

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

На правах рукописи



КИРЕНЧЕВ АНТОН ГЕННАДЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ
СУДОВ В ОЖИДАЕМЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность 05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент кафедры ЛА и Д Иркутского филиала МГТУ ГА **Даниленко Николай Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, главный специалист отдела конструктивно-технологического перспективных проектов филиала АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей» (филиал АО «ОДК» «НИИД») **Евдокимов Алексей Иннокентьевич.**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Физика, механика и приборостроение» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения» **Пахомов Сергей Васильевич.**

Ведущая организация: **Федеральное государственное унитарное предприятие Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ФГУП ГосНИИ ГА)**

Защита состоится 20 января 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета ДС 223.011.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, дом 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

**Учёный секретарь диссертационного совета
Д 223.011.01, профессор, доктор технических наук**



В.М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Нередко в процессе технического обслуживания воздушных судов, опробования двигателей на стоянке и газовой площадке, при рулении воздушных судов (ВС) по рулёжным дорожкам и взлётно-посадочной полосе в двигатели попадают частицы аэродромной засорённости (посторонние предметы), которые могут привести к разрушению элементов проточной части силовой установки. Одной из основных причин попадания посторонних предметов (ПП) с поверхности аэродрома в ГТД являются интенсивные вихревые течения. Они образуются при работе двигателя между входным устройством (ВУ) и поверхностью аэродрома. Вихревые шнуры циркуляционным потоком захватывают ПП. Последние, соударяясь с неровностями поверхности аэродрома, подсакаются и со стоковым потоком воздуха засасываются в проточную часть воздухозаборника (ВЗ) и ГТД.

При соударении ПП с лопатками направляющих аппаратов и рабочих колёс ОК на их поверхности образуются забоины. Повреждения проточной части ОК в виде недопустимых забоин, вмятин, трещин и др. ведут к досрочному снятию двигателей с эксплуатации (ДСД) и к большим финансовым затратам на демонтаж повреждённых и монтаж новых двигателей. Как следствие, авиапредприятия и государство теряют большие денежные средства из-за досрочного снятия ГТД. Серьёзные последствия могут возникнуть в случае разрушения лопаток, которые способны повлечь за собой разрушение не только компрессора, но и газотурбинного двигателя. Разрушение двигателя в процессе взлёта и полёта ВС может стать причиной его катастрофы.

Проблема ДСД с эксплуатации в гражданской авиации актуальна на протяжении всей истории развития реактивной авиации. Развитие авиационных двигателей имеет тренд на увеличение объёмов секундного массового расхода воздуха через их воздушный канал, что приводит к увеличению интенсивности вихревых течений, возникающих под входными устройствами на поверхности аэродрома. Это косвенно приводит к увеличению процента посторонних предметов, засасываемых в ГТД вихрями.

Следует также учесть, что аэродромы располагаются под открытым небом при различных погодных и температурных условиях. В результате этого бетонные покрытия рулёжных дорожек (РД), площадок для запуска и опробования двигателей и взлётно-посадочная полоса (ВПП) испытывают температурные деформации и внутренние напряжения, что дополнительно приводит к их разрушению и появлению аэродромной засорённости в виде разного рода мелких ПП, которые также могут быть увлечены стоковым потоком в тракт ГТД. Особо опасны продукты пыльных и песчаных шквалов.

Немаловажным фактором, влияющим на досрочное снятие двигателей, является и несоблюдение технологической дисциплины ИТС при выполнении видов работ по обслуживанию ВС. В процессе выполнения работ технический состав нередко оставляет на бетонных покрытиях кусочки контрольной проволоки, шпильки и другие элементы расходного материала. Попадание этих предметов в двигатель может так же привести к недопустимым повреждениям проточной части двигателей и к их досрочному снятию с эксплуатации. (случайно)

Следует отметить, что современные ВС имеют тенденцию к использованию силовых установок с низко расположенными ВУ. Это ведёт к увеличению интенсивности вихревого засасывания ПП и абразива внутрь ГТД в режиме «пылесоса».

Следовательно, снижение повреждаемости двигателей посторонними предметами остаётся достаточно актуальной задачей. Процесс засасывания ПП при работе ГТД на земле установлен. Но существует проблема отсутствия теории формирования вихревой активности стокового потока перед ВЗ при работе ГТД на земле. Также следует отметить, на современном этапе наземной эксплуатации ГТД при низком расположении ВУ надстилающей поверхностью аэродрома они переходят в режим работы «пылесоса». Следовательно, появилась и заявляет о себе новая проблема вихревого засасывания абразива – песка и мельчайших частиц износа поверхности не только бетонного покрытия аэродрома, но и абразива в виде продукта износа резины пневматиков при посадке ВС на ВПП и активном их торможении.

Степень разработанности вопроса. Решение проблемы повреждения авиационных двигателей посторонними предметами и абразивом в процессе их наземной эксплуатации достигается следующими способами:

- а) установкой на ВС бортового защитного устройства, предотвращающего попадание посторонних предметов, песка и пыли в тракт ГТД;
- б) соблюдением технологической дисциплины инженерно-техническим составом при выполнении видов работ на ВС;
- в) улучшением качества бетонных покрытий аэродромов;
- г) подбором наиболее рациональной геометрической формы воздухозаборника ГТСУ с минимальной активностью к образованию интенсивных вихрей;
- д) выявлением влияния условий эксплуатации на процесс вихревого засасывания ПП и абразивных частиц в воздушный тракт ГТД, с последующим использованием полученных результатов для совершенствования организации технологических процессов обслуживания воздушных судов.

В предыдущих работах по данному направлению большинство авторов шли по первым (а - г) путям познания вихреобразования (ВО), но не в полной мере исследовали влияние условий эксплуатации на процесс вихревого засасывания посторонних предметов. К настоящему времени исследователями разработаны программы на базе метода дискретных вихрей, моделирующие интерференционные вихревые течения под входными устройствами двигателей, но не учитывающие влияния на данный процесс суточного вращения Земли. Спроектированы и запатентованы различные защитные устройства, позволяющие уменьшить интенсивность вихря или полностью разрушить его, которые являются эффективными против больших посторонних предметов, но недостаточно хорошо останавливают частички песка и пыли, способствующие абразивному износу элементов авиационного двигателя. Все достижения учёных по выбранной теме подробно рассмотрены в работе. Но по общей информации можно сделать предварительный вывод, что в постановке задачи на исследование процесса интенсивности вихревого засасывания ПП в тракт ГТД в работе также необходимо учитывать влияние новых ожидаемых условий эксплуатации, которые не были в полной мере рассмотрены учёными ранее.

Ожидаемые условия эксплуатации воздушного судна учитываются при поддержании лётной годности. Внешние (ожидаемые) условия эксплуатации охватывают номенклатуру факторов и условий, возникающих в процессе эксплуатации ВС, и влияющих на работоспособность, надёжность и параметры работы конструкции, функциональных систем и оборудования, которые подлежат учёту в полной мере для достижения установленного уровня лётной годности.

Целью данной работы является: Совершенствование методов организации технологических процессов обслуживания воздушных судов в ожидаемых условиях эксплуатации путём учёта суточного вращения Земли, а также влияния рифления аэродромных панелей под воздухозаборником авиационного двигателя на процесс захвата вихрем ВЗ посторонних предметов и абразива в режиме пылесоса. Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

- исследовались внешние условия, влияющие на процесс вихреобразования (ВО) перед входными устройствами авиационных двигателей ВС при их обслуживании, с целью выявления новых ожидаемых условий эксплуатации;
- исследовались и анализировались основы теории вихревого движения для выявления не учтённых факторов вихревой активности стоковой среды;
- сила и закономерности влияния новых ожидаемых условий эксплуатации исследовались методами математического и экспериментального моделирования;
- на основании полученных результатов совершенствовались методы организации технологических процессов обслуживания ВС в новых ожидаемых условиях эксплуатации.

Объектом исследования является входное устройство авиационного двигателя, как элемент воздушного судна, формирующий вихри в процессе наземной эксплуатации.

Предметом исследования являются методы организации процессов обслуживания воздушных судов в ожидаемых условиях эксплуатации.

Методы исследования. В работе, в зависимости от решаемых задач, были использованы экспериментальные и аналитические методы исследования процессов вихреобразования и вихревого засасывания посторонних предметов в газовоздушный тракт моделей входного устройства авиационного газотурбинного двигателя. Такими же методами исследовалось влияние различных внешних условий на рассматриваемые процессы. Методика проведения исследований приведена для каждого метода отдельно по тексту работы.

Научная новизна работы:

- на основании базового метода дискретных вихрей проф. д. т. н. С. М. Белоцерковского с введением в его постановку задачи нового граничного условия отклоняющего действия силы Кориолиса создан модифицированный метод математического моделирования одноименных стоковых вихрей ВЗ при работе ГТД на земле;

- на базе метода газо-гидродинамической аналогии создан метод экспериментального моделирования исключительно стоковых вихрей ВЗ в поле отклоняющего действия силы Кориолиса;

- на основании проведенных экспериментов и математического моделирования получены закономерности влияния суточного вращения Земли и формы рифления аэродромных плит на процесс вихревого засасывания ПП и абразива в ВЗ газотурбинного двигателя при обслуживании ВС на земле;

- дополнена концепция зон особой чистоты средних и полярных широт в местах активного вихреобразования под воздухозаборниками газотурбинных двигателей ВС, определяемых ростом вихревой активности стокового потока в поле действия силы Кориолиса.

Практическая значимость полученных результатов

- результаты, полученные в работе, имеют практическую значимость в расширении требований лётной годности путём учёта новых факторов влияния силы Кориолиса на вихревую активность стоковых потоков под ВЗ при наземной эксплуатации авиационных ГТД;

- предлагаемая методика экспериментальных и теоретических исследований может быть востребована при расчёте полей «опасных зон» двигателей ВС, при определении мест установки модифицированных аэродромных плит ПАГ, а также при разметке новых аэродромов;

- полученные результаты работы могут быть использованы при подготовке авиационных специалистов по направлению эксплуатации ГТД на земле.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на доказанной адекватности результатов, полученных:

- при математическом моделировании МДВ стоковых течений – введением в его алгоритм физически и научно обоснованного на базе II закона Ньютона и закона Л. Эйлера «О количестве движения» жидкости (газа) нового граничного условия отклоняющего действия силы Кориолиса;

- при экспериментальном моделировании вихревой активности стоковых течений ВЗ при работе ГТД на земле – экспериментально обоснованной необходимости «чистого» эксперимента с конструктивно-комповочным отделением исследуемого фактора кориолисова вихреобразования от внешних факторов – интерференционных факторов корпуса ВЗ, внешних потоков (ветра, струй), вихревой активности суточного вращения Земли и др.;

- обработкой результатов проводимого эксперимента современными методами и методиками с использованием относительной погрешности, критерия Граббса и других средств оценки чистоты получаемых результатов.

Апробация полученных результатов. Результаты диссертационной работы докладывались на 8 научно-практических конференциях, в числе которых 6 всероссийских и 2 региональных. Список публикаций автора по теме работы включает 16 научных трудов, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (2 по транспорту) при Минобрнауки РФ (44 с.); 8 публикации в трудах всероссийских и региональных конференций

(44 с.); 3 в других изданиях (33 с.).

Личный вклад автора. Автором разработал методики математического и экспериментального исследования стоковых вихрей ВЗ с учётом влияния отклоняющего действия на забираемый стоковый поток у экрана силы Кориолиса. Создал установку для исследования сепарированных вихрей, наведенных отклоняющей силой Кориолиса. На основании результатов, полученных в работе, предложил совершенствования методов организации обслуживания ВС и его ГТД с учётом новых граничных условий и перехода к эксплуатации низко расположенных ВЗ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методики экспериментального и математического моделирования вихрей при работе авиационных двигателей на земле с учётом нового граничного условия –отклоняющего действия силы Кориолиса в циклоническом направлении.

2. Результаты исследований влияние силы Кориолиса на процесс наземной эксплуатации воздушных судов и их авиационных двигателей, включающие:

- результаты влияния силы Кориолиса на интенсивность вихря под ВЗ силовой установки ВС с учётом направления вращения Земли;
- результаты влияния расположения воздушного судна относительно широт и полюсов Земли на процесс вихревого засасывания посторонних предметов;
- результаты влияния расположения ВЗ и рельефа аэродромной плиты на интенсивность засасываемых абразивных частиц песка от износа аэдродрома и др.

3. Параметр «кинетическая энергия вращательного движения» внесён в уравнение сохранения энергии движения газа, как фактор его вихревой активности в поле стокового течения потока воздухозаборника при работе ГТД на земле.

4. Практические рекомендации по совершенствованию методов организации технологических процессов наземной эксплуатации воздушных судов в поле суточного вращения Земли и силы Кориолиса, включающие:

- план расстановки ВС на аэродроме в зависимости от широты;
- определение размеров зон чистоты под ВЗ ГТД воздушного судна с учётом поправки силы Кориолиса для различных широт;
- методы уменьшения вихревого засасывания ПП путём изменения формы рифления аэродромных плит.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Диссертация содержит 186 страниц текста, 74 рисунков, 15 таблиц и библиографию из 85 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложена цель работы и определены задачи для её достижения, представлена научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, даны сведения по апробации и внедрению результатов исследований, а также публикациям автора по теме работы.

В первой главе диссертации решались задачи, связанные с анализом возможных причин повреждения двигателей воздушных судов при их эксплуатации на земле. Было установлено, что авиадвигатели повреждаются преимущественно посторонними предметами (ПП), попавшими

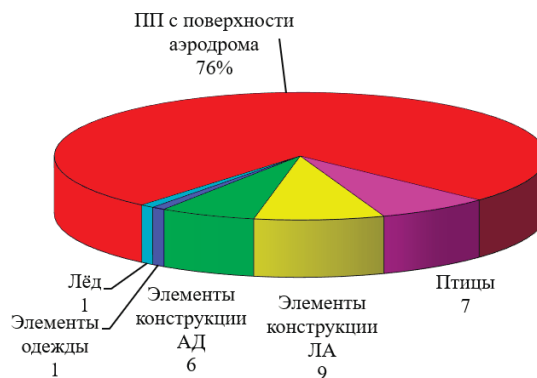


Рисунок 1 – Причины повреждения авиадвигателей ВС посторонними предметами

в их газовоздушный тракт с поверхности аэродрома (до 76 %) (рисунок 1).

Причины попадания ПП на вход в ГТД с поверхности аэродрома различны. Однако проводимые исследования учёных работающих в данной тематике (А. И. Евдокимова, А. А. Комова, С. В. Пахомова, А. М. Сафарбакова, Н. В. Даниленко и других) показали, что определяющей из них является компоновочная схема ВС и входа в ГТСУ, т. е. расположение и форма входного сечения воздухозаборника. Различные сочетания данных параметров ведут к изменению вихревой активности перед воздухозаборниками ГТД.

В процессе анализа тенденций развития современных ВС было выявлено, что современные двигатели проектируются в сторону увеличения секундного массового расхода (рис. 2), что в свою очередь увеличивает вихревую активность и риск засасывания посторонних предметов. Для снижения вихревой активности конструкторы ВС постепенно начали переходить к низкому расположению воздухозаборников над поверхностью аэродрома. Это стало заметным по тренду относительной высоты $H_{\text{отн}}$ воздухозаборников авиационных двигателей над поверхностью аэродрома, представленной на рисунке 3.

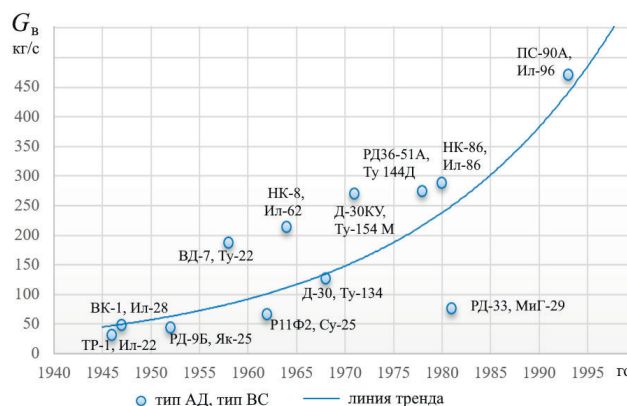


Рисунок 2 – Изменение расхода воздуха через двигатели в зависимости от их года выпуска

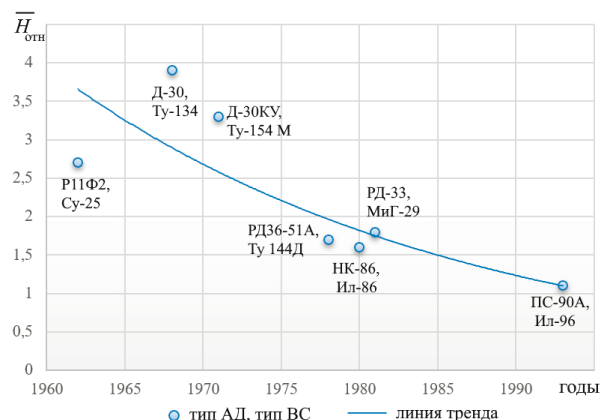


Рисунок 3 – Изменение относительной высоты входа авиационных двигателей над подстилающей поверхностью в зависимости от года их выпуска

Тенденция использования низкого расположения воздухозаборников очевидна и по компоновке силовых установок зарубежных самолётов. Благодаря такому техническому решению мощное одиночное вихреобразование под воздухозаборниками современных ВС стало переходить в разряд мелких вихрей и вихрей размытой интенсивности.

Несмотря на то, что переход к низкому расположению воздухозаборника позволяет избавиться от мощного вихря под воздухозаборниками авиационных двигателей, это приводит к появлению другой проблемы, а именно переходу двигателя от режима вихревого засасывания посторонних предметов в режим засасывания песка и пыли, т. е. режим «пылесоса». На этом режиме возрастает активность засасывания мелких частиц песка и пыли непосредственно с поверхности аэродрома под воздухозаборником. Небольшое количество песка и пыли не наносит серьезных повреждений тонкостенным рабочим лопаткам двигателя. Но при постоянном длительном воздействии этих частиц на тонкостенные лопатки происходит абразивный и эрозионный износ их пера, срыв потока, помпажный срыв и другие последствия.

Следовательно, проблема повреждения лопаток посторонними предметами, превращается в проблему эрозионного износа, по которой статистика ещё не наработана. В процессе исследования данной проблемы были рассмотрены основные направления защиты ГТД от повреждения ПП. На основании анализа, по которому был сделан вывод, находим, что ни одна из рассмотренных систем защиты газотурбинных двигателей от попадания в них ПП и птиц не решает в полной мере задачу досрочного снятия двигателей с эксплуатации. Ни одна из них не учитывает фактор эрозионного износа. Следует отметить, что данные средства защиты

не учитывают влияние воздействия внешней среды на ВС, влияющее на процесс формирования вихрей у ВЗ их силовых установок.

Явления ВО перед ВЗ ГТД воздушных судов и смерчей (торнадо) в атмосфере Земли имеют схожий физический смысл и рабочий процесс. Следовательно, одним из основных факторов генерации циклонических торнадо является суточное вращение Земли (отклоняющая сила Кориолиса). Можно предположить, что силу Кориолиса следует учитывать и при исследовании ВО перед ВЗ ГТД воздушных судов. Этот подход обладает элементом новизны.

На основании анализа проведенного в главе 1 можно сделать вывод, что появление и дальнейшее развитие газотурбинных СУ типа ПС-90 и линейки ГТД типа ПД-14 с низко расположенными и стремящимися в сторону подстилающей поверхности воздухозаборниками, генерировало ряд новых проблем, ныне не решённых, определяемых следующими задачами численного и экспериментального моделирования:

1) установление физической сущности и рабочего процесса стоковых потоков входных устройств с низко расположенными воздухозаборниками, работающими у подстилающей поверхности аэродрома в режиме газотурбинного «пылесоса» и поднимающими в проточную часть ГТД песок и абразив – источники разрушения напряжённых элементов проточной части ГТСУ;

2) разработка и создание упрощённого метода численного моделирования неустановившихся стоковых вихревых течений у подстилающей поверхности низко расположенного входного устройства ГТСУ в поле вращения Земли относительно полярной оси (силы Кориолиса) с расходом рабочего тела, эквивалентным расходу воздуха ГТД исследуемой ГТСУ. Исследование газодинамических характеристик стокового потока в поле вихревой активности воздухозаборника;

3) разработка и создание метода экспериментального моделирования изолированных стоковых вихрей у подстилающей поверхности низко расположенного воздухозаборника в поле отклоняющего действия силы Кориолиса с выходом на кинематические характеристики стоковых вихрей;

4) разработка практических рекомендаций и методов ухода за подстилающими поверхностями в зонах особой чистоты с исключением захвата и засасывания во входное устройство песка и абразива различного рода, разрушающих элементы проточной части ГТД и ведущих к досрочному съёму двигателей с эксплуатации.

Во второй главе приведена доказательная база сходства рабочего процесса техногенных и естественных вихрей, построенная на основных уравнениях движения газа (неразрывности течения, сохранения энергии, Л. Эйлера о количестве движения), а также на схожести их кинематических моделей (рисунок 4).

На основании установленного рабочего процесса ВО сделано предположение общности источников образования вихрей воздухозаборников ВС и естественных циклонов и их смерчей, возникающих вследствие сбора внешней завихренности, энергообмена стокового потока с внешней средой, включая силу Кориолиса, а также использования избытка внутренней и кинетической энергии.

В поле разнообразия элементов классификации вихрей ВЗ все усилия направлены на выбор

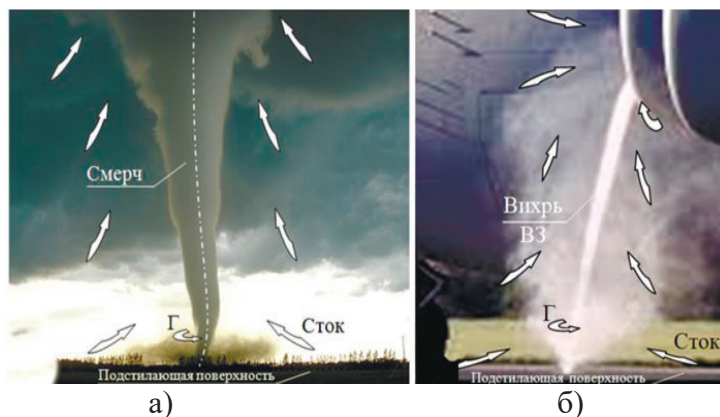


Рисунок 4 – Кинематическое сходство стоковых вихрей: а) естественный торнадо стокового типа; б) техногенный стоковый вихрь ВЗ

методов теоретического и экспериментального моделирования с изоляцией проводимых исследований от сопутствующих факторов вихреобразования в виде интерференции вихрей с экраном различного рода, вращения ротора ГТД и других.

Предложена классификация вихрей ВЗ. Доказана многоликость их рабочего процесса. Указано направление исследования вихреобразования по сущности рабочего процесса его вихрей, подтверждённое алгоритмом решения задачи ВО в поле отклоняющего действия силы Кориолиса.

Подготовлена база теоретического обоснования рабочего процесса, необходимая для математического и экспериментального моделирования стоковых вихрей ВЗ в поле суточного вращения Земли и действия силы Кориолиса.

В третьей главе произведено математическое моделирование вихреобразования перед ВЗ ГТД с учётом влияния силы Кориолиса. В качестве базового способа моделирования был выбран метод дискретных вихрей проф. д. т. н. С. М. Белоцерковского, а средой моделирования Compaq Visual Fortran. Данный выбор обоснован несколькими причинами. Во-первых, большинство программ математического моделирования вихрей ВЗ базируется на МДВ, что позволяет использовать их в качестве базовых для решения новых вихревых задач. Во-вторых, в отличие от многих сред моделирования (Ansys, Nastran и т.д.) в Compaq Visual Fortran программа моделирования полностью пишется исследователем с использованием языка Fortran, что позволяет вводить вновь открытые граничные условия, опирающиеся на существующие законы.

Исследование стокового вихреобразования в поле силы Кориолиса перед ВЗ, низко расположенными над подстилающей поверхностью, потребовало исключения влияния всех иных факторов вихревой активности, начиная от внешней завихрённости среды и завершая интерференционными вихрями от собственной поверхности ВЗ у экрана. Для упрощения этой сложной вихревой задачи воздухозаборник заменялся моделью стока (рисунок 5). Основная постановка задачи не отличается от базовых моделей,

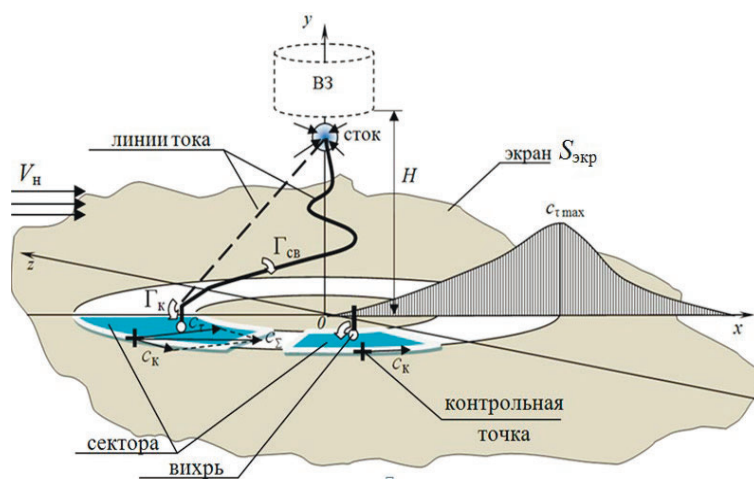


Рисунок 5 – Модель вихрей, наведенных силой Кориолиса

использованных к. т. н. С. В. Пахомовым и к. т. н. А. М. Сафарбаковым в их работах. Основным отличием является введение нового граничного условия на основании которого, эффект генератора кориолисова ВО в поле стокового течения моделируется отклоняющим действием силы Кориолиса $P_{\text{кор}}$, построенном на кориолисовом ускорении $a_{\text{кор}}$ для единичного интервала времени $\Delta t = 1$, взятом из формулы силы Кориолиса:

$$P_{\text{кор}i} = m a_{\text{кор}i} = m 2 \omega_z u_i \sin \lambda.$$

Работоспособность предлагаемой модели подтверждена расчётными и экспериментальными данными в виде линий тока для стационарного решения задачи без учёта и с учётом силы Кориолиса, представленными на рисунке 6.

По данным расчёта и эксперимента (рисунок 6 б и в) видно, что под действием силы Кориолиса теоретические и экспериментальные линии тока у экрана качественно совпадают как по форме, так и по направлению тока. Расчётные спирали Архимеда (рисунок 6 б) качественно сопоставимы по форме и закрутке со спиралевидными профилями («запятые») циклонов средних широт и их торнадо. Таким образом, основу РП вихрей стокового типа качественно определяет сила Кориолиса, как по эксперименту, так и по закрутке циклонов и смерчей средних широт (рисунок 6 б и в).

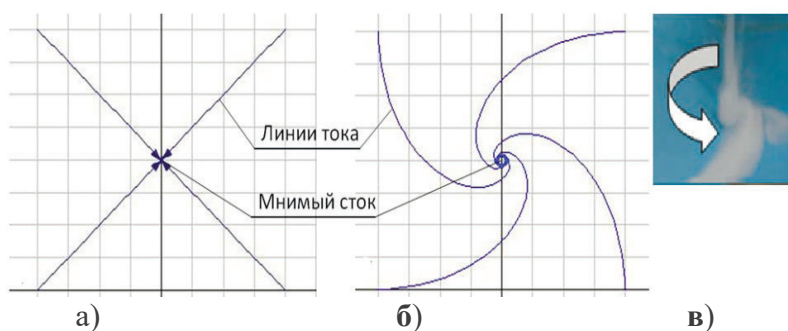


Рисунок 6 – Линии тока стокового течения у подстилающей поверхности: а) расчёт без учёта силы Кориолиса; б) расчёт с учётом силы Кориолиса; в) вихрь в поле силы Кориолиса ($\lambda = 52^\circ$)

Проведём проверку зависимости тангенциальных скоростей на поверхности экрана от интенсивности вихревого движения, т. е. при наличии и отсутствии условия силы Кориолиса. Условия данной задачи максимально приблизим к реальным показателям:

- интенсивность стока вычислим из максимальной тангенциальной скорости на входе в ВЗ, равной 140 м/с;
- диаметр исходной модели ВЗ, внутри которой устанавливается сток, примем равным 1 м.

Решив данную задачу определения радиальной скорости $c_{r\tau}$ для первой высоты расположения ВЗ, получаем данные о поле скоростей на поверхности экрана. Из массива данных выбираем только скорости по оси x , в 9-ти контрольных точках, расположенных на равном удалении друг от друга в 0,25 м. Первая точка – точка мнимого стока, последняя точка – на расстоянии 2 м от первой. Решая задачу для всех выбранных высот расположения ВЗ над землёй, заносим данные в таблицу 1.

Таблица 1 – Результат расчёта тангенциальной скорости стокового потока у экрана при различных высотах источника стокового потока

$L, \text{ м}$	$c_{r\tau}, \text{ м/с},$ вихрев., $\bar{H} = 0,5$	$c_{r\tau}, \text{ м/с},$ потенци- альное, $\bar{H} = 0,5$	Актив- ть ВО $\bar{H} = 0,5,$ %	$c_{r\tau}, \text{ м/с},$ вихревое, $\bar{H} = 1$	$c_{r\tau}, \text{ м/с},$ потенци- альное, $\bar{H} = 1$	Актив- ть ВО $\bar{H} =$ 1,0, %	$c_{r\tau}, \text{ м/с},$ вихревое, $\bar{H} = 1,5$	$c_{r\tau}, \text{ м/с},$ потенци- альное, $\bar{H} = 1,5$	Актив- ть ВО $\bar{H} =$ 1,5, %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	115,3	88,8	29,8	28,4	21,86	29,92	6	6	0
0,5	140	107,8	29,87	45	34,6	30,05	13,2	11,5	14,78
0,75	115,3	88,8	29,8	55,5	42,7	29,97	21,5	18,6	15,59
1	80,2	61,7	29,98	45	34,6	30,05	28,3	22,2	27,47
1,25	45	34,65	29,87	28,4	21,86	29,91	21,5	18,6	15,59
1,5	27,1	20,9	29,66	18	13,86	29,87	13,2	11,5	14,78
1,75	13	10	30,0	8	6,18	29,44	6	6	0
2	8	6,18	29,44	3	2,3	30,43	1,8	1,8	0

Для более наглядного представления полученных результатов построим графики кинематических характеристик склонности стокового потока к ВО (рисунок 7).

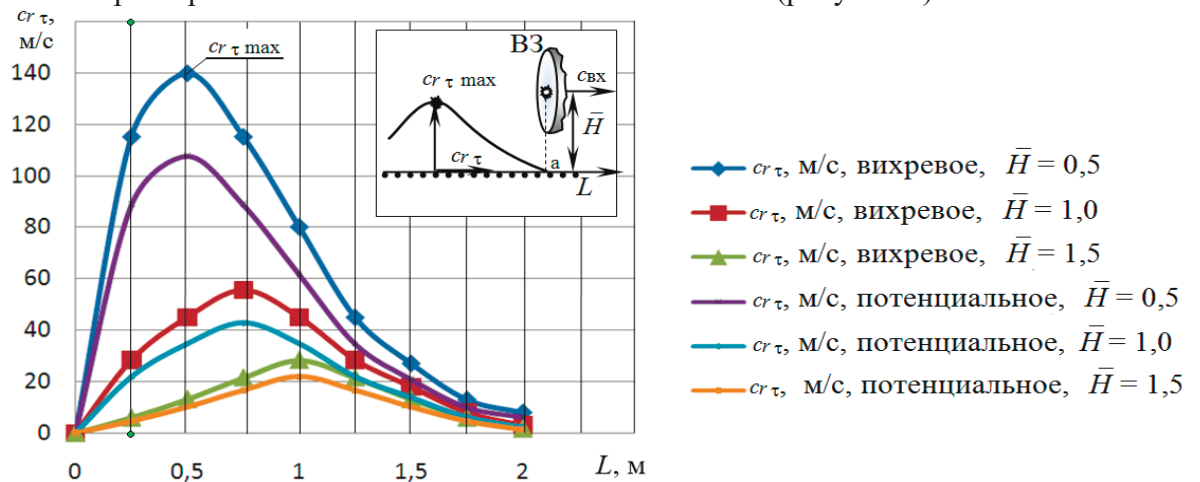


Рисунок 7 – Расчётные кинематические характеристики стока у плоского экрана

По результатам расчётов (таб. 1 и рисунок 7) можно сделать вывод, что наличие вихревой активности под воздухозаборником ($cr_{\tau \max}$) увеличивает тангенциальные скорости потока у его подстилающей поверхности примерно на 30 %. С ростом относительной высоты $\bar{H}$ этот эффект исчезает. Таким образом, рост тангенциальной скорости стокового потока $cr_{\tau \max}$ у экрана под стоком (ВЗ) активирует рост кориолисова ускорения $a_{\text{кор}}$ и силы $P_{\text{кор}}$, – генераторов вихревой активности и ВО в исследуемом стоковом потоке.

В четвертой главе произведено экспериментальное моделирование вихреобразования перед ВЗ ГТД с учётом влияния силы Кориолиса. Эксперимент проводился на специально спроектированной установке (рисунок 8) для исследования вихрей, наведенных только силой Кориолиса. Модель воздухозаборника при проведении экспериментов располагалась вертикально во избежание интерференционных возмущений от стенок ВЗ посредством его геометрической симметрии.

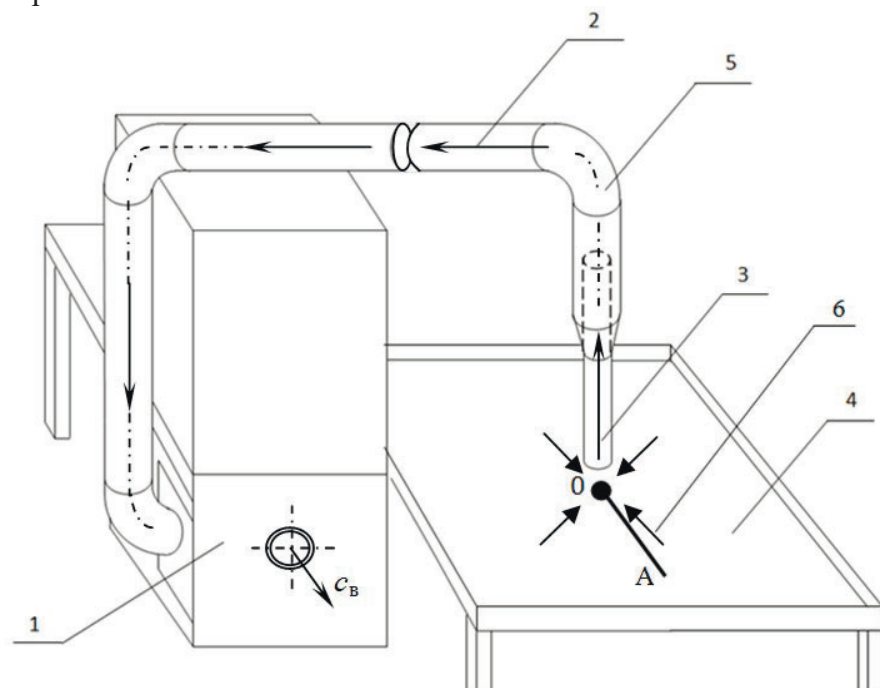


Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки: 1 – турбовоздуходувка с электроприводом; 2 – воздуховод; 3 – модель воздухозаборника; 4 – экран; 5 – поворотный узел воздуховода; 6 – линия ОА измерения скорости потока cr_{τ}

На первом этапе проводилась визуализация вихрей для проверки возможности адекватного их моделирования в возможных условиях эксперимента. Результаты по визуализации вихрей осесимметричного горизонтально ориентированного ВЗ на режимах: кориолисова (рисунок 9 а) и интерференционного ВО – парных вихрей, а также вихрей размытой интенсивности (там же: 9 г) с последующим сравнением их с аналогичными вихрями на реальном двигателе ВС, представлены на рисунке 9.

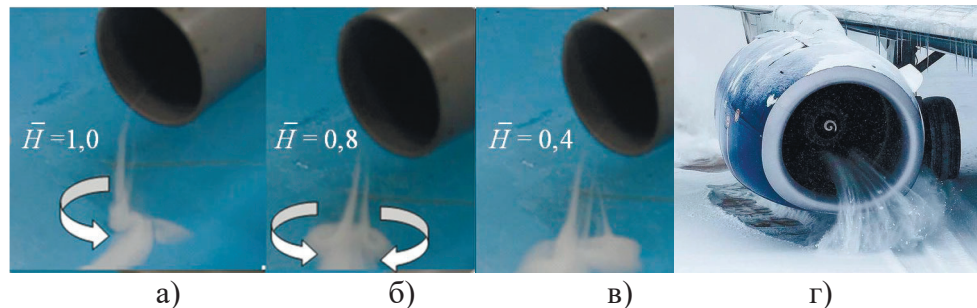


Рисунок 9 – Вихри стокового воздушного потока у плоского экрана под ВЗ:

а) – одиночный вихрь силы Кориолиса; б) – слабые парные интерференционные вихри; в) – начало перехода в систему размытых вихрей; г) – система размытых техногенных вихрей под ВЗ авиационного двигателя

Качественная картина полученных результатов соответствует реальным аналогам. Это даёт возможность для последующего, не только качественного моделирования выбранного явления вихреобразования перед ВЗ, но и количественного его представления в параметрах вихревой активности (вихревых характеристик).

Количественное исследование вихрей силы Кориолиса проводилось за счёт оценки интенсивности вихревого течения при помощи замера тангенциальной скорости на плоской поверхности раздела сред. Экспериментальный замер скорости c_τ (рисунок 10) в исследуемых точках производился по линии ОА с помощью анемометра. Усреднённые результаты эксперимента с учётом погрешности оформлялись протоколом в виде таблицы, по данным которой строился график характеристики (рисунок 11). В поле задачи замера тангенциальной скорости автор работы допустил, что такой традиционный способ её замера при абсолютной погрешности по паспорту анемометра возможен.

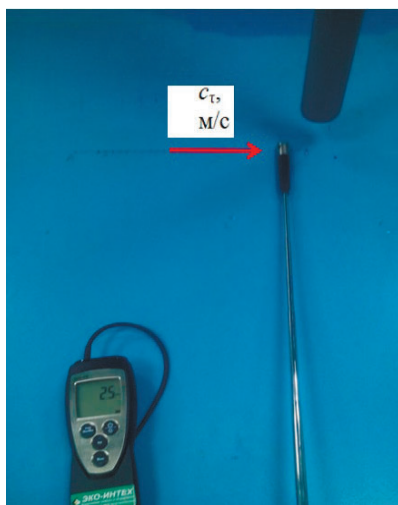


Рисунок 10 – Схема замера тангенциальной скорости

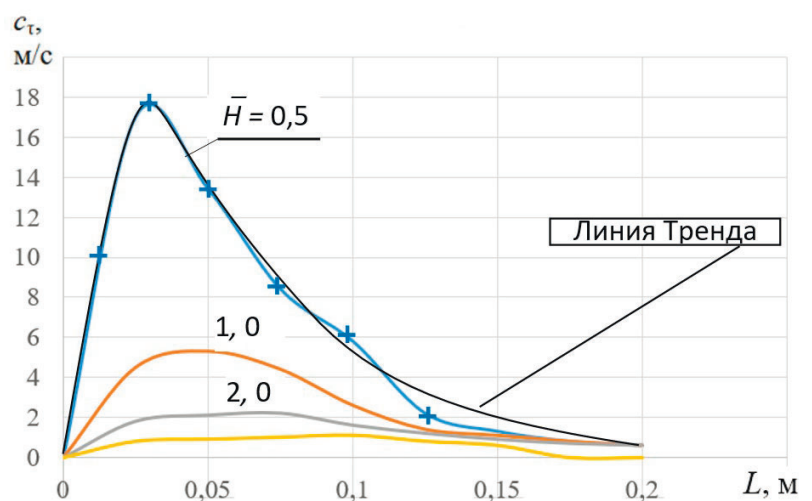


Рисунок 11 – Расчётные характеристики стока по тангенциальной скорости и относительной высоте $\bar{H}$ расположения модели ВЗ над экраном

В результате сравнения полученных характеристик математического и экспериментального моделирования видна качественная сходимость закономерностей изменения тангенциальной скорости от высоты расположения ВЗ (стока) над подстилающей поверхностью и от удаления точки замера от точки мнимого стока. Полученные результаты подтверждают качественную корректность проведенного эксперимента.

После подтверждения корректности метода исследования проводились замеры тангенциальной скорости в тех же точках на поверхности экрана, при циклонической (вызванной силой Кориолиса) и антициклонической закрутке вихря. При антициклоническом вихреобразовании стартовая закрутка потока производилась принудительно с помощью вентиляторов (рисунок 12). Наличие антициклонической закрутки проверялось с помощью визуализации дымом. После получения антициклонической закрутки перед началом замера вентиляторы убирались. Вихрь работал в режиме автовращения. Проводился один замер. Установка выключалась. Следующий замер вновь проводился с принудительным антициклоническим стартом. На основании полученных результатов строился график характеристики (рисунок 13).

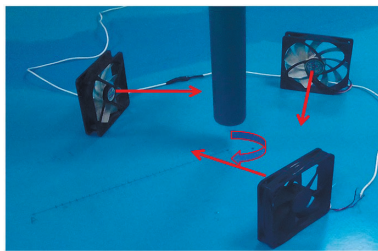


Рисунок 12 – Стартовая принудительная антициклоническая закрутка стокового потока

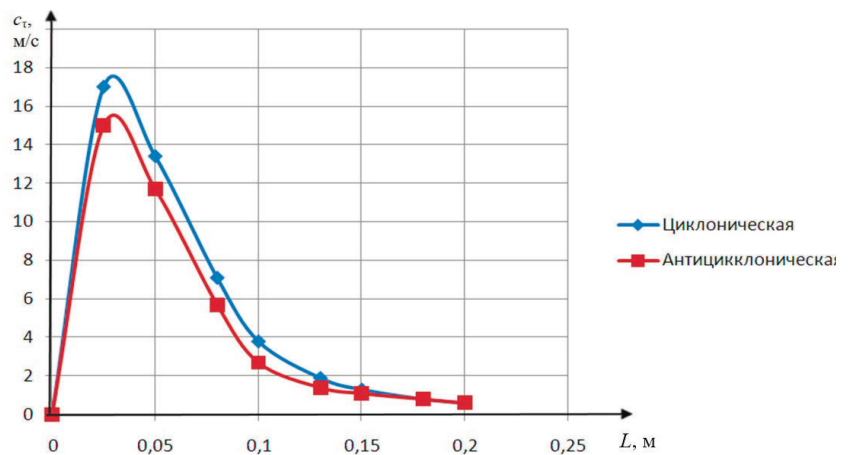


Рисунок 13 – Характеристики тангенциальной скорости при циклонической и антициклонической закрутке вихря

Анализ данных, приведенных на рисунке 13, позволяет сделать вывод, что влияние силы Кориолиса уменьшает скорости антициклонического вихреобразования, направленного против действия этой силы.

В пятой главе предложены организационно-технических рекомендации по совершенству технологических процессов эксплуатации газотурбинных двигателей ВС на основании результатов исследовательской работы.

Предложен метод организации технологического процесса обслуживания ГТД путём изменения рифления рабочей поверхности аэродромных плит.



Рисунок 14 – Образцы моделей плиты типа ПАГ с различной глубиной рифления на поверхности: а) 0,06 мм; б) 0,5 мм; в) 1 мм

Основой для данной рекомендации послужили результаты следующего эксперимента. В качестве объекта исследования использовалась модель аэродромной плиты, на которой было нанесено ромбическое рифление по ГОСТ 8568, с различной глубиной бороздок h : 2, 15, 30 мм (рисунок 14), с учётом масштабного фактора 1:30. Глубина бороздок на моделях составляет

газовочных площадках, в местах стоянок (внутри контура обслуживания) и остановок (местах ожидания, промежуточных местах ожидания, порогах искусственной ВПП) ВС перед запуском или при увеличении режима работы ГТД в соответствии с рисунком 18, в частности на РД (маршрутах руления), примыкающих к ВПП, где наносятся два типа маркировки мест ожидания: маркировка типа А и типа Б. Маркировка типа Б (дополнительная, более удаленная от ВПП) наносится перед ВПП по мере необходимости. Необходимость в дополнительной маркировке мест ожидания у ВПП определяется оператором аэродрома (ФАП-262);

– установка аэродромных плит с изменением «узора» в других местах нецелесообразна, т. к. в проведенных исследованиях ЗОО ГСС доказано, что вихреобразование отстаёт от степени нарастания расхода воздуха через воздухозаборник двигателя и на режиме установившегося расхода воздуха (режим «малый газ») вихрь на подстилающей поверхности ещё не формируется, а на повышенных режимах работы и при движении ВС на скорости 25 км/час и более вихрь сдувается.

Применение вышеописанных рекомендаций позволит снизить коэффициент попадания посторонних предметов на 16,4 % (см. рисунок 17).

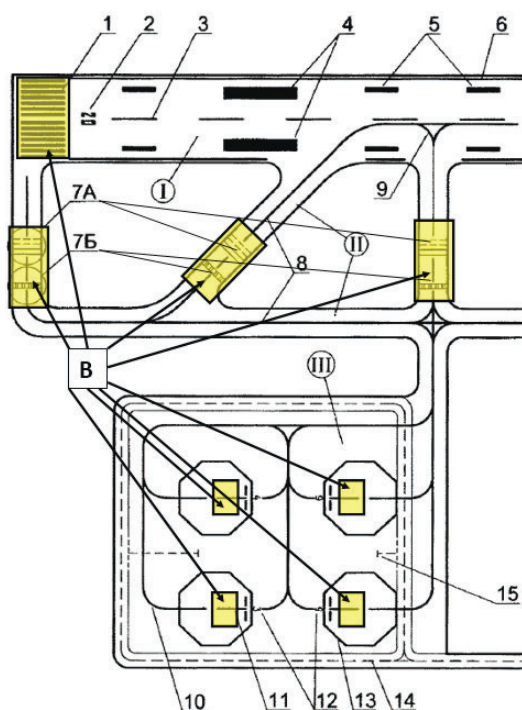


Рисунок 18 – Места возможной установки плит типа ПАГ с измененным рельефом поверхности: I - взлетно-посадочная полоса с искусственным покрытием; II - рулежные дорожки; III – перрон; 1 - порог искусственной ВПП (ИВПП), установка плит типа ПАГ с углубленным рельефом; 2 - цифровой знак ПМПУ; 3 - осевая линия ИВПП; 4 - зона фиксированного расстояния; 5 - зона приземления; 6 - край ИВПП; 7А - маркировка места ожидания у ВПП типа А, установка плит типа ПАГ с углубленным рельефом; 7Б - маркировка места ожидания у ВПП типа Б, установка плит типа ПАГ с углубленным рельефом; 8 - оси руления ВС на РД; 9 - участок сопряжения РД с ВПП; 10 - пути руления ВС по прямой и кривой; 11 - Т-образный знак остановки ВС; 12 - номер стоянки ВС; 13 - контур зоны обслуживания ВС; 14 - пути движения спецавтотранспорта; 15 - Т-образный знак остановки спецавтотранспорта; В – места предполагаемой установки плит с измененным рельефом поверхности

Предложен метод организации технологического процесса обслуживания ГТД путём корректировки опасных зон двигателя и внедрения концепции особых зон чистоты.

Исследования, проведенные в области предупреждения попадания посторонних предметов, показывают, что при запуске и опробовании двигателей впереди и сзади ВС образуются опасные зоны. Величина «опасных зон» зависит от типа двигателя и типа самолёта, т. е. для одной и той же модификации двигателя зоны могут отличаться в зависимости от того, на каком самолёте он установлен, т. е. от высоты расположения двигателя от поверхности аэродрома, следовательно, эти зоны зависят от скорости потока под воздухозаборником двигателя.

Учитывая результаты, представленные в данной работе, величина тангенциальной скорости, следовательно, и размер опасных зон, в зависимости от широты может меняться (рисунок 19).

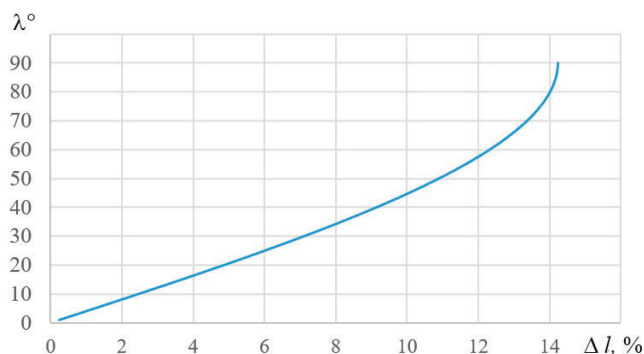


Рисунок 19 – Зависимость геометрического приращения величины опасных зон от широты географического расположения аэродрома

Приведенные данные позволяют количественно оценить возможные неточности при определении опасных зон на различных аэродромах. Величина приращения, указанная в таблице взята с допущением, что зоны опасности двигателя вычислялись при его испытаниях на экваторе, т. е. без учёта сил Кориолиса, но реальные двигатели производятся по всему миру, поэтому величина приращения в зависимости от места производства будет меняться.

Для внедрения метода корректировки опасных зон, необходимо учесть место производства двигателя и вычислить

максимальное приращение опасных зон при эксплуатации этого двигателя на экваторе и полюсах (таб. 2). Анализ таблицы 5.6 позволяет сделать выводы о том, что большинство современных двигателей производится в средних широтах Северного полушария и максимальное приращение они получают при полёте на полюса, например, для двигателя CFM 56 самолета Boeing 737, данное приращение составит 5,26 %, в результате его опасные зоны изменятся на 0,22 м (с 4,2 до 4,42 м). Изменение опасных зон на величину более 5 % является серьёзным фактором, влияющим на безопасность полётов и лётную годность, поэтому его нельзя не учитывать.

Таблица 2 – Распределение приращения «зон опасности» различных двигателей по месту их производства

Тип ВС	Тип двигателя	Место производства	Широта	Δl , %, на экваторе	Δl , %, на полюсах
Boeing 737	CFM 56	США, Огайо, Цинциннати	39,1399	-8,98	+5,26
Airbus 319/320	CFM 56	США, Огайо, Цинциннати	39,1399	-8,98	+5,26
RRJ-95B	SaM-146	Франция, Париж	48,8032	-10,7	+3,53
Airbus A220	PW1000G	США, Коннектикут, Восточный Хартфорд	41,7614	-9,48	+4,76
Airbus A350	Rolls-Royce Trent XWB	Великобритания, Лондон	51,5072	-11,14	+3,1
Bombardier Global 7500	General Electric Passport	США, Бостон	42,332	-9,58	+4,7
Ил-76	ПС-90А	Россия: Пермь	58,0105	-12,07	+2,2

Следовательно, основываясь на данных, полученных в работе, необходимо предложить метод увеличения опасных зон двигателей ВС в зависимости от места их производства на максимальное приращение (таб. 2) с целью повышения безопасности обслуживания ВС и их СУ. Учёт только максимального приращения размера опасных зон обоснован необходимостью уменьшить затраты на расчёты приращения для каждого аэродрома в отдельности.

В работе предлагается внести понятие концепции «зоны особой чистоты» перед воздухозаборником двигателя. Понятие концепция зоны особой чистоты – система положений, трактующая недопустимость запуска и опробования авиационных газотурбинных двигателей самолёта при наличии перед воздухозаборником каких-либо загрязнений, посторонних

предметов, в том числе снежно-ледяных отложений.

Исходя из выполненного анализа, было установлено, что засасывание посторонних предметов происходит из зоны, которая ограничена по ширине шириной воздухозаборника ВС. Поэтому предполагается установить минимальные размеры «зон особой чистоты» в форме круга под каждым воздухозаборником диаметром от 0,787 до 3 м, в зависимости от типа воздушного судна наиболее часто эксплуатирующихся в авиапредприятии.

В соответствии с предлагаемой концепцией в зоне обслуживания ВС должна быть нанесена разметка не только места стоянки ВС, но и указаны зоны особой чистоты на площадках для запусков (опробования) двигателей, а также в местах остановки воздушных судов на ВПП и РД (рисунок 20).

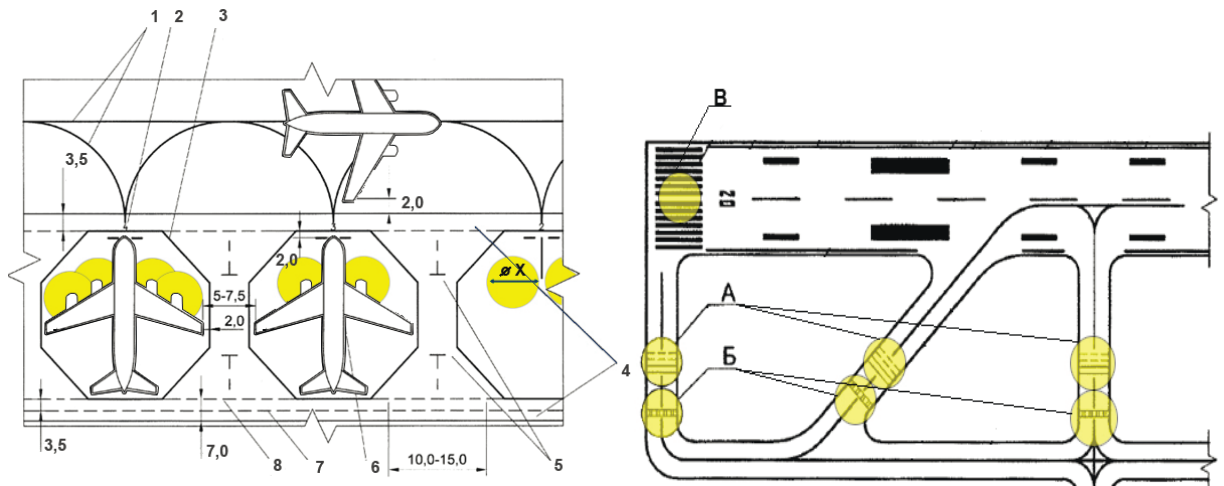


Рисунок 20 – Контур зоны обслуживания ВС и с обозначение зон особой чистоты перед воздухозаборниками двигателя: 1 - оси руления ВС; 2 - номер стоянки ВС; 3 - контур зоны обслуживания ВС; 4 - пути движения спецавтотранспорта; 5 - Т-образный знак остановки спецавтотранспорта; 6 - Т-образный знак места остановки ВС; 7 - разделительная ось пути движения спецавтотранспорта; 8 - знак разрешения на въезд и выезд спецавтотранспорта; А, Б - места остановки воздушных судов на РД; В - места остановки воздушных судов на ВПП; Ø X – диаметр зоны особой чистоты. Примечание: размеры даны в метрах.

Маркировочные знаки перрона и мест стоянок должны быть следующих цветов:

- желтого (оранжевого) - для осей руления ВС, Т-образных знаков места остановки ВС и номеров стоянок;
- красного - для линий контуров зон обслуживания ВС;
- белого - для путей движения и знаков остановки спецавтотранспорта.

Маркировка «зон особой чистоты должна» выполняться путём двухразовой покраски тщательно отремонтированных и очищенных участков покрытия желтым цветом, смысловое значение которого – возможная опасность, применяется для обозначения возможной опасности, опасной ситуации; предупреждения, предостережения о возможной опасности. Покраска бетонных поверхностей на площадках для запусков (опробования) двигателей, а также в местах остановки воздушных судов на ВПП и РД (зон особой чистоты), над которыми располагаются воздухозаборники самолётов, должна осуществляться в пределах размеров площадок, установленных руководствами по эксплуатации в зависимости от типа воздушного судна наиболее часто эксплуатирующихся в авиапредприятии.

Предложен метод организации технологического процесса обслуживания ГТД путём рационального расположения воздушного судна на аэродроме с учётом влияния суточного вращения Земли. В соответствии с проведенными исследованиями руководителя данной научной работы Даниленко Н. В., ГТД работает в поле суточного вращения Земли. Ротор

находится в состоянии сложного углового движения, включающего относительное вращение ω_r вокруг собственной оси и переносное вращение Ω_z , определяемое суточным вращением Земли. В сложном движении вектор абсолютного вращения ротора ГТД ω_Σ определен геометрическим сложением векторов относительного ω_r и переносного Ω_z вращений.

Установлено, что расположения вращающегося ротора относительно полюсов Земли может увеличивать или уменьшать время выбега ротора ГТД. В процессе исследований было выявлено, что приращение времени выбега может составлять до 10 %.

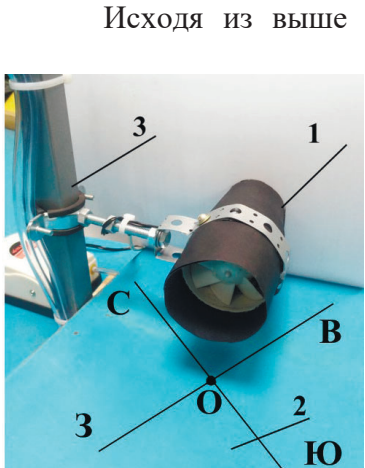


Рисунок 21 – Модель по исследованию вихревого засасывания посторонних предметов: 1 – модель ВЗ; 2 – подстилающая поверхность; 3 – штатив для изменения высоты

Исходя из выше сказанного, можно предположить, что суточное вращение Земли, влияющее на скорость вращения ротора ГТД, влияет и на интенсивность Γ вихря перед воздухозаборниками ГТД в зависимости от расположения ВС относительно полюсов Земли.

Для подтверждения данного предположения было выполнено экспериментальное исследование. В процессе эксперимента воздухозаборник модели располагался по направлению одного из полюсов Земли и производились измерения скорости на поверхности экрана под воздухозаборником. Для измерений использовался анемометр Tesco. Измерения производились на определенных расстояниях ($\Delta L = 0,005$ м, из соображений обеспечения приемлемой скорости в исследуемом потоке) L от точки мнимого стока O (рисунок 21).

По данным эксперимента строился график (рисунок 22) $c_t(L)$ для различного положения ротора исследуемой модели, позволяющий оценить влияние азимутального расположения ротора на тангенциальную скорость потока под ВЗ.

Анализ полученных результатов показал, что азимутальное положение модели воздухозаборника с ротором оказывает влияние на величину скорости перед ним. По самым большим скоростям в точке 0,005 м видно, что различия при направлении ВЗ с Севера на Юг составляет 0,2 м/с, а самая большая скорость достигается при совпадении направления вращения ротора с направлением суточного вращения Земли, т. е. при повороте модели ВЗ на Юг. Разница между максимальной и минимальной скоростями составляет 5,26 % (если за 100 % брать скорость при направлении вектора вращения ротора ГТД на Север).

Следовательно, в зависимости от направления вращения ротора авиационного двигателя и его направления по азимутам приращение к тангенциальной скорости под ВЗ двигателя может варьироваться от 0 до 5,26 %.

Известно, что в настоящее время аэродромы строят с учётом Розы ветров, но, не учитывая азимутальное расположение ВПП, рулёжных дорожек площадок и специальных площадок. Этим можно воспользоваться. В зависимости от направления вращения двигателя, которое определяется согласно ГОСТ, добавки будут составлять максимальные 5,26 % для двигателей с вращением ротора по часовой стрелке при их направлении на ЮГ и для двигателей с вращением ротора против часовой стрелки при их направлении на Север (в Северном полушарии).

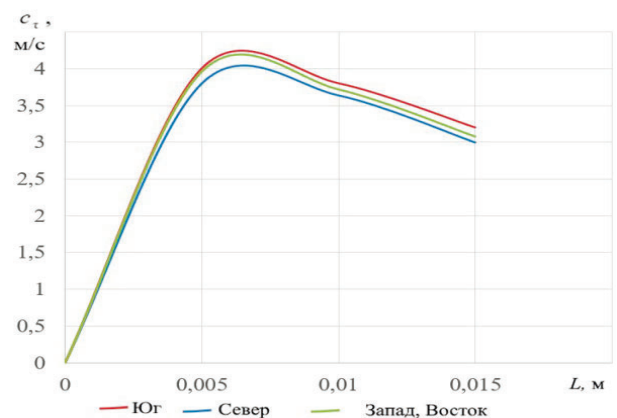


Рисунок 22 – Зависимость тангенциальной скорости от азимутального расположения ротора

Следовательно, ВПП, рулёжные дорожки и специальные площадки на аэродроме ВС необходимо располагать их так:

- чтобы при взлёте добавка к вращению ротора двигателя была максимальной, что позволит понизить расход топлива, т. к. для достижения тех же скоростей и оборотов потребуется на 5,26 % меньше усилий;

- чтобы при рулении и опробовании двигателя на специальных площадках добавка отсутствовала или была минимальной, так как при низкой скорости образуются вихри под ВЗ и происходит засасывание ПП, а увеличение скорости даже на 5, 26 % увеличивает коэффициент засасывания ПП.

Для достижения этих целей необходимо располагать ВС на различных частях аэродрома в соответствии с таблицей 3.

Таблица 3 – Расположение воздушного судна на аэродроме

Расположение ВС в Северном полушарии				
Вращение ротора двигателя		ВПП	Рулёжные дорожки	Специальные площадки
CFM-56, SaM-146, PW1000G, General Electric Passport	по часовой	Юг	Север, Запад или Восток	Север
ПС-90А, Rolls-Royce Trent XWB	против часовой	Север	Юг, Запад или Восток	Юг
Расположение ВС в Южном полушарии				
CFM-56, SaM-146, PW1000G, General Electric Passport	по часовой	Север	Юг, Запад или Восток	Юг
ПС-90А, Rolls-Royce Trent XWB	против часовой	Юг	Север, Запад или Восток	Север

Рекомендации, приведенные в таблице 3, необходимо учитывать при строительстве новых аэродромов и при перепроектировании некоторых элементов старых, если это возможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на базе метода дискретных вихрей создан метод математического моделирования техногенных вихрей силы Кориолиса для решения задач стокового вихревого вихреобразования газового потока в стационарной и не стационарной постановке с введением в постановку задачи нового кинематического граничного условия.

На базе метода газо- гидравлической аналогии создан экспериментальный метод исследования вихрей Кориолиса без внешнего влияния со стороны интерференционных и других сопутствующих факторов, выявлению которых способствовало создание новой классификации вихрей ВЗ по сущности их рабочего процесса.

На основании полученных результатов предложены совершенствования методов технологического обслуживания воздушных судов с учётом новых ожидаемых условий эксплуатации при низком расположении воздухозаборников, работающих в режиме «пылесоса», путём:

- расстановки ВС на аэродроме в зависимости от широты, позволяющего учесть влияние суточного вращения Земли на интенсивность вихревого засасывания посторонних предметов (приращение к тангенциальной скорости под ВЗ двигателя может варьироваться от 0 до 5,26 %).

- изменения размеров опасных зон перед воздухозаборником авиационного двигателя воздушного судна с учётом добавки силы Кориолиса для средних и полярных широт, где величина приращения зоны может варьироваться от 0 до 14, 23 %;

- разметки зон особой чистоты в местах активного вихревого засасывания посторонних предметов и использования специальных методов очистки зон чистоты, снижающих как засасывание посторонних предметов, так и абразива в авиационный двигатель;
- метода уменьшения на 16,9 % коэффициента попадания посторонних предметов и абразивных частиц, песка (пыли) от вихревого засасывания посторонних предметов путём изменения рельефа аэродромных плит.

По содержанию диссертации опубликованы следующие работы:

В изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций:

1. **Киренчев А. Г.** Влияние внешних факторов на особенности технической эксплуатации ГТД на аэродроме [Текст] / Н. В. Даниленко, А. Г. Киренчев // Научный Вестник ГосНИИ ГА, № 24, 2018 г, с. 74 – 84.
2. **Киренчев А. Г.** Влияние геометрической формы воздухозаборника ГТД на особенности его технической эксплуатации на аэродроме [Текст] / Н. В. Даниленко, А. Г. Киренчев // Научный Вестник ГосНИИ ГА, № 25, 2019 г, с. 106 – 114.
3. **Киренчев А. Г.** Рабочий процесс вихреобразования сред Земли [Электронный ресурс] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Вестник МАИ / – 2018. – № 3. – Режим доступа: <http://vestnikmai.ru/publications.php?ID=95889>.
4. **Киренчев А. Г.** Вихреобразование стоковых течений [Электронный ресурс] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Вестник МАИ / – 2018. – № 4. – Режим доступа: <http://vestnikmai.ru/publications.php?ID=100042>.
5. **Киренчев А. Г.** Особенности рабочего процесса вихрей газотурбинных силовых установок [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, Пермь, № 55, 2018 г, с. 23 - 32.

Научные публикации в других изданиях:

1. **Киренчев А. Г.** Особенности методики исследования стоковых наведённых вихрей в поле действия кориолисовой силы [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Сборник трудов VII Региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации – 2014». – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2015. – С. 54–59.
2. **Киренчев А. Г.** Проблемы экспериментального моделирования стоковых вихрей кориолисовой силы и пути их преодоления / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» 22 – 24 марта 2016. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2016. – С. 301–307.
3. **Киренчев А. Г.** Проблемы математического моделирования МДВ стокового вихреобразования у подстилающей поверхности / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации» 22–24 марта 2016. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2016. – С. 289–295.
4. **Киренчев А. Г.** Проблемы познания рабочего процесса вихревого движения жидких и газовых сред Земли и пути их преодоления / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Российско-китайский научный журнал «Содружество». 2016. № 9. С. 36–44.
5. **Киренчев А. Г.** Методика проведения исследования вихрей воздухозаборников экспериментальными методами [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию Иркутского филиала МГТУ ГА «Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации». – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2017. – С. 151-155;
6. **Киренчев А. Г.** Математическое моделирование стоковых техногенных вихрей кориолисовой силы у подстилающей поверхности аэродрома [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В.

Даниленко, Е. М. Бильдаков // Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы и перспективы развития авиационной техники и методов её эксплуатации – 2017». – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2017. – С. 120-127;

7. **Киренчев А. Г.** Влияние вихревого поля Земли на особенности эксплуатации авиационной техники [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2018. – С. 95-103.

8. **Киренчев А. Г.** Анализ факторов, влияющих на образование вихрей перед воздухозаборниками воздушных судов гражданской авиации [Текст] / Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования. Материалы XI региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 75-летию Инженерного института. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2019. – С. 164-167.

9. **Киренчев А. Г.** Современные методы исследования техногенных вихрей / П. А. Притчин, А. Г. Киренчев // Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов её эксплуатации – 2019 Сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов 4-5 декабря 2019 г. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, 2019. – С.125-130

10. **Киренчев А. Г.** Особенности интерференции вихрей воздухозаборников газотурбинных силовых установок с подстилающей поверхностью [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2019. № 4. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, С. 74-85.

11. **Киренчев А. Г.** Проблемы процессов технического обслуживания воздушных судов гражданской авиации в ожидаемых условиях эксплуатации [Текст] / А. Г. Киренчев, Н. В. Даниленко // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2020. № 1. – Иркутск: Иркутский филиал МГТУ ГА, С. 59-73.

Соискатель



Киренчев А. Г.