности системы ТО ВС производится выбор показателей, к которым следует отнести среднюю продолжительность технического обслуживания, среднюю трудоемкость технического обслуживания, удельную суммарную продолжительность технических обслуживаний, удельную суммарную трудоемкость технических обслуживаний, коэффициент готовности, коэффициент технического использования, готовность парка объектов и др.^{7,8}

Влияние управленческих и эксплуатационных параметров на эффективность системы ТО ВС за отчетный период, как правило, оценивается по относительным показателям. В этом случае берут отношение показателя за рассматриваемый период к нормируемому показателю. Принцип системного подхода к исследованию эффективности любой системы требует необходимости определения относительной важности рассматриваемых параметров, т. е. определения относительных показателей состояния системы.

Оценить относительную значимость факторов по влиянию на результирующий параметр можно по коэффициенту доминанты, определяемому из соотношения

$$\Theta = \left| \frac{\beta_i}{\beta_{\max}} \right|,$$

где $\beta_{\max}$ и β_i – максимальный и i -й коэффициенты регрессии стандартизованного вида соответственно.

Вероятностно-статистические модели многокомпонентных систем на основе марковских процессов позволяют оценивать влияние различных мероприятий, в том числе случайных параметров, на изменение значений вероятности P_i нахождения элементов системы в i -м состоянии. Такая методология позволяет проследить изменение располагаемых временных и материальных ресурсов системы ТО ВС в динамике.

Классический подход при планировании численного эксперимента предусматривает выработку концепции создаваемой модели, описание математического аппарата и, наконец, создание электронно-вычислительного продукта [9].

В основу эффективного моделирующего алгоритма системы ТО ВС могут быть положены следующие математические методы: описание марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем (системой дифференциальных уравнений Колмогорова), методы статистических испытаний (Монте-Карло) и логико-комбинаторного анализа [10].

⁷ ГОСТ Р 53863-2010 Воздушный Транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2020. 23 с.

⁸ ГОСТ 18322-2016 Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.

Эти методы позволяют с требуемой точностью отразить все особенности поведения реального процесса системы ТО ВС. Схема моделирующего алгоритма исследуемой системы ТО парка воздушных судов представлена на рис. 1.

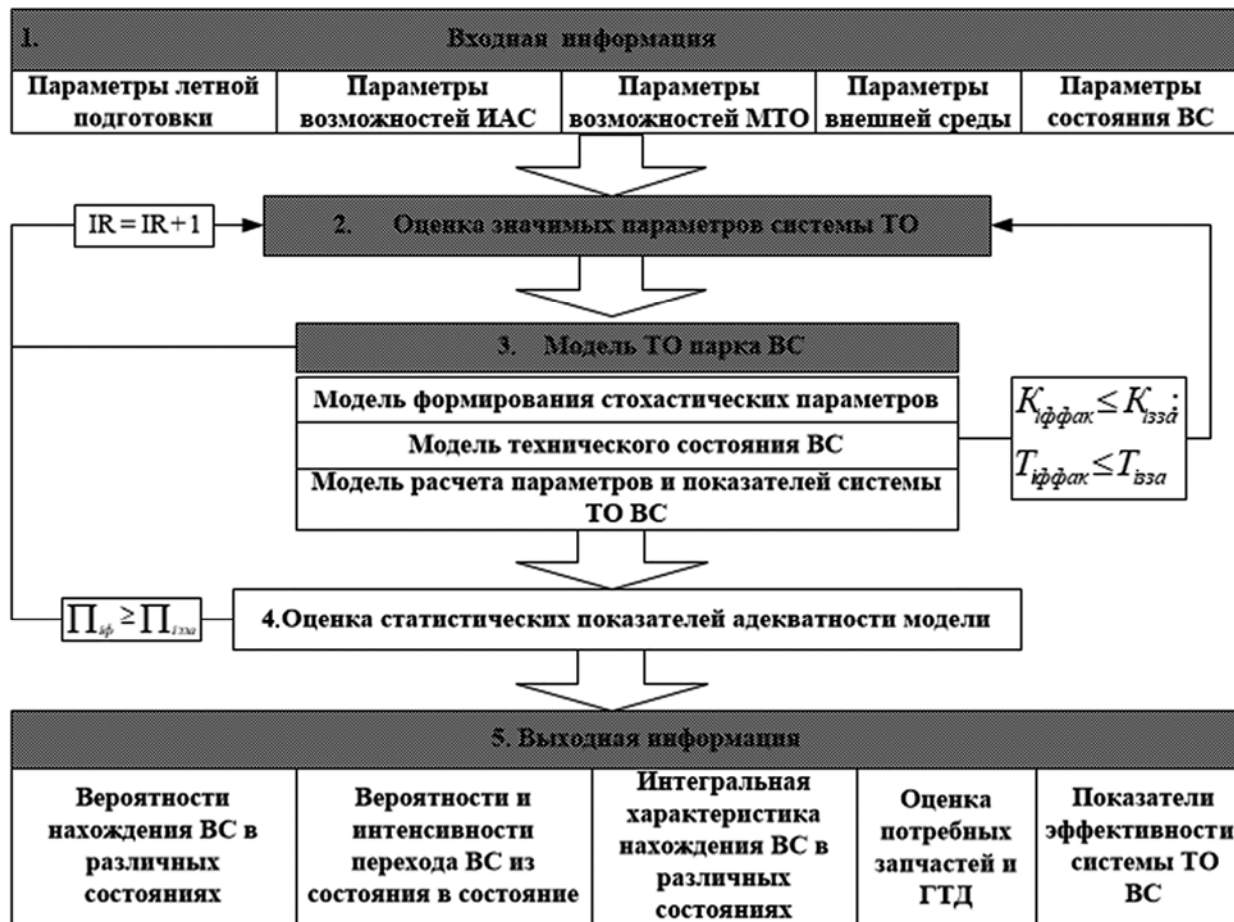


Рис. 1. Схема моделирующего алгоритма исследуемой системы ТО парка воздушных судов
Fig. 1. Modeling algorithm diagram of the aircraft fleet maintenance system under study

При функционировании реальных сложных технических систем смена состояний происходит в моменты времени, заранее неизвестные для наблюдателя. Для описания процедуры взаимодействия таких компонентов часто применяют непрерывную цепь Маркова. В этом случае делается допущение о дискретных состояниях системы и непрерывном времени функционирования системы.

Определение количества состояний ВС исследуемой модели носит, как правило, субъективный характер. При нахождении оптимального количества состояний ВС математической модели и исключения второстепенных факторов предлагается использовать относительный показатель структуры (ОПС), характеризующий долю или удельный вес части совокупности в общем ее объеме:

$$W_i = \frac{t_i}{\sum_{i=1}^n t_n} \cdot 100 \%,$$

где t_i продолжительность нахождения ВС в i -м состоянии, $\sum_{i=1}^n t_n$ – суммарное время нахождения ВС в n -состояниях.

В случае нахождения значений θ_i одного из состояний ниже пороговых значений, данное состояние следует исключить из модели либо в результате непрерывного контроля «включать» в работу модели при достижении нормируемых значений. Пороговым (нормируемым) значением рекомендуется принимать 5 %.

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ТО ПАРКА ВС

Для реализации научно обоснованного подхода к оценке состояний ВС, как правило, разрабатывается топологическая модель системы ТО в виде графа состояний, в которых находится ВС в процессе технической эксплуатации (рис. 2) [10]. Этот граф позволяет проследить в динамике последовательность и частоту попадания ВС в различные состояния.

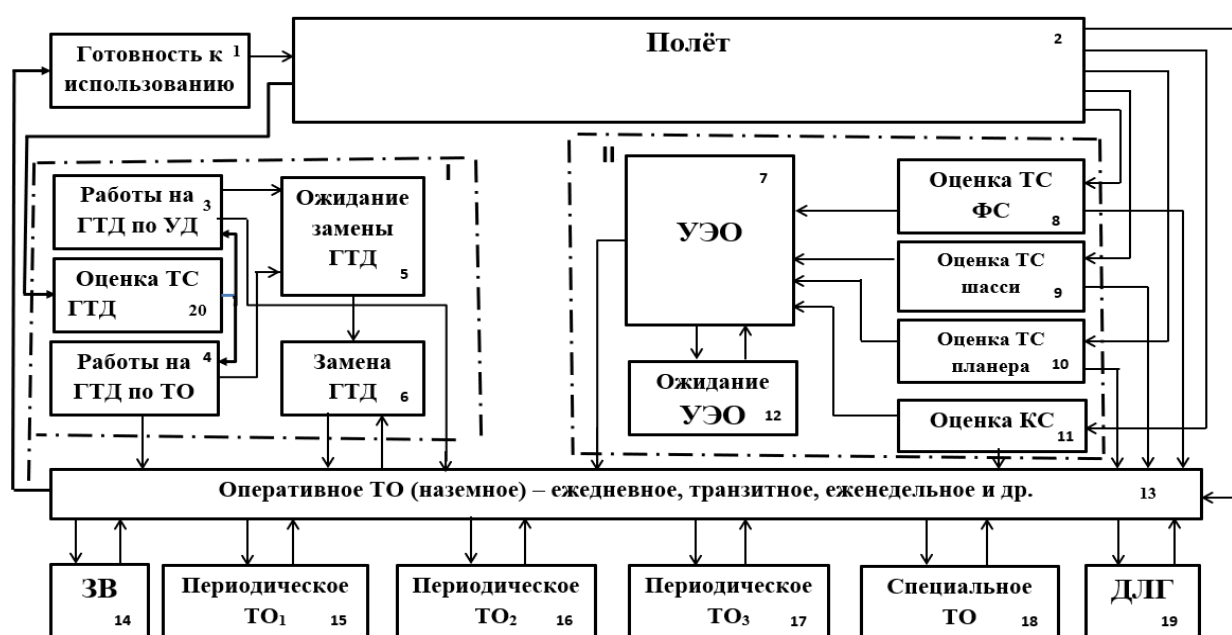


Рис. 2. Граф состояний ВС в процессе технической эксплуатации: I – блок эксплуатационной надежности ГТД; II – блок эксплуатационной надежности ВС; ГТД – газотурбинный двигатель; УЭО – устранение эксплуатационных отказов; ТС – техническое состояние; УД – устранение дефектов; ФС – функциональная система; ЗВ – задержки вылетов по техническим причинам; ДЛГ – директивы летной годности; КС – коррозионное состояние

Fig. 2. Graph for aircraft conditions in the process of technical operation. I – gas turbine engine operational reliability unit, II – aircraft operational reliability unit, gas turbine engine, EOF – elimination of operational failures, TC – technical condition, DE – defects elimination, FS – functional system, FD – flight delays for technical reasons, AWD – airworthiness directives, CS – corrosion state

Для описания случайного процесса, протекающего в этой системе, применяются вероятности состояний

$$p_1(t), p_2(t), \dots, p_i(t), (*),$$

где $p_i(t)$ – вероятность того, что система S в момент t находится в состоянии S_i :

Очевидно, что любого t

$$\sum_{i=1}^n p_i(t) = 1.$$

Для нахождения вероятностей (*) необходимо решить систему дифференциальных уравнений (уравнений Колмогорова), имеющих вид

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji}(t)P_j(t) - \sum_{i=1}^n \lambda_{ij}(t)P_i(t) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

Произведение плотности вероятности перехода λ_{ij} из S_i состояния в S_j на вероятность нахождения в S_j называется потоком вероятности перехода из состояния S_i в состояние S_j [10]:

$$\lambda_{ij}P_i(t).$$

Правомерность того, что марковские процессы с непрерывным временем являются частным случаем полумарковских процессов, в которых на независимые функции распределения времени ожидания перехода наложено ограничение по их экспоненциальности [11].

Функция λ_{ij} описывает закон перехода ВС из состояния i в состояние j , и в этом случае она представляет собой условную вероятность перехода при нахождении объекта в состоянии i . Зачастую делают допущение, что переходы между состояниями осуществляются под действием пуассоновских потоков. Тогда эти переходы можно аналитически описать экспоненциальным распределением. Следует отметить, что потоки переходов событий состояний сложной системы в большинстве случаев не будут простейшими. Следовательно, плотности вероятности перехода λ_{ij} являются интенсивностями соответствующих потоков событий, произвольным образом зависящими от времени [11].

Для корректного решения задач построения математических алгоритмов при возникновении мгновенных отказов АТ делается допущение о том, что на небольшом интервале времени Δt протекание процесса в многокомпонентных системах рассматривается как процесс с дискретными состояниями и дискретным временем, трансформация состояний системы происходит с шагом $t = 0, t = \Delta t, t = 2\Delta t, \dots$. Временной шаг задается при решении уравнений состояния системы ТО ВС и ФС с использованием программного обеспечения работы ЭВМ [12].

Обозначим через a_{ij} интенсивности, а через p_{ij} соответственно вероятности перехода из одного состояния в другое. Интенсивность перехода a_{ij} характеризует, с какой скоростью осуществляется переход из одного состояния в другое в единицу времени, а вероятность перехода p_{ij} – с какой вероятностью осуществляется переход из одного состояния в другое:

$$\begin{aligned} \lambda_{ij} &= \frac{1}{t_i} p_{ij}; \\ a_{ij} &= \frac{1}{t_i}; a_{ji} = \frac{1}{t_j}; \\ \frac{dP_i(t)}{dt} &= \sum_{j=1}^n a_{ji} \cdot p_{ji} \cdot P_j(t) - \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot p_{ij} \cdot P_i(t) \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \end{aligned}$$

При рассмотрении элементарных потоков событий, в том числе отказов и повреждений АТ, в многокомпонентных технических системах, очевидно, что время нахождения в состояниях ПТЭ и время перехода t между событиями распределяется по экспоненциальному закону⁹. В этом случае математическое ожидание (среднее значение) времени нахождения в состояниях ПТЭ t равно среднему квадратическому отклонению [13]:

$$M[t] = S_{\bar{t}} = \frac{1}{\lambda}.$$

⁹ ГОСТ 8.381-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения. М.: Стандартинформ, 2020. 17 с.

Стохастические величины ПТЭ (среднее время нахождения в состоянии, параметр потока отказов, налет на отказ и повреждение и др.) для случайного ординарного потока без последствия уже не будут распределены по экспоненциальному закону. Вид этого распределения будет зависеть в первую очередь от времени наступления первого события и, во-вторых, от переменной интенсивности потока $\lambda(t)$. При решении узкого круга исследовательских задач (например, при наложении ограничений на объем и периодичность ТО ВС) можно сделать вполне правомерное допущение о сравнительно медленном изменении функции $\lambda(t)$, и тогда можно говорить об экспоненциальной зависимости распределения времени в заданном диапазоне. Отсюда следует, что в этом случае можно говорить о средних значениях интенсивности $\lambda(t)$ на заданном временном интервале [14]. Для определения времени нахождения в состоянии оценки технического состояния ВС, ФС или отдельных элементов предлагается использовать вероятности точности диагностирования объекта [15, 16, 17, 18].

$$M[t_{от}] = \frac{t_{кр}(1-\alpha) \cdot e^{-\omega_0 t_{п}}}{(1-\alpha \cdot e^{-\omega_0 t_{п}})},$$

где $t_{кр}$ – средняя продолжительность контроля работоспособности; α – условная вероятность «необнаружения отказа» при оценке технического состояния ВС, ФС или отдельных элементов ФС; ω_0 – параметр потока отказов; $t_{п}$ – время нахождения в предыдущем состоянии.

Воздействие стохастических входных параметров на функционирование многокомпонентных систем может вызвать отклонение от средних значений параметров функционирования, что в конечном итоге приведет к искажению результатов эксперимента. В связи с этим необходимо постоянно оценивать точность вычислений при проведении исследований сложных систем с учетом новых, ранее неизвестных, случайных факторов [6].

В математическом аппарате имитационного моделирования сложных слабоформализуемых процессов, как правило, используются определяемые и вероятностные параметры исследуемой системы.

К таким параметрам можно отнести количество самолетов авиационного парка компании, среднесуточный налет на одно ВС, среднюю продолжительность типового полета, режимы ТО ВС, квалификацию инженерно-технического персонала, показатели надежности АТ и др.

В этом случае на основе логико-комбинаторного подхода можно осуществить проектирование системы ТО ВС от концепции создания до построения математической модели исследуемой сложной многокомпонентной системы [7].

Основные расчетные зависимости вероятностей и интенсивностей перехода представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Расчетные формулы вероятностей и интенсивностей перехода
Estimated formulas of transition probabilities and intensities

Вероятности перехода	Интенсивности перехода
$p_{2.8} = 1 - e^{-\frac{t_{п}}{t_{п}}}$	$a_{2.8} = \frac{T_{п}}{t_{п} n_{п}}$
$p_{2.9} = 1 - e^{-\omega_{п} t_{п}}$	$a_{2.9} = \frac{1}{t_{п}}$

Продолжение таблицы 1
Continuation of Table 1

$p_{2.10} = 1 - e^{-\omega_{пл} t_{и}}$	$a_{2.10} = \frac{1}{t_{и}}$
$p_{2.11} = 1 - e^{-\omega_{кв} t_{и}}$	$a_{2.11} = \frac{1}{t_{и}}$
$p_{7.13} = 1 - e^{-\frac{1}{t_{срФС}}}$	$a_{7.13} = \frac{t_{рв}}{T_{в} \cdot n_{п}}$
$p_{2.13} = 1 - p_{13.14} - p_{13.15} - p_{13.16} - p_{13.17} - p_{13.1}$	$a_{2.13} = \frac{1}{t_{и}}$
$p_{1.2} = 1$	$a_{1.2} = \frac{T_{пл}^r \cdot N_{вс}}{K_{год} \cdot K_{и} \cdot t_{срс}}$
$p_{5.6} = 1$	$a_{5.6} = \frac{1}{t_{ож.}}$
$p_{13.1} = 1 - e^{-\frac{1}{t_{срТО0}}}$	$a_{13.1} = \frac{1}{t_{срТО0}}$
$p_{13.15} = 1 - e^{-\frac{t_{ТО0}}{\tau_{ПТО1}}}$	$a_{13.15} = \frac{1}{t_{срТО0}}$
$p_{15.13} = 1 - e^{-\frac{t_{ПТО1}}{\tau_{ПТО1}}}$	$a_{15.13} = \frac{t_{ПТО1}}{T_{ПТО1} \cdot n_{ПТО1}}$
$p_{13.16} = 1 - e^{-\frac{t_{ТО0}}{\tau_{ПТО2}}}$	$a_{13.16} = \frac{1}{t_{срТО0}}$
$p_{13.17} = 1 - e^{-\frac{t_{ТО0}}{\tau_{ПТО3}}}$	$a_{13.17} = \frac{1}{t_{срТО0}}$
$p_{13.1} = 1 - p_{13.14} - p_{13.15} - p_{13.16} - p_{13.17} - p_{13.1}$	$a_{13.1} = \frac{1}{t_{срТО0}}$
$p_{8.7} = 1 - e^{-\frac{t_{диагн}}{\tau_{диагн}}}$	$a_{8.7} = \frac{1}{t_{срфс}}$
$p_{7.13} = 1 - p_{8.7} - p_{9.7} - p_{10.7} - p_{11.7} - p_{12.7}$	$a_{7.13} = \frac{t_{рв}}{T_{в}}$

В табл. 1 элементы формул означают [18, 19]: $\omega_{фс}$ – параметр потока отказов функциональных систем (планера, шасси и др.); $t_{и}$ – использование ВС по назначению (полет); $T_{н}$ – налет за рассматриваемый период, час; $t_{п}$ – налет на отказ в полете, час; $n_{п}$ – рассматриваемый период, дней. $t_{рв}$ – календарный период рабочего времени; $T_{в}$ – математическое ожидание технологической продолжительности одного восстановления работоспособного состояния изделия ВС после отказа, час; $t_{срФС}$ – среднее время нахождения на оценке технического состояния ФС; $t_{ПТО}$ – нормативная продолжительность периодического ТО, час; $t_{срТО0}$ – среднее время на оперативном ТО; $T_{ПТО}$ – математическое ожидание технологической продолжительности периодического ТО, час; $n_{ПТО}$ – календарный период данного вида ТО, дней; $t_{диагн}$ – время нахождения на диагностике, час; $\tau_{диагн}$ – трудозатраты на диагностирование, чел-час.

Для реализации функционирования предложенной имитационной модели системы ТО ВС в качестве источников эксплуатационной информации необходимо использовать статистические данные эксплуатантов авиационной техники, организаций по ТО ВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований:

Предложено оценивать относительную значимость факторов системы ТО ВС по влиянию на результирующий параметр по коэффициенту доминанты.

Представленная в работе концептуальная схема исследуемой системы ТО парка воздушных судов позволяет построить моделирующий алгоритм.

Разработанный граф состояний ВС в процессе технической эксплуатации дает возможность проследить в динамике последовательность и частоту попадания ВС в различные состояния и на его основе создать математическую модель системы ТО ВС.

Для определения времени нахождения в состояниях оценки технического состояния ВС, ФС или отдельных элементов предлагается использовать вероятности точности диагностирования объекта.

Предложены расчетные зависимости вероятностей и интенсивностей при переходе из состояния в состояние для построения математической модели функционирования системы ТО ВС.

Таким образом, предлагаемый подход к имитационному моделированию слабоформализуемых современных систем ТО ВС позволяет создать математическую модель на основе марковских процессов, которая способна давать прогнозную оценку технического состояния ВС и изделий функциональных систем, выявлять наименее надежные элементы функциональных систем, определять режимы ТО, рассчитывать потребную трудоемкость ТО ВС.

Результаты исследования рекомендуется использовать на авиационных предприятиях, в организациях по ТО ВС, разработчикам и изготовителям авиационной техники на этапах проектирования, производства и эксплуатации ВС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щербатов И.А.** Управление слабоформализуемыми многокомпонентными системами на основе агентных технологий: автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Астрахань, 2015. 32 с.
2. **Растрюгин Л.А.** Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне, 1981. 375 с.
3. **Кузнецов С.В.** Математические модели процессов и систем технической эксплуатации бортовых комплексов и функциональных систем авионики // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 132–140.
4. **Герасимова Е.Д., Смирнов Н.Н., Ойдов Н.** Влияние надежности функциональных систем на эффективность технической эксплуатации воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 45–52.
5. **Киселев Д.Ю., Киселев Ю.В.** Комплексный подход к моделированию процессов технического обслуживания авиационной техники // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 33–40.
6. **Бусленко Н.П.** Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 356 с.
7. **Ицкович А.А., Алексанян А.Р., Файнбург И.А.** Построение математической модели процессов технической эксплуатации авиационной техники как замкнутой системы массового обслуживания // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 46–52.
8. **Ицкович А.А., Кабков М.А.** Вероятностно-статистические модели: учеб. пособие. Ч. 2. М.: МГТУ ГА, 2005. 118 с.
9. **Советов Б.Я., Яковлев С.А.** Моделирование систем: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 343 с.
10. **Вентцель Е.С.** Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.
11. **Емелин Н.М.** Отработка систем технического обслуживания летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 128 с.
12. **Акоф Р., Сасени М.** Основы исследования операций. М.: Мир, 1971. 534 с.

13. Горский В.Г., Адлер Ю.П., Талалай А.М. Планирование промышленных экспериментов. М.: Металлургия, 1978. 112 с.

14. Лычкина Н.Н. Современные технологии имитационного моделирования и их применение в информационных бизнес-системах // Новые информационные технологии: тезисы XIV Международной школы-семинара, 2006. Т. 1. С. 64–73.

15. Мачалин И.А., Конахович Г.Ф., Ткалич О.П. Аппроксимация одного класса случайных процессов в задачах контроля радиоэлектронных систем // Материалы IV международной научно-технической конференции «АВИА-2002». Киев, 2002. С. 67–69.

16. Бронников А.М., Морозов Д.В. Динамика технического состояния необслуживаемой в межрегламентный период бортовой системы летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 152–158.

17. Мачалин И.А. Математические модели стратегий технического обслуживания современной авионики // Математические машины и системы. 2005. № 2. С. 130–139.

18. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет. В.С. Авдусевский (пред.) и др. Т. 3: Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крюкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.

19. Фадеев Ю.М., Дондоров М.С. Математическое моделирование процессов технической эксплуатации летательных аппаратов в подготовительной фазе их эксплуатации при боевой подготовке и длительном ведении боевых действий // Отчет о НИР ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1997. С. 27–66.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самуленков Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, yu.samulenkov@mstuca.aero.

Филатова Яна Александровна, студентка 3 курса МГТУ ГА, yanafilatova787@yandex.ru.

Грузд Антон Дмитриевич, ассистент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, a.gryzd@mstuca.aero.

AIRCRAFT MAINTENANCE SYSTEM SIMULATION MATHEMATICAL MODEL CONSTRUCTION

Yuri I. Samulenkov¹, Yana A. Filatova¹, Anton D. Gryzd¹
¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation,
Moscow, Russia*

ABSTRACT

The development of the aviation transport system is characterized by sophistication of interacting objects, the multi-criteria nature of the tasks to be solved and difficulties in making management decisions. For example, modern medium haul aircraft are fitted with up to 25,000 sensors to monitor the performance capabilities of functional systems components. Numerous ground-based instrumental methods and means of diagnosing the technical condition are used. This requires the development of methods and algorithms for determining and monitoring the criteria of limiting state of the monitored components and functional systems of aeronautical equipment. In this regard, analytical models of predictive estimate for the technical condition of aeronautical equipment, determination of aircraft maintenance modes and provision of spare parts and materials become essential. The paper proposes a scheme of the aircraft fleet maintenance system modeling algorithm and deducing the mathematical model of the optimal number of aircraft states in order to exclude secondary and subjective factors. The method of statistical modeling based on

Markov processes with discrete states and continuous time is the basis of the proposed analytical model. The proposed method is reduced to the synthesis of some modeling algorithm of the investigated process that simulates the complex system components behavior and interaction as well as random perturbing factors. A distinctive feature of the presented algorithm is determination of the predominant estimated dependences of transition probabilities and intensities taking into account the requirements of the modern regulatory framework in terms of reliability of equipment and diagnosing the technical condition. The analysis of the predominant estimated dependencies study results in the conditions of operation of the aircraft maintenance system confirmed a high degree of correlation of the time duration effect on the particular states in order to diagnose the technical condition depending on the diagnostic concept. The proposed simulation model can be used for the aircraft technical condition predictive estimate, aircraft gas turbine engines and functional systems.

Key words: aircraft maintenance, simulation mathematical modeling, weakly formalized multicomponent systems, minimum permissible diagnostic accuracy, technical condition, aircraft maintenance concept, Markov and semi-Markov processes.

REFERENCES

1. **Shcherbatov, I.A.** (2015). *Upravleniye slaboformalizuyemyimi mnogokomponentnymi sistemami na osnove agentnykh tekhnologiy: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Weak-focusing multi-component systems management based on agent technologies Doctor of Technical Sciences Dissertation Abstract]. Astrakhan, 32 p. (in Russian)
2. **Rastrigin, L.A.** (1981). *Adaptatsiya slozhnykh sistem* [Complex systems adaptation]. Riga: Zinatne, 375 p. (in Russian)
3. **Kuznetsov, S.V.** (2017). *Mathematical models of processes and systems of technical operation for onboard complexes and functional systems of avionics*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 132–140. (in Russian)
4. **Gerasimova, E.D., Smirnov, N.N. and Oidov, N.** (2017). *The effect of reliability of functional systems on the efficiency of the technical operation of the aircraft*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 45–52. (in Russian)
5. **Kiselev, D.Yu. and Kiselev, Yu.V.** (2015). *An integrated approach for modelling of aircraft maintenance processes*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 219 (9), pp. 33–40. (in Russian)
6. **Buslenko, N.P.** (1968). *Modelirovaniye slozhnykh sistem* [Complex systems modeling]. Moscow: Nauka, 356 p. (in Russian)
7. **Itskovich, A.A., Aleksanyan, A.R. and Feinburg, I.A.** (2015). *The construction of mathematical model of processes of maintenance of aircraft engineering as a closed service system*. Nauchny Vestnik MGTU GA, no. 219 (9), pp. 46–52. (in Russian)
8. **Itskovich, A.A. and Kabkov, M.A.** (2005). *Veroyatnostno-statisticheskiye modeli: uchebnoye posobiye. Chast 2* [Probability and statistical models. Training manual. Part 2]. Moscow: MSTU GA, 118 p. (in Russian)
9. **Sovetov, B.Ya. and Yakovlev, S.A.** (2001). *Modelirovaniye system: uchebnik dlya VUZ* [Modeling of systems: Textbook for Universities]. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow: Vysshaya shkola, 343 p. (in Russian)
10. **Wentzel, E.S.** (1972). *Issledovaniye operatsiy* [Operation research]. Moscow: Sovetskoye radio, 552 p. (in Russian)
11. **Emelin, N.M.** (1995). *Otrabotka sistem tekhnicheskogo obsluzhivaniya letatelnykh apparatov* [Development of aircraft maintenance systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 128 p. (in Russian)
12. **Akof, R. and Sasieni, M.** (1971). *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Fundamentals of operations research]. Moscow: Mir, 534 p. (in Russian)
13. **Gorsky, V.G., Adler, Yu.P. and Talalay, A.M.** (1978). *Planirovaniye promyshlennykh eksperimentov* [Industrial experiments planning]. Moscow: Metallurgiya, 112 p. (in Russian)
14. **Lychkina, N.N.** (2006). *Sovremennyye tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya i ikh primeneniye v informatsionnykh biznes-sistemakh* [Modern technologies of simulation modeling and

their application in information business systems]. *Novyye informatsionnyye tekhnologii: tezisy XIV Mezhdunarodnoy shkoly-seminara* [New Information Technologies: Abstracts of the XIV International School-Seminar], vol. 1, pp. 64–73. (in Russian)

15. Machalin, I.A., Konakhovich, G.F. and Tklich, O.P. (2002). *Approksimatsiya odnogo klassa sluchaynykh protsessov v zadachakh kontrolya radioelektronnykh sistem* [Approximation of one class random processes in the problems of radio-electronic systems control]. *Materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «AVIA-2002»* [Proceedings of the IV international scientific and technical conference "AVIA-2002"]. Kiev, pp. 67–69. (in Russian)

16. Bronnikov, A.M. and Morozov, D.V. (2017). *Process of changes of maintenance-free onboard system operational status between scheduled maintenances*. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 152–158. (in Russian)

17. Machalin, I.A. (2005). *Matematicheskiye modeli strategiy tekhnicheskogo obsluzhivaniya sovremennoy avioniki* [Mathematical models of maintenance strategies for modern avionics]. *Matematicheskiye mashiny i sistemy*, no. 2, pp. 130–139. (in Russian)

18. Avduevsky, V.S. and others. (Eds.). (1988). *Nadezhnost i effektivnost v tekhnike: spravochnik v 10 tomakh* [Reliability and efficiency in engineering]. T. 3: *Effektivnost tekhnicheskikh sistem* [Vol. 3: The effectiveness of technical systems], in Utkin V.F., Kryuchkov Yu.V. (eds.), 328 p. (in Russian)

19. Fadeev, Yu.M. and Dondorev, M.S. (1997). *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov tekhnicheskoy ekspluatatsii letatelnykh apparatov v podgotovitelnoy faze ikh ekspluatatsii pri boyevoy podgotovke i dlitelnom vedenii boyevykh deystviy* [Mathematical modeling of the aircraft maintenance during preparation phase of their operation during combat training and long military operations]. *Otchet o NIR VVIA im. N.E. Zhukovskogo*, pp. 27–66. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri I. Samulenkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aircraft and Aircraft Engines Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.samulenkov@mstuca.aero.

Yana A. Filatova, 3rd year student of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, yanafilatova787@yandex.ru.

Anton D. Gruzhd, Assistant, the Aircraft and Aircraft Engines Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.gryzd@mstuca.aero.

Поступила в редакцию
Принята в печать

30.03.2021
22.07.2021

Received
Accepted for publication

30.03.2021
22.07.2021

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;**
05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
05.07.05 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем;
05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов;
05.07.10 – Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности

УДК 629.7.05.07

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-50-60

ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛАНСИРОВОЧНОГО УГЛА ПОВОРОТА ВИНТОМОТОРНОЙ ГРУППЫ ЭЛЕКТРОКОНВЕРТОПЛАНА

В.И. БУСУРИН¹, П.В. МУЛИН¹

*¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия*

В работе исследовалась возможность улучшения энергоэкономических характеристик электроконвертоплана с подъемно-двигательной винтомоторной группой для установившегося самолетного режима полета путем уменьшения расхода энергии винтомоторной группы в единицу времени или на единицу пройденного электроконвертопланом пути. Это достигается за счет выбора оптимальных углов поворота вектора суммарной тяги электроконвертоплана. В предлагаемом подходе балансировочный угол поворота винтомоторной группы является переменным в зависимости от аэродинамических характеристик электроконвертоплана, его винтомоторной группы. Поскольку винтомоторная группа оснащена приводами для ее поворота, то такой подход легко реализуется штатными средствами электроконвертоплана. Поворот вектора суммарной тяги, с одной стороны, приводит к увеличению эффективного значения аэродинамического коэффициента подъемной силой, а с другой стороны, сопровождается уменьшением проекции вектора суммарной тяги на вектор скорости полета, изменением лобового сопротивления, мощности, необходимой для создания тяги винтомоторной группы. Это обстоятельство и обуславливает необходимость решения задачи оптимизации с целью увеличения продолжительности или дальности полета на крейсерском режиме полета электроконвертоплана. В работе приводится методика расчета оптимальных углов поворота вектора суммарной тяги на основании уравнений установившегося движения электроконвертоплана на режиме крейсерского полета; выражения для суммарной мощности, необходимой для вращения винтов винтомоторной группы. Получены аналитические зависимости для оптимальных углов поворота вектора суммарной тяги в зависимости от соотношения площади крыла к суммарной ометаемой площади винтов винтомоторной группы и аэродинамического качества электроконвертоплана.

Ключевые слова: электроконвертоплан, винтомоторная группа, угол поворота, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

В работе рассматривается электроконвертоплан с подъемно-двигательной винтомоторной группой (ВМГ). Особенностью электроконвертоплана является возможность совмещать вертолетный и самолетный режимы полета. Традиционно на конвертопланах при переходе от вертолетного к самолетному режиму полета вектор суммарной тяги поворачивается на 90 град и остается таким на всех самолетных режимах полета [1–9]. Благодаря большим значениям аэродинамического качества и скорости полета, самолетный режим является наиболее длительным. Он используется на режимах набора высоты, крейсерского полета и при снижении [1–9]. Однако современные источники электрической энергии, применяемые на ЛА, имеют низкую удельную энергию по сравнению с традиционным топливом. Поэтому особенно важно сократить расход энергии и тем самым увеличить дальность, продолжительность полета электрокон-

вертоплана в самолетном режиме. Этого можно достичь путем увеличения его аэродинамического качества, вместе с тем аэродинамическое качество конвертопланов существенно уступает традиционным ЛА самолетной аэродинамической схемы.

В настоящей работе исследовалась возможность улучшения энергоэкономических характеристик беспилотного электроконвертоплана в установившихся самолетных режимах полета путем уменьшения расхода энергии винтомоторной группы в единицу времени или на единицу пройденного пути. Это достигается за счет выбора оптимальных углов поворота вектора суммарной тяги электроконвертоплана. В предлагаемом подходе угол поворота вектора суммарной тяги является переменным в зависимости от аэродинамических характеристик электроконвертоплана. Поскольку винтомоторная группа оснащена приводами для ее поворота, то такой подход легко реализуется штатными средствами.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривается установившийся режим полета электроконвертоплана в самолетной конфигурации. В установившемся режиме полета сумма моментов и сил, действующих на ЛА, равна нулю. Для выбора оптимальных углов отклонения вектора суммарной тяги ЛА, соответствующих установившемуся полету, необходимо воспользоваться уравнениями его движения. Схема сил, действующих на ЛА в самолетном режиме, приведена на рис. 1.

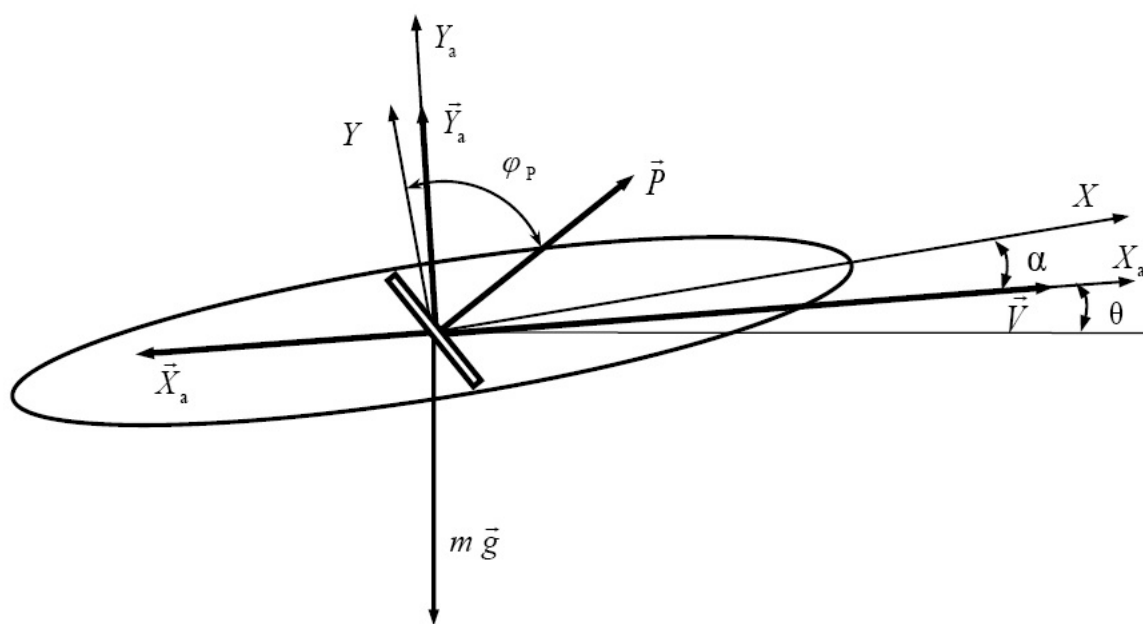


Рис. 1. Силы, действующие на ЛА в самолетном режиме
Fig. 1. Forces acting on the aerial vehicle in airplane mode

Векторы $\vec{P}$, $m\vec{g}$, $\vec{Y}_a$ и $\vec{X}_a$ определяют суммарную силу тяги двигателей ВМГ, силу тяжести, аэродинамическую подъемную силу и силу лобового сопротивления. Направление вектора тяги $\vec{P}$ зависит от углов установки ВМГ φ_p . На рис. 1 α , φ_p и θ – значения угла атаки, поворота осей вращения двигателей ВМГ и наклона траектории соответственно; OX , OY – оси связанной системы координат. На этом же рисунке для упрощения точки приложения векторов тяги, подъемной силы и силы лобового сопротивления совмещены с центром тяжести.

Уравнения установившегося движения ЛА, с учетом допущения, что углы отклонения осей вращения ВМГ изменяются синхронно и имеют одинаковое значение φ_p , можно записать в виде

$$P \sin(\varphi_p - \alpha) - X_a - mg \sin \theta = 0 ; \quad (1)$$

$$P \cos(\varphi_p - \alpha) + Y_a - mg \cos \theta = 0 . \quad (2)$$

Из уравнений (1), (2), с учетом выражения для аэродинамического качества ЛА $K = \frac{Y_a}{X_a}$, можно выразить силы потребной тяги и лобового сопротивления:

$$P = (Kmg \sin \theta + mg \cos \theta) / (\cos(\varphi_p - \alpha) + K \cdot \sin(\varphi_p - \alpha)); \quad (3)$$

$$X_a = \frac{\sin(\varphi_p - \alpha) \cdot mg \cdot \cos \theta - mg \cdot \sin \theta \cdot \cos(\varphi_p - \alpha)}{\cos(\varphi_p - \alpha) + K \cdot \sin(\varphi_p - \alpha)} . \quad (4)$$

Выражение для скорости полета имеет вид [10]

$$V = \sqrt{\frac{2 X_a}{c_x \rho S}} , \quad (5)$$

где ρ – плотность воздуха; c_x – аэродинамический коэффициент силы лобового сопротивления ЛА; S – площадь крыла ЛА.

Для электроконвертоплана с отклоняемой ВМГ суммарная потребная мощность N_Σ всех двигателей для установившегося прямолинейного полета складывается из мощности N_V , расходуемой на перемещение электроконвертоплана со скоростью, определяемой из выражения (5), индуктивной мощности N_i , расходуемой на отбрасывание воздуха, и мощности профильного сопротивления N_p , затрачиваемой для рассекаания воздуха и для преодоления трения лопастей ВМГ о воздух при их вращении [11]. Таким образом, потребная мощность N_n всех двигателей для установившегося прямолинейного полета

$$N_\Sigma = N_V + N_i + N_p . \quad (6)$$

Мощность, расходуемая на перемещение ЛА, определяется выражением

$$N_V = P_1 \times n \times V \sin(\varphi_p - \alpha) , \quad (7)$$

где P_1 – тяга одного двигателя ВМГ; n – число двигателей ВМГ.

Индуктивная мощность, т. е. мощность, непосредственно необходимая для создания тяги n двигателей ВМГ, определяется выражением

$$N_i = n \times P_1 u_i , \quad (8)$$

где u_i – индуктивная скорость.

Индуктивная скорость, в соответствии с импульсной теорией, определяется из выражения [11]

$$u_i = \frac{1}{\sqrt{(V \cos(\varphi_p - \alpha))^2 + (V \sin(\varphi_p - \alpha) + u_i)^2}} \times \frac{P_1}{2\rho\pi R^2}, \quad (9)$$

где R – радиус каждого винта ВМГ; πR^2 – ометаемая площадь винта одного двигателя ВМГ. В установившемся самолётном режиме полета рассматриваемого ЛА выполняется соотношение (см. рис. 2)

$$V \sin(\varphi_p - \alpha) + u_i \gg V \cos(\varphi_p - \alpha). \quad (10)$$

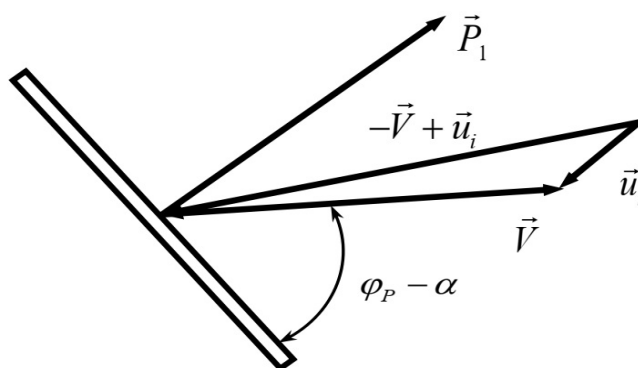


Рис. 2. Поток воздуха сквозь диск винта ВМГ
Fig. 2. Airflow through the propeller group disk area

С учетом (10) из выражения (9) находим

$$u_i \approx -\frac{V \sin(\varphi_p - \alpha)}{2} + \sqrt{\left(\frac{V \sin(\varphi_p - \alpha)}{2}\right)^2 + \frac{P_1}{2\rho\pi R^2}}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (8), получаем выражение для индуктивной мощности n двигателей ВМГ

$$N_i = -P \times \frac{V \sin(\varphi_p - \alpha)}{2} + P \times \sqrt{\left(\frac{V \sin(\varphi_p - \alpha)}{2}\right)^2 + \frac{P_1}{2\rho\pi R^2}}. \quad (12)$$

Мощность профильного сопротивления N_p n двигателей ВМГ имеет вид [11]

$$N_p = m_p \times \left(1 + 4.6 \frac{V^2 \cos^2(\varphi_p - \alpha)}{\omega^2 R^2}\right) \times P \times \sqrt{\frac{P_1}{2\rho\pi R^2}}, \quad (13)$$

где ω – угловая скорость вращения лопасти винта ВМГ; m_p – коэффициент профильного сопротивления.

Выражение для N_p (13) представим в виде

$$N_p = \frac{N_{po}}{\sqrt{2\rho\pi R^2 n}}, \quad (14)$$

где

$$N_{po} = m_p \times (1 + 4.6 \frac{V^2 \cos^2(\varphi_p - \alpha)}{\omega^2 R^2}) \times \sqrt{P^3}. \quad (15)$$

Для низкоскоростных электроконвертопланов с малыми диаметрами винтов ВМГ мощность профильного сопротивления слабо зависит от скорости набегающего потока воздуха, т. е. допустимо в первом приближении принимать ее постоянной [3, 11]. Поэтому ниже предполагается, что $N_{po} \approx const$.

Подставляя (7), (12) и (13) в (6), получим выражение для суммарной потребной мощности всех двигателей ВМГ

$$N_\Sigma = P \times \frac{V \sin(\varphi_p - \alpha)}{2} + P \times \sqrt{\left(\frac{V \sin(\varphi_p - \alpha)}{2}\right)^2 + \frac{P}{2\rho\pi R^2 n}} + \frac{N_{po}}{\sqrt{2\rho\pi R^2 n}}. \quad (16)$$

Суммарная мощность, необходимая для вращения винтов ВМГ:

$$N_{ВМГ} = \frac{N_\Sigma}{\eta_{КПД}}, \quad (17)$$

где $\eta_{КПД}$ – коэффициент полезного действия ВМГ, далее предполагается, что $\eta_{КПД} \approx const$.

Из анализа выражения (16) следует, что отклонение вектора суммарной тяги приводит к изменению потребной мощности ВМГ из-за его влияния на потребную тягу (3); проекцию вектора суммарной тяги на вектор скорости полета; скорость полета (5); мощность, необходимую для создания тяги ВМГ (12). Это обстоятельство и обуславливает необходимость решения задачи оптимизации с целью улучшения энергоэкономических характеристик электроконвертоплана.

За бесконечно малый промежуток dt времени ЛА переместится по горизонтали на величину

$$dL = V \times dt. \quad (18)$$

За время dt будет израсходовано некоторое количество энергии:

$$dE = N_{ВМГ} dt. \quad (19)$$

На основании (19) получим выражение для продолжительности полета

$$T = \int_{E_0}^{E_k} \frac{dE}{N_{ВМГ}}, \quad (20)$$

где E_0 и E_k – энергия батарей соответственно в начале и в конце полета на крейсерском режиме.

Наименьшему расходу энергии в единицу времени будет соответствовать наибольшая продолжительности полета. Этому условию отвечает полет с углом отклонения вектора суммарной тяги электроконвертоплана, который можно определить, найдя частную производную

$\frac{\partial N_{ВМГ}}{\partial \varphi_p}$ и приравняв ее к нулю.

Из (18) и (19) получим

$$dL = \frac{V}{N_{ВМГ}} dE = \frac{dE}{N_{ВМГ}/V}. \quad (21)$$

На основании (21) приходим к следующему выражению для определения дальности полета:

$$L = \int_{E_0}^{E_k} \frac{V}{N_{ВМГ}} dE.$$

Наименьшему расходу энергии на единицу пройденного пути будет соответствовать наибольшая дальность полета. Этому условию отвечает полет с углом отклонения вектора суммарной тяги электроконвертоплана, который можно определить, найдя частную производную

$\frac{\partial (N_{ВМГ} / V)}{\partial \varphi_p}$ и приравняв ее к нулю.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Найдя частную производную $\frac{\partial N_{ВМГ}}{\partial \varphi_p}$ и приравняв ее к нулю, при выполнении условия

(10), и пренебрегая изменением силы лобового сопротивления при повороте ВМГ, на основании (3–5), (14), (16) и (17) получим, что для увеличения продолжительности полета на этапе горизонтального полета в самолетной конфигурации угол φ_p отклонения вектора суммарной тяги должен определяться из уравнения

$$\sqrt{\sin^4(\varphi_p - \alpha) + \mu \sin(\varphi_p - \alpha)} + \sin^2(\varphi_p - \alpha) + \mu \times (\sin(\varphi_p - \alpha) - K \cos(\varphi_p - \alpha)) = 0, \quad (22)$$

где

$$\mu = \frac{c_x S}{n \pi R^2}. \quad (23)$$

На рис. 3 приведено семейство графиков зависимостей $(\varphi_p - \alpha)$, полученных на основании (22) при различных значениях аэродинамического качества K и μ .

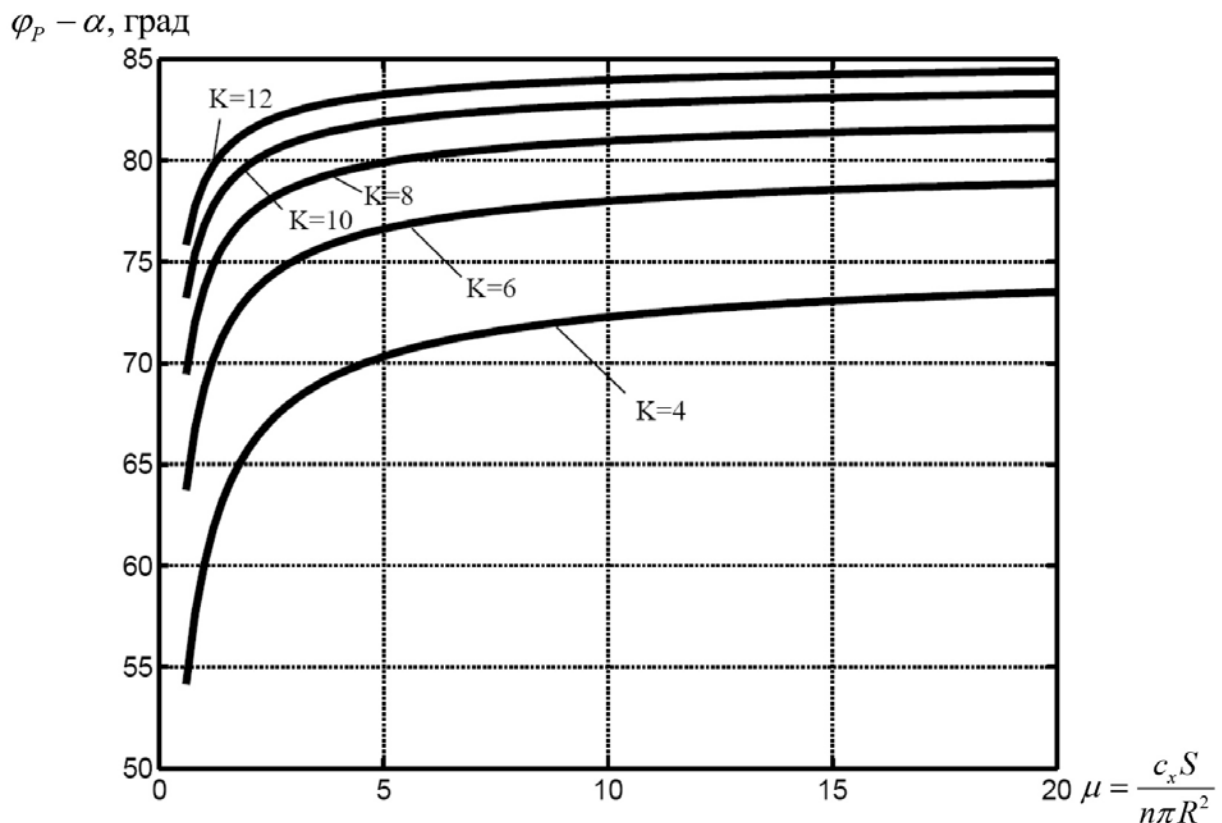


Рис. 3. Семейство графиков зависимостей угла поворота ВМГ для увеличения продолжительности полета на этапе горизонтального полета в самолетной конфигурации
Fig. 3. A family of the dependency plots of the tilting angle of the propeller group to increase the flight endurance at the horizontal flight phase in the aircraft configuration

Поскольку угол поворота вектора суммарной тяги электроконвертоплана на самолетных режимах полета близок к 90 град, то уравнение (22) можно упростить и значение угла ($\varphi_p - \alpha$) в градусах без большой погрешности вычислять по формуле

$$\varphi_p - \alpha \approx 90 - 57.3 \frac{1 + \sqrt{1 + \mu} + \mu}{\mu} \frac{1}{K}.$$

Для $\mu \gg 1$ из уравнения (22) находим

$$\operatorname{tg}(\varphi_p - \alpha) \approx K. \quad (24)$$

Определив частную производную $\frac{\partial P}{\partial \varphi_p}$ для выражения силы потребной тяги (3) и приравняв ее к нулю, получим, что выражение (24) также соответствует углу отклонения вектора суммарной тяги, обеспечивающего минимизацию потребной тяги на этапах набора высоты, горизонтального полета и снижения в самолетной конфигурации, за исключением снижения с углом наклона траектории

$$\operatorname{tg} \theta = -\frac{1}{K}.$$

В этом случае потребная тяга равна нулю.

Таким образом, значения оптимальных углов поворота ВМГ для увеличения продолжительности полета зависят от отношения площади крыла ЛА к суммарной ометаемой площади винтов ВМГ и его аэродинамических характеристик. При значениях $\mu \gg 1$ оптимальные углы поворота ВМГ определяются только значением аэродинамического качества ЛА и соответствуют минимальной потребной тяге в самолетной конфигурации.

Для оптимизации угла поворота вектора суммарной тяги электроконвертоплана с целью увеличения дальности полета необходимо приравнять к нулю частную производную $\frac{\partial(N_{ВМГ}/V)}{\partial\varphi_p}$. При выполнении условия (10) и пренебрегая изменением силы лобового сопротивления при повороте ВМГ, на основании (3–5), (14), (16) и (17) получим, что для увеличения дальности полета на этапе горизонтального полета угол φ_p отклонения вектора суммарной тяги ВМГ должен определяться из уравнения

$$\begin{aligned} & \sqrt{\sin^3(\varphi_p - \alpha) + 0.5(3\sin(\varphi_p - \alpha)(\sin(\varphi_p - \alpha) - K\cos(\varphi_p - \alpha)) - 1)}\sqrt{\mu} = \\ & = \frac{N_{po}}{\sqrt{(mg)^3}} \sqrt{(K\sin(\varphi_p - \alpha) + \cos(\varphi_p - \alpha))^3} \sqrt{\mu}. \end{aligned} \quad (25)$$

Поскольку угол поворота вектора суммарной тяги электроконвертоплана на самолетных режимах полета близок к 90 град, уравнение (25) можно упростить и значение угла $(\varphi_p - \alpha)$ в градусах без большой погрешности определять по формуле

$$\varphi_p - \alpha \approx \frac{30}{\pi} \frac{1}{(K + n_{po}\sqrt{K})} ((4\sqrt{K^3} + 3\pi\sqrt{K}) \times n_{po} + 3\pi K - 4(1 + \frac{1}{\sqrt{\mu}})), \quad (26)$$

где

$$n_{po} = \frac{N_{po}}{\sqrt{(mg)^3}}.$$

Из (26) следует, что угол поворота ВМГ для увеличения дальности полета зависит от аэродинамического качества ЛА и характеристик ВМГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приводится методика расчета оптимальных углов отклонения вектора суммарной тяги ВМГ электроконвертоплана с точки зрения увеличения продолжительности и дальности полета на основании уравнений установившегося его движения в самолетной конфигурации с использованием априорной информации о его аэродинамических характеристиках и ВМГ. Получены приближенные аналитические зависимости для оптимальных углов отклонения вектора суммарной тяги ВМГ на этапе горизонтального полета, в зависимости от отношения площади крыла ЛА к суммарной ометаемой площади винтов винтомоторной группы и аэродинамического качества электроконвертоплана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kim H.D., Perry A.T., Ansell Ph.J.** A review of distributed electric propulsion concepts for air vehicle technology // 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. Cincinnati, Ohio, 9–11 July 2018. Pp. 77–98. DOI: 10.2514/6.2018-4998
2. **Ciopcia M., Szczepanski C.** Quad-Tiltrotor – modelling and control // Journal of Marine Engineering & Technology. 2017. Vol. 16. Pp. 331–336. DOI: 10.1080/20464177.2017.1388068
3. **Cawez A., Collette A., Cotteleer L. и др.** Autonomous electric vertical takeoff and landing aircraft [Электронный ресурс] // AIAA Graduate Team Aircraft Competition 2018-2019. AIAA. 2019. 89 p. URL: https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/education-and-careers/university-students/design-competitions/2nd-place-grad-team-aircraft.pdf?sfvrsn=2733cf6b_0 (дата обращения: 21.04.2021).
4. **Vuruskan A.** Dynamic modeling of a fixed-wing VTOL UAV / A. Vuruskan, B. Yuksek, U. Ozdemir, A. Yukselen, G. Inalhan // Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE. Orlando, Florida, USA, May 2014. Pp. 483–491. DOI: 10.1109/ICUAS.2014.6842289
5. **Zaibin Ch., Hongguang J.** Design of flight control system for a novel tilt-rotor UAV // Journal of Complexity. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–14. DOI: 10.1155/2020/4757381
6. **Yukse B.** Transition flight modeling of a fixed-wing VTOL UAV / B. Yuksek, A. Vuruskan, U. Ozdemir, M.A. Yukselen, G. Inalhan // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2016. Vol. 84, no. 1–4. Pp. 83–105. DOI: 10.1007/s10846-015-0325-9
7. **Flores G., Lozano R.** Transition flight control of the quad-tilting rotor convertible MAV // International Conference on Unmanned Aircraft Systems. IEEE, Atlanta, 28–31 May 2013. Pp. 789–794. DOI: 10.1109/icuas.2013.6564761
8. **Finger D.F., Braun C., Bil C.** The impact of electric propulsion on the performance of VTOL UAVs // CEAS Aeronautical Journal. 2019. Vol. 10. Pp. 827–843. DOI: 10.1007/S13272-018-0352-X
9. **Oner K.T.** Dynamic model and control of a new quadrotor unmanned aerial vehicle with tilt-wing mechanism / K.T. Oner, E. Cetinsoy, M. Unel, M. Aksit, I. Kandemir, K. Gulez // International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering. 2008. Vol. 2, no. 9. Pp. 1008–1013.
10. **Остославский И.В., Стражева И.В.** Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1969. 500 с.
11. **Johnson W.** Helicopter theory. Courier Corporation, 2012. 1120 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бусурин Владимир Игоревич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), busurinvi@mail.ru.

Мулин Павел Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета), pvmpro@mail.ru.

OPTIMIZATION OF THE TRIMMING TILTING ANGLE OF THE ELECTRIC TILTROTOR PROPELLER GROUP

Vladimir I. Busurin¹, Pavel V. Mulin¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

ABSTRACT

The paper examined the possibility of improving the energy efficient performance of an electric tiltrotor with a lift-propulsion propeller group for a steady flight mode by reducing the energy consumption of the propeller group per unit of time or per unit of the path traveled by the electric tiltrotor. This is achieved by selecting the optimal tilting angles of the electric tiltrotor total thrust vector. In the proposed approach, the trimming tilting angle of the propeller group is variable, depending on the aerodynamic characteristics of the electric tiltrotor, its propeller group. Since the propeller group is equipped with the drives for tilting them, this approach is easily implemented by the conventional facilities of the electric tiltrotor. The tilting of the total thrust vector, on the one hand, leads to an increase in the effective value of the aerodynamic lift coefficient and, on the other hand, it is accompanied by a decrease in the projection of the total thrust vector on the flight speed vector, a change in the drag and power required to create the thrust of the propeller group. This circumstance makes it necessary to solve the optimization problem in order to increase the maximum endurance and long-range capabilities in the cruise mode of the electric tiltrotor flight. The paper presents a method for calculating the optimal tilting angles of the total thrust vector based on the equations of steady motion of the electric tiltrotor in the cruise flight mode, the expression for the total power required for the rotation of the propellers of the propeller group. The analytical dependences for the optimal tilting angles of the total thrust vector are obtained depending on the ratio of the wing area to the total propeller-disk area of the propeller group and the aerodynamic quality of the electric tiltrotor.

Key words: electric tiltrotor, propeller group, tilting angle, optimization.

REFERENCES

1. Kim, H.D., Perry, A.T. and Ansell, Ph.J. (2018). *A review of distributed electric propulsion concepts for air vehicle technology*. 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. July 9–11, Cincinnati, Ohio, pp. 77–98. DOI: 10.2514/6.2018-4998
2. Ciopcia, M. and Szczepanski, C. (2017). *Quad-Tiltrotor – modelling and control*. Journal of Marine Engineering & Technology, vol. 16, pp. 331–336. DOI: 10.1080/20464177.2017.1388068
3. Cawez, A., Collette, A., Cotteleer, L. and others. (2019). *Autonomous electric vertical takeoff and landing aircraft*. AIAA Graduate Team Aircraft Competition 2018-2019, AIAA, 89 p. Available at: https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/education-and-careers/university-students/design-competitions/2nd-place-grad-team-aircraft.pdf?sfvrsn=2733cf6b_0 (accessed: 22.04.2021).
4. Vuruskan, A., Yuksek, B., Ozdemir, U., Yukselen, A. and Inalhan, G. (2014). *Dynamic modeling of a fixed-wing VTOL UAV*. Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), IEEE, Orlando, Florida, USA, pp. 483–491. DOI: 10.1109/ICUAS.2014.6842289
5. Zaibin, Ch. and Hongguang, J. (2020). *Design of flight control system for a novel tiltrotor UAV*. Journal of Complexity, vol. 2020, pp. 1–14. DOI: 10.1155/2020/4757381
6. Yuksek, B., Vuruskan, A., Ozdemir, U., Yukselen, M.A. and Inalhan, G. (2016). *Transition flight modeling of a fixed-wing VTOL UAV*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 84, no. 1–4, pp. 83–105. DOI: 10.1007/s10846-015-0325-9
7. Flores, G. and Lozano, R. (2013). *Transition flight control of the quad-tilting rotor convertible MAV*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, IEEE, Atlanta, pp. 789–794. DOI: 10.1109/icuas.2013.6564761

8. Finger, D.F., Braun, C. and Bil, C. (2019). *The Impact of electric propulsion on the performance of VTOL UAVs*. CEAS Aeronautical Journal, vol. 10, pp. 827–843. DOI: 10.1007/S13272-018-0352-X
9. Oner, K.T., Cetinsoy, E., Unel, M., Aksit, M., Kandemir, I. and Gulez, K. (2008). *Dynamic model and control of a new quadrotor unmanned aerial vehicle with tilt-wing mechanism*. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, vol. 2, no. 9, pp. 1008–1013.
10. Ostoslavskij, I.V. and Strazheva, I.V. (1969). *Dinamika poleta. Traektorii letatelnykh apparatov* [Flight dynamics. Aircraft flight paths]. Moscow: Mashinostroyeniye, 500 p. (in Russian)
11. Johnson, W. (2012). *Helicopter theory*. Courier Corporation, 1120 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. Busurin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of "Automatic and Intelligent Control Systems" of the Moscow Aviation Institute (National Research University), busurinvi@mai.ru.

Pavel V. Mulin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of "Automatic and Intelligent Control Systems" of the Moscow Aviation Institute (National Research University), pvmpro@mail.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

15.05.2021
22.07.2021

Received
Accepted for publication

15.05.2021
22.07.2021

УДК 539.3:534.1

DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-61-74

РЕАКЦИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАГРУЖЕННОЙ ОБОЛОЧКИ ВРАЩЕНИЯ С ЖЕСТКОЙ НОСОВОЙ ЧАСТЬЮ АППАРАТА НА УДАРНУЮ ВОЛНУ В ЖИДКОСТИ

И.К. ТУРКИН¹, Д.А. РОГОВ², В.А. ГРАЧЕВ²

¹Московский авиационный институт, г. Москва, Россия

²АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина ГНЦ РФ, г. Обнинск, Россия

В статье исследуется задача гидроупругого взаимодействия слабой ударной волны с предварительно нагруженной осевыми усилиями оболочкой вращения с жесткой носовой частью. Оболочка заключена в жесткий параболический экран, то есть влияние торца и дифракция ударной волны не учитываются. Идеально сжимаемой считается жидкость, передаваемое полное гидродинамическое давление которой при комплексном взаимодействии с поверхностью оболочки может быть разложено на падающую, отраженную и излученную волны. Задача гидроупругого взаимодействия указанных ударных фронтов с нагруженной параболической оболочкой, имеющей жесткую носовую часть, в связанной постановке сводится к решению волновых уравнений нелинейной системы уравнений движения оболочки при соответствующих начальных и граничных условиях, в которых безразмерное смещение этой носовой части под действием гидродинамических сил определяется интегрированием ее уравнения движения. Уравнения, описывающие зависимости перемещений носовой части от времени взаимодействия с ударной волной, учитывают обобщенные гидродинамические силы, в том числе второй категории, непосредственно связанные с массой присоединенной жидкости. Определение напряженно-деформированного состояния при взаимодействии с ударной волной в жидкости упругого параболоида вращения в виде оболочки, содержащей в носовой части жесткую вставку, сводится к решению системы нелинейных уравнений движения оболочки с учетом граничных условий по закреплениям в торце оболочки и условий сопряжения оболочки и вставки. Безразмерные перемещения носовой части под действием гидродинамических сил определяются интегрированием уравнений движения при начальных условиях по смещениям вставки в осевых направлениях.

Ключевые слова: оболочка, жесткая носовая часть, ударная волна, жидкость, напряженно-деформированное состояние, перемещения.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимодействия плоской ударной волны в идеально сжимаемой жидкости с нагруженной упругой оболочкой вращения, имеющей жесткую носовую часть, носит приоритетный характер при разработке эффективных и надежных аппаратов, функционирующих в жидкости, что неоднократно подчеркивалось в работах [1–7].

Решение этой проблемы в представленной постановке позволяет определять напряженно-деформированное состояние упругого параболоида вращения (оболочки), содержащего в носовой части жесткую вставку при указанном нагружении. Полученные результаты позволяют проектировать агрегаты перспективных аппаратов, функционирующих в жидкой среде.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МЕТОД РЕШЕНИЯ

В предлагаемой работе рассматривается модель взаимодействия плоской ударной волны в идеальной сжимаемой жидкости с предварительно нагруженной упругой оболочкой вращения. Оболочка имеет жесткую носовую часть, которая заключена в жесткий параболический экран, что исключает влияние торца на дифракцию ударной волны (рис. 1). Представленные на рисунке обозначения: f – фокальный параметр, α_0 – угол между нормалью к поверхности и осью симметрии в начальном сечении, α_n – угол между нормалью к поверхности и осью симметрии в конечном сечении, L – осевая длина оболочки, S – криволинейная координата. В данной обла-

сти основные результаты получены для задач о движении в жидкости тел произвольной формы под действием акустической волны давления и представлены в работах [8–14].

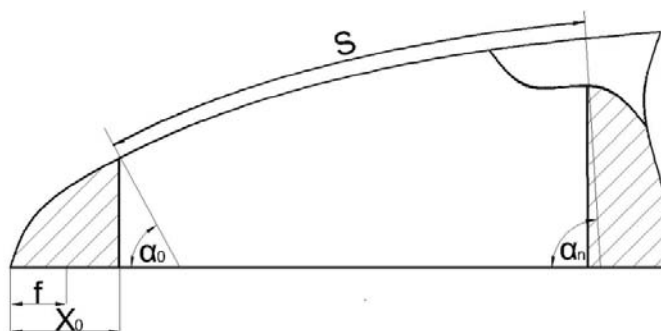


Рис. 1. Параболическая оболочка с жесткой носовой частью
Fig. 1. Parabolic shell with a rigid nose insertion

Давление и поле скоростей жидкости подчиняется линейным волновым уравнениям относительно векторного поля:

$$\nabla^2 V = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}, \quad V = \text{grad } \Psi. \quad (1)$$

Здесь оператор Лапласа ∇ и оператор градиента выражены в некоторой выбранной криволинейной ортогональной системе координат (c – скорость звука в жидкости). Потенциал скоростей Ψ и давление среды связаны следующей зависимостью:

$$p = -\rho_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (2)$$

где потенциал Ψ также удовлетворяет волновому уравнению (ρ_0 – плотность жидкости):

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Принимая во внимание линейность внешней гидродинамической задачи, полное гидродинамическое давление можно представить в виде суммы давлений в падающей p_1 , отраженной p_2 и излученной p_3 волнах:

$$p = p_1 + p_2 + p_3. \quad (4)$$

Составляющая $(p_1 + p_2) / p_0$ (p_0 – давление на фронте волны) суммарного давления на оболочку задается соотношением [10]

$$\frac{p_1 + p_2}{p_0} = \left\{ e^{-\eta(\tau-X)} + \frac{1}{2} \left[e^{-a_1(\tau-X)} - e^{-a_2(\tau-X)} \right] - \frac{\eta}{2} \left[\frac{e^{-a_1(\tau-X)} - e^{-\eta(\tau-X)}}{\eta - a_1} + \frac{e^{-a_2(\tau-X)} - e^{-\eta(\tau-X)}}{\eta - a_2} \right] \right\} H(\tau - X), \quad (5)$$

где a_1 и a_2 – некоторые постоянные, η – параметр, характеризующий спад давления за фронтом волны. Давление излучения p_3 записывается в виде

$$p_3 = \rho_0 c \left[\dot{W} - KW + K^2 \int_0^\tau W e^{-K(\tau-\tau_1)} d\tau_1 \right], \quad (6)$$

здесь K – безразмерная средняя кривизна поверхности оболочки.

Движение оболочки определяется из решения системы нелинейных уравнений

$$\begin{aligned}\ddot{U} &= k_1 \left[\cos^3 \alpha (N_1 - \theta Q)' + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} (N_1 - N_2 - \theta Q) + \cos^3 \alpha (\theta N_1 + Q) + \frac{\theta P}{k_0} \right]; \\ \ddot{W} &= k_1 \left[\cos^3 \alpha (Q - \theta N_1)' + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} (Q + \theta N_1) - \cos^3 \alpha (N_1 - \theta Q) - N_2 \cos \alpha - \frac{P}{k_0} \right]; \\ \ddot{\Phi} &= k_1 \left[-(M_1 \cos^3 \alpha)' - \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} (M_1 - M_2) + \theta M_2 \cos \alpha + \frac{12Q}{k_0} \right],\end{aligned}\quad (7)$$

где $k_0 = \frac{h}{R}$; $k_1 = \frac{a^2}{c^2}$; $a = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}$ – скорость распространения продольных возмущений в оболочке при известных величинах h – толщины оболочки, R – радиуса оболочки, c – скорости распространения звуковых волн в материале оболочки, ρ , E и μ – плотности, модуля упругости первого рода и коэффициента Пуассона материала оболочки соответственно.

Здесь U , W – продольные и поперечные перемещения, Φ – угол поворота прямолинейно-го волокна, перпендикулярного срединной поверхности оболочки до деформации.

Силовые факторы оболочки связаны с компонентами деформации геометрическими соотношениями

$$N_1 = (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2) - N_1^*; N_2 = (\mu \varepsilon_1 + \varepsilon_2) - N_2^*; M_1 = -\mu \varepsilon_1 - \varepsilon_2; Q = \frac{\pi^2}{24} (1 - \mu) \varepsilon_{1,2}, \quad (8)$$

где $N_{1,2}^*$ – безразмерные предварительные продольные усилия, $M_{1,2}$ – безразмерные моменты и Q – безразмерные перерезывающие силы. Здесь соотношения между безразмерными и размерными силовыми факторами следующие:

$$N_i^* = \frac{\bar{N}_i^*}{D_0} N_i = \frac{\bar{N}_i}{D_0}; M_i = \frac{\bar{M}_i}{D_0} \quad (i = 1, 2); Q = \frac{\bar{Q}}{D_0}, \quad (9)$$

где D_0 – цилиндрическая жесткость.

Связь компонент деформаций с обобщенными координатами определяется зависимостями

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \cos^3 \alpha (U' + W) + \frac{Q^2}{2}; \varepsilon_2 = \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} U + \cos \alpha W; \varepsilon_{12} = \cos^2 \alpha (W' + U) + \Phi; \\ \varepsilon_1 &= \Phi' \cos^3 \alpha; \varepsilon_2 = \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \Phi.\end{aligned}\quad (10)$$

Задача решается при нулевых начальных условиях:

$$U = W = \Phi = 0, \dot{U} = \dot{W} = \dot{\Phi} = 0 \text{ при } \tau = 0. \quad (11)$$

Граничные условия на защемленном торце оболочки имеют вид

$$U = W = \Phi = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_n. \quad (12)$$

На торце жесткой носовой части $\alpha = \alpha_n$ выполняются условия, соответствующие перемещению торца оболочки в осевом направлении:

$$U = \Delta \sin \alpha_0, W = -\Delta \cos \alpha_0, \Phi = 0 \text{ при } \alpha = \alpha_n. \quad (13)$$

Здесь Δ – безразмерное смещение жесткой носовой части в осевом направлении, нормированное делением на фокальный параметр параболы f . Величина Δ определяется из решения уравнения движения жесткой носовой части как твердого тела [15]:

$$\ddot{\Delta}(\tau) = \frac{f}{Mc^2} [\sum_{i=1}^3 q_i(\tau) - G], \quad (14)$$

где $q_i(\tau)$ – результирующая нагрузка, обусловленная составляющей давления p_i , M – масса носовой части оболочки и G – осевая сила реакции оболочки на смещение торца $\alpha = \alpha_0$. Для определения $q_i(\tau)$ необходимо проинтегрировать по поверхности жесткой носовой части величины элементарных нагрузок, проекция которых на ось симметрии оболочки имеет вид

$$dq_i(\tau) = p_i dS \cos \gamma, \quad i = 1, 2, 3. \quad (15)$$

Таким образом, для составляющих $q_i(\tau)$ будем иметь

$$q_i(\tau) = \iint_S p_i \cos \alpha dS, \quad (16)$$

т. к. для параболоида $\gamma = \alpha$. Обобщенную гидродинамическую силу первой категории [12], представляющую собой результирующую давлений в падающей Q_1 и отраженной Q_2 волнах, найдем интегрированием соотношения (5) и представим в следующей безразмерной форме:

при $\tau \leq \frac{1}{2} \text{tg}^2 \alpha_0$

$$Q_1 + Q_2 = K_1 K_5 P_0 \left[\frac{\eta^2 - 2\eta}{\eta^2 - 4\eta + 2} (1 - e^{-\eta\tau}) + \frac{\eta}{2} \left(\frac{1 - e^{-a_1\tau}}{a_1 - \eta} + \frac{1 - e^{-a_2\tau}}{a_2 - \eta} \right) \right] \quad (17)$$

и при $\tau > \frac{1}{2} \text{tg}^2 \alpha_0$

$$Q_1 + Q_2 = K_1 K_5 P_0 \left[\left(e^{\frac{1}{2} \text{tg}^2 \alpha_0} - 1 \right) \left(\frac{\eta^2 - 2\eta}{\eta^2 - 4\eta + 2} e^{-\eta\tau} \right) + \frac{\eta}{2} \frac{e^{-a_1\tau}}{a_1 - \eta} + \frac{\eta}{2} \frac{e^{-a_2\tau}}{a_2 - \eta} - \frac{e^{-\eta\tau}}{\eta^2 - 4\eta + 2} \right], \quad (18)$$

где введены безразмерные параметры

$$K_1 = \frac{a^2}{c^2}; \quad K_5 = \frac{8\pi\rho f^3}{M\eta}.$$

Результирующая q_3 давления излучения, возникающего при поступательном движении параболоида вращения, или гидродинамическая сила второй категории, определяется с помощью зависимостей, полученных в работе [9] на основании линейной аппроксимации переходной функции $F(\tau)$ [12]:

при $\tau < \tau^*$

$$q_3(\tau) = -q_0 c \dot{\Delta}(\tau) + \frac{q_0^2 f}{2m} \Delta(\tau), \quad (19)$$

при $\tau \geq \tau^*$

$$q_3(\tau) = -q_0 c \dot{\Delta}(\tau) + \frac{q_0^2 f}{2m} \Delta(\tau) - \frac{q_0^2 f}{2m} \Delta(\tau - \tau^*), \quad (20)$$

$$q_0 = \rho_0 c \iint_S \cos^2 \alpha dS, \quad \tau^* = \frac{2mc}{q_0 f}.$$

Здесь q_0 – нагрузка, возникающая на поверхности тела при действии давления отраженной волны в соответствии с гипотезой плоского излучения, τ^* – время, после которого жидкость можно считать несжимаемой в определении нагрузки на носовую часть, m – присоединенная масса жидкости.

Величина присоединенной массы жидкости в первом приближении определяется соотношением [12]

$$m = \frac{2}{3} \pi \rho_0 x_0 y_0^2 \frac{c_0}{2 - c_0} = \frac{1}{3} \pi \rho_0 f^3 \operatorname{tg}^4 \alpha_0 \left(\frac{c_0}{2 - c_0} \right) = \frac{4}{3} \frac{\rho_0}{\rho^*} \frac{c_0}{2 - c_0}, \quad (21)$$

$$\text{где } c_0 = \frac{\sqrt{l^4 - 1} + \ln(l^2 \sqrt{l^4 - 1})}{2(l^2 - 1)\sqrt{l^2 - 1}}, \quad l = \frac{2}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Значение q_0 найдем с учетом уравнения для образующей оболочки в прямолинейной системе координат

$$y^2 = 2fx. \quad (22)$$

Это значение имеет вид

$$q_0 = 2\pi \rho_0 c \int_0^{\frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \alpha_0} y \sqrt{1 - (y')^2} \cos \alpha dx = \frac{\pi \rho_0 c f^3}{2 \operatorname{tg}^2 \alpha_0} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^4 \alpha_0} - 1 \right). \quad (23)$$

Тогда время τ^* будет равно

$$\tau^* = \frac{\operatorname{tg}^8 \alpha_0}{3(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^4 \alpha_0} - 1)} \cdot \left(\frac{c_0}{2 - c_0} \right). \quad (24)$$

Принимая во внимание, что при $\tau \geq \tau^*$ жидкость считается несжимаемой и ее реакция на движение носовой части пропорциональна ускорению, нагрузку $q_3(\tau)$ можно записать в виде

$$q_3(\tau) = -q_0 c \dot{\Delta}(\tau) + \frac{q_0^2 f}{2m} \Delta(\tau) \text{ при } \tau < \tau^*, \quad (25)$$

$$q_3(\tau) = -m \ddot{\Delta}(\tau) \text{ при } \tau \geq \tau^*. \quad (26)$$

Подставим в эти соотношения выражения (21) для m и (23) для q_0 и приведем $q_3(\tau)$ к безразмерному виду умножением на коэффициент f/Mc^2 :

$$Q_3(\tau) = K_6 [-\Delta(\tau) + K_7 \dot{\Delta}(\tau)] \text{ при } \tau \leq \tau^*, \quad (27)$$

$$Q_3(\tau) = -\frac{m}{M} \ddot{\Delta}(\tau) \text{ при } \tau > \tau^*, \quad (28)$$

где введены безразмерные параметры

$$K_6 = \frac{\pi \rho_0 f}{2 M \operatorname{tg}^2 \alpha_0} \left(\sqrt{1 + \operatorname{tg}^4 \alpha_0} - 1 \right); K_7 = \frac{3}{4} \frac{2 - c_0}{c_0} \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^4 \alpha_0} - 1}{\operatorname{tg}^6 \alpha_0}. \quad (29)$$

Осевая реакция оболочки G может быть представлена в виде

$$G = \frac{M c^2}{f} K_1 K_3 G_0, \quad (30)$$

где

$$K_3 = \frac{2 \pi \rho h f^2 \operatorname{tg} \alpha_0}{M}; G_0 = (N_1 - \theta Q) \sin \alpha_0 - (Q + \theta N_1) \cos \alpha_0. \quad (31)$$

В итоге уравнения движения жесткой носовой части в осевом направлении можно записать в безразмерной форме

$$\ddot{\Delta}(\tau) = Q_1 + Q_2 + Q_3 + K_1 K_3 G \text{ при } \tau \leq \tau^*, \quad (32)$$

$$\left(1 + \frac{m}{M}\right) \ddot{\Delta}(\tau) = Q_1 + Q_2 + K_1 K_3 G_0 \text{ при } \tau > \tau^*, \quad (33)$$

где $Q_1 + Q_2$ и Q_3 определяются выражениями (17), (18) и (27), (28).

Начальные условия

$$\Delta = 0, \dot{\Delta} = 0 \text{ при } \tau = 0 \quad (34)$$

соответствуют состоянию покоя носовой части в момент падения ударной волны.

Таким образом, задача напряженно-деформированного состояния упругого параболоида вращения в виде оболочки, содержащей в носовой части жесткую вставку и взаимодействующую с ударной волной в жидкости, сводится к решению нелинейной системы уравнений движения оболочки (7) при начальных условиях (11) и граничных условиях (12) и (13), в которых безразмерное смещение жесткой носовой части под действием гидродинамических сил (17), (18) и (27), (28) определяется интегрированием уравнений движения (32), (33) при начальных условиях (34).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ В ОБОЛОЧКЕ

В результате численного интегрирования указанных уравнений движения методом Рунге – Кутты – Мерсона по времени в комбинации с методом прямых по координате определяется суммарное давление на оболочку, ее напряженно-деформированное состояние и кинематические параметры движения жесткой носовой части. Оболочка из алюминия имеет следующие геометрические параметры: $f = 164 \text{ мм}$, $h = 2,5 \text{ мм}$, $\alpha_0 = 54,5^\circ$, $\alpha_n = 74,3^\circ$. На оболочку падает плоская ударная волна, давление на фронте которой составляет $p_0 = 4 \text{ МПа}$ и $\eta = 0,4$. Принимается, что предварительное осевое усилие отсутствует $N_{1,2}^* = 0$. Соответствующие безразмерные параметры задачи таковы: $K_0 = h/f = 1,52 \cdot 10^{-2}$; $K_1 = 13,9$ и $P_0 = 4,72 \cdot 10^{-5}$.

Результаты расчета суммарного давления P_Σ показаны на рис. 2. Здесь представлены зависимости P_Σ от времени (рис. 2, а) в различных сечениях оболочки. Кривая 1 соответствует сечению $\alpha = 56,48^\circ$, кривая 2 – сечению $\alpha = 66,38^\circ$ и кривая 3 – сечению $\alpha = 72,32^\circ$. На рис. 2, б приведены эпюры давления P_Σ вдоль образующей для значений времени $\tau = 2,6; 6,0; 7,2$ (кривые 1, 2, 3 соответственно). Вертикальной чертой отмечено положение переднего фронта волны

на оболочке. Из приведенных результатов следует, что максимальные давления имеются вблизи места крепления оболочки к жесткой носовой части, где поперечные прогибы малы и давление излучения невелико.

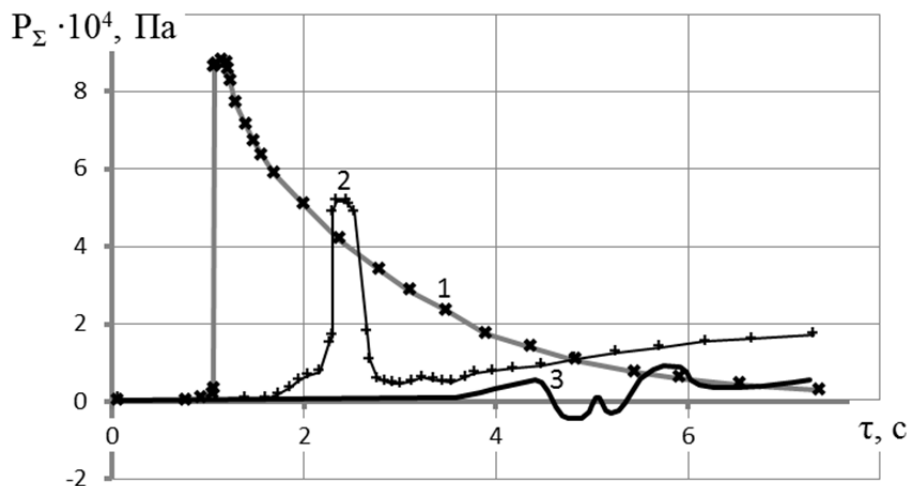


Рис. 2а. Суммарное давление на внешней поверхности оболочки в нескольких сечениях, зависимость от времени

Fig. 2a. Summing pressure on the outer shell surface in multiple sections, dependence on time

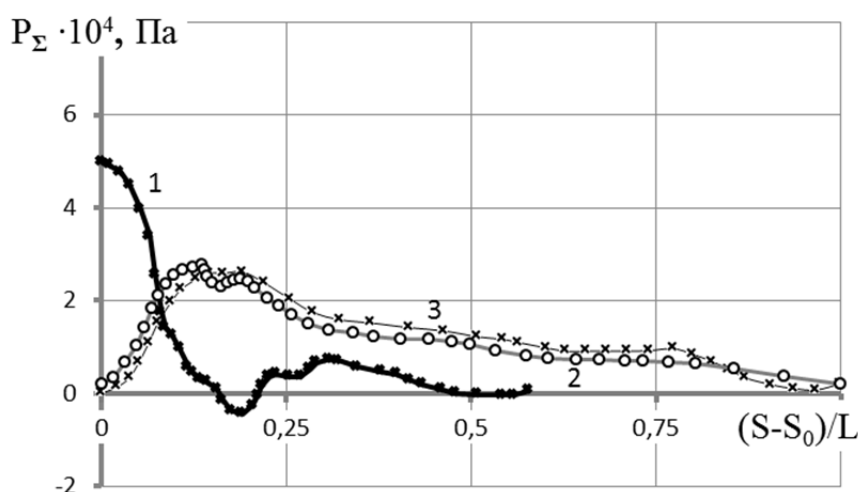


Рис. 2б. Суммарное давление на внешней поверхности оболочки для $\tau = 2,6; 6,0; 7,2$ с, распределение вдоль образующей

Fig. 2b. Summing pressure on the outer shell surface for $\tau = 2.6; 6.0; 7.2$ sec, distribution along the generatrix

Смещения Δ , скорости $\dot{\Delta}$ и ускорения $\ddot{\Delta}$ жесткой носовой части даны на рис. 3. Здесь приводятся кинематические характеристики движения жесткой носовой части, полученные с учетом давления излучения p_3 (кривые 1, 2, 3) и в случае когда $p_3 = 0$ (соответственно кривые 4, 5, 6). Следует отметить, что на начальном этапе взаимодействия, когда ударная волна находится на жесткой вставке, т. е. при $\tau \leq 0,98$, учет давления p_3 не оказывает заметного влияния на параметры ее движения. Для остальных значений времени кривые, определенные с учетом p_3 , имеют сглаженный характер.

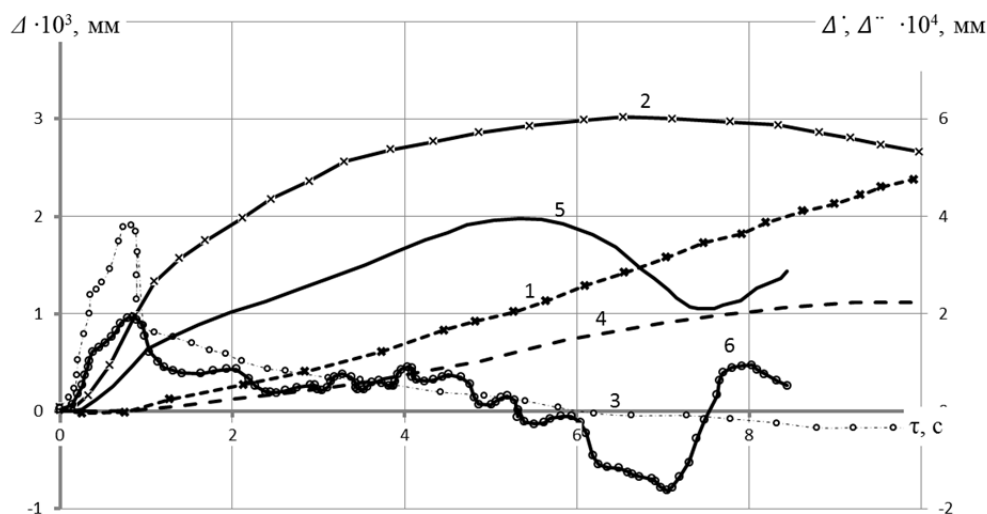


Рис. 3. Смещения Δ , скорость $\dot{\Delta}$ и ускорение $\ddot{\Delta}$ жесткой носовой части, зависимость от времени

Fig. 3. Offsets Δ , velocity $\dot{\Delta}$ and acceleration $\ddot{\Delta}$ of the rigid nose insertion, dependence on time

Распределение поперечных прогибов W вдоль образующей показаны на рис. 4 для значений времени $\tau = 2,2$ и $6,0$ (соответственно кривые 1, 3 и 2, 4). Правая шкала относится к расчетному случаю, учитывающему давление p_3 , а левая – случаю $p_3 = 0$. Сравнение полученных результатов показывает, что максимальные значения прогибов, найденные без учета давления излучения, локализованы вблизи переднего фронта волны и на порядок выше максимальных прогибов, рассчитанных с учетом p_3 .

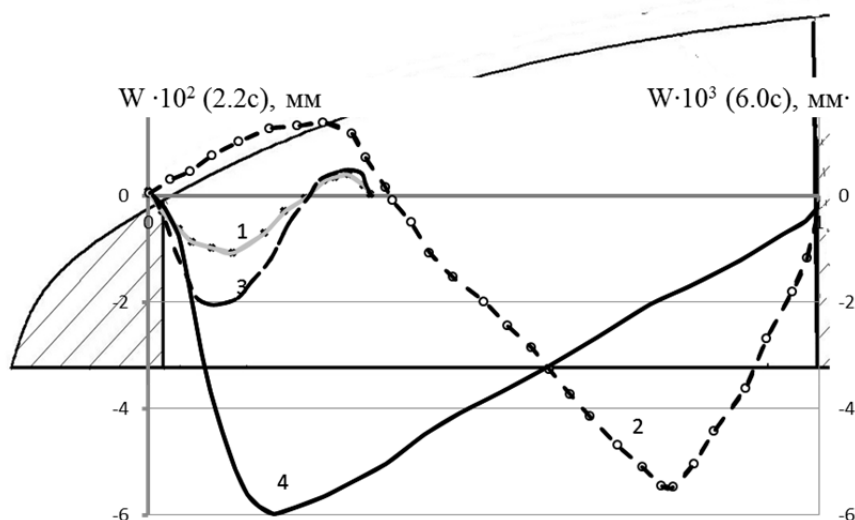


Рис. 4. Распределение поперечных прогибов вдоль образующей оболочки

Fig. 4. The transverse deflection distribution along the generatrix

На рис. 5 приведены эпюры усилий N_1 , N_2 (рис. 5, а) и изгибающих моментов M_1 и M_2 (рис. 5, б) вдоль образующей оболочки в момент времени $\tau = 4,4$. Представленные графики показывают, что продольные усилия и изгибающие моменты, определенные с учетом (кривые 3, 4) и без учета (кривые 1, 2) давления излучения, имеют существенно различающиеся закономерности их изменения вдоль образующей оболочки. Учет давления излучения p_3 приво-

дит к сглаживанию величин продольных усилий и моментов вдоль образующей. Отсутствие учета p_3 увеличивает значения величин N_1 , N_2 и M_1 , M_2 . Кроме того, изгибающие моменты, определенные при $p_3 = 0$, более чем на порядок превышают изгибающие моменты, рассчитанные с учетом p_3 . Аналогичные выводы можно сделать относительно мембранных напряжений $\sigma_{1,2}$, изгибных напряжений $\sigma_{изг\ 1,2}$ и напряжений сдвига σ_{1z} , представленных на рис. 6 и 7.

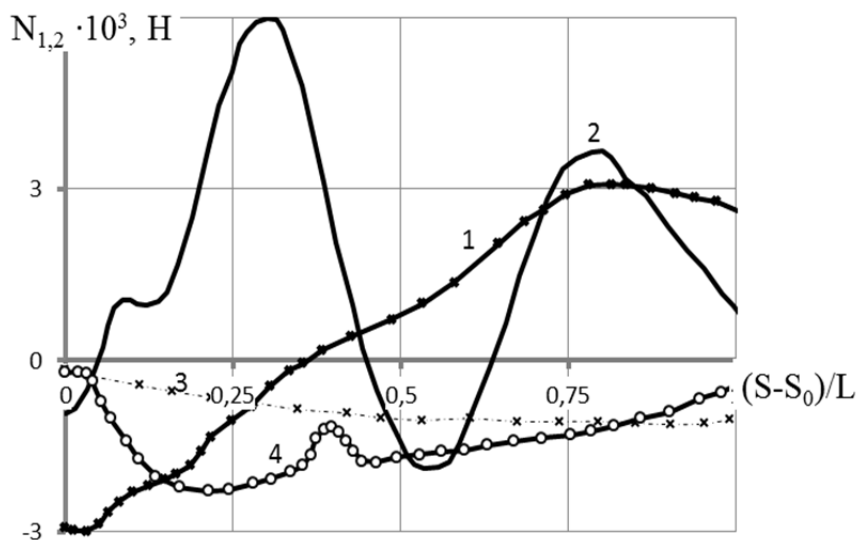


Рис. 5а. Эпюры осевых усилий вдоль образующей оболочки в момент времени $\tau = 4,4$ с
Fig. 5a. Epure of axial forces along the shell generatrix at the time $\tau = 4.4$ sec

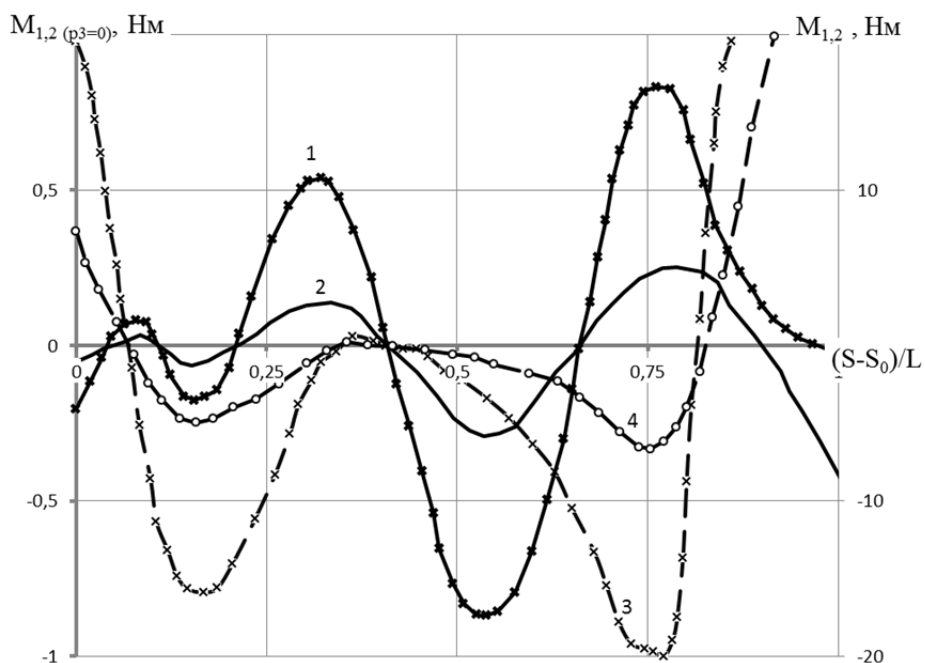


Рис. 5б. Эпюры изгибающих моментов вдоль образующей оболочки в момент времени $\tau = 4,4$ с
Fig. 5b. Epure of bending moments along the shell generatrix at the time $\tau = 4.4$ sec

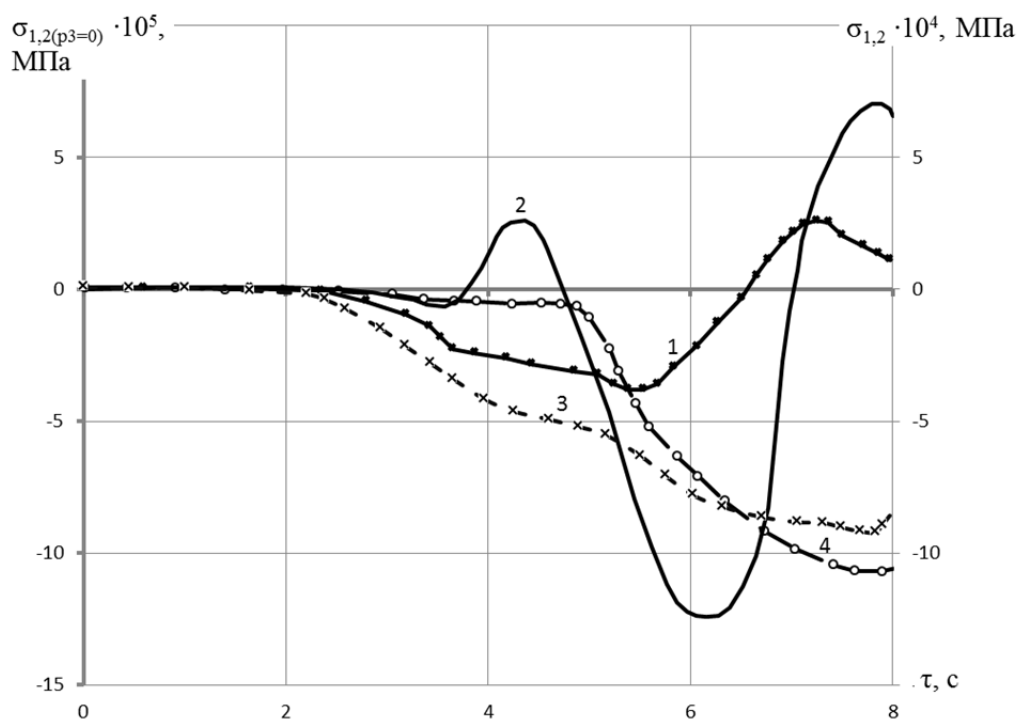


Рис. 6а. Эпюры мембранных напряжений вдоль образующей оболочки
в момент времени $\tau = 4,4$ с

Fig. 6a. Epure of membrane stresses along the shell generatrix
at the time $\tau = 4.4$ sec

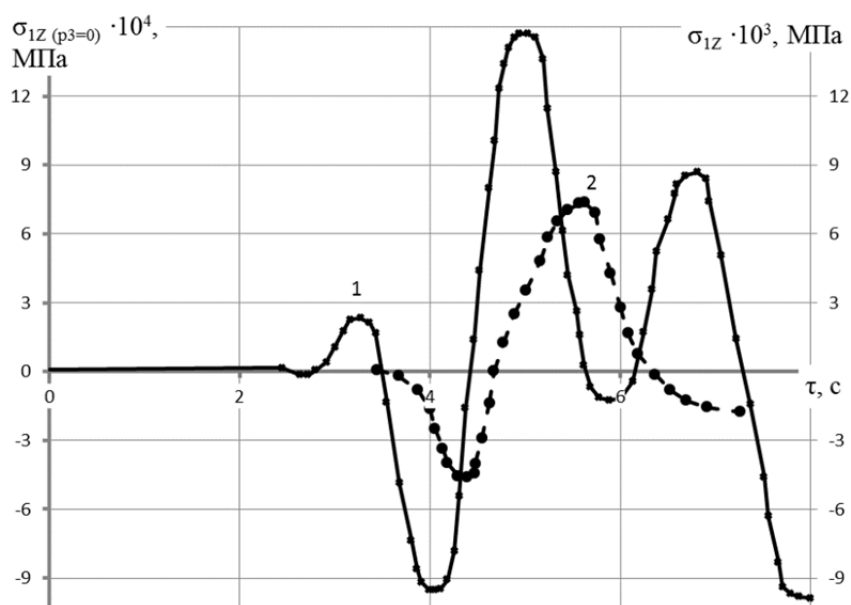


Рис. 6б. Эпюры напряжений сдвига вдоль образующей оболочки
в момент времени $\tau = 4,4$ с

Fig. 6b. Epure of shear stresses along the shell generatrix
at the time $\tau = 4.4$ sec

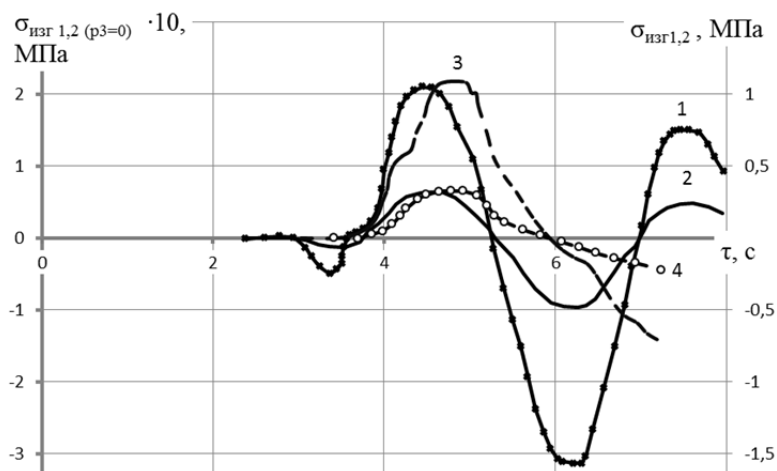


Рис. 7. Эпюры изгибных напряжений вдоль образующей оболочки в момент времени $\tau = 4,4$ с
Fig. 7. Epure of bending stresses along the shell generatrix at the time $\tau = 4.4$ sec

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведено решение задачи гидроупругого взаимодействия слабой ударной волны с предварительно нагруженной оболочкой вращения параболической формы с жесткой носовой частью.

В результате определено суммарное давление на оболочку под действием ударной волны, ее напряженно-деформированное состояние и кинематические параметры движения жесткой носовой части. Показано, что максимальные давления действуют вблизи места крепления оболочки к жесткой носовой части. Максимальные значения поперечных прогибов оболочки, найденные без учета давления излучения, локализованы вблизи переднего фронта волны и на порядок выше максимальных прогибов, рассчитанных с учетом давления излучения. Продольные усилия и изгибающие моменты, определенные с учетом и без учета давления излучения, имеют существенные различия закономерности их изменения вдоль образующей оболочки. Например, изгибающие моменты, определенные при $p_3 = 0$, более чем на порядок превышают изгибающие моменты, рассчитанные с учетом p_3 . Аналогично ведут себя мембранные напряжения, напряжения сдвига и изгибные напряжения.

Учет полученных в статье выводов позволит в процессе проектирования перспективных аппаратов, функционирующих в жидкости, принимать осмысленные решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломенко Н.С., Абрамян К.Г., Сорокин В.В. Прочность и устойчивость пластин и оболочек судового корпуса. Л.: Судостроение, 1967. 488 с.
2. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. М.: Наука, 1975. 416 с.
3. Глушко С.К., Немировский Ю.В. Прямые и обратные задачи механики упругих композиционных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008. 432 с.
4. Ляхов В.Н., Подлубный В.В., Титаренко В.В. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций: Математическое моделирование в нестационарной газодинамике. М.: Машиностроение, 1989. 392 с.
5. Гостев А.Н. Исследование ударного взаимодействия оболочек вращения с идеальной жидкостью // Научный Вестник МГТУ ГА. 2009. № 138. С. 245–247.
6. Глушак Б.Л., Куропатенко В.Ф., Новиков С.А. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках. Новосибирск: Наука, 1992. 294 с.

7. Григолюк Э.И., Кузнецов Е.Б. Коническая оболочка под воздействием слабой ударной волны // Доклады Академии наук СССР. 1976. Т. 230, № 2. С. 300–301.
8. Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967. 387 с.
9. Новожилов В.В. О перемещении твердого тела под действием акустической волны давления // Прикладная математика и механика. 1959. Т. 23, вып. 4. С. 794–796.
10. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Взаимодействие слабых ударных волн с упругими конструкциями // Научные труды ИМ МГУ. 1971. № 13. С. 180.
11. Гузь А.Н., Кубенко В.А. Дифракция упругих волн. Киев: Наукова думка, 1978. 307 с.
12. Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Определение гидродинамических нагрузок при взаимодействии слабых нестационарных волн давления с упругими оболочками // Колебания, излучение и демпфирование упругих структур: сборник докладов. М.: Наука, 1973. С. 3–11.
13. Туркин И.К. Исследование взаимодействия упругой оболочки вращения аппарата с ударной волной в жидкости // Системный анализ, управление и навигация: тезисы докладов XXIII Международной научной конференции. Евпатория 01–08 июля 2018 г. М.: МАИ, 2018. С. 95–96.
14. Туркин И.К. Исследование реакции оболочки вращения аппарата с конструктивным элементом в носовой части на ударную волну в жидкости // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: сборник трудов XXVI Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Вятчи 16–20 марта 2020 г. М.: ООО ТРП, 2020. Т. 1. С. 223–224.
15. Чернова Н.Д. Реакция параболоида вращения с жесткой носовой частью на действие ударной волны // Научные труды ИМ МГУ. 1984. С. 43–50.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Туркин Игорь Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой проектирования и прочности авиационно-ракетных и космических изделий Московского авиационного института, kafedra_602@mail.ru.

Рогов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, начальник сектора расчетов прочности и надежности АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, rogov.dmitry.76@yandex.ru.

Грачев Виктор Александрович, инженер сектора расчетов прочности и надежности АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, viktoralexandrovich.g@gmail.com.

REACTION OF THE PRELOADED ROTATION SHELL WITH THE RIGID NOSE PART OF THE APPARATUS TO A SHOCK WAVE IN THE LIQUID

Igor K. Turkin¹, Dmitry A. Rogov², Victor A. Grachev²

¹ Moscow Aviation Institute (MAI), Moscow, Russia

² ORPE "Technologiya" named after A.G. Romashin, Obninsk, Russia

ABSTRACT

The article investigates the problem of hydro-elastic interaction of a weak shock wave with a rigid nosed rotation shell preloaded with axial forces. The shell is enclosed in a rigid parabolic screen, i.e. the impact of the end face and the shock wave diffraction are not considered. Liquid is regarded to be perfectly compressible. Its applied summing hydrodynamic pressure during complex interaction with the shell surface can be classified into the incident, reflected and radiated waves. The problem of hydro-elastic interaction of these shock fronts with a preloaded parabolic rigid nosed shell in a related setting is reduced to the solution of the

wave equations of nonlinear system of equations for shell motion under particular initial and boundary conditions, in which the dimensionless displacement of this nose section under the impact of hydrodynamic forces is determined by integrating its motion equation. The equations, describing the dependences of nose section displacements on shock wave interaction time, take into account generalized hydrodynamic forces, including the second category directly related to the mass of the attached fluid. Determination of stress-strain state in case of interaction with the shock wave in the liquid of elastic rotation paraboloid in the form of the shell containing a rigid insertion in the nose section is reduced to the solution of a nonlinear equations system of shell motion considering the boundary conditions along fastenings at the end face of the shell and interface conditions of the shell and insertion. Dimensionless displacements of the nose section caused by hydrodynamic forces are defined by integrating the equations of motion under the initial conditions along insertion offsets in the axial directions.

Key words: shell, rigid nose, shock wave, liquid, stress-strain state, displacements.

REFERENCES

1. Solomenko, N.S., Abramyan, K.G. and Sorokin, V.V. (1967). *Prochnost i ustoychivost plastin i obolochek sudovogo korpusa* [Durability and stability of ship plates and shells]. Leningrad: Sudostroyeniye, 488 p. (in Russian)
2. Volmir, A.S. (1975). *Obolochki v potoke zhidkosti i gaza. Zadachi aerouprugosti* [Shells in liquid and gaseous flows. Aeroelasticity problems]. Moscow: Nauka, 416 p. (in Russian)
3. Glushko, S.K. and Nemirovsky, Yu.V. (2008). *Pryamyie i obratnyie zadachi mekhaniki uprugikh kompozitsionnykh plastin i obolochek vrashcheniya* [Direct and inverse problems of elastic composite plates and revolution shells mechanics]. Moscow: Fizmatlit, 432 p. (in Russian)
4. Lyahov, V.N., Podlubny, V.V. and Titarenko, V.V. (1989). *Vozdeystviye udarnykh voln i struy na element konstruktsey: Matematicheskoye modelirovaniye v nestatsionarnoy gazodinamike* [Impact of shock waves on structural elements: Mathematical modeling in non-stationary gas dynamics]. Moscow: Mashinostroyeniye, 392 p. (in Russian)
5. Gostev, A.N. (2009). *Research of shock interaction of covers of rotation with the ideal liquid*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 138, pp. 245–247. (in Russian)
6. Glushak, B.L., Kuropatenko, V.F. and Novikov, S.A. (1992). *Issledovaniye prochnosti materialov pri dinamicheskoy nagruzke* [Study of materials strength in cases of dynamic loads]. Novosibirsk: Nauka, 294 p. (in Russian)
7. Grigilyuk, E.I. and Kuznetsov, E.B. (1976). *Konicheskaya obolochka pod vozdeystviem slaboy udarnoy volny* [Cone shell under impact of faint shock wave]. Doklady Akademii nauk USSR, vol. 230, no. 2, pp. 300–301. (in Russian)
8. Zamyshlyayev, B.V. and Yakovlev, Yu.S. (1967). *Dinamicheskiye nagruzki pri podvodnom vzryve* [Dynamic loads at underwater explosion]. Leningrad: Sudostroyeniye, 387 p. (in Russian)
9. Novozhilov, V.V. (1959). *O peremeshchenii tverdogo tela pod deystviyem akusticheskoy volny davleniya* [On movement of solid body under acoustic pressure wave]. Prikladnaya matematika i mekhanika, vol. 23, issue 4, pp. 794–796. (in Russian)
10. Grigolyuk, E.I. and Gorshkov, A.G. (1971). *Vzaimodeystviye slabyykh udarnykh voln s uprugimi konstruktseyami* [Interaction of faint shock waves with elastic structures]. Nauchnyye Trudy IM MGU, no. 13, p. 180. (in Russian)
11. Guz, A.N. and Kubenko, V.A. (1978). *Difraktsiya uprugikh voln* [Diffraction of elastic waves]. Kiev: Naukova dumka, 307 p. (in Russian)
12. Grigolyuk, E.I. and Gorshkov, A.G. (1973). *Opredeleniye gidrodinamicheskikh nagрузok pri vzaimodeystvii slabyykh nestatsionarnyykh voln davleniya s uprugimi obolochkami* [Obtaining of hydrodynamic loads caused by interaction between pressure's faint non-stationary waves and elastic structures]. Kolebaniya, izlucheniye i dempfirovaniye uprugikh struktur: sbornik dokladov [Fluctuations, emission and damping of elastic structures: proceedings]. Moscow: Nauka, pp. 3–11. (in Russian)

13. Turkin, I.K. (2018). *Issledovaniye vzaimodeystviya uprugoy obolochki vrashcheniya apparata s udarnoy volnoy v zhidkosti* [Research of interaction between an elastic shell of a device rotation and a shock wave in a liquid]. *Sistemnyy analiz, upravleniye i navigatsiya: tezisy dokladov XXIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [System analysis, control and navigation: proceedings of the XXIII International Scientific Conference]. Moscow: MAI, pp. 95–96. (in Russian)

14. Turkin, I.K. (2020). *Issledovaniye reaktsii obolochki vrashcheniya apparata s konstruktivnym elementom v nosovoy chasti na udarnuyu volnu v zhidkosti* [Research of the reaction of the apparatus rotation shell with the structural element in the nose part to the shock wave in the liquid]. *Dinamicheskiye i tekhnologicheskiye problemy mekhaniki konstruktsiy i sploshnykh sred: sbornik trudov XXVI Mezhdunarodnogo simpoziuma im. Gorshkova A.G.* [Dynamic and Technological Problems of Structural Mechanics and Continuous Media: Proceedings of the XXVI International Symposium. A.G. Gorshkova]. Moscow: OOO TRP, vol. 1, pp. 223–224. (in Russian)

15. Chernova, N.D. (1984). *Reaktsiya paraboloida vrashcheniya s zhestkoy nosovoy chastyu na deystviye udarnoy volny* [Rotation paraboloid reaction with a rigid nose part to the shock wave action]. *Nauchnyye Trudy IM MGU*, pp. 43–50. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor K. Turkin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Design and Strength Analysis of Aerospace and Missile Products Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), kafedra_602@mail.ru.

Dmitry A. Rogov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Strength Analysis and Reliability Department, ORPE "Technologiya" named after A.G. Romashin, rogov.dmitry.76@yandex.ru.

Victor A. Grachev, Engineer of the Strength Analysis and Reliability Department, ORPE "Technologiya" named after A.G. Romashin, viktoralexandrovich.g@gmail.com.

Поступила в редакцию
Принята в печать

11.04.2021
22.07.2021

Received
Accepted for publication

11.04.2021
22.07.2021

ББК 05
Н 34
Св. план 2021

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 24, № 04, 2021
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 24, No. 04, 2021

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

Подписано в печать 17.08.2021.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

9,5 усл. печ. л.

Заказ № 831 / 156

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА

125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Изготовлено в ИД Академии имени Н.Е. Жуковского

125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А

Тел.: (495) 973-45-68

E-mail: artpress@ mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2018

