

**Соколов Олег Аркадьевич**

Санкт-Петербургский Государственный Университет Гражданской Авиации им. Главного маршала авиации А.А.Новикова

**Силенко Алексей Сергеевич**

Санкт-Петербургский Государственный Университет Гражданской Авиации им. Главного маршала авиации А.А.Новикова

**Малютин Артемий Михайлович**

Санкт-Петербургский Государственный Университет Гражданской Авиации им. Главного маршала авиации А.А.Новикова

### **Использование автоматизированной системы управления перекачки топлива для увеличения экономичности полетов на примере самолета Boeing 747-400**

**Аннотация.** В настоящей статье рассматривается система автоматизированного управления перекачкой топлива (САУПТ) и её интеграция с автоматической системой управления полётом самолёта Boeing 747-400. Основная цель рассмотрения данной интеграции – убедиться, что внедрение САУПТ является экономически выгодным решением в условиях полетов на большие расстояния, ведь эффективность (экономичность) выполнения полетов является одним из трех столпов организации летной работы. Разработаны математические модели полёта с использованием САУПТ и без неё на основе уравнений пространственного движения твёрдого тела с учётом изменения массы и положения центра тяжести. Наглядно показано, что использование системы позволяет достичь экономии топлива до 2-3% путём оптимизации положения центра тяжести самолёта в диапазоне 20-22% САХ за счет уменьшения индуктивного сопротивления.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, перекачка топлива, центр тяжести, экономичность полёта, Boeing 747-400, математическое моделирование, динамика полёта.

**Sokolov Oleg Arkadevich**

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation

**Silenko Aleksei Sergeevich**

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation

**Malyutin Artemiy Mikhailovich**

Saint-Petersburg State University of Civil Aviation

### **Using an automated fuel transfer control system to improve flight efficiency using the Boeing 747-400 aircraft as an example**

**Abstract.** The present article considers an automated fuel transfer control system (AFTCS) and its integration with the automated flight control system of the Boeing 747-400 aircraft. The main purpose of considering this integration is to make sure that the introduction of AFTCS is a cost-effective solution for long-range flights, because the efficiency (cost-effectiveness) of flight operations is one of the three pillars of the organization of flight operations. Mathematical models of flight using AFTCS and without it have been developed based on the equations of spatial motion of a rigid body, taking into account changes in mass and center of gravity position. It is clearly shown that the use of the system allows achieving fuel savings of up to 2-3% by optimizing the aircraft center of gravity position in the range of 20-22% MAC by reducing the induced drag.

**Keywords:** automated control system, fuel transfer, center of gravity, flight economy, Boeing 747-400, mathematical modeling, flight dynamics.

## Введение

Авиационная отрасль постоянно сталкивается с задачами, связанными с повышением экономичности полёта и снижением эксплуатационных расходов. Расходы на топливо составляют значительную долю в системе операционных расходов авиакомпаний – от 20% до 40% в зависимости от маршрута и типа воздушного судна [1]. В этих условиях особую актуальность приобретает разработка и внедрение систем, позволяющих оптимизировать расход топлива.

Одним из перспективных направлений повышения топливной эффективности является управление положением центра тяжести (ЦТ) самолёта посредством перекачки топлива между баками. Смещение ЦТ приводит к уменьшению потребного угла атаки при той же скорости, вследствие чего снижает аэродинамическое сопротивление и, соответственно, уменьшает расход топлива [2].

Целью исследования является разработка математической модели полёта с использованием системы автоматизированного управления перекачкой топлива (САУПТ) и оценка её влияния на экономичность полёта на примере самолёта Boeing 747-400.

## Основная часть

### Обзор топливной системы Boeing 747-400

Самолёт Boeing 747-400 оснащён сложной топливной системой, включающей несколько топливных баков, расположенных в крыльях и фюзеляже [3].

Топливная система Boeing 747-400 включает следующие баки:

Таблица 1 – Характеристики топливных баков Boeing 747-400

Бак	Расположение
Center Wing Tank	Fuselage
Main Tank 1	Left wing (outer)
Main Tank 2	Left wing (inner)
Main Tank 3	Right wing (inner)
Main Tank 4	Right wing (outer)
Reserve Tank 1	Left wing (tip)
Reserve Tank 4	Right wing (tip)

Особенностью конфигурации является наличие центрального бака крыла, расположенного в центроплане. При заполнении центрального бака ЦТ смещается вперед, что может быть использовано для оптимизации аэродинамических характеристик на определённых этапах полёта [4].

Система индикации количества топлива (FQIS) представляет собой комплекс датчиков и вычислительных устройств, а также устройства индикации непосредственно, обеспечивающих непрерывный контроль количества топлива в каждом баке [5]. Система использует ёмкостные датчики, работающие по принципу изменения ёмкости конденсатора в зависимости от уровня топлива.

Компенсаторные блоки обеспечивают коррекцию показаний с учётом изменения диэлектрической проницаемости топлива в зависимости от его плотности и температуры. Это позволяет получать точные данные о массе топлива независимо от его физических свойств.

### Математическая модель полёта

*Модель без использования САУПТ.*

Для описания движения самолёта в продольной плоскости используем систему уравнений пространственного движения твёрдого тела. Основные уравнения динамики полёта в связанной с самолётом системе координат имеют вид:

$$m dV/dt = P - X - mg \sin \theta, \quad (1)$$

где  $m$  – масса самолёта, кг;  $V$  – истинная воздушная скорость полёта, м/с;  $t$  – время, с;  $P$  – тяга двигателей;  $X$  – сила лобового сопротивления;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\theta$  – угол наклона траектории, рад.

Уравнение моментов относительно поперечной оси (оси OZ):

$$I_z d\omega_z/dt = M_z, \quad (2)$$

где  $I_z$  – момент инерции относительно оси Z, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_z$  – угловая скорость тангажа, рад/с;  $M_z$  – суммарный момент сил относительно оси Z, Н·м.

Положение центра тяжести самолёта без использования САУПТ определяется последовательностью расхода топлива из баков. Стандартная последовательность сжигания топлива:

- 1) Центральный бак – используется первым, смещая ЦТ назад;
- 2) Внутренние баки крыла (основные баки 2 и 3) – используются параллельно;
- 3) Наружные баки крыла (основные баки 1 и 4) – используются после внутренних баков;
- 4) Резервные баки (резервные баки 1 и 4) – топливо перетекает по гравитации в наружные баки.

Масса самолёта изменяется по закону:

$$m(t) = m_0 - \int_0^T q(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где  $m_0$  – начальная масса самолёта, кг;  $q(\tau)$  – мгновенный расход топлива, кг/с;  $\tau$  – переменная интегрирования по времени,  $T$  – полетное время или время, в течение которого расходуется топливо.

Положение ЦТ рассчитывается как отношение суммы моментов самолета без топлива и топлива в  $i$ -том баке к сумме их масс [6]:

$$x_{CG}(t) = (m_{ac}x_{ac} + \Sigma(m_i(t)x_i)) / (m_{ac} + \Sigma(m_i)), \quad (4)$$

где  $x_{CG}(t)$  – текущее положение ЦТ, % САХ;  $m_{ac}$  – масса самолёта, кроме топлива, кг;  $x_{ac}$  – положение ЦТ самолёта, кроме топлива, % САХ;  $m_i(t)$  – масса топлива в  $i$ -м баке, кг;  $x_i$  – положение ЦТ  $i$ -го бака, % САХ.

*Модель с использованием САУПТ.*

При использовании системы автоматизированного управления перекачкой топлива положение ЦТ может поддерживаться в оптимальной зоне путём управляемого перекачки топлива между баками. Математическая модель дополняется уравнениями, описывающими процесс перекачки.

Расход топлива из  $i$ -го бака описывается уравнением:

$$dm_i/dt = -q_{cons,i} + q_{in,i} - q_{out,i},$$

где  $m_i$  – масса топлива в  $i$ -м баке, кг;  $q_{cons,i}$  – расход топлива двигателями из  $i$ -го бака, кг/с;  $q_{in,i}$  – скорость перекачки в  $i$ -й бак, кг/с;  $q_{out,i}$  – скорость перекачки из  $i$ -го бака, кг/с.

Управляющее воздействие системы определяется алгоритмом поддержания оптимального положения ЦТ. Целевая функция оптимизации имеет вид:

$$J = \alpha \int_0^T (x_{CG}(t) - x_{CG,opt})^2 dt + \beta Q,$$

где  $J$  – целевая функция;  $\alpha$  – весовой коэффициент отклонения ЦТ;  $x_{CG,opt}$  – оптимальное положение ЦТ (обычно 20-22% САХ);  $x_{CG}(t)$  – текущее положение ЦТ, % САХ;  $\beta$  – весовой коэффициент расхода топлива;  $Q$  – суммарный расход топлива на полёт, кг.

Ограничения задачи оптимизации:

$x_{CG,min} \leq x_{CG}(t) \leq x_{CG,max}$  – допустимый диапазон ЦТ;

$m_i(t) \geq m_{i,min}$  – невырабатываемый остаток топлива в баке;

$q_{max} \geq |q|$  – максимальная скорость перекачки.

Зависимость расхода топлива от положения ЦТ  
(Boeing 747-400, крейсерский режим)

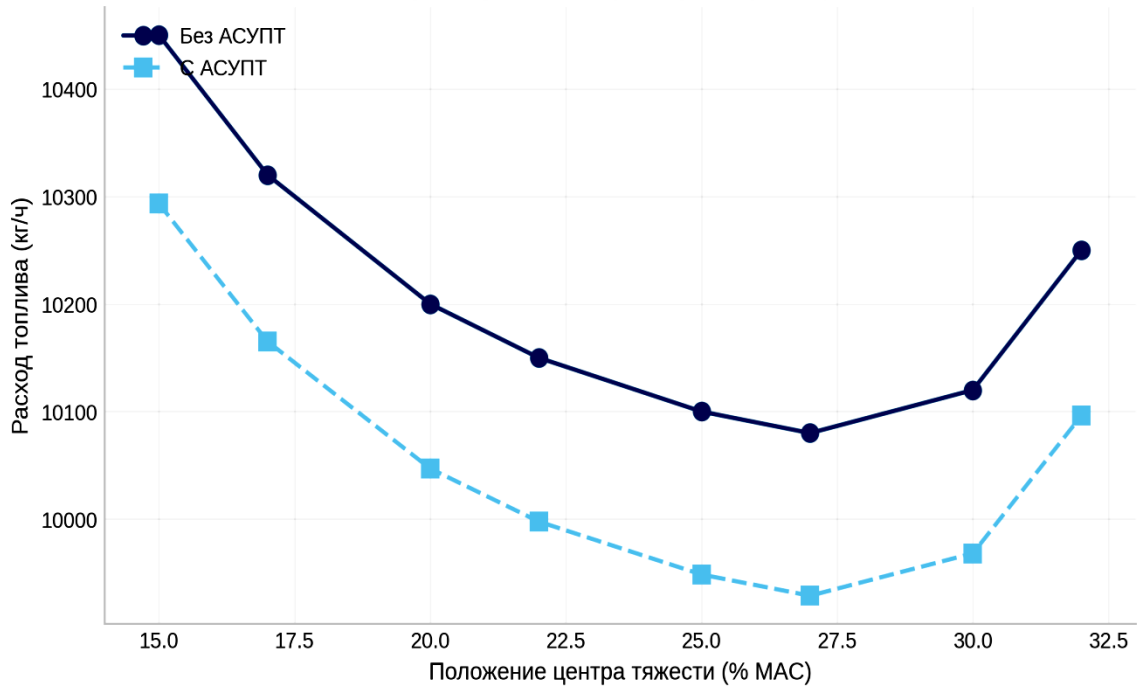


Рисунок 1 – Зависимость расхода топлива от положения ЦТ

## Интеграция САУПТ с автоматической системой управления полётом

*Структурная схема интеграции.*

Интеграция САУПТ с автоматической системой управления полётом (АСУП) осуществляется через бортовую вычислительную сеть. Центральным элементом интеграции является бортовой вычислитель (FMC), который получает данные от различных бортовых систем и формирует управляющие воздействия (рис. 2).

Структурная схема интеграции АСУПТ с автоматизированной системой управления полетом

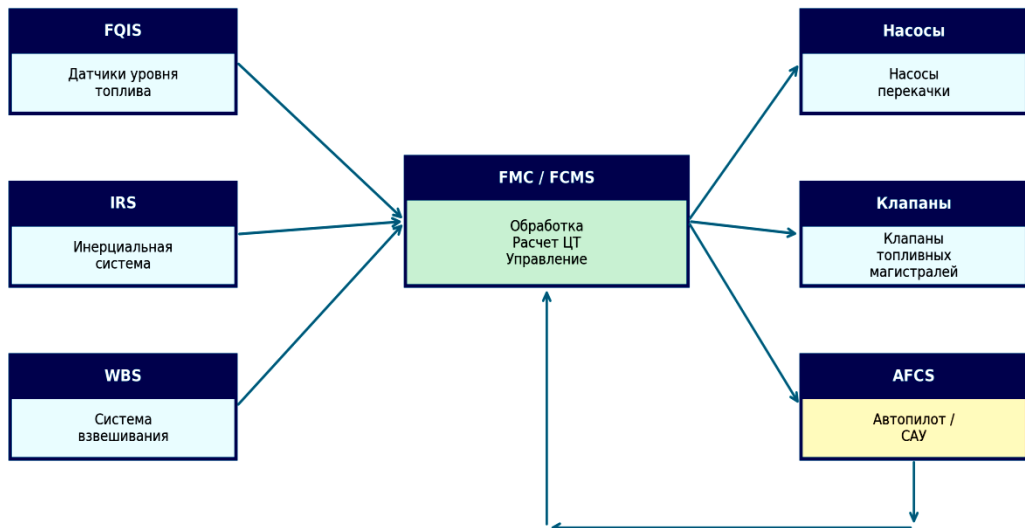


Рисунок 2 – Структурная схема интеграции САУПТ с АСУП

На рисунке 2 представлены основные компоненты интегрированной системы. Они заключены в единую коммутационную схему. Блоками выделены:

1. FMC (Flight Management Computer) – Бортовой вычислитель, выполняющий расчеты и формирующий управляющие команды;
2. AFCS (Automated Flight Control System) – Автоматизированная система управления полетом, в том числе и САУПТ;
3. IRS (Inertial Reference System) – Инерциальная система, обеспечивающая FMC данными о параметрах полета ВС;
4. FQIS (Fuel Quantity Indication System) – Система индикации количества топлива, состоящая из подсистемы датчиков и непосредственно индикатора топлива, которая обеспечивает определение остатка топлива в каждом баке с погрешностью  $\pm 1\%$ ;
5. WBS (Weight and Balance System) – Система взвешивания и балансировки, которая используется перед выполнением полета, и позволяющая FMC производить расчеты веса и центровки в полете;
6. Система исполнительных механизмов, таких как различного вида клапанов и насосов перекачки топлива, которые выполняют непосредственно процессы перекачки топлива согласно управляющих команд, получаемых с САУПТ.

*Алгоритм управления перекачкой топлива.*

Чтобы поддерживать центровку в оптимальном диапазоне в течение всего полета работает алгоритм управления. Он заключается в следующих этапах.

На первом система получает информацию от датчиков и информацию, которую ввел экипаж. По формуле 4) рассчитывается центровка в начальный момент времени.

На втором этапе с учетом ограничений центровки, опубликованных производителем, определяется целевая центровка. Для Boeing 747-400 допустимый диапазон центровок составляет 13-31% для посадки, 8,5-31% до массы 365 тонн и 20-25% для максимальной массы 396,89 тонны.

На третьем система считает, сколько топлива перекачать между баками, чтобы сместить центровку в оптимальный диапазон.

Затем, на четвертом этапе, система вырабатывает сигналы на включение насосов и открытие клапанов для самой перекачки.

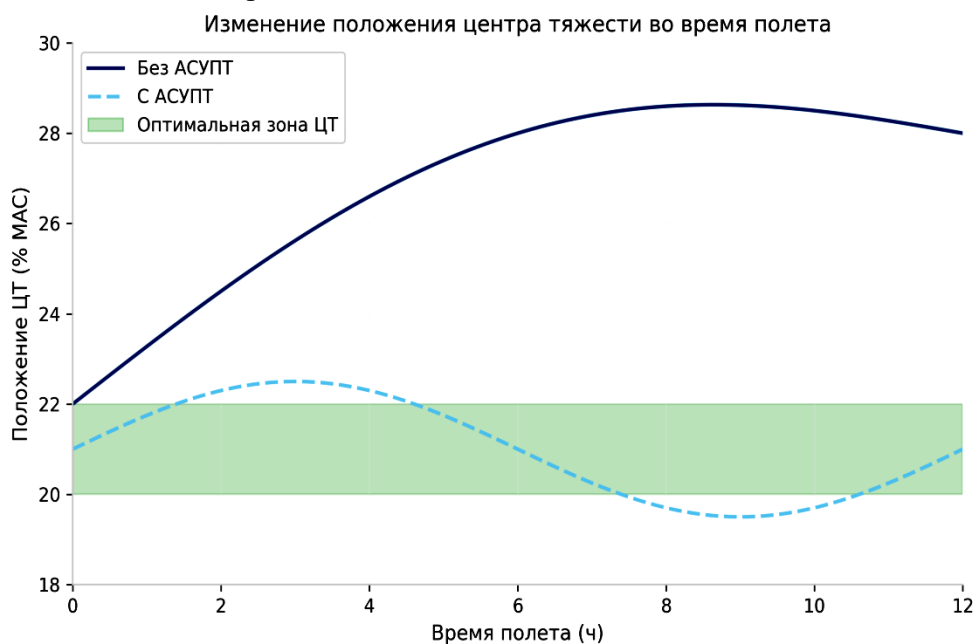


Рисунок 3 – Изменение положения центра тяжести в процессе полёта  
Результаты математического моделирования

*Анализ внедрения систем автоматизированного управления перекачкой топлива и их влияние на экономию топлива в целом.*

Моделирование было произведено для некоторого абстрактного маршрута протяжённостью 10 000 м. Рассматриваются два случая: в первом система автоматизированного управления перекачкой топлива не используется, во втором – используется. Результаты математического моделирования показывают, что применение САУПТ действительно приводит к экономии топлива, вплоть до 1,8% на одном из самых топливозатратных этапов полета – наборе высоты.

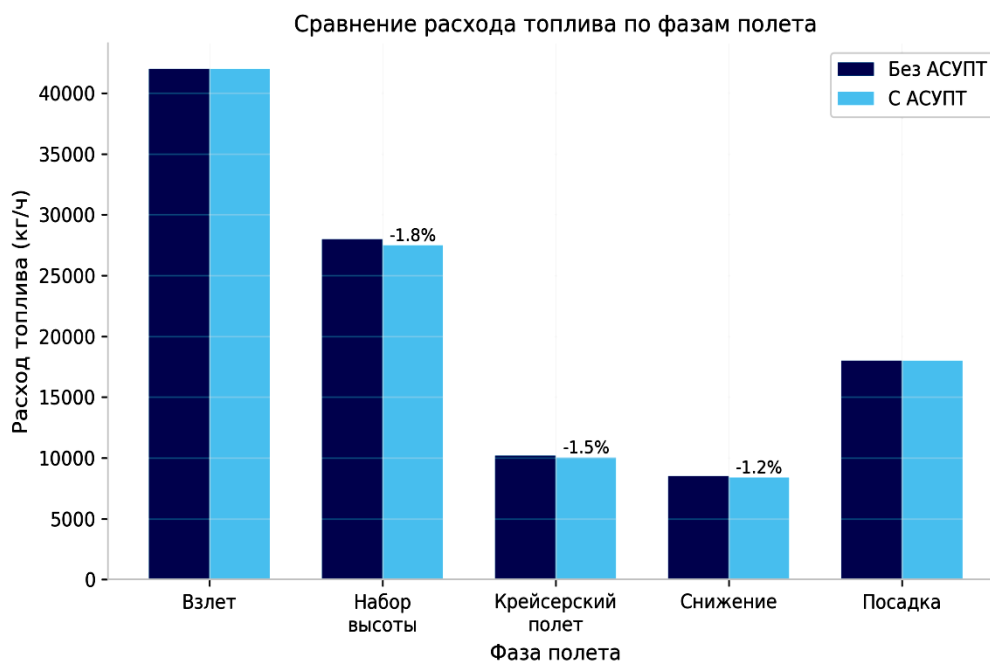


Рисунок 4 – Сравнение расхода топлива по фазам полёта

Однако, наибольшая экономия количества топлива достигается на этапе крейсерского полета, а не набора, по причине того, что крейсерский полет занимает большую часть всего полета. Происходит это в первую очередь за счет уменьшения индуктивного сопротивления, что приводит к уменьшению потребной тяги двигателей.

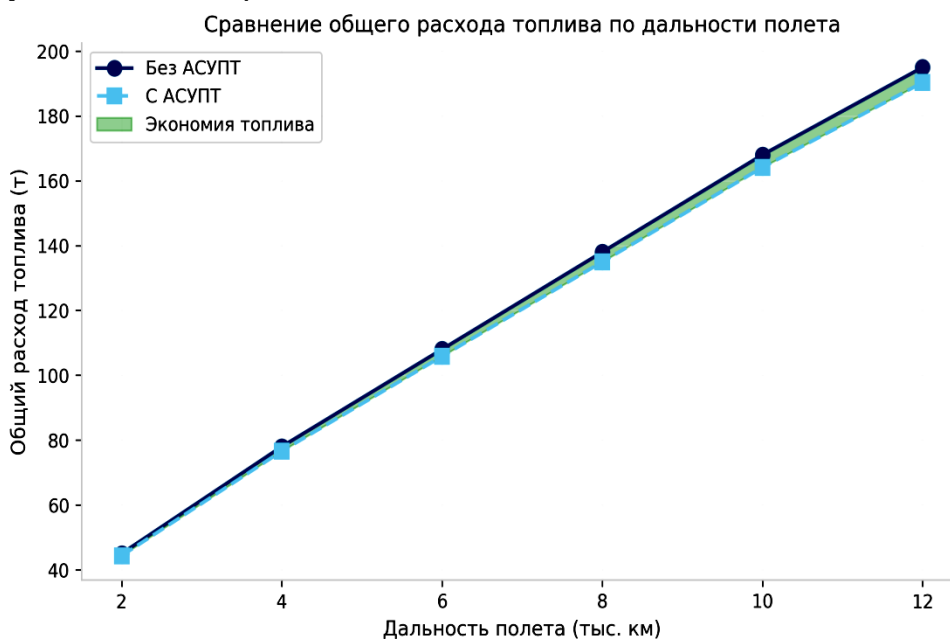


Рисунок 5 – Сравнение суммарного расхода топлива по дальности полёта

С увеличением дальности полёта относительная экономия топлива возрастает. Это объясняется тем, что на дальних перелётах больше времени проводится в крейсерском режиме, где эффект оптимизации ЦТ наиболее значителен.

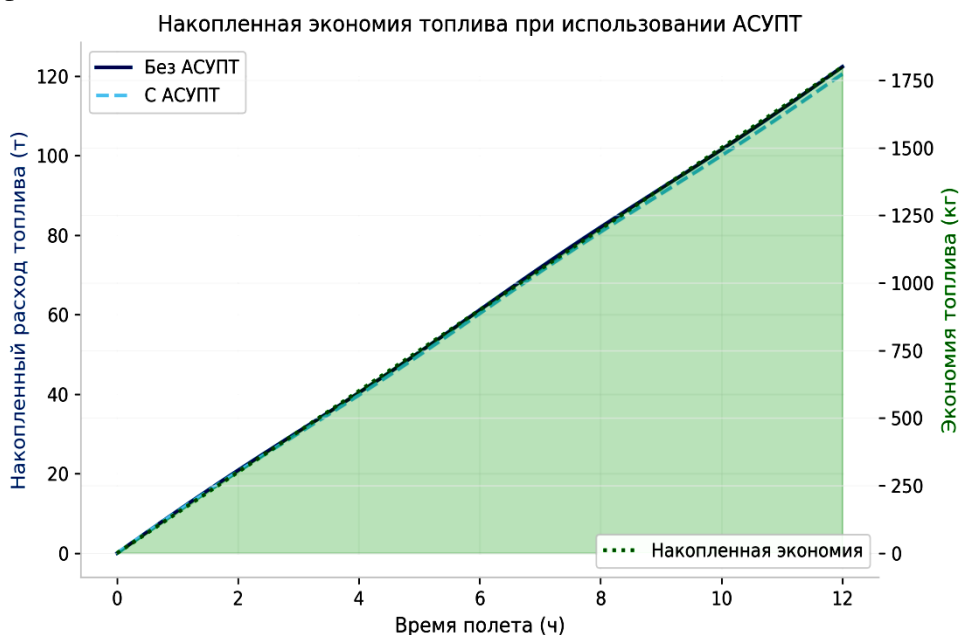


Рисунок 6 – Накопленная экономия топлива при использовании САУПТ

*Влияние на устойчивость и управляемость.*

Важным аспектом применения САУПТ является обеспечение требуемых характеристик устойчивости и управляемости. Оптимальное положение ЦТ с точки зрения экономии топлива (20-22% САХ) находится вблизи задней границы допустимого диапазона, что требует усиленного контроля параметров полета [7].

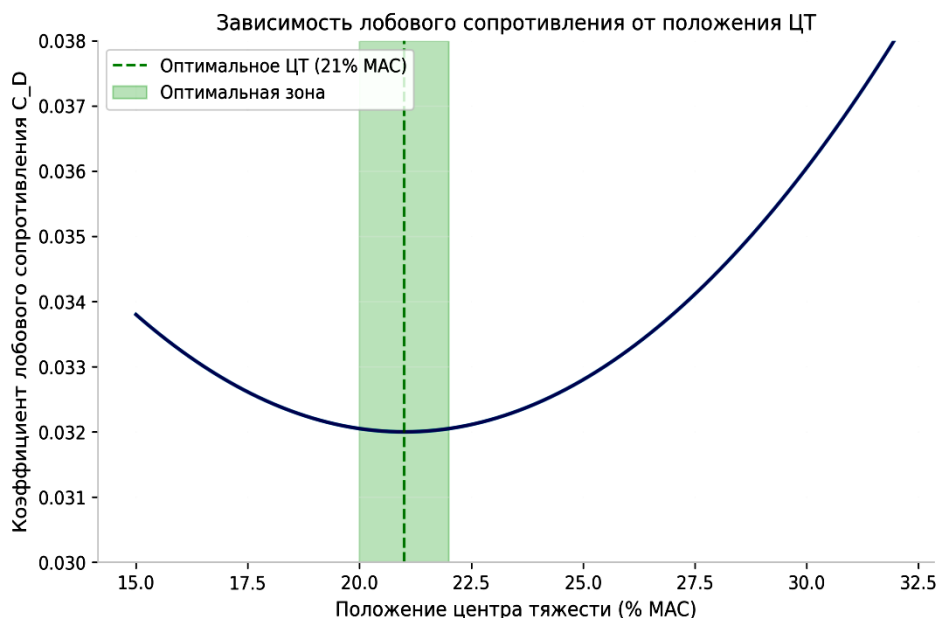


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от положения ЦТ

Анализ показал, что при положении ЦТ 21% САХ достигается минимальное сопротивление при сохранении запаса продольной статической устойчивости не менее 4%. Для Boeing 747-400 допустимый диапазон центровок составляет 13-31% для посадки, 8,5-31% до массы 365 тонн и 20-25% для максимальной массы 396,89 тонны.

Интеграция САУПТ с системой автоматического управления позволяет:

- обеспечить плавное изменение ЦТ без резких скачков;
- автоматически корректировать положение ЦТ при изменении условий полёта;

- предотвращать выход ЦТ за пределы допустимого диапазона;
- поддерживать требуемые характеристики устойчивости на всех этапах полёта.

### **Заключение**

В результате проведённых исследований предложены математические модели полёта самолёта Boeing 747-400 с использованием системы автоматизированного управления перекачкой топлива и без неё. Показано, что применение САУПТ позволяет достичь значительной экономии топлива путём оптимизации положения центра тяжести.

Основные результаты работы:

- 1) Предложена математическая модель динамики полёта с учётом изменения массы и положения ЦТ в процессе расхода топлива.
- 2) Показано, что использование САУПТ обеспечивает экономию топлива до 2-3% на дальнемагистральных маршрутах за счёт поддержания оптимального положения ЦТ.
- 3) Разработан алгоритм интеграции САУПТ с автоматической системой управления полётом, обеспечивающий безопасное и эффективное управление перекачкой топлива.
- 4) Установлено, что оптимальное положение ЦТ для крейсерского полёта составляет 20-22% САХ, что обеспечивает минимальное сопротивление при сохранении требуемого запаса устойчивости.

Иными словами, установлено, что внедрение САУПТ и ее интеграция в АСУП для самолета Boeing 747-400 является технически возможным, эксплуатационно безопасным, но в то же время экономически выгодным. С учетом того, что данный тип самолета используется для полетов на дальние расстояния, в том числе и трансатлантические перелеты, становится возможным заключить, что даже несколько процентов сэкономленного топлива на этапе крейсерского полета обращается в большую экономическую выгоду для каждого эксплуатанта.

### **Список источников**

1. Ефремов А. В. Динамика полета. Учебник / А. В. Ефремов, В. Ф. Захарченко, В. Н. Овчаренко. – Москва: Машиностроение, 2011. – 776 с. Электрон. копия печ. изд. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2013> (дата обращения: 05.04.2026). — Режим доступа: для зарегистрир. пользователей.
2. Егорчев М. В. Моделирование продольного углового движения самолета: сопоставление теоретического, эмпирического и полуэмпирического подходов. / М. В. Егорчев, Д. С. Козлов, Ю. В. Тюменцев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2015. – № 211(1). – С. 116-123.
3. Boeing Commercial Airplanes. 747-400 Airplane Characteristics for Airport Planning. – Document D6-58326-1. – Seattle: Boeing, 2019. – 112 p. Электрон. копия печ. изд. — URL: [https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/747-400\\_REV\\_E.pdf](https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/747-400_REV_E.pdf) (дата обращения: 05.04.2026).
4. Аэромеханика самолёта: Динамика полёта: Учебник для авиационных ВУЗов / А.Ф. Бочкарёв и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с.
5. Fuel Quantity Indicating System (FQIS) // SKYbrary Aviation Safety. – URL: <https://skybrary.aero/articles/fuel-quantity-indicating-system-fqis> (дата обращения: 05.04.2026).
6. Teixeira M. Center of Gravity Position Optimization for Fuel Savings. – Covilha: Universidade da Beira Interior, 2012. – 145 p. — URL: [https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5096/1/3603\\_7304.pdf](https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/5096/1/3603_7304.pdf) (дата обращения: 05.04.2026).
7. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. – FAA-H-8083-25B. – Washington: FAA, 2016. – 528 p. Электрон. копия печ. изд. — URL: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/phak](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak) (дата обращения: 05.04.2026).

### **Сведения об авторах**

**Соколов Олег Аркадьевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой №13 «Системы Автоматизированного Управления», Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А.Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

**Силенко Алексей Сергеевич**, студент, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А.Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

**Малютин Артемий Михайлович**, студент, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А.Новикова, Санкт-Петербург, Россия.

### **Information about the authors**

**Sokolov Oleg Arkadevich**, candidate of technical sciences, associate professor, head of department №13 "Automated Control Systems", Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, Saint-Petersburg, Russia.

**Silenko Aleksei Sergeevich**, student, Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, Saint-Petersburg, Russia.

**Malyutin Artemiy Mikhailovich**, student, Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, Saint-Petersburg, Russia.