

**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 3 «Расчетные исследования смешанного обледенения. Исследования физики сброса льда. Обобщение и анализ результатов исследований. Подведение итогов реализации проекта»

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,

ГАА) 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 3 (2020 г.)

Результаты, полученные ФГУП «ЦАГИ»:

Выполнен эксперимент по изучению физики сброса льда в конфигурации, моделирующей тепловую среду внутри компрессора авиационного двигателя, включая повышение температуры в его тракте вследствие изменения высоты полета.

Проведены эксперименты по обледенению в смешанных условиях при температурах потока до минус 30 градусов Цельсия.

Проведены измерения силы адгезии льда на поверхности.

Выполнены численное моделирование стендовых экспериментов по аккреции льда в условиях смешанного обледенения и валидация программ.

Исследованы характеристики многофазного потока до и после взаимодействия с моделью.

Выполнены обобщение и анализ экспериментальных данных, взаимная верификации численных исследований с европейскими партнерами.

Для условий кристаллического и смешанного обледенения разработана экспериментальная методика исследований обледенения ЛА.

Создана итоговая база экспериментальных данных для калибровки и верификации физико-математических моделей кристаллического и смешанного обледенения.

Созданы верифицированная физико-математическая модель и расчетная методика исследований обледенения ЛА.

Разработаны рекомендации по использованию созданного задела в области методов экспериментальных и расчетных исследований кристаллического и смешанного обледенения.

Разработан проект технического задания на составную часть ОКР по проверке эффективности противообледенительной защиты приемника воздушных давлений в условиях кристаллического и смешанного обледенения.

Результаты, полученные иностранными партнерами:

Проведены исследования процесса обледенения в аэрохолодильной трубе TUBS при малых скоростях потока (до 40 м/с) в смешанных условиях при помощи моделей, препарированных термодатчиками и оборудованных электрическими нагревателями поверхности.

Выполнены эксперименты по срыву льда в аэрохолодильной трубе TUBS на больших аэродинамических моделях, с моделированием фактора плавления одновременным инжектированием жидкокапельной и кристаллической фракций в аэродинамический канал.

Проведены измерения характеристик капельно-кристаллического потока до и после взаимодействия с моделью.

Выполнены экспериментальные исследования процессов сброса льда на аэрохолодильной трубе iCORE в диапазоне температуры воздуха от минус 20 до 0 градусов Цельсия, скорости потока до 140 м/с, проведены съемка аккреции и эрозии льда высокоскоростными камерами, мониторинг фрагментации и уноса частиц.

Разработанные новые модели применены для развития собственных программ расчета обледенения.

Проведена серия численных экспериментов для калибровки и валидации новых моделей на основе имеющихся экспериментальных данных.

Выработана серия общих двумерных тестовых случаев для моделирования аккреции кристаллов и теплообмена.

Проведены расчеты отобранных тестовых случаев в рамках собственных двумерных кодов.

Проведено перекрестное сравнение численных результатов с результатами партнеров, выполнено сравнение с экспериментальными данными. Сделан выбор физико-математических моделей для применения в промышленных программных продуктах для расчета обледенения.

1) Основные характеристики полученных результатов.

1. Проведены эксперименты, моделирующие образование и сброс льда внутри компрессора авиационного двигателя, включая повышение температуры в его тракте вследствие изменения высоты полета. Показано, что накопление и срывы льда происходят в двух основных случаях: 1) подогреваемой поверхности с небольшой положительной температурой в диапазоне 1–3 °С и температуре потока и кристаллов около 0 °С, 2) холодной поверхности и температуре потока около 8 °С, когда в поток вводятся холодные кристаллы с температурой в диапазоне –2...–7 °С. Режим 2 наиболее близко соответствует процессам, происходящим в двигателе при полете в кристаллических или смешанных облаках, и приводит к катастрофическому росту, а затем срыву ледяной массы.

2. Эксперименты по обледенению в смешанных условиях проведены на модели нагреваемого профиля NASA0012 для скорости потока 40 м/с, его температуры $5 \pm 0,5$ °С, жидкокапельной водности LWC в диапазоне 1,1–2,4 г/м³, кристаллической водности IWC в диапазоне 5 – 14 г/м³. На модели профиля крыла ЦАГИ №2 выполнен эксперимент с дополнительным охлаждением потока до температуры –25°С за счет инжектирования кристаллов CO₂ при скорости потока $V = 40$ м/с,

$LWC = 1,1 \text{ г/м}^3$, $IWC = 14 \text{ г/м}^3$. Получены данные по температурной динамике поверхности, интенсивности обледенения и форме образующегося льда. Данные предназначены для валидации численных программ.

3. Измерения силы адгезии льда проведены для пластин из дюралюминия, нержавеющей стали и дюралюминия, покрытого кремнийорганической гидрофобной эмалью, для следующих случаев образования льда: замерзание переохлажденных капель, барьерный лед, замерзание на поверхности без потока воды в каплях, внутри цилиндров и в виде лужицы. Сила адгезии обычного и барьерного льда к поверхностям дюралюминия и нержавеющей стали примерно одинакова и находится в диапазоне $4,5\text{--}6 \text{ кг/см}^2$. Какой-либо зависимости от скорости потока или его температуры не обнаружено. Величина силы адгезии льда в виде капель и лужицы для всех поверхностей значительно больше, чем льда, полученного другими способами. Величина силы адгезии льда, полученного методом цилиндров, имеет средние значения. Для гидрофобной пластины значения силы адгезии меньше, чем для других образцов.

4. Численные исследования смешанного обледенения выполнены для опорных случаев стендовых экспериментов на модели профиля крыла №2 с нагреваемой передней кромкой для скорости воздушного потока 40 м/с , его температуры минус $12 \text{ }^\circ\text{C}$, случая чисто жидкокапельного обледенения с $LWC = 1,4 \text{ г/м}^3$, и случая смешанного обледенения с тем же значением LWC и кристаллической водностью $IWC = 1,2 \text{ г/м}^3$. Для моделирования была использована физико-математическая модель жидкой пленки, взаимодействующей с натекающими кристаллами, разработанная на предыдущем этапе работы. Результаты сравнивались с экспериментом по положению и массе образующегося барьерного льда. Погрешность расчета по массе барьерного льда составила $18\text{--}22\%$.

5. Валидация вычислительных программ смешанного обледенения выполнена в диапазоне параметров стендовых экспериментов на модели профиля крыла №2 с нагреваемой передней кромкой для скорости воздушного потока 40 м/с , его температуры минус $12 \text{ }^\circ\text{C}$, жидкокапельной водности $LWC 0,7\text{--}1,4 \text{ г/м}^3$, кристаллической водности $IWC 0\text{--}5,9 \text{ г/м}^3$.

6. Проведено экспериментальное исследование характеристик капельно-кристаллического потока до и после взаимодействия с передней кромкой профиля НАСА0012 при скоростях потока 40 и 80 м/с . С помощью теневого метода измерены направления движения кристаллов, их размеры и концентрация.

7. Выполнены обобщение и анализ экспериментальных данных. Проанализированы данные для приведенной интенсивности обледенения в смешанных условиях на модели профиля ЦАГИ №2 при скорости воздушного потока от 40 до 120 м/с , его температурах 0 , -6 и $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, при полной водности TWC в диапазоне от $0,7$ до $14,9 \text{ г/м}^3$, значениях соотношения плавления ξ от 0 (чисто кристаллический поток) до 1 (чисто капельный поток). Результаты сравнены с полученными Техническим

университетом Брауншвейга на модели профиля NASA0012 при скорости потока 40 м/с, его температурах 0, – 6 и –15 °С, полной водности TWC в диапазоне от 6,4 до 17 г/м³. Несмотря на разные способы получения кристаллов, данные ЦАГИ хорошо коррелируют с данными TUBS в области значений ξ , не превышающих 0,4.

Полученные результаты могут быть использованы для валидации численных моделей обледенения холодной и нагреваемой поверхности в смешанных и кристаллических условиях.

8. Верификация численных исследований с зарубежными партнерами была проведена на основе проведения численного моделирования эксперимента NRC с цилиндрической передней кромкой для следующих параметров потока: скорость 84.5 м/с, температура около 15 °С, кристаллическая водность IWC = 5.64 г/м³, жидкокапельная водность LWC = 0.36 г/м³. Результаты сравнивались по форме льда, образующегося на передней кромки модели. Верификация показала удовлетворительное совпадение результатов численных исследований ЦАГИ и ONERA.

9. Разработана экспериментальная методика для испытаний ЛА и элементов их конструкции, гармонизированная с последней редакцией международной нормативной документации по условиям обледенения ЛА (Приложение Р к CS-25, Приложение D к FAR – 33) в кристаллических и смешанных условиях.

10. Методика разработана с целью подготовки промышленных и сертификационных испытаний датчиков восприятия параметров воздушного потока (приемники полного и статического давлений, датчики угла атаки, датчики вектора скорости, датчики температуры), а также сигнализаторов обледенения в соответствии с актуальными международными нормами. Методика может быть также адаптирована для испытаний любых устройств с внутренними каналами (воздухозаборники самолетов и вертолетов), а также несущих аэродинамических поверхностей, обладающих большими габаритами, после необходимой адаптации стендовой базы.

11. Создана итоговая база экспериментальных данных для калибровки и верификации физико-математических моделей кристаллического и смешанного обледенения (включая сопряженный теплообмен и эрозию). База включает данные по обледенению (форма, размеры, положение) необогреваемых поверхностей моделей профиля ЦАГИ №2 и NASA0012, а также данные по барьерному льду (масса, положение, динамика температуры поверхности) на моделях профилей ЦАГИ №1 и 2 в диапазоне температур потока от 0 до минус 25 °С, его скорости от 40 до 120 м/с, полной водности от 0 до 18 г/м³, соотношения плавления от 0 (кристаллическое обледенение) до 1 (жидкокапельное обледенение). В базу данных входит полное геометрическое описание моделей, характеристики капельно-кристаллического потока (размеры частиц, поля водности), параметры эксперимента (скорость, температура и влажность потока).

12. На основе уравнений пограничного слоя для водяной пленки, осредненных по ее толщине, создана модель для расчета обледенения в смешанных условиях. В модели учтены захват кристаллов пленкой, их таяние и теплообмен, а также разрушение пленки кристаллами.

13. На основе рассмотрения процессов взаимодействия кристаллов с поверхностью с учетом эрозии образующейся наледи получена модель образования льда на необогреваемой поверхности в чисто кристаллических условиях обледенения. Модель описывает образование льда при положительных температурах потока, близких к $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и верифицирована сравнением с экспериментами ЦАГИ на модели профиля №2.

14. В ходе проекта подтверждена необходимость проверки приемников воздушных давлений и других устройств с внутренними каналами, подверженных воздействию капельно-кристаллического потока в условиях кристаллического и смешанного обледенения. Подготовлена экспериментальная база и созданы методики для проведения соответствующих работ по проверке эффективности систем противообледенительной защиты изделий в условиях, соответствующих актуальным международным нормам по кристаллическому и смешанному обледенению.

15. Разработанная в ходе выполнения проекта верифицированная физико-математическая модель и расчетная методика исследований обледенения ЛА в кристаллических и смешанных условиях может быть использована для оценки изменения аэродинамических характеристик ЛА при полете в смешанных условиях, расчета массы и положения барьерного льда на крыле и на внутренней поверхности обечайки двигателя.

16. Разработан проект технического задания на составную часть ОКР по проверке эффективности противообледенительной защиты приемника воздушных давлений в условиях кристаллического и смешанного обледенения.

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

Проблема кристаллического обледенения является междисциплинарной, ее исследования требуют применения численных методов, методов механики сплошной среды, аэродинамики, теплообмена в многофазных системах, механики разрушения, реологии, математики. Для ее исследования на современном уровне требуются обширные данные физических экспериментов, компенсирующие неполноту применяемых в настоящее время физико-математических моделей и недостаточные возможности используемых на практике пакетов прикладных программ.

В рамках настоящего проекта с учетом задач MUSIC-НАИС ФГУП «ЦАГИ» выполнил часть экспериментальных исследований теплообмена и явлений аккреции льда в условиях смешанного обледенения при больших скоростях набегающего потока, срыва фрагментов льда. В продолжение исследований, начатых в рамках проекта «High Altitude Ice Crystals» (НАИС),

в данном проекте исследованы три ранее не изученных механизмов сброса льда, на которые оказывают влияние аэродинамические силы, сила тяжести и сила адгезии. Первый механизм значителен, когда предел текучести ледяного слоя очень мал (очень большие или очень маленькие значения отношения кристаллической водности потока к общей водности, т.н. фактор плавления) и меньше, чем аэродинамические силы. При этом ледяной слой разрушается, или его фрагменты отделяются от частей, более механически устойчивых (например, ледяной слой около острой передней кромки). Вторым механизмом является в случае, когда внешние силы (аэродинамическая сила и сила тяжести) превышают силу адгезии между ледяным слоем и подложкой. Третьим механизмом является существенен, когда сила адгезии уменьшается путем нагрева границы раздела между льдом и поверхностью, что ведет также и к уменьшению площади межфазной границы за счет плавления.

Также в проекте проведено дальнейшее развитие физико-математической модели кристаллического обледенения. На ее основе создана модель обледенения в смешанных условиях, разработаны соответствующие численные реализации модели и откалиброваны на основе сравнения с экспериментальными данными и перекрестного сравнения результатов расчетов различных организаций, входящих в консорциум по проекту.

Таким образом, реализация настоящего проекта привела:

- к получению передовых знаний в области физики взаимодействия облачных кристаллов с поверхностью ЛА в условиях кристаллического и смешанного обледенения;

- к созданию экспериментальной методики исследований обледенения ЛА в кристаллических и смешанных условиях, гармонизированной с изменениями FAR 33;

- развитию физико-математической модели и расчетной методики исследований обледенения ЛА в кристаллических и смешанных условиях;

- к созданию базы экспериментальных данных обледенения элементов конструкции ЛА в кристаллических и смешанных условиях для верификации численных методик.

Вышеуказанные результаты крайне важны для решения задач MUSIC-NAIC в целом, получены впервые, что обуславливает их новизну и актуальность реализации настоящего проекта. Например, использование результатов проекта дает возможность улучшить средства численного определения зон и скорости кристаллического обледенения, определение формы и размеров образующегося льда, массы срываемых кусков льда для элементов тракта двигателя (на основе экспериментальных измерений силы адгезии), поскольку в применяемых для этого методах помимо данных, полученных в процессе эксплуатации ЛА, можно внедрить исследованные физические критерии срыва. Аналогичная ситуация складывается и для определения критических условий (массовой доли кристаллической фазы в воздухе) нормальной работы приемников воздушных давлений (ПВД). В инструментах численного анализа можно использовать гораздо более реалистичную физико-математическую модель кристаллического

обледенения при взаимодействии кристаллов с противообледенительной системой ПВД.

Настоящий проект посвящен именно поиску оптимальных путей моделирования кристаллического и смешанного обледенения. Для Российской Федерации разработанные экспериментальные методики и средства моделирования кристаллического и смешанного обледенения, гармонизированные с последней редакцией европейских авиационных правил CS-25, являются принципиально новым результатом. Методы создания условий кристаллического и смешанного обледенения для наземных испытательных установок, а также методики проведения соответствующих экспериментальных исследований, 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.

Таким образом, выполнение настоящего проекта способствовало формированию необходимого научно-методического задела для создания гармонизированных с вновь введенными нормами летной годности сертифицированных методик расчетных и экспериментальных исследований обледенения изделий авиационной техники. Создание и внедрение этих методик обеспечит замещение импорта в части проведения испытаний и сертификации (в соответствии с действующими международными авиационными правилами) изделий отечественной авиационной промышленности, предназначенных для эксплуатации в условиях кристаллического и смешанного обледенения.

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 «Трехмерные междисциплинарные средства моделирования обледенения в полете на больших высотах, вызванного кристаллами льда» («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 осуществляется 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 HAIC (High Altitude Ice Crystals) были модернизированы для создания условий кристаллического и смешанного обледенения, соответствующих изменениям авиационных правил.

Участие в проекте HAIC 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 в данном проекте 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 по ним в мировой литературе отсутствуют.

Полученные экспериментальные результаты для создания, калибровки и верификации физико-математической модели кристаллического и смешанного обледенения (включая сопряженный теплообмен и эрозию) предоставляет недостающие данные для развития, калибровки и валидации моделей аккреции ледяных кристаллов (включая эффекты эрозии и теплообмена с поверхностью). Фактически, при этом продолжались работы, начатые совместно ФГУП «ЦАГИ» и TUBS в проекте HAIC. В экспериментах TUBS и ФГУП «ЦАГИ» посредством частичного дублирования режимов исследовано влияние способа создания кристаллов на экспериментальные результаты.

Результаты изучения механизмов сброса льда и соответствующая база данных экспериментов послужит фундаментом для создания трехмерных промышленных программных продуктов для расчета таких сложных явлений, как образование ледяных наростов и сброс льда в тракте двигателя. Разработка трехмерных промышленных программных продуктов предусмотрена на дальнейших стадиях реализации проекта MUSIC-HAIC.

Проведение валидации вычислительных программ на основе наработанной базы экспериментальных данных, взаимная верификация численных исследований с европейскими партнерами позволили выбрать лучшие математические модели обледенения, которые могут быть внедрены в промышленные программные продукты.

Таким образом, полученные при выполнении проекта научно-технические результаты полностью соответствуют достижениям, определяющим мировой уровень, а в некоторых аспектах превосходят его.