

На правах рукописи

АСТАПОВ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ЛЕТНО-ТЕХНИЧЕСКИХ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОВРЕМЕННЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ РЕАКТИВНЫХ САМОЛЕТОВ С ПОМОЩЬЮ
УБИРАЕМЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ГРЕБНЕЙ ГОНДОЛ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова» (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова).

Научный руководитель: **БАРАНОВ Николай Евгеньевич**,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
№ 14 «Аэродинамики и динамики полета» ФГБОУ ВО
СПбГУ ГА им. А.А. Новикова

Официальные оппоненты: **ЦИПЕНКО Владимир Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель
науки РФ, профессор кафедры аэродинамики, конструкций и
прочности летательных аппаратов ФГБОУ ВО «Московский
государственный технический университет гражданской
авиации»
ТИМОФЕЕВ Вадим Иванович,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
эксплуатации и управления аэрокосмическими системами
ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»

Ведущая организация: **ФГУП «Государственный научно-исследовательский
институт гражданской авиации» (ФГУП ГосНИИ ГА)**

Защита состоится «20» сентября 2024 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.002.01 на базе ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А. А. Новикова, по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38.

Тел.: (812) 704-18-18, факс: (812) 704-18-63, e-mail: info@spbguga.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова и на сайте: https://spbguga.ru/files/Dissovet/42.2.002.01/Astapov_Dissertacia.pdf

Автореферат разослан «16» июля 2024 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 42.2.002.01
канд. техн. наук, доц.

Н.Е. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

К концу XX века определилась наиболее эффективная аэродинамическая компоновка пассажирского лайнера, а именно: свободнонесущий низкоплан со стреловидным крылом, низкорасположенным оперением и двигателями, размещенными на пилонах под крылом, что обусловлено крайне высокой противоштопорной устойчивостью такой компоновки, а также удобством технического обслуживания двигателей и заправки самолета топливом. По такой схеме скомпонованы все производящиеся в настоящий момент дальне- и среднемагистральные самолеты. При этом, на большинстве из них, включая флагман отечественного самолетостроения МС-21, применяются аэродинамические гребни гондол двигателей. Эти гребни создают на себе вихрь, который, начиная с некоторого угла атаки, уменьшает затенение на верхней поверхности крыла от вынесенной вперед мотогондолы, таким образом, увеличивает коэффициент подъемной силы и улучшает взлетно-посадочные характеристики ВС.

Однако в режиме крейсерского полёта, характеризующегося малыми углами атаки ($\alpha=2-3^\circ$) затенения крыла гондолой двигателя не создается, но, тем не менее, аэродинамический гребень продолжает создавать вихрь, увеличивая сопротивление, так как является аэродинамической поверхностью очень малого удлинения и относительной толщины, работающей под собственным углом атаки.

Из вышесказанного следует, что убирание аэродинамического гребня на режимах полета, характеризующихся малыми углами атаки, представляется перспективной технологией уменьшения аэродинамического сопротивления, и, соответственно, сокращения расхода топлива и выбросов углекислого газа, и требует более полного изучения, что обуславливает актуальность темы исследования.

Научной задачей, решаемой в диссертации, является анализ, обоснование, обеспечение и оценка уровня летно-технических (таких, как максимальная дальность полета) и эксплуатационно-технических (таких, как часовой расход топлива, экономичность эксплуатации) характеристик воздушных судов, оснащенных убираемыми в полете аэродинамическими гребнями гондолы двигателя. Настоящая работа является очередным шагом (после выдвижения концепции) в разработке ресурсосберегающей и экологически ориентированной технологии – убирания аэродинамических гребней в полете. Путем выработки методики оценки эффективности такой технологии было выполнено информационное обеспечение процессов использования по назначению авиационной техники. По итогам работы, были сделаны выводы о возможности уточнения границ летной годности воздушных судов после применения новой технологии. На основании этих выводов, были обоснованы и определены требования к новой авиационной технике и эксплуатации перспективных воздушных судов.

Для решения этой научной задачи были исследованы работы в области экономичности летной эксплуатации самолетов. В этой области работали такие видные отечественные

ученые, как: Афанасьев Н.В., Бадягин А.А., Васильев А.Я., Гличев А.В., Громов Н.Н., Губенко А.В., Коваленко Г.В., Кочкарев Г.К., Михальчевский Ю.Ю., Мирошников А.В., Симакова С.Н., Тарасов Е.В., Федоров Л.П., Ципенко В.Г., Югов О.К. и другие. Весомый вклад (более десяти научных работ) в эту область знания внес Скрипниченко С.Ю.

Иностранцами исследователями этой проблематики были Джон Андерсон (John D. Anderson), Ховард Кёртис (Howard Curtis), Джон Мак-Мастерс (John McMasters), Дэниел Раймер (Daniel Raymer), Эгберт Торенбек (Egbert Torenbeek), Ричард Уиткомб (Richard T. Whitcomb) и другие.

Изучением именно аэродинамических гребней (вихрегенераторов, турбулизаторов) занимались Гарбарук А. В., Долотовский А.В., Сагайдак М. В., Ципенко В.Г., Шевяков В. И., Eaton J. K., Forster K.J., Godart G., Jansen D.P., Kim W.J., Konig J., Meunier M., Pearcey H., Pauley W.R., Souckova N., Sun Z., Taylor H.D., Veldhuis L.L.M., White T. R.

Настоящая работа является продолжением научных исследований зарубежных и отечественных авторов, а также развивает и дополняет идеи некоторых патентов. Концепция убирания аэродинамических гребней гондол двигателей была предложена в одном из них, однако оставались нераскрытыми вопросы о том, будет ли такая концепция эффективна, безопасна, какие экономические и экологические выгоды она дает. В настоящей работе эти вопросы были, по возможности, раскрыты.

Объект исследования – процесс эксплуатации современных реактивных транспортных самолетов.

Предмет исследования – летно-технические и эксплуатационные характеристики воздушных судов при применении технических устройств типа убираемых в полете аэродинамических гребней гондол двигателей.

Цель диссертационного исследования – обосновать возможность улучшения летно-технических характеристик современных реактивных транспортных самолетов за счет применения убираемых аэродинамических гребней гондол двигателей на участках набора высоты, крейсерского полета и снижения.

Задачи исследования:

1. Разработать метод оценки предельной эффективной массы устройства уборки-выпуска.
2. Разработать метод оценки экономической и экологической эффективности от применения убираемых аэродинамических гребней.
3. Оценить возможность возникновения неблагоприятных аэродинамических факторов, влияющих на безопасность полетов, при применении убираемых гребней.
4. Обосновать требования к перспективным образцам воздушных судов по оснащению их убираемыми аэродинамическими гребнями для повышения их летно-технических характеристик.

Научная новизна исследования заключается в том, что:

1. Обоснована целесообразность применения убираемых аэродинамических гребней с целью улучшения летно-технических характеристик воздушных судов с сохранением заданного уровня безопасности полетов.
2. Разработана методика, позволяющая оценить влияние использования убираемых аэродинамических гребней на эффективность летной эксплуатации на основе обработки данных средств сбора полетной информации (ССПИ).
3. Предложен метод расчета предельной эффективной массы устройств уборки аэродинамических гребней.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе результативно использованы методы численного моделирования для доказательства эффективности применения убираемых в полете аэродинамических гребней гондол двигателя. Изложены и изучены условия, обеспечивающие экономическую эффективность убираемых в полете аэродинамических гребней, в частности предельная масса устройства уборки-выпуска таких гребней. Разработан метод вычисления предельной эффективной массы устройства для уборки-выпуска таких гребней.

Практическая значимость исследования заключается в представлении по результатам работы новых требований к перспективной авиационной технике, а также количественной оценке выгод от применения описанной технологии. Результаты работы используются в отделе аэродинамического проектирования АО «ОКБ им. А.С. Яковлева» при рассмотрении возможности применения такой технологии на самолетах семейства МС-21, а так же на других перспективных образцах авиационной техники.

Методология исследования. Численное моделирование было выполнено с помощью программного обеспечения Autodesk Simulation CFD, которое численным методом решает уравнения Навье-Стокса, уравнения неразрывности и сохранения энергии. Программное обеспечение было верифицировано путем сравнения полученных в нем результатов с табличными для некоторых правильных геометрических фигур. На качественном уровне результат был подтвержден экспериментом в аэродинамической трубе СПбГУ ГА в условиях частичного механического подобия. Расчет экономической эффективности был выполнен аналитически, основываясь на данных, полученных при численном моделировании и в ходе лётного эксперимента. При расчете предельной эффективной массы устройства были использованы данные численного моделирования и аэродинамические параметры самолета, вычисленные из данных, полученных в ходе летного эксперимента.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод расчета предельной эффективной массы устройства уборки-выпуска аэродинамических гребней.
2. Методика оценки полетного качества и других аэродинамических характеристик самолета по данным средств сбора полетной информации (ССПИ).
3. Методика расчета изменений летно-технических характеристик, экономического и экологического эффекта при применении исследуемой технологии.

4. Результаты численного моделирования, дающие необходимые численные данные для оценки влияния рассматриваемой технологии на летно-технические характеристики ВС, а также качественные данные, позволяющие оценить возможность возникновения неблагоприятных аэродинамических факторов, влияющих на безопасность полетов, при применении убираемых гребней мотогондол.

5. Требования к воздушным судам, на которых применяются убираемые аэродинамические гребни гондол двигателей.

Достоверность полученных результатов подтверждается выполненной в рамках работы верификацией программного обеспечения, а на качественном уровне – экспериментом, проведенном в аэродинамической трубе.

Достоверность полученных результатов и адекватность основных положений подтверждаются:

- выполненной в рамках работы верификацией программного обеспечения;
- натурным экспериментом, проведенным в аэродинамической трубе;
- положительными отзывами специалистов при обсуждении на научно-практических, в том числе и международных, конференциях;
- экспертизой трех публикаций, отражающих основные результаты диссертации, в рецензируемых научных журналах и изданиях;

Степень достоверности и апробацию результатов проведенных исследований обеспечивают:

- апробация результатов исследований на трех научно-практических конференциях: XII Общероссийской научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (Санкт-Петербург, 2020); Всероссийской научно-практической конференции молодых авиаторов России «Авиация будущего: тренды, вызовы и возможности» (Казань, 2023); на II Международной молодёжной научно-практической конференции «Состояние и основные тенденции развития гражданской авиации» (Санкт-Петербург, 2024), а так же на семинарах в СПбГУ ГА.

- оценка организационного комитета по проведению конкурса «Молодые ученые транспортной отрасли» Министерства транспорта РФ в 2023 году с присвоением второго места за работу «Применение убираемых аэродинамических гребней гондолы двигателя для улучшения летно-технических характеристик гражданских воздушных судов: расчет предельной эффективной массы устройства и численное моделирование» по направлению «Новые транспортные средства, технологии, материалы».

Публикации. По результатам исследования опубликовано 3 научные статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, все из них по специальности 2.9.6. «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники», а также 3 статьи в сборниках трудов конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения. Количество страниц машинописного текста – 160, 8 таблиц, 59 рисунков, 111 источника в списке литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обусловлена актуальность работы касательно применения аэродинамических гребней гондол двигателей современных транспортных самолетов с двигателями, расположенными на пилонах под крылом, а также описаны те проблемы, которые применение таких гребней неизбежно создает.

В первой главе приведены результаты обзора научных работ и патентов по теме исследования. На рисунке 1 представлен выполненный по данным результатам сводный график эффективности методов уменьшения аэродинамического сопротивления.

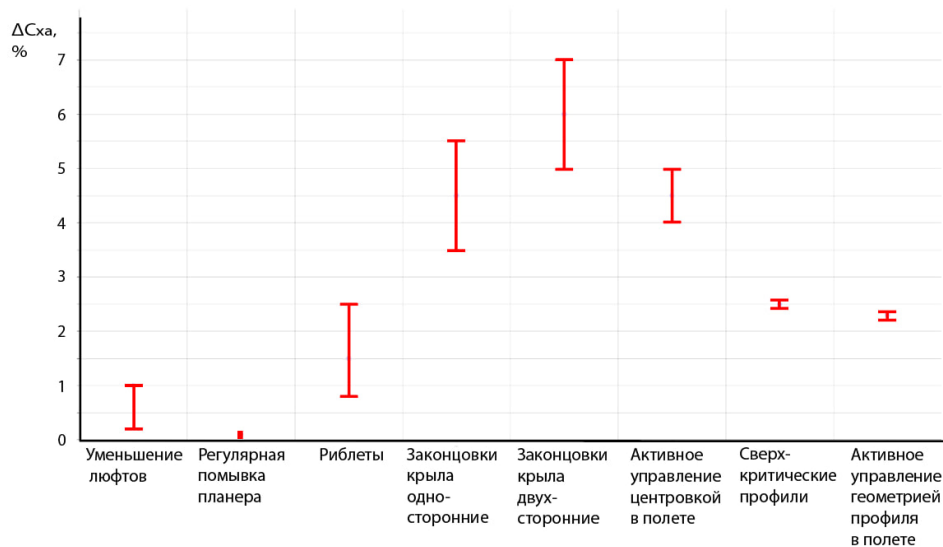


Рис. 1 – Сводный график эффективности методов уменьшения аэродинамического сопротивления

Так, на наш взгляд, в изученных работах остался открытым вопрос о том, насколько применение убираемых аэродинамических гребней гондол двигателя влияет на эффективность эксплуатации самолета и на безопасность полетов. Не исследован вопрос о предельной эффективной массе устройства уборки-выпуска таких гребней. Также, в первой главе отмечены исследования, позволяющие выполнить настоящую работу – например, о возможности применения численного моделирования для решения задач об обтекании воздухом гребней гондол двигателей.

Вторая глава посвящена численному моделированию динамики потока газа вблизи аэродинамических гребней гондолы двигателя. Для численного моделирования было выбрано программное обеспечение Autodesk Simulation CFD. Autodesk Simulation CFD – система автоматизированного проектирования, предназначенная для расчетов и моделирования потоков движения жидкостей и газов, а также процессов теплопередачи и тепло- и массообмена. Программное обеспечение было верифицировано путем продувки в нем тел правильной геометрической формы, вычисления полученного коэффициента сопротивления и

сравнения его с табличным значением. Полученная относительная погрешность менее 1% говорит о том, что данное программное обеспечение могло быть успешно использовано для решения задач в рамках настоящей работы.

В качестве модели для численных оценок был выбран типичный среднемагистральный самолет Airbus A319. Геометрические параметры аэродинамического гребня гондолы двигателя и самой мотогондолы были сняты с самолета A319-111, регистрационный номер VP-BBU, серийный номер 01630, они приведены на рисунке 2.

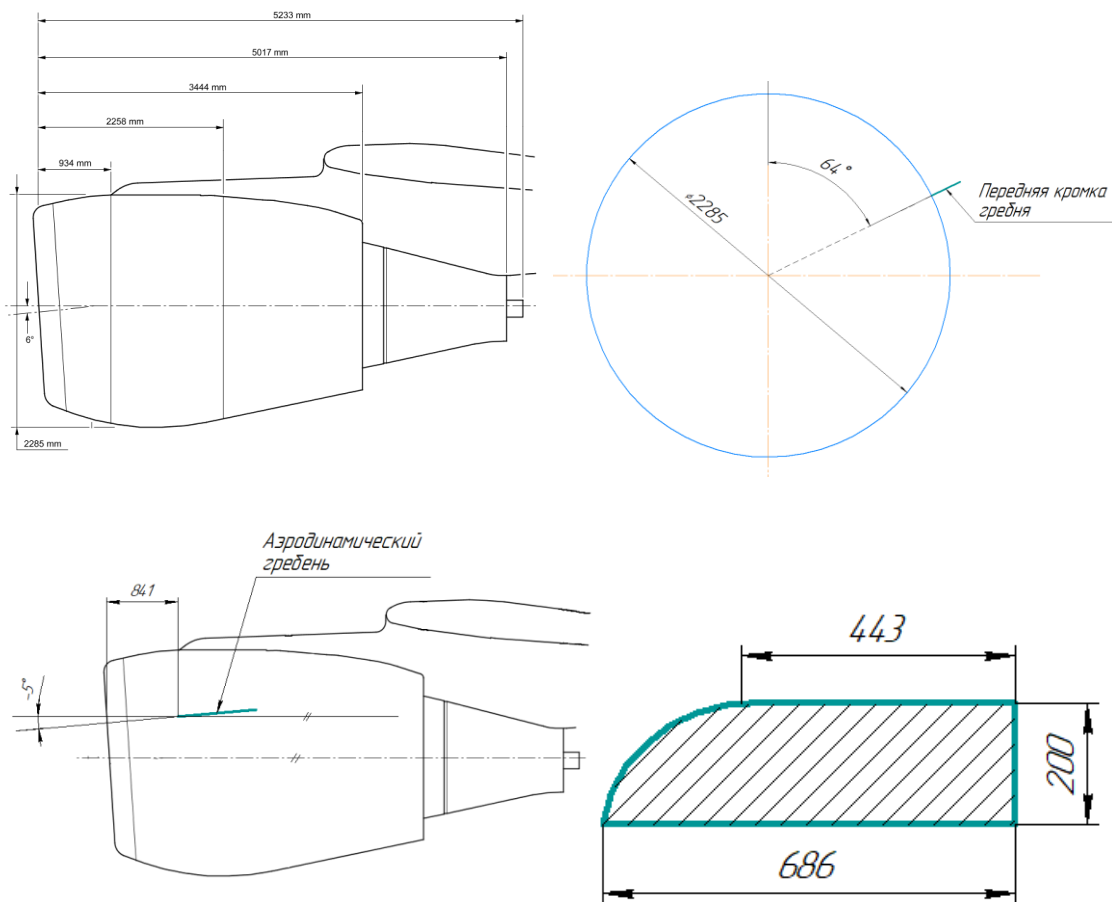


Рис. 2 – Геометрические параметры модели

По полученным размерам были построены две 3D-модели гондолы двигателя с пилоном и участком центроплана, к которому крепится пилон. Одна модель содержит гребень, вторая нет. Двигатель внутри мотогондолы не моделировался, т.к. в конечном итоге интерес представляла разница сопротивлений, создаваемых двумя моделями. Сопротивление, которое бы вносил двигатель, при вычитании сокращалось, а влияния на обтекание в окрестности гребня (за мотогондолой) двигатель не оказывает. Обе модели представлены на рисунке 3.

Модель была верифицирована путем сравнения результатов численного моделирования для модели, выполненной в масштабе 1:12, и результатов, полученных в ходе натурного эксперимента в аэродинамической трубе (рисунок 4).

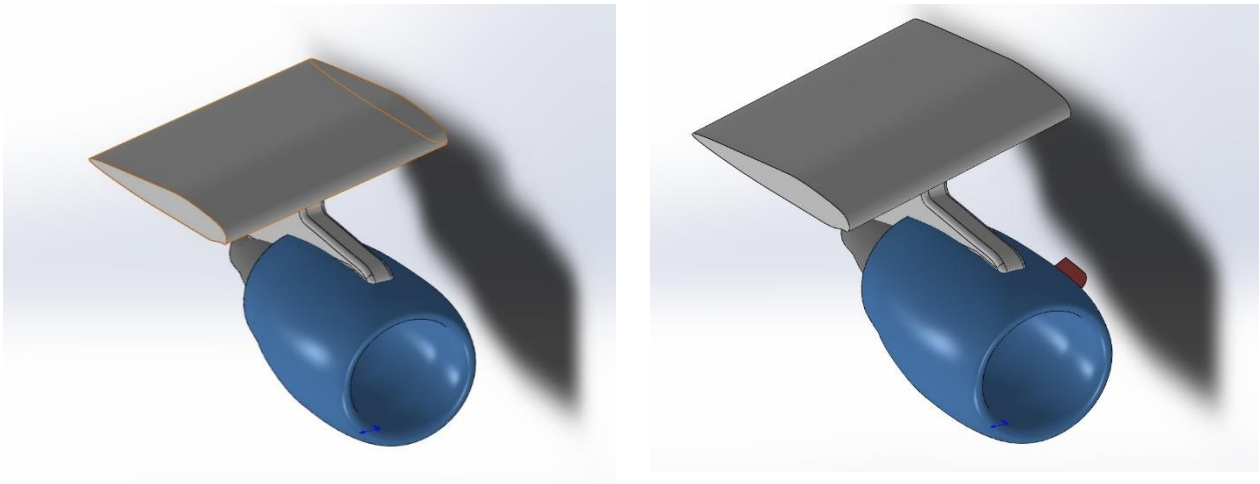


Рис. 3 – 3D-модели для численного исследования

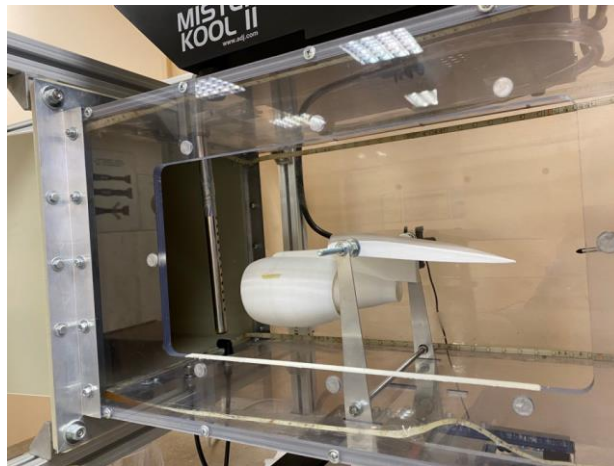


Рис. 4 – 3D-модель в аэродинамической трубе

По результатам натурного эксперимента было получено значение силы лобового сопротивления $C_{xa} = 2163$ мН на угле атаки $\alpha = 3^\circ$ (рисунок 5).

После выполненного натурного эксперимента были измерены температура и давление в помещении, в котором производилось исследование. Далее было проведено численное моделирование с той же 3D моделью, скоростью, температурой и давлением, как и в натурном эксперименте. По результатам численного моделирования сила лобового сопротивления составила $C_{xa} = 1931$ мН (рисунок 6).

Относительная погрешность, таким образом, составляет:

$$\delta = \frac{2163 - 1931}{2163} = 0,107 = 10,7\% \quad (1)$$

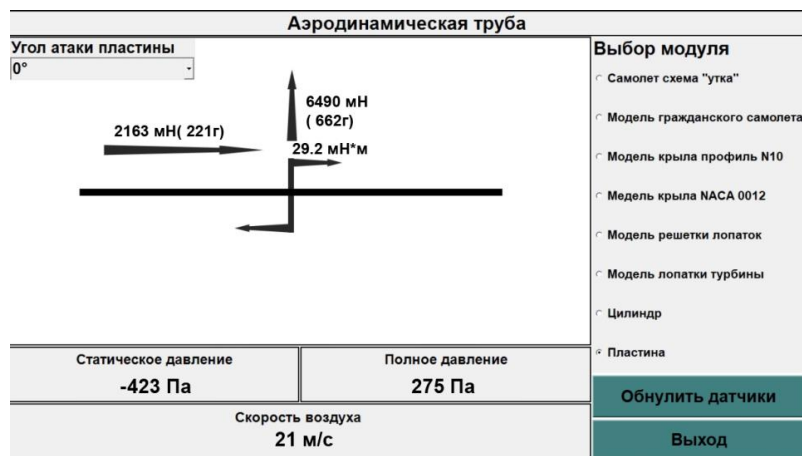


Рис. 5 – Результаты натурного эксперимента в аэродинамической трубе

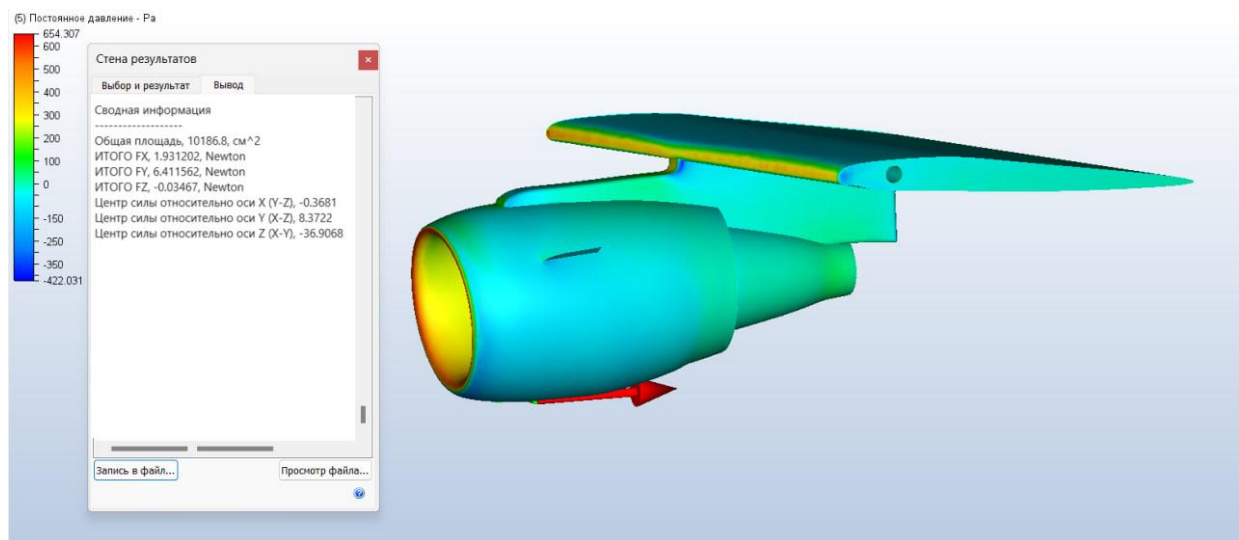


Рис. 6 – Результаты численного моделирования

По результатам численного моделирования было получено меньшее сопротивление, чем в натурном эксперименте. Этому способствовало два фактора: напечатанная на 3D-принтере модель имеет шероховатости (артефакты печати), в то время, как компьютерная модель гладкая; а так же в натурном эксперименте дополнительное сопротивление создавал подвес модели. Учитывая это, можно обоснованно полагать, что относительная погрешность для математической модели составляет менее 10%, что позволяет ее использовать.

Исследование проводилось при следующих параметрах. Среда: сжимаемый воздух (вязкий газ). Числа M полета 0,7; 0,72; 0,74; 0,76; 0,78; 0,8; 0,82. Углы атаки силовой установки 2°; 2,5°; 3°. Статическое давление и плотность воздуха соответствуют, согласно ГОСТ 4401-81 «Стандартная атмосфера», высотам полета в стандартной атмосфере 11900 м. (эшелон полета 390); 11600 м. (эшелон полета 380); 11300 м. (эшелон полета 370); 11000 м. (эшелон полета 360); 10700 м. (эшелон полета 350); 10350 м. (эшелон полета 340); 10050 м. (эшелон полета 330); 9750 м. (эшелон полета 320); 9450 м. (эшелон полета 310); 9150 м. (эшелон полета 300); 8850 м. (эшелон полета 290); 8550 м. (эшелон полета 280). Выбранные параметры

перекрывают большую часть диапазона скоростей, высот и весов (выраженных в величине угла атаки) для типичного среднемагистрального самолета.

По результатам численного моделирования, путем вычитания из сопротивления, создаваемого моделью с гребней, сопротивления модели без гребня, были получены зависимости дополнительно вносимого гребнем сопротивления. Сводные графики представлены на рисунке 7.

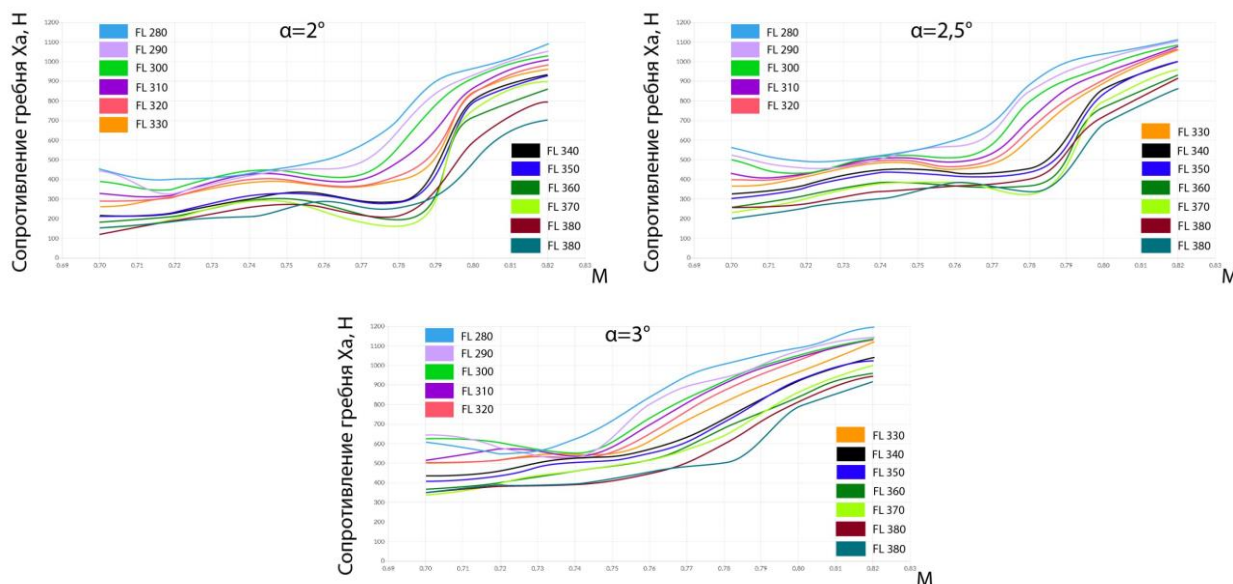


Рис. 7 – Зависимость сопротивления аэродинамического гребня от высоты и скорости, полученная по результатам численного моделирования для различных углов атаки

По результатам численного моделирования был так же сделан вывод о том, что применение убираемых в полете гребней не влияет на безопасность полетов (при соблюдении определенных требований). На рисунке 8 отображение линий тока настроено таким образом, что отображаются только линии тока в окрестности гребня. Видно, что вихрь, рожденный гребнем не взаимодействует ни с нижней, ни, тем более, с верхней поверхностью крыла.

Анализируя модель, расположенную под углом атаки $\alpha=2^\circ$, было замечено, что на таком угле атаки гребень начинает создавать аэродинамическую силу, имеющую компонент противоположный подъемной силе всего самолета. На рисунке 9.1 – 9.2 показаны область повышенного давления (подпора) на верхней поверхности гребня (рис. 9.1), и область пониженного давления (подсоса) на нижней поверхности гребня (рис. 9.2).

Из этого можно сделать вывод, что на некоторых полетных углах атаки негативное влияние гребня выражается не только в создании им дополнительного паразитного сопротивления, но и в создании отрицательной подъемной силы, которая вынуждает увеличивать угол атаки всего самолета. На качественном уровне этот результат был верифицирован в аэродинамической трубе при соблюдении критерия подобия по числу Re.

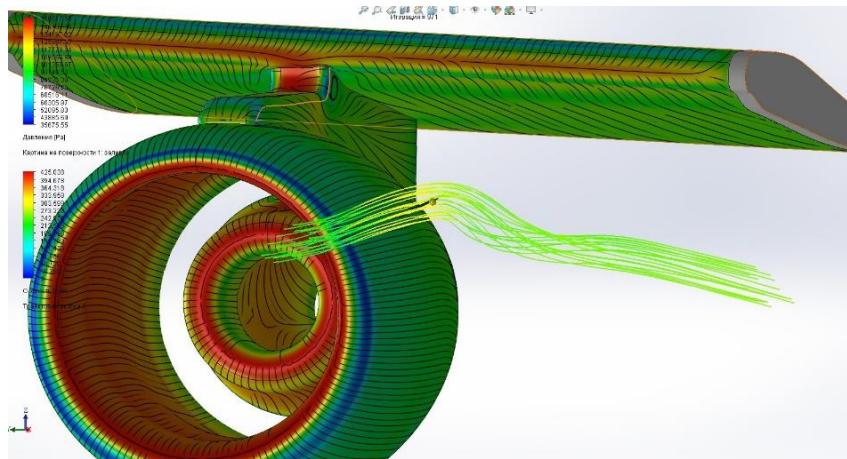


Рис. 8 – Линии тока в окрестности аэродинамического гребня при угле атаки $\alpha=3^\circ$

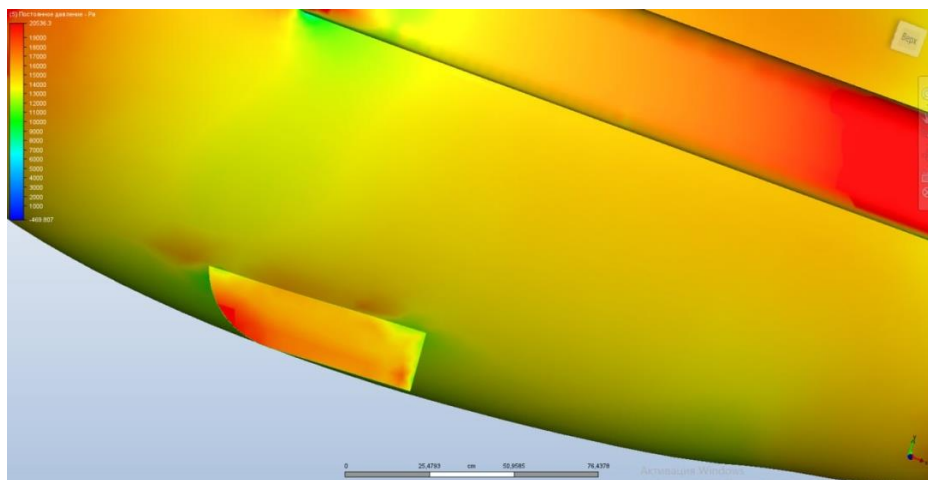


Рис. 9.1 – Область подпора на верхней поверхности гребня при угле атаки $\alpha=2^\circ$

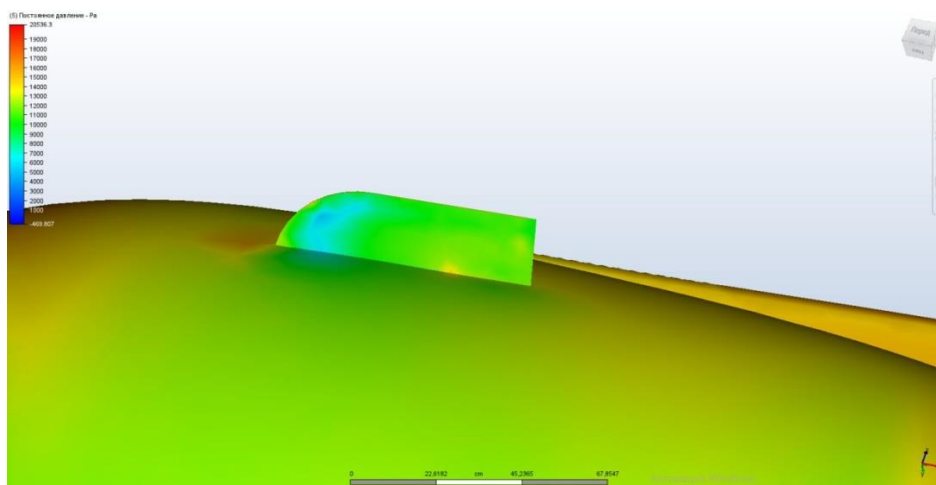


Рис. 9.2 – Область подсоса на нижней поверхности гребня при угле атаки $\alpha=2^\circ$

В третьей главе был разработан метод, по которому был выполнен расчет предельной массы устройства уборки-выпуска аэродинамического гребня, при которой сохраняется экономический смысл всей концепции.

Убирание аэродинамического гребня gondoly двигателя преследует собой цель уменьшение аэродинамического сопротивления лайнера в крейсерском полете, наборе высоты и снижении, а как следствие – снижение расхода топлива и увеличение экономичности эксплуатации. Устройство, устанавливаемое на самолет и обеспечивающее убирание гребня, неизбежно будет обладать некоторой массой, увеличивающей полетную массу самолета. Это, в свою очередь, приведет к увеличению полетного угла атаки и индуктивного сопротивления. Очевидно, что существует некоторая предельная масса устройства, при которой величина дополнительного индуктивного сопротивления, вызванного его массой, будет равна уменьшению лобового сопротивления из-за уборки гребня, и эффективность устройства с такой массой будет равна нулю. Устройство с массой ниже критической будет иметь экономическую эффективность при установке на самолет. Расчет предельной массы устройства убирания так же необходим для эскизного проектирования и создания прототипа такого устройства.

Метод оценки предельной массы устройства уборки-выпуска аэродинамических гребней gondoly двигателя состоит в следующем:

1. Построить 3D-модель исследуемого гребня и gondoly двигателя, пилонa и участка крыла с пилоном. Построить вторую 3D-модель без аэродинамического гребня. Сам двигатель внутри gondoly допускается не моделировать, так как наличие гребня не оказывает влияния на течение воздуха в двигателе.
2. Используя пакеты прикладных программ, произвести численное моделирование течения воздуха на обеих моделях, на интересующих режимах полета (скорость, высота, угол атаки).
3. Вычислить разницу сопротивлений, создаваемых первой и второй 3D-моделью. Это и будет аэродинамическое сопротивление гребня. Взять наименьшее из получившихся сопротивлений.
4. Используя формулу $\Delta G = K \Delta X_a$, по величине полетного качества оценить, предельный эффективный вес (массу) устройства. Если полетное качество неизвестно, его можно оценить, выполнив следующую блок-схему (рисунок 10):

Вычисленная с применением этого метода максимальная масса устройства выпуска и уборки аэродинамического гребня gondoly двигателя, при которой есть целесообразность установки такого устройства, для самолета Airbus A319, который был выбран в качестве прототипа типичного среднемагистрального самолета, составляет 172 кг. В оценке величины этого параметра, в том числе, заключается научная новизна настоящей работы.

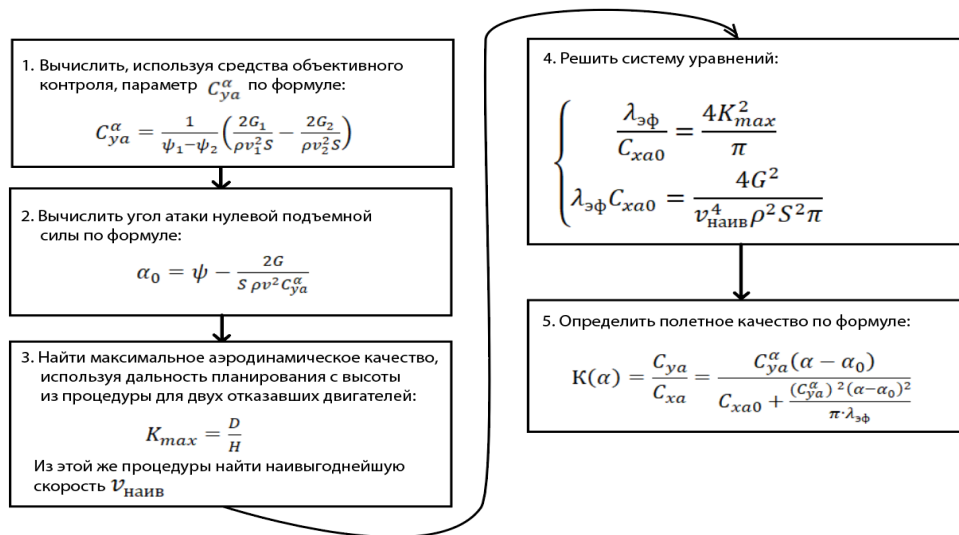


Рис. 10 – Блок-схема для определения полетного качества по данным ССПИ.

В четвертой главе был выполнен расчет экономического и экологического эффекта от применения убираемых аэродинамических гребней в абсолютных и относительных величинах.

Для расчета показателей экономичности были использованы данные, полученные по результатам численного моделирования, а также летного эксперимента и летных испытаний. При этом, для простоты и запаса по точности расчетов, масса одного устройства уборки-выпуска гребня принята за 127 кг, что в несколько раз больше той, которую дает эскизное проектирование.

Формула потребной тяги горизонтального полета говорит нам о том, что увеличение полетного веса самолета увеличивает потребную тягу горизонтального полета на величину в K раз меньшую приращения веса, где K – аэродинамическое качество самолета. Качество самолета на крейсерском режиме было оценено в главе 3. Оно составило примерно 14. Для еще большего запаса в оценках, его значение было уменьшено на 10%. Тогда дополнительный вес в 1235 Н создаст дополнительное индуктивное сопротивление:

$$\Delta X_{ai} = \frac{\Delta G}{K} = \frac{1235}{12,6} \approx 98 \text{ Н} \quad (2)$$

Результирующее прирост сопротивления (отрицательный по модулю, по сути – уменьшение), таким образом, составит:

$$\Delta X_a = \Delta X_{ai} - X_{aг} \quad (3)$$

Этот параметр был вычислен для всех диапазонов режимов полета, исследуемых в настоящей работе.

Абсолютное уменьшение часового расхода на режиме крейсерского полета составляет:

$$\Delta C_h = C_{уд} \cdot \Delta P = C_{уд} \cdot \Delta X_a \quad (4)$$

где $C_{уд}$ – удельный расход топлива, известная для самолета величина. Относительное изменение получим, разделив абсолютное уменьшение часового расхода на его величину для разных режимов полета. Последняя величина была получена после обработки данных средств

сбора полетной информации (ССПИ) на реальных самолетах в реальных производственных полетах. Всего были собраны данные с более чем 250 полетов. Абсолютное уменьшение часового расхода топлива было вычислено для всех режимов полета, исследуемых в работе, за исключением тех, которые выходят за рамки эксплуатационных, вследствие чего на них было невозможно измерить часовой расход топлива. В качестве примера, на рисунке 11 приведен график для высоты $H=11000$ м.

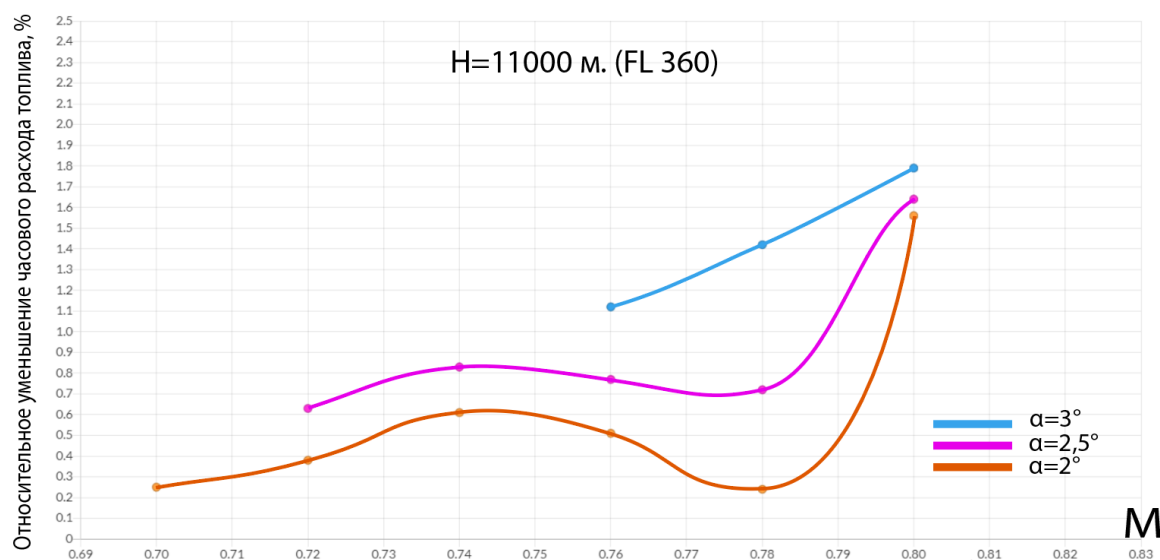


Рис. 11 – Уменьшение расхода топлива, $H = 11000$ м. (FL360)

Таким образом, если выбранный прототип оснастить четырьмя убирающимися аэродинамическими гребнями (вместо четырех стационарных), уменьшение часового расхода топлива на этапе крейсерского полета может составлять от 1,00 % до 8,28 %. Расход топлива в крейсерском полете составляет для среднемагистрального самолета 67,5 % от топлива, затрачиваемого на выполнение всего рейса. Тогда, экономия топлива может составлять от 0,67 % до 5,36 %. Для дальнемагистральных самолетов эта величина может быть больше из-за большей доли режима крейсерского полета. Приращение целевой функции ξ (пассажиро-километр на литр топлива) будет равно величине экономии топлива, и составлять от 0,67 % до 5,36 %, или в абсолютном выражении (при среднем значении 32) от 0,214 до 1,715.

Для самолета A319 (выбранный прототип) средний расход топлива за рейс составляет 4415 кг. Тогда, при применении четырех убираемых аэродинамических гребней, экономия топлива за рейс может составлять от 30 кг до 237 кг, в среднем 133,5 кг. За год, таким образом, при средней интенсивности полетов 1800 полетов в год, экономия на одном самолете может составить от 54 т до 426,6 т топлива, в среднем 240,3 т топлива. При средней цене за авиационный керосин 67173 р/т, годовая экономия может составить от 3,6 млн. р. до 28,7 млн. р., в среднем 16,12 млн. р. Относительное снижение всех эксплуатационных расходов после применения изучаемой технологии, с учетом доли расходов на топливо, может составить 0,20% – 1,65%.

Далее, в соответствии с «Методическими указаниям и руководству по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность на территории Российской Федерации», был выполнен расчет экологического эффекта от применения технологии убираемых аэродинамических гребней для выбранного прототипа. Среднее значение сокращения выбросов углекислого газа для одного самолета составило 540,6 т CO_2 /год.

На основании проведенных исследований предложена методика оценки влияния применения технологии убираемых аэродинамических гребней на летно-технические характеристики ВС, а также экономического и экологического эффекта от применения такой технологии, состоящая в следующем:

1. Построить 3D-модель исследуемого гребня и гондолы двигателя. Построить 3D-модель только гондолы двигателя. Сам двигатель внутри гондолы допускается не моделировать, так как наличие гребня не оказывает влияния на течение воздуха в двигателе.
2. Используя пакеты прикладных программ, произвести численное моделирование течения воздуха на обеих моделях, на наиболее характерных режимах полета (скорость, высота, угол атаки).
3. Вычислить разницу сопротивлений, создаваемых одной и второй 3D-моделью. Это и будет аэродинамическое сопротивление гребня.
4. Используя метод расчета предельной эффективной массы устройства уборки-выпуска аэродинамического гребня, рассчитать такую массу.
5. Оценить эскизную массу устройства уборки-выпуска аэродинамического гребня. Взять некоторый запас. Убедиться, что такая масса меньше или равна максимальной эффективной массе.
6. По величине полетного качества оценить, какое дополнительное индуктивное сопротивление вызовет такая масса.
7. Вычесть из величины, полученной в п. 3 величину, полученную в п.6.
8. Оценить, используя значения удельного расхода топлива для конкретного типа двигателя и величину, полученную в п.7, величину прироста часового расхода топлива.
9. Зная абсолютное увеличение часового расхода топлива, оценить его относительное увеличение на изучаемом этапе полета. Часовой расход топлива для интересующего режима получить по данным ССПИ, используя статистически достоверную выборку.
10. Зная долю исследуемого этапа полета в полном расходе топлива, оценить общее относительное увеличение расхода топлива.
11. На полученную в п.10 величину будет так же изменяться и показатель топливной эффективности – пассажиро-километр на литр топлива.
12. Зная абсолютное увеличение расхода топлива и его стоимость, оценить стоимость сэкономленного топлива.
13. Используя величину из п.12 и зная общие эксплуатационные расходы, оценить относительное их изменение при применении технологии.

14. Выброс углекислого газа оценить, зная абсолютное увеличение расхода топлива и используя «Методические указания и руководство по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность на территории Российской Федерации».

При применении технологии убираемых в полете аэродинамических гребней необходимо не допустить снижения уровня безопасности полетов. Поэтому, если такая технология будет применяться, выпуск гребней должен быть надежным и безусловным (условия должны выполняться только для их уборки). Так, например, необходимо требовать механический принудительный выпуск (например, от пружины) при отказе управляющей или силовой электрической линии, подходящей к агрегату уборки-выпуска. Так же, для уборки гребней должны быть строго оговорены минимальные высоты, скорости и максимальный угол атаки. Уборка гребней допускается только при убранной механизации крыла. Предлагаемая логическая схема для уборки гребней представлена на рисунке 12.

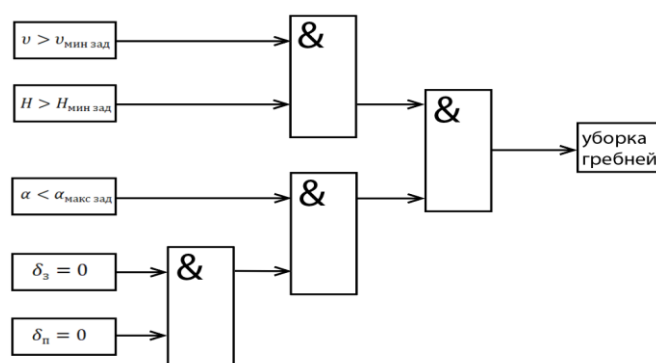


Рис. 12 – Предлагаемая логическая схема линии управления.

Предлагаемая логическая схема может быть реализована только электронным способом. Учитывая это, предлагается сделать уборку гребней автоматической для того, чтобы не увеличивать нагрузку на экипаж, не изменять технологию его работы и не проводить дополнительное обучение летного состава.

Процедура обработки отказа выпуска гребней должна гарантировать крыло от появления затенения и ухудшения его несущих свойств. Для этого предлагается процедуру при отказе выпуска гребней создать в ключе всех процедур обработки отказа механизации. Все они требуют увеличения скорости захода на посадку, для того, чтобы заход на посадку и посадка выполнялась на углах атаки меньших, чем при нормальной эксплуатации. Процедуру при отказе уборки таких гребней предлагается так же сделать в ключе существующих процедур при тех отказах, которые увеличивают расход топлива, а именно: вычислить прирост часового расхода топлива и внести его в таблицу, которой экипаж пользуется для расчетов увеличенного расхода топлива, которое не может посчитать бортовой компьютер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, можно сформулировать следующие основные результаты диссертационного исследования:

1. Показана возможность повышения эффективности летной эксплуатации путем применения убираемых в полете аэродинамических гребней.

2. Разработан метод оценки максимальной эффективной массы устройства-выпуска таких гребней. Такая масса была вычислена для выбранного прототипа. Масса, определенная при эскизном проектировании таких устройств, не превышает вычисленную предельную эффективную массу, что обосновывает целесообразность применения технологии убираемых в полете гребней гондол двигателей.

3. Разработана методика количественной оценки эффективности применения технологии убираемых в полете гребней гондол. С использованием этой методики получены результаты, доказывающие возможность экономии значительного количества топлива и заметного снижения выбросов углекислого газа в атмосферу.

4. Установлено, что на режимах крейсерского полета, возмущенная гребнем область потока не касается крыла, поэтому не влияет на его несущие свойства. Исходя из этого, можно обоснованно утверждать, что убирающиеся на крейсерском режиме полета гребни не ухудшают безопасности полетов, при выполнении сформулированных в работе требований.

5. На основе проведенных исследований сформулированы требования к перспективным образцам авиационной техники, оснащаемых убираемыми в полете аэродинамическими гребнями (турбулизаторами) гондол двигателей, подвешенных на пилонах под крылом.

6. На основании обобщения результатов исследования в развитие существующих эксплуатационных процедур сформулированы предложения по внесению в них изменений, связанных с применением технологии убираемых аэродинамических гребней гондол двигателей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня рецензируемых изданий ВАК:

1. Астапов, И. В. Применение убираемых аэродинамических гребней гондолы двигателя для улучшения летно-технических характеристик гражданских воздушных судов / И. В. Астапов, Н. Е. Баранов, Ю. Ю. Михальчевский // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2023. – № 2(39). – С. 5-14.

2. Астапов, И. В. Исследование динамики взаимодействия воздушного потока с аэродинамическим гребнем гондолы двигателя при различных полетных характеристиках / И. В. Астапов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2023. – № 4(41). – С. 5-12.

3. Астапов, И. В. Методика оценки экономической и экологической эффективности применения убираемых в полете аэродинамических гребней / И. В. Астапов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2024. – № 1(42). – С. 66-74.

Статьи в сборниках трудов конференций:

1. Астапов, И. В. Применение аэродинамических гребней гондолы двигателя для улучшения лётных характеристик воздушных судов при различных режимах полёта: проблематика исследования / И. В. Астапов, Н. Е. Баранов // Молодежь. Техника. Космос: труды XII общероссийской молодежной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 2020 г. В 4 т. Т. 1. / Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова. - СПб., 2020. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 66). - С.32-34.

2. Астапов, И. В. Методика расчета предельной эффективной массы устройства уборки-выпуска аэродинамических гребней гондолы двигателя воздушного судна / И. В. Астапов // Авиация будущего: тренды, вызовы и возможности: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Авиация будущего: тренды, вызовы и возможности», Казань, 6-8 декабря 2023 г. – М.: Издательство Ипполитова, 2024. -С.18-23.

3. Астапов, И. В. Анализ характера обтекания крыла при применении убираемых аэродинамических гребней гондол двигателей у современных транспортных реактивных самолетов и его влияние на безопасность полетов / И. В. Астапов // Состояние и основные тенденции развития гражданской авиации: Сборник материалов II Международной молодежной научно-практической конференции – СПб: СПбГУ ГА, 2024 – С. 154-158.

Печатается в авторской редакции.
Подписано к печати 11.07.2024. Формат бумаги 60х90^{1/16}.
Тираж 100. Усл.печ.л. 1,15. С 140. Заказ 472
Тип. Университета ГА. 196210 С.-Петербург, ул. Пилотов, д.38