

УДК 629.7.067.5

ББК 39.52

DOI 10.51955/2312-1327_2023_2_15

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕДУР ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА УРОВЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАССАЖИРСКОГО МАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЁТА

*Сергей Викторович Скоробогатов,
orcid.org/0000-0002-9370-6402,
кандидат технических наук
Московский государственный технический
университет гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
maestro.ru@mail.ru*

Аннотация. Целью данной статьи является исследование процесса возникновения отложений барьерного льда после противообледенительной обработки самолёта, а также анализ влияния данных отложений на безопасность полётов. Изучается степень влияния скорости полёта и расположения барьерных колец относительно трубок Пито самолёта на создание возмущений воздушного потока и пульсации показателей полного давления. Выполнен анализ авиационных происшествий, связанных с процессом обледенения воздушных судов. Произведён подробный разбор инцидента, причиной которого послужило наличие барьерных колец в носовой части фюзеляжа, проанализировано влияние процедуры выполнения противообледенительной обработки воздушных судов на безопасность полётов. Проведено компьютерное моделирование, по результатам которого представлена картина турбулентных пульсаций потока за барьерными кольцами, позволяющего определить условия полёта, при которых возможно получение экипажем недостоверных сведений о воздушной скорости – важного параметра, необходимого для нормального функционирования системы автоматического управления полётом.

Ключевые слова: обледенение, противообледенительная обработка, безопасность полётов, барьерный лёд, осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса.

ANALYSIS OF THE DE-ICING PROCEDURES EFFECT ON THE FLIGHT SAFETY LEVEL IN THE OPERATION OF A LONG-HAUL PASSENGER AIRPLANE

*Sergey V. Skorobogatov,
orcid.org/0000-0002-9370-6402,
Candidate of Technical Sciences
Moscow State Technical University of Civil Aviation (Irkutsk branch),
3, Kommunarov
Irkutsk, 664047, Russia
maestro.ru@mail.ru*

Abstract. The purpose of this article is to investigate the barrier ice accretion after aircraft de-icing, as well as to analyze the impact of it on flight safety. The influence degree of the flight speed factor, the factor of the ice ridges location relative to the aircraft Pitot tubes on the airflow disturbance creation and the total pressure indicators pulsations is studied. It was analyzed the aviation accidents

related to the aircraft icing process. A detailed study of the incident caused by the barrier ice in the fuselage nose section was performed; weather conditions and de-icing procedure by the ground personnel were analyzed. It has been presented a picture of the turbulent flow pulsations behind the ice ridges, making it possible to determine the flight conditions when the crew may receive unreliable information about the airspeed being an important parameter necessary for the autopilot normal operation.

Keywords: icing, de-icing, flight safety, ice ridges, Reynolds averaged Navier-Stokes equations.

Введение

Проблемы, связанные с образованием ледяных отложений на аэродинамических поверхностях, известны давно, с самого зарождения авиационной отрасли. Как известно, в атмосферном воздухе довольно в больших количествах содержатся водяные пары. Особенно в высоких концентрациях вода присутствует в нижних слоях атмосферы, что обуславливает активнейшие погодные явления в данных слоях с образованием и выпадением осадков в виде дождя и снега. При определённом сочетании атмосферных параметров, таких как давление, плотность, температура, скорость ветра, в воздухе возможно наличие так называемых переохлаждённых капель воды, то есть воды, находящейся в жидкой фазе при отрицательной температуре окружающей среды [Демидов и др., 2014]. Такие капли очень нестабильны в жидком состоянии, и как только они сталкиваются с передними кромками аэродинамических поверхностей летательного аппарата, то практически мгновенно происходит кристаллизация и образование ледяных отложений различных форм [Борисова и др., 2014]. Подобные отложения, сформировавшиеся на передней кромке крыла, а также в области вертикального и горизонтального оперения воздушного судна (ВС), представляют особую опасность, поскольку они сильно влияют на аэродинамические характеристики данных поверхностей. Кроме этого, наличие массивных ледяных отложений, их сход могут приводить к ударам, повреждениям элементов планера и силовой установки самолёта¹ [Иванова, 2018; Обледенение двигателей..., 2014]. Существенное влияние на безопасность полетов может оказать наличие ледяных отложений в каналах приёмников полного давления (ППД), искажая показатели воздушной скорости самолёта и надёжность работы бортового автопилота [Мазин, 1957].

Этим обусловлен выбор области исследования, целью которого является изучение процесса возникновения отложений барьерного льда после противообледенительной обработки самолёта, а также исследование влияния данных отложений на безопасность полётов.

Материалы и методы

Статистические данные и результаты исследований авиационных происшествий подчеркивают, что возникновение наземного обледенения

¹ Гишваров А. С. Обледенение воздушных судов и силовых установок: анализ и профилактика: учебное пособие для межвузовского использования / А. С. Гишваров; А. С. Гишваров; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования Уфимский гос. авиационный технический ун-т. Уфа: Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2006. 276 с. ISBN 5-86911-567-1. EDN QNTLVJ.

особенно опасно в режиме взлёта самолета, поскольку при отрыве от взлётно-посадочной полосы самолёт энергично увеличивает углы атаки, а скорость и запас высоты при этом имеют минимальные значения. Поэтому перед вылетом воздушное судно подвергается наземной противообледенительной обработке посредством нанесения на аэродинамические поверхности воздушного судна специальных химических реагентов.

Однако, несмотря на результаты научных достижений отечественных и зарубежных авторов в области оценки влияния обледенения на безопасность полетов, а также учитывая наличие широкого спектра способов по борьбе с обледенением в полёте и на земле, проблема остается весьма актуальной, а задачи для ее решения недостаточно изученными [Павленко, 2009; Павленко, 2016; Сторожук, 2015; Шамсиев, 2016; Aircraft icing..., 2019; Cao et al., 2018; Challinor, 2017; Yamazaki et al., 2021].

Для проведения исследования в работе использованы: программа Ansys с целью моделирования образования барьерного льда на критических поверхностях воздушного судна. Для расчета результатов эксперимента был выбран численный метод, основанный на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, хорошо зарекомендовавший себя при решении инженерных задач, обеспечивая необходимую точность результатов.

Результаты

Для достижения поставленной цели в работе проведен анализ авиационных происшествий, связанных с процессом обледенения ВС. Одним из таких событий явилась авиакатастрофа Ан-148 в Раменском районе Подмосковья, которая произошла в феврале 2018 года с самолётом авиакомпании «Саратовские авиалинии», вылетевшим из Москвы в Орск (рисунок 1).



Рисунок 1 – Место крушения самолёта Ан-148 Саратовских авиалиний,
Источник: <https://ru.wikipedia.org/>

По результатам расследования основными причинами явились человеческий фактор и нарушение технологии противообледенительной защиты ВС. В условиях интенсивного обледенения (-5°C и ливневого снегопада) командир воздушного судна отказался от противообледенительной обработки и не проверил включения обогрева ППД. Вследствие этого, в режиме взлета и набора высоты, нестабильность показателей воздушной скорости спровоцировали ошибочные действия экипажа и привели к столкновению самолёта с землёй, его полному разрушению и гибели людей [Окончательный отчёт..., 2018].

По похожему сценарию развивалась другая крупная катастрофа в июне 2009 года, произошедшая с самолетом Airbus A-330 авиакомпании Air France, следствием которой явилась асинхронная передача показаний скорости со стороны приёмников полного давления и последующего отключения автопилота. Причиной расхождения показаний с приёмников давления, по мнению комиссии, стало обледенение в полёте. В сочетании с грубыми ошибками в пилотировании со стороны малоопытного второго пилота полет закончился авиационной катастрофой, разрушением самолета и гибелью 228 человек.



Рисунок 2 – Обломок вертикального оперения самолёта А-330,
источник: <https://ru.wikipedia.org/>

Анализируя вышеперечисленные примеры, сделан вывод, что возникновение рассмотренных катастроф имеет схожие причины, к которым

можно отнести человеческий фактор и качество проведения процедур противообледенительной обработки. На основании этого в работе проведено исследование, в основу которого положены результаты серьезного авиационного инцидента, произошедшего с самолетом А321 авиакомпании «Сибирь», выполнявшего регулярный пассажирский рейс СБИ-5219/5220 в декабре 2021 года между Новосибирском (Толмачёво) и Магаданом (Сокол). Такой выбор обусловлен тем, что последствия серьезного авиационного инцидента не привели к разрушению ВС и позволили сохранить и использовать в исследовании весьма актуальную информацию о сценарии развития события. Во время вылета из аэропорта города Магадан самолёт попал в условия сильного обледенения, что привело к рассинхронизации показателей воздушной скорости и отключению автопилота. Экипаж на непродолжительное время потерял управление и ориентацию в пространстве, но смог восстановить контроль над воздушным судном и благополучно приземлиться в аэропорту города Иркутска.

Согласно метеорологической предполетной информации в районе аэропорта города Магадан отмечалось снижение температуры от -9°C градусов до -12°C и интенсивный снегопад, иначе называемый «ливневым снегом». Это вызвало накопление снега на верхней части фюзеляжа, крыле и стабилизаторе. Перед взлётом экипаж принял решение использовать противообледенительную жидкость (ПОЖ) типа I и типа IV. На первом этапе использовалось соотношение 25/75 ПОЖ и воды. На втором этапе использовалась 100% ПОЖ типа IV, в соответствии с требованиями противообледенительной обработки для данных погодных условий [Отчет..., 2021].

Тем не менее, после посадки самолета в аэропорту Иркутск были обнаружены отложения льда: на передней части фюзеляжа воздушного судна под остеклением кабины (форточками) экипажа; перед ППД. Образование шероховатого непрозрачного льда в форме диска было сконцентрировано в носовой части фюзеляжа на обтекателе метеолокатора. Аналогичного вида наросты отмечены на передних кромках крыла и стабилизатора. Несмотря на оперативные действия экипажа в полете при попадании воздушного судна в условия сильной турбулентности при максимально допустимой скорости на бортах фюзеляжа, под остеклением и перед ППД сохранилось наличие барьерного льда, идущего от обогреваемых стёкол кабины экипажа самолёта (рисунок 3).

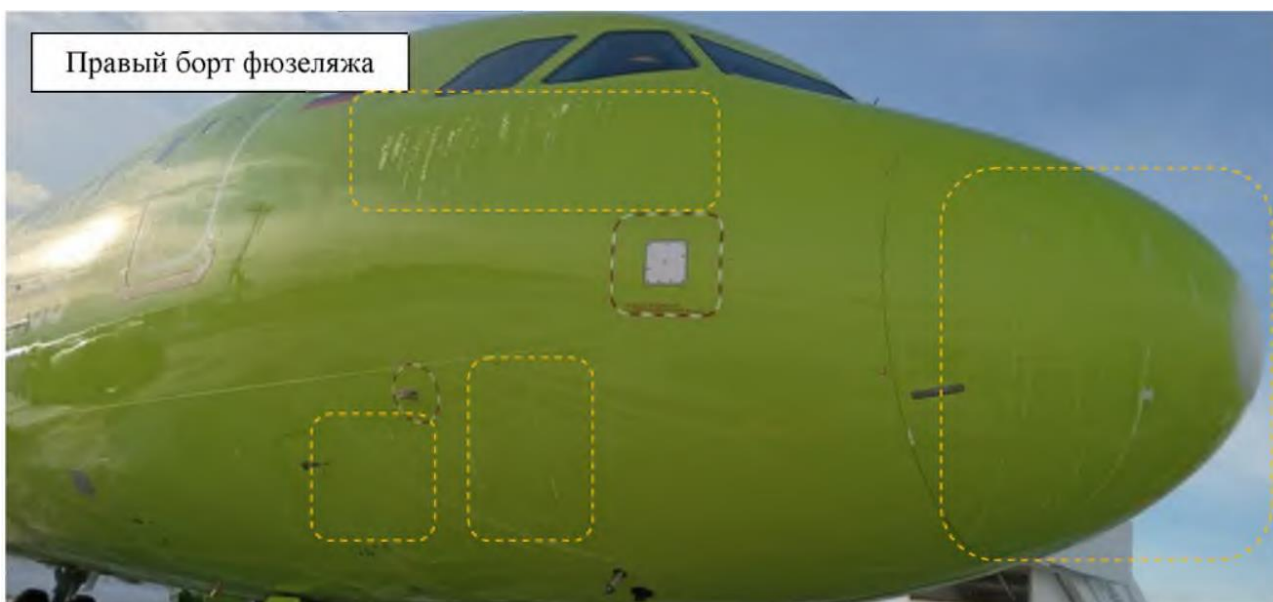


Рисунок 3 – Наросты льда в носовой части фюзеляжа самолёта,

Источник: <https://cutt.ly/51UJ8tx>

Для определения причин возникновения обледенения и наличия остатков барьерного льда на критически важных поверхностях воздушного судна в работе проведен анализ противообледенительной обработки самолета, включая:

- требования к процедурам защиты воздушного судна от наземного обледенения;
- результаты опроса участников ситуации;
- анализа области применимости ПОЖ в зависимости от климатических условий.

На основании полученных результатов были сделаны следующие выводы.

Разногласий и противоречий о необходимости удаления снега и противообледенительной обработки самолёта в два этапа (этап 1: обработки ПОЖ типа I; этап 2: обработки ПОЖ типа IV) не отмечено. Однако были допущены процедурные ошибки, обусловленные удалением снега с верхней части фюзеляжа и носовой части самолёта.

Кроме того, не было учтено, что таяние снега, образовавшегося за время стоянки на остеклении кабины экипажа, может привести к замерзанию воды и образованию «барьерного льда» перед ППД. Данные нарушения были отмечены также в выводах комиссии по расследованию серьёзного инцидента. Это подчёркивает, что при противообледенительной обработке и организации вылета была нарушена процедура очистки аэродинамических поверхностей самолета, в результате чего на передней части фюзеляжа (на остеклении кабины и под ним) был снег, который продолжал таять и стекать вниз, формируя барьерный лёд. Это привело к плохим условиям работы ППД, включающим появление вихрей перед ними, что, в свою очередь, вызвало изменение показаний скорости с переходом системы управления в режим ALTERNATE и DIRECT.

При обработке воздушного судна с помощью ПОЖ типа IV были допущены грубые технологические нарушения, обусловленные нормативами расхода ПОЖ

для обработки воздушного судна А-321NEO: при нормативе расхода 230 л. фактически использовано 99 л. Кроме этого, в процессе анализа ПОЖ типа IV было обнаружено изменение показателя «динамическая вязкость при 20°С», что приводит к уменьшению динамической вязкости ПОЖ и последствиям в виде увеличения вероятности образования льда на аэродинамических поверхностях воздушного судна. Совокупность выявленных отклонений и нарушений привела к изменению аэродинамических характеристик воздушного судна при взлете и наборе высоты.

Таким образом, исходя из результатов расследования серьёзного инцидента, произошедшего с авиалайнером А-321 авиакомпании «Сибирь», критическим моментом стало образование так называемого «барьерного льда» в носовой части фюзеляжа. Данные образования представляют собой небольшие наросты на обшивке, которые в процессе полёта приводят к турбулизации потока за ними. В случае образования барьерного льда непосредственно перед трубками Пито, наличие ледяных отложений может приводить к пульсации давления непосредственно в области отверстия для контроля полного давления набегающего потока (рисунок 4).

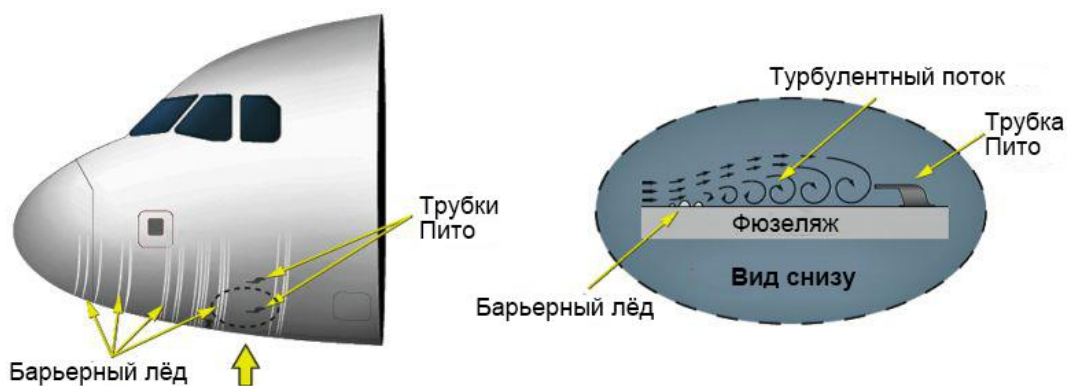


Рисунок 4 – Влияние барьерного льда на образование пульсации давления,
Источник: <https://www.kolyma.ru/>

Вышеописанная проблема характерна не только для самолётов типа А-320, но и для других лайнеров, имеющих схожую аэродинамическую компоновку и схему размещения ППД. В этой связи, с целью исследования степени влияния барьерного льда на область непосредственно перед приёмниками полного давления была создана 3D модель носовой части фюзеляжа самолёта МС-21 (рисунок 5).

Для проведения численного моделирования исследования был выбран метод, основанный на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [Исаев и др., 2017]. Данный метод довольно хорошо зарекомендовал себя при решении инженерных задач и обеспечивает необходимую точность несмотря на то, что получение осреднённых параметров потока не является физически корректным подходом, в сравнении с методами, позволяющими получить мгновенные параметры течения (давление, скорость и пр.). Достоинством

выбранного метода является то, что он менее требователен к ресурсам в сравнении с другими численными методами, такими как метод крупных вихрей или метод прямого численного моделирования.

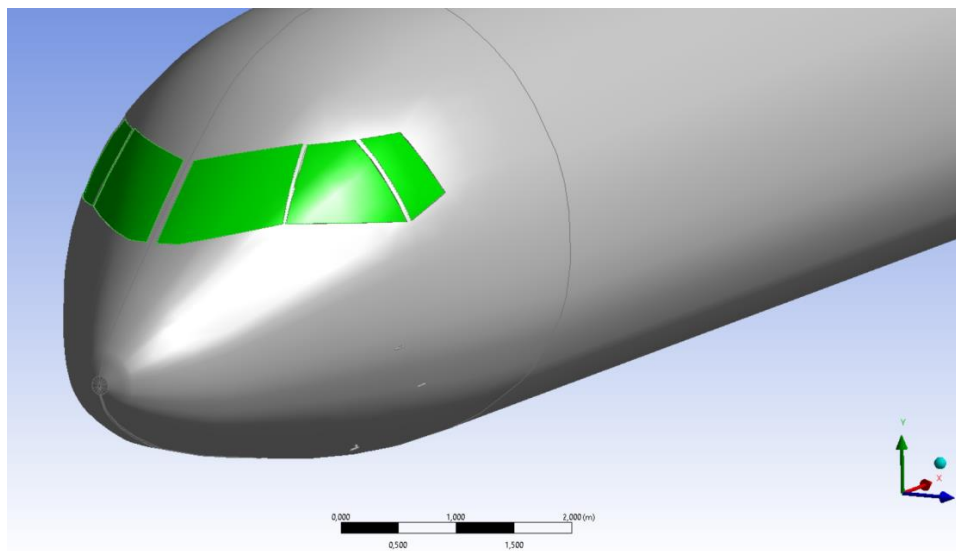


Рисунок 5 – 3D модель носовой части самолёта MC-21

Моделирование осуществлялось в программе Ansys. Для этого созданная 3D модель адаптировалась для создания расчётной конечно-элементной сетки. Барьерный лёд в носовой части фюзеляжа моделировался геометрически.

Затем построенная конечно-элементная сетка передавалась в расчётный модуль Ansys Fluent, где задавались граничные условия решаемой задачи. Исследование проводилось на скоростях, соответствующих: скорости отрыва самолёта от взлётно-посадочной полосы; скорости, достигаемой при полёте в зоне возможного обледенения.

Результаты проведенного эксперимента позволили выявить несколько важных особенностей при обтекании воздушным потоком фюзеляжа самолета без ледяных отложений и при наличии барьерного льда (рисунок 6).

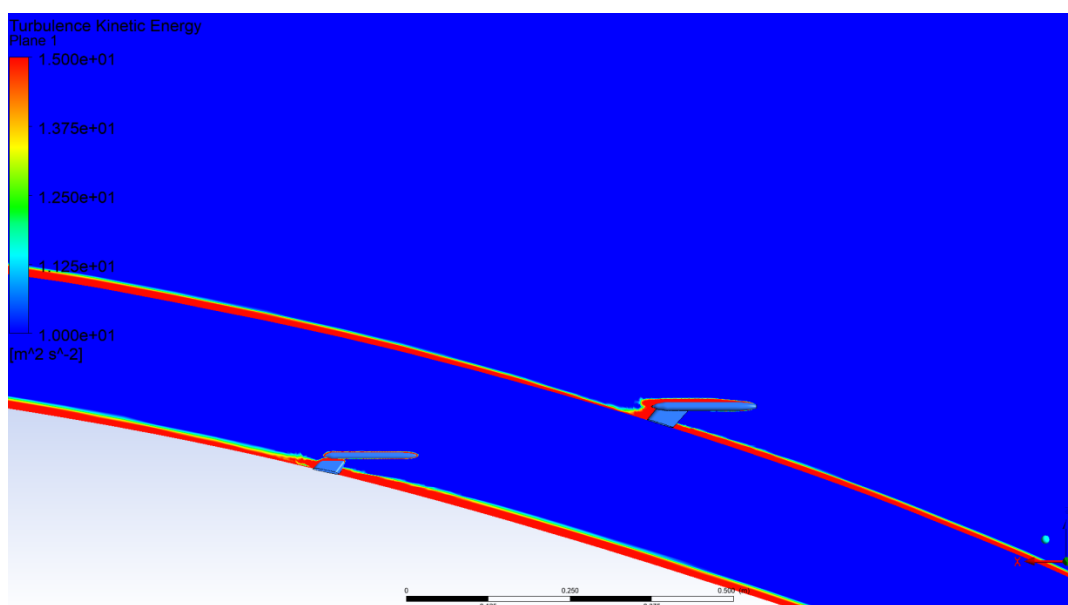


Рисунок 6 – Картина обтекания воздушным потоком фюзеляжа без ледяных отложений в сечениях на уровне размещения ППД

Установлен и зафиксирован момент возникновения интенсивной турбулизации потока вдоль обшивки самолета при наличии ледяных образований (рисунок 7).

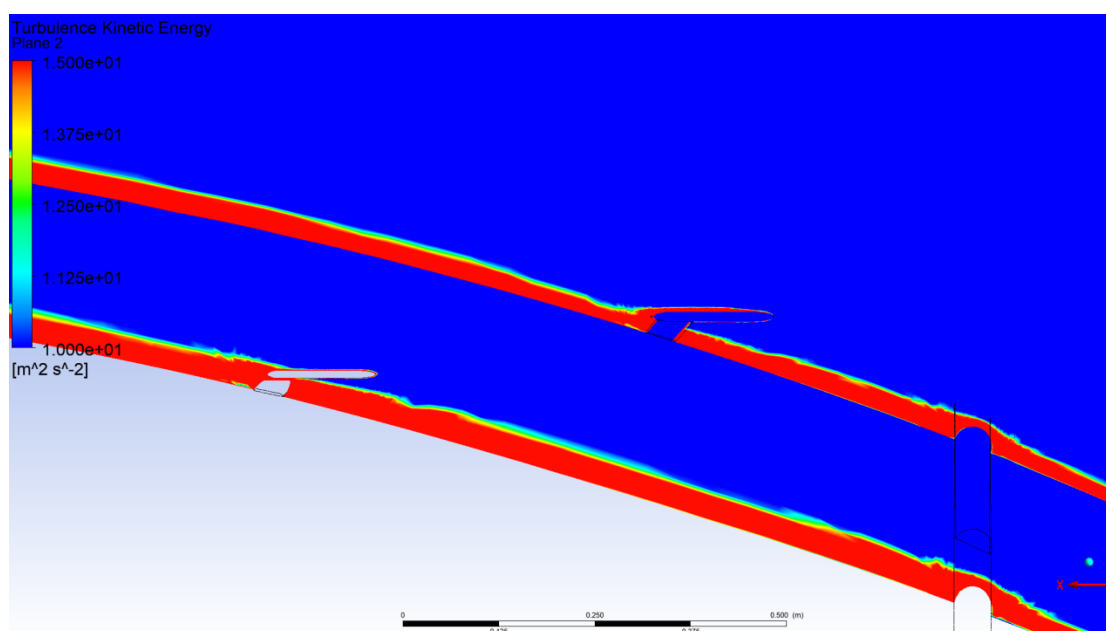


Рисунок 7 – Картина обтекания воздушным потоком фюзеляжа при наличии барьерного льда в сечениях на уровне размещения ППД при $V_{\infty} = 70$ м/с

В формате решения научной задачи наибольший интерес представляет возникновение интенсивности роста турбулизации в зависимости от скорости полета 120 м/с (рисунок 8).

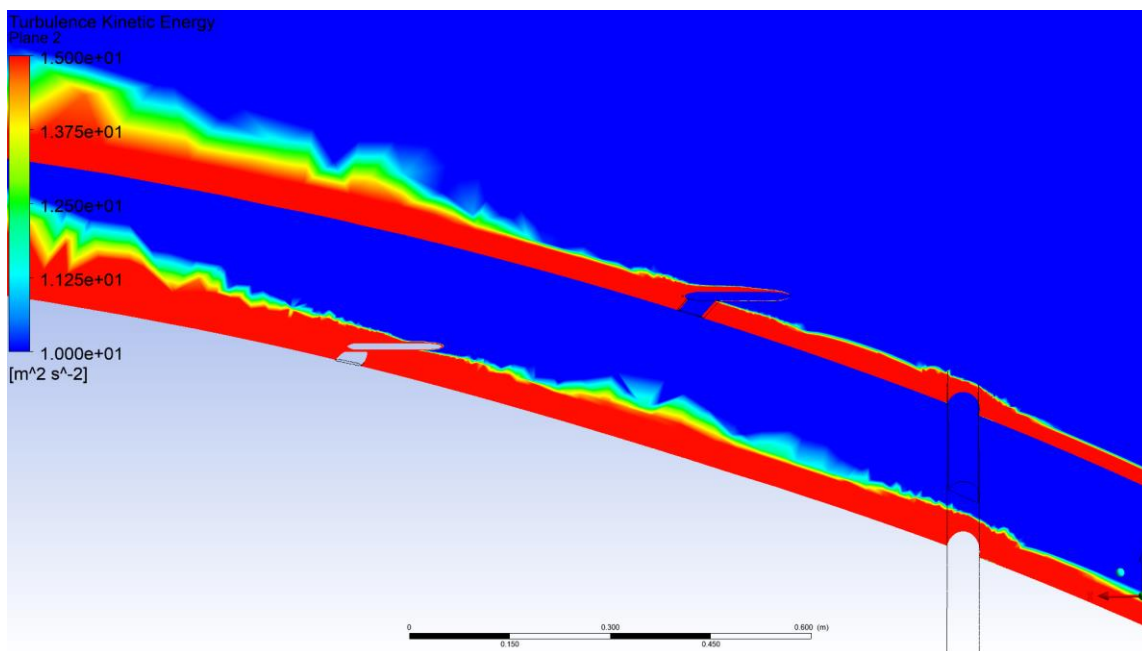


Рисунок 8 – Картина обтекания воздушным потоком фюзеляжа при наличии барьерного льда в сечениях на уровне размещения ППД при $V_{\infty} = 120$ м/с

Проведенный эксперимент и полученные результаты демонстрируют, насколько интенсивность турбулизации течения и глубина турбулентного слоя могут отличаться от сечения к сечению моделируемого фюзеляжа ВС, подчеркивая его геометрию в области лобового остекления и носового обтекателя. Это позволяет определять степень угрозы попадания возмущенного барьерным льдом потока в область непосредственно перед ППД, а также прогнозировать возникновение пульсации давления непосредственно в ППД.

Кроме этого, проведенное моделирование обтекания воздушным потоком фюзеляжа позволило установить, что на интенсивность турбулизации пограничного слоя может влиять наличие ледяных отложений непосредственно на носовом обтекателе бортового метеолокатора, поскольку в таком случае поток, достигая барьерных колец, может быть уже изначально возмущенным в лобовой части фюзеляжа.

Выводы

По результатам проведенного исследования можно отметить, что основная цель достигнута и можно сделать следующие выводы.

Результаты научных достижений отечественных и зарубежных авторов в области оценки влияния обледенения на безопасность полетов доказывают актуальность данной проблемы, а задачи для ее решения недостаточно изученными.

Полученные выводы открывают новые подходы к обеспечению безопасности полетов ВС в зависимости от качества процедур противообледенительной обработки с учетом погодных-климатических условий.

На основе моделирования процесса обтекания воздушным потоком

фюзеляжа ВС установлена интенсивность турбулизации течения и глубина турбулентного слоя в зависимости от сечения к сечению моделируемого фюзеляжа ВС, подчеркивая его геометрию в области лобового остекления и носового обтекателя.

Полученные расчетные показатели позволяют определять степень угрозы попадания возмущенного барьерным льдом потока в область непосредственно перед ППД, а также прогнозировать возникновение пульсации давления в нем.

Оценка степени угрозы турбулизации в зависимости от вероятности попадания возмущенного барьерным льдом потока в область расположения ППД позволяет внести корректирующие мероприятия в процесс подготовки летного состава при попадании ВС в область турбулентности.

Библиографический список

- Борисова Н. А.* Оценка аэродинамических характеристик летательного аппарата при полете в условиях обледенения / Н. А. Борисова, Д. В. Горячев, А.Б. Кощеев // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45. № 6. С. 43-49. EDN SYUHWWD
- Демидов А. И.* Проблема обледенения летательных аппаратов и применяемые методы борьбы с ней / А. И. Демидов, Т. И. Шишелова // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 8-2. С. 88-89. EDN SJXNJH
- Иванова А. Р.* Обледенение двигателей самолетов в ледяных кристаллах: пути решения проблемы // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2(368). С. 95-109. EDN XSCLNZ.
- Исаев А. И.* Гидродинамическая верификация и валидация численных методов расчета течения в камере сгорания газотурбинного двигателя / А. И. Исаев, С. В. Скоробогатов // Труды МАИ. 2017. № 97. С. 7. EDN YMIGQC
- Мазин И. П. Физические основы обледенения самолетов. М.: Гидрометеиздат, 1957. 121 с.
- Обледенение двигателей самолета в кристаллических облаках: анализ случая / Н. П. Шакина, И. А. Горлач, Е. Н. Скриптунова, Н. И. Комасько // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 85-91. EDN RUXQBH.
- Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия с самолётом Ан-148-100В. 2018. 180 с. // [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/560/report_ra-61704.pdf (дата обращения: 28.02.2023).
- Отчет по результатам расследования серьёзного авиационного инцидента с самолетом A321-271N VQ-BGU АО «Авиакомпания «Сибирь». 2021. 58 с. // [Электронный ресурс]. 2021. URL: https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2022/01/1659736_c08e2316ec004d1cf7ab9afa500f4e2c.pdf (дата обращения: 28.02.2023).
- Павленко О. В.* Параметрические исследования влияния обледенения на аэродинамические характеристики профиля крыла // Ученые записки ЦАГИ. 2009. Т. 40. № 2. С. 61-67. EDN KUVHHJ
- Павленко О. В.* Численное исследование особенностей обтекания модели крыла с имитаторами льда // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Том 47. № 1. С. 62-68. EDN VJQCLF
- Сторожук М. В.* Наземное обледенение воздушных судов: меры по предупреждению авиационных происшествий // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. № 219 (9). С. 93-98. EDN VHFBDR
- Шамсиев З. З.* Совершенствование технологий противообледенительной обработки воздушных судов // Наука, техника и образование. 2016. № 11(29). С. 18-20. EDN XAMRCZ
- Aircraft icing: in-cloud measurements and sensitivity to physical parameterizations / A. Merino, M. L. Martín, J. L. Marcos et al. // Geophysical Research Letters. 2019. № 20. pp. 11559-11567. DOI 10.1029/2019GL084424.
- Cao Y. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety / Y. Cao, W. Tan, Z. Wu // Aerospace

science and technology. 2018. № 75. pp. 353-385. DOI:10.1016/j.ast.2017.12.028

Challinor Chloe A. S. Accident Investigators are the guardians of public safety: the importance of safeguarding the independence of air accident investigations as illustrated by recent accidents // *Air and Space law*. 2017. Vol. 42. № 1. pp. 43-70. doi.org/10.54648/aila2017004

Yamazaki M. A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation / M. Yamazaki, A. Jemcov, H. Sakaue // *Aerospace*. 2021. № 7. 188 p. DOI: 10.3390/aerospace8070188

References

Borisova N. A., Goryachev D. V., Koscheev A. B. (2014). Assessment of aerodynamic characteristics of the aircraft during flight in icing conditions. *Scientific Notes of TsAGI*. 45(6): 43-49. EDN SYUHWL. (in Russian)

Cao Y., Tan W., Wu Z. (2018). Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace science and technology*. 75: 353-385. DOI:10.1016/j.ast.2017.12.028

Challinor Chloe A. S. (2017). Accident Investigators are the guardians of public safety: the importance of safeguarding the independence of air accident investigations as illustrated by recent accidents. *Air and Space law*. 42(1): 43-70. doi.org/10.54648/aila2017004

Demidov A. I., Shishelova T. I. (2014). The problem of icing of aircraft and the methods used to combat it. *International Journal of Experimental Education*. 8-2: 88-89. EDN SJXNJH. (in Russian)

Final report on the results of the investigation of the AN-148-100B accident. (2018). Available at: https://mak-iac.org/upload/iblock/560/report_ra-61704.pdf (accessed 28 February 2023). (in Russian)

Isaev A. I., Skorobogatov S. V. (2017). Hydrodynamic verification and validation of numerical methods for calculating the flow in the combustion chamber of a gas turbine engine. *Proceedings of MAI*. 97: 7. (in Russian)

Ivanova, A. R. (2018). Icing of aircraft engines in ice crystals: ways of solving the problem. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. 2(368): 95-109. EDN XSCLNZ (in Russian)

Mazin I. P. (1957). Physical bases of aircraft icing. Moscow: *Gidrometeoizdat*. 1957. 121 p. (in Russian)

Merino A., Martín M. L., Marcos J. L. et al. (2019). Aircraft icing: in-cloud measurements and sensitivity to physical parameterizations. *Geophysical Research Letters*. 20: 11559-11567. DOI 10.1029/2019GL084424.

Pavlenko O. V. (2009). Parametrical studies of the effect of icing on the aerodynamic characteristics of the wing profile. *Scientific Notes of TsAGI*. 40(2): 61-67. EDN KUVHHJ (in Russian)

Pavlenko O. V. (2016). Numerical study of the features of the wing model with ice simulators. *Scientific Notes of TsAGI*. 47(1): 62-68. EDN VJQCLF. (in Russian)

Report on the results of the investigation of a serious aviation incident with the A321-271N VQ-BGU aircraft of Sibir Airlines JSC (2021). Available at: https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2022/01/1659736_c08e2316ec004d1cf7ab9afa500f4e2c.pdf (accessed 28 February 2023).

Shakina N. P., Gorlach I. A., Skriptunova E. N., Komashko N. I. (2014). Aircraft engine icing in crystalline clouds: case analysis. *Meteorology and hydrology*. 2: 85-91. EDN RUXQBH. (in Russian)

Shamsiev Z. Z. (2016). Improvement of aircraft de-icing technologies. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*. 11(29): 18-20. EDN XAMRCZ (in Russian)

Storozhuk M. V. (2015). Ground icing of aircraft: measures to prevent aviation accidents. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*. 219 (9): 93-98. EDN VHFBDL (in Russian)

Yamazaki M., Jemcov A., Sakaue H. (2021). A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation. *Aerospace*. 7: 188. DOI: 10.3390/aerospace8070188