

**Проект уникальный идентификатор RFMEFI62818X0010,
выполняемый по соглашению № 075-11-2018-177 от 30.11.2018
с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации
о предоставлении из федерального бюджета субсидии
в рамках реализации ФЦП
«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы»**

Название проекта: «Экспериментальные и теоретические исследования образования и срыва льда в смешанных условиях обледенения летательного аппарата».

Руководитель проекта: Стасенко Альберт Леонидович

Выполнение и результаты этапа 2 «Теоретические и расчетно-экспериментальные исследования физики смешанного обледенения. Разработка методики и подготовка оборудования для изучения физики сброса льда»

Цели проекта

1) Реализуемый проект направлен на решение следующих задач:

– повышение эффективности применения вновь создаваемых и находящихся в эксплуатации изделий авиационной техники посредством уменьшения числа аварийных случаев и повреждений летательных аппаратов по причине обледенения, сокращения энергетических затрат на работу противообледенительных систем, обеспечения всепогодности применения;

– обеспечение замещения импорта в части проведения испытаний и сертификации изделий отечественной авиационной промышленности, предназначенных для эксплуатации в условиях кристаллического и смешанного обледенения, в соответствии с последними изменениями международных авиационных правил.

2) Целью реализуемого проекта является создание методик экспериментального и численного моделирования условий обледенения летательных аппаратов в кристаллических и смешанных облаках. Результаты реализуемого проекта будут способствовать формированию научно-технического задела для разработки новых эффективных инструментов и методик проектирования и сертификации отечественной авиационной продукции, эксплуатируемой в условиях кристаллического и смешанного обледенения.

Назначение и область применения результатов проекта

1) Результаты работы имеют важное практическое значение для обеспечения промышленной безопасности РФ в части производства и сертификации авиационной техники.

2) Методы, разработанные в ходе реализации настоящего проекта, планируется впоследствии внедрить в отечественную промышленность в

качестве согласованных с международными авиационными властями (EASA, FAA) методик проведения экспериментов по обледенению натуральных авиационных двигателей и приёмников воздушных давлений.

Потребителями результатов проекта с точки зрения проведения испытаний и сертификации продукции являются отечественные предприятия – производители авиационной техники и оборудования, потенциально уязвимых с точки зрения обледенения в кристаллических и смешанных облаках. Обледенению в этих условиях наиболее подвержены бортовые авиационные датчики с внутренними каналами (приемники воздушных давлений, датчики температуры и др.), а также турбореактивные двигатели. Предприятия – потребители результатов, производящие авиационные датчики: АО «Концерн Радиоэлектронные технологии» (КРЭТ), включая АО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» (АО «УКБП») и АО «Аэроприбор-Восход». Предприятия – потребители результатов, производящие авиационные двигатели: АО «ОДК-Авиадвигатель».

С точки зрения внедрения разработанной методики для испытаний двигателей в условиях кристаллического и смешанного обледенения потребителем результатов проекта является ФГУП «ЦИАМ».

Результаты проекта будут доведены до потребителя путем обеспечения испытаний их продукции по разработанным методикам на экспериментальной базе ЦАГИ, а также путем выполнения специалистами ЦАГИ расчетных работ по определению соответствия противообледенительной защиты отечественной авиационной техники международным авиационным нормам в части обледенения.

3) Созданные в результате работы по проекту методики экспериментальных исследований и программы численного моделирования будут использованы для экспериментального и расчетного определения соответствия противообледенительной защиты летательных аппаратов последней редакции международных норм летной годности в условиях кристаллического и смешанного обледенения. Таким образом, будет обеспечено решение задач проведения испытаний и сертификации ЛА отечественного производства в условиях кристаллического и смешанного обледенения на территории РФ, что не обеспечивается в настоящий момент в должной мере.

В рамках международного сотрудничества особое внимание уделено гармонизации методик экспериментального и численного подтверждения эффективности противообледенительных систем летательных аппаратов в нормированных условиях обледенения.

Эффекты от внедрения результатов проекта

Результаты настоящего проекта способствуют формированию необходимого научно-методического задела для создания сертифицированных методик расчетных и экспериментальных исследований обледенения изделий авиационной техники, гармонизированных с вновь введенными нормами летной годности. Создание и внедрение этих методик

снизит риски для отечественной авиационной промышленности, связанные с необходимостью сертификации вновь создаваемых летательных аппаратов в соответствии с актуальными международными авиационными правилами, и обеспечит замещение импорта в части проведения испытаний и сертификации изделий, предназначенных для эксплуатации в условиях кристаллического и смешанного обледенения.

Партнеры проекта

Французский центр аэрокосмических исследований (ONERA, Франция).

AIRBUS CRT (бывш. AIRBUS Group Innovations – AGI, Германия).

Итальянский центр аэрокосмических исследований (CIRA, Италия).

Технический университет Брауншвейга (TUBS, Германия).

Технический университет Дармштадта (TUDA, Германия).

Результаты проекта, полученные на этапе 2 (2019 г.)

Результаты, полученные ФГУП «ЦАГИ»:

Получены данные экспериментов по обледенению в смешанных условиях при высоких скоростях потока.

Проведена калибровка и исследовано обледенение трубки макетного приемника воздушных давлений в условиях кристаллического и смешанного обледенения. Выполнено обобщение данных экспериментов.

Развиты физико-математические модели взаимодействия ледяных кристаллов с нагретой сухой/смоченной поверхностью и обледенения в кристаллических и смешанных условиях.

Проведены расчеты аккреции кристаллов нагретой поверхностью профиля крыла.

Исследована микрофизика взаимодействия кристаллов с поверхностью, уточнены методики характеристики кристаллов и параметров потока.

Разработана методика экспериментальных исследований сброса льда при моделировании тепловой среды внутри авиационного двигателя.

Проведена адаптация стенда для испытаний при низких температурах.

Выполнена взаимная верификация экспериментальных данных.

Результаты, полученные иностранными партнерами:

Адаптированы и настроены системы регистрации данных сброса льда.

Измерены характеристики капельно-кристаллического потока (концентрация кристаллов, скорости и размеры) до и после взаимодействия с моделью.

Развиты модели тепломассообмена в пористом водо-ледяном слое.

1) Основные характеристики полученных результатов.

1. Исследования смешанного обледенения проведены в условиях образования барьерного льда на 2 моделях профиля крыла с электрически обогреваемой поверхностью. Модели отличаются формой передней кромки – у первой это цилиндрическое тело, у второй – хорошо обтекаемая

аэродинамическая поверхность. Эксперименты проведены в диапазоне скоростей потока 40 м/с – 80 м/с, его температур от минус 5 °С до минус 12 °С, полной водности TWC от 1.4 до 18 г/м³, соотношения плавления $\xi = LWC/TWC$ в диапазоне от 0 (чисто кристаллический поток) до 1 (только капли). Результаты анализировались в терминах коэффициента преобразования натекающей воды в барьерный лед и температурных перепадов поверхности как функций ξ , температуры и скорости набегающего потока, температуры поверхности модели.

Показано, что эффективность преобразования натекающих частиц в барьерный лед увеличивается с ростом относительного содержания ξ капель в потоке, при этом экспериментальные точки для близких по параметрам режимов для обеих моделей близки друг к другу, несмотря на существенно отличающиеся температурные перепады. В случае увеличения скорости от 40 м/с до 80 м/с эффективность захвата частиц поверхностью значительно снижается из-за возрастающих эффектов сдува пленки и ее разрушения потоком кристаллов.

Проведены исследования образования льда на передней кромке 2 моделей профиля крыла без нагрева поверхности при тех же параметрах потока. Выполнены измерения интенсивности обледенения (средней линейной скорости роста ледяного слоя), результирующей формы ледяных образований, угла откоса ледяного слоя для различных условий натекания ледяных частиц и капель. Показано, что на скоростном режиме 80 м/с становятся существенными эффекты эрозии, а понижение температуры, увеличение кристаллической водности или скорости ведет к уменьшению угла откоса, делает клин наледи более острым. Полученные данные могут быть использованы для верификации численной модели.

2. Выполнены калибровочные испытания погрешности восприятия полного и статического давления приемником ПВД-2С в условиях обтекания дозвуковым потоком в диапазоне чисел Маха $M = 0.2 \div 0.5$. Эксперименты были выполнены на УНУ АДТ Т-125 ФГУП «ЦАГИ». Результаты исследований показывают, что на дозвуковых режимах до $M = 0.5$ включительно относительная погрешность восприятия полного давления приемником ПВД-2С-1 составляет не более 0.4 %, погрешность восприятия статического давления находится в диапазоне 0 – 1.7 %. Влияние угла скоса потока до величины угла рыскания в горизонтальной плоскости $\beta=10^\circ$ незначительно.

3. Разработана методика и выполнены экспериментальные исследования обледенения ПВД в смешанных условиях. В результате экспериментов определялось время закупорки льдом внутреннего канала ПВД в функции скорости, температуры, водности кристаллической фракции IWC, а также оценивалось время восстановления показаний скорости ПВД при выходе из кристаллического облака для номинальной мощности его обогрева.

На основе полученных результатов сделан вывод о высокой вероятности запираания канала ПВД при попадании ЛА в снежный заряд или в область с высокой концентрацией ледяных кристаллов (верхний слой развитой кучевой облачности, зоны над грозовыми фронтами).

4. Выполнено обобщение экспериментальных данных для создания, калибровки и верификации физико-математической модели кристаллического и смешанного обледенения, включая эрозию льда натекающими кристаллами и сопряженный теплообмен внутри стенки модели. Данные по коэффициенту преобразования натекающей воды в барьерный лед, температурным перепадам поверхности и приведенной интенсивности обледенения представлены в виде функций соотношения плавления и температуры потока.

5. Развита физико-математическая модель гидротермодинамики водяной пленки на поверхности нагретого тела, которая подвергается бомбардировке кристаллами льда. Учтено поглощение части массы кристалла пленкой и разбрызгивание пленки из-за удара.

6. Приведен комплекс физико-математических моделей обледенения ЛА в кристаллических и смешанных условиях. Для учета эффекта частичного плавления кристалла при его движении по теплой поверхности, когда его можно считать точечным стоком тепла, использована аналогия с задачей об энергообмене источника тепла, рассматривавшейся ранее другими авторами в приложении к сварке и резке металлов.

Для моделирования обледенения ЛА в кристаллических условиях развита стохастическая модель взаимодействия отдельных кристаллов с поверхностью. В случае смешанного обледенения предложена аналогичная дискретно-капельная модель. Кроме того, описана модель взаимодействия частиц с рельефным телом на основе использования методов молекулярной динамики.

7. Представлены результаты численных исследований аккреции льда, полученные в рамках разработанных моделей. На основе модели тонкой пленки прослежено влияние кристаллов на параметры барьерного льда, образующегося из-за замерзания пленки, которая течет по поверхности макета крыла, используемого в экспериментах на аэрохолодильном стенде. Дискретно-капельная и дискретно-кристаллическая модели опробованы на примере обледенения кругового цилиндра. Приведены подробные результаты численного моделирования взаимодействия частиц с поверхностью методом молекулярной динамики.

8. Выполнена экспериментальная работа по определению характеристик падающего и отраженного потоков кристаллов льда (распределение по размерам, скорости и концентрации) у поверхности металлической пластины, установленной под углом 45° к потоку. Исследование проводилось с помощью теневого метода. Данный метод был впервые реализован в ЦАГИ в ходе выполнения данной работы.

9. Теневым методом определены характеристики кристаллов, а также уточнены размеры водяных частиц при помощи фазодоплеровского

анализатора на выходе из сопла стенда искусственного обледенения. Проведено сравнение данных с результатами по характеристикам смешанных потоков, полученными зарубежными партнерами.

10. Разработана методика экспериментальных исследований сброса льда в конфигурации экспериментальной установки, моделирующей тепловую среду внутри компрессора авиационного двигателя. Рассмотрены 2 подхода к моделированию соотношения плавления в эксперименте: инжектирование холодных кристаллов в теплый поток с их последующим частичным таянием до взаимодействия с моделью и одновременное инжектирование в поток капель и кристаллов. Выполнены пробные пуски с моделью в виде плоской нагреваемой пластины для апробации методики.

11. Выполнены работы по адаптации систем стенда для проведения испытаний при температурах потока до минус 30 °С. Экспериментально проверены 2 подхода, обеспечивающие требуемое захолаживание потока: вброс измельченных кристаллов сухого льда при помощи эжекторной системы и инжектирование жидкого азота через дополнительную форсунку, установленную в аэродинамическом канале.

12. Выполнена взаимная верификация экспериментальных результатов ФГУП «ЦАГИ» и TUBS на основе анализа данных по приведенной интенсивности обледенения на критической линии модели крыла как функции отношения плавления. Показано, что, несмотря на принципиально разные способы получения кристаллов, наблюдается хорошая корреляция данных.

2) Оценка элементов новизны научных решений, применявших методик и решений.

Реализация второго этапа настоящего проекта привела к получению экспериментальных результатов по обледенению в смешанных условиях для моделей профиля крыла без нагрева поверхности и с ее нагревом в режиме образования барьерного льда. Выполнены эксперименты по обледенению приемников воздушных давлений в условиях кристаллического и смешанного обледенения. Выполнены систематизация и анализ результатов экспериментов, их обобщение для верификации и калибровки физико-математических моделей и расчетных программ. Выполнена подготовка стендов и измерительных систем, разработана методика для изучения физики сброса льда в конфигурации, моделирующей тепловую среду внутри компрессора авиационного двигателя, подготовлены эксперименты по обледенению в смешанных условиях потока при температурах до минус 30 градусов Цельсия. Развита новая физико-математическая модель смешанного обледенения, включающая развитие подхода, основанного на описании течения тонкой пленки, взаимодействующей с натекающими каплями и кристаллами, а также новую модель дискретно-капельного обледенения. Выполнены расчеты, моделирующие стендовый эксперимент. Для определения размеров, формы и концентрации кристаллов в потоке стенда, а также в области у поверхности модели успешно применен теневой метод фотовидеосъемки.

Полученные в ходе выполнения этапа результаты крайне важны для решения задач MUSIC-НАИС в целом и получены впервые. Для Российской Федерации разработка экспериментальных методик и средств моделирования кристаллического и смешанного обледенения, гармонизированных с последней редакцией европейских авиационных правил CS 25, а также получение экспериментальных результатов в условиях смешанного обледенения является принципиально новой задачей.

Полученные результаты полностью соответствуют требованиям Приложения № 1 «Техническое задание» к Соглашению № 075-11-2018-177 от 30.11.2018.

3) Сопоставление с результатами аналогичных работ, определяющими мировой уровень.

Настоящий проект является составной частью совместного проекта «3D multi-disciplinary tools for the simulation of in-flight icing due to high altitude ice crystals» (MUSIC-NAIC), выполняемого международным консорциумом академических, исследовательских организаций (включая ФГУП «ЦАГИ») и промышленных партнеров с целью дальнейшего совершенствования (с существующего TRL2–TRL4 до TRL6) трехмерных промышленных пакетов программ, моделирующих обледенение изделий авиационной техники. Финансирование деятельности иностранных партнеров в рамках проекта MUSIC-NAIC поддержано Еврокомиссией.

В европейских авиационных научных центрах идет интенсивная работа по адаптации существующих экспериментальных установок для имитации условий кристаллического и смешанного обледенения. Такие установки как GKN ATS, Esterline Icing Wind Tunnel, TUBS, DGA в период выполнения проекта NAIC (High Altitude Ice Crystals) были модернизированы для создания условий кристаллического и смешанного обледенения, соответствующих изменениям авиационных правил.

Участие в проекте NAIC позволило научному коллективу ФГУП «ЦАГИ» разработать стенд и методику для исследований физики процессов обледенения в полностью кристаллических условиях, а также новые физико-математические модели и расчетные программы. Результаты ФГУП «ЦАГИ» по кристаллическому обледенению признаны европейскими партнерами, в частности Airbus и ONERA, и соответствуют передовому мировому уровню. Полученные на данном этапе результаты позволили создать банк экспериментальных данных и провести сравнение с результатами ведущих научных центров (в частности, TUBS). Сравнение показало хорошую корреляцию данных ФГУП «ЦАГИ» и зарубежных партнеров в области пересечения входных параметров эксперимента. Часть полученных результатов (например, данные по обледенению трубки приемника воздушных давлений при натекании кристаллов) не имеет аналогов. Несмотря на принципиальную важность экспериментов такого рода для безопасности полетов, данные в мировой литературе по ним отсутствуют.