

**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 1** «Разработка методик и подготовка оборудования для исследований обледенения в смешанных условиях»

**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 1 (2018 г.)**

#### Результаты, полученные ФГУП «ЦАГИ»:

1. Проведен обзор научных работ, посвященных экспериментальным и теоретическим исследованиям обледенения в кристаллических и смешанных облаках.

2. Выполнен анализ критериев подобия, проведены физические оценки характерных времен и пространственных масштабов для смешанного обледенения в полете.

3. Проведены патентные исследования по методам изучения кристаллического и смешанного обледенения.

4. Разработана методика проведения экспериментов по обледенению в смешанных условиях при высоких скоростях потока (до 120 м/с).

5. Подготовлена система визуализации физического процесса обледенения в аэрохолодильной трубе, включающая съемку HD-камерами оптического диапазона, ИК-камерой диапазона 8-14 мкм, системой высокоскоростной микросъемки.

6. Разработаны и изготовлены модели, оборудованные электрическими нагревателями поверхности, проведена препарировка моделей термодатчиками.

7. Разработана и изготовлена система создания жидкой пленки на поверхности модели.

#### Результаты, полученные иностранными партнерами:

8. Разработаны методика и программа экспериментальных исследований в аэрохолодильной трубе TUBS для воспроизведения условий смешанного обледенения с кристаллами, подобными облачным (малой плотности и неправильной формы).

9. Введена в действие новая система обводнения потока, обеспечивающая среднеобъемный диаметр капель в диапазоне от 15 до 55 мкм и водность жидкокапельной фракции от 0.1 до 1.2 г/м<sup>3</sup>.

10. Разработаны методика и программа экспериментальных исследований образования и сброса льда на аэрохолодильной трубе iCORE в

диапазоне температуры воздуха от минус 20 до 0 градусов Цельсия, скорости потока до 140 м/с, разных значений подводимой к поверхности тепловой мощности.

#### 1) Основные характеристики полученных результатов.

Выполнен обзор более чем 130 научных работ, посвященных экспериментальным и теоретическим исследованиям обледенения в кристаллических и смешанных облаках.

Проведен анализ основных способов получения потока с кристаллами на имеющихся в мире аэрохолодильных трубах, отмечена необходимость подтверждения соответствия наземного моделирования натурным условиям (с учетом разнообразия форм облачных кристаллов). Установлен современный уровень математического моделирования льдообразования в кристаллических и смешанных условиях обледенения. Существующие достижения в части моделей и программ позволяют надеяться на создание алгоритма расчета обледенения тел сложной геометрии с нагревом поверхности (включая компрессор двигателя и ПВД) в смешанных условиях обледенения к сроку окончания проекта MUSIC-НАИС. На основании мировой нормативной документации по кристаллическому обледенению определены диапазоны размеров кристаллов и значений жидкокапельной и общей водностей, которые должны быть воспроизведены в эксперименте. Систематизированы авторские подходы исполнителей проекта в построении безразмерных управляющих параметров движения газокристаллических систем, получены оценки характерных времен и масштабов физических явлений для условий полета в смешанных и кристаллических облаках, исследованы зависимости параметров рассмотренных физических процессов от соответствующих безразмерных критериев и управляющих параметров подобия.

Разработана экспериментальная методика исследований обледенения при высоких скоростях потока (до 120 м/с) в смешанных условиях, выработаны основные расчетные соотношения для обработки и анализа получаемых результатов.

Система визуализации физического процесса обледенения в аэрохолодильной трубе подготовлена к выполнению работ в соответствии с техническим заданием проекта, выполнены пробные измерения тепловых полей поверхностей моделей в условиях обледенения, микросъемка движения капель по поверхности, подтвердившие требуемые характеристики измерительного оборудования.

Разработаны и изготовлены 2 экспериментальные модели, представляющие собой участки крыла с электрически нагреваемыми передними кромками. Первая модель обеспечивает изучение процессов образования барьерного льда в случае первоначально сухой поверхности или смоченной тонкой пленкой (до 100 мкм), вторая модель – изучение натекания кристаллов на поверхность, покрытую достаточно толстой (до 1 мм) пленкой.

Модели препарированы термопарными датчиками, которые подключены к системе регистрации, сбора и анализа данных эксперимента.

Разработаны и изготовлены 2 системы создания «тонкой» и «толстой» жидких пленок на поверхности моделей, проведена экспериментальная проверка, подтверждающая готовность систем и моделей к проведению исследований по проекту.

В соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 проведены патентные исследования по теме «Методы изучения кристаллического и смешанного обледенения», выпущен отчет о них в виде отдельного документа.

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

Реализация первого этапа настоящего проекта привела к созданию экспериментальной методики исследований обледенения летательных аппаратов в кристаллических и смешанных условиях, гармонизированной с актуальной мировой нормативной документацией, развитию физико-математической модели и расчетной методики исследований обледенения ЛА в кристаллических и смешанных условиях.

Для проведения экспериментальных исследований, помимо штатных измерительных систем стендовой базы и типовых аэродинамических моделей, с учетом специфики условий эксперимента апробированы созданные методики, средства измерений и модели для изучения обледенения элементов авиационной техники.

Эти 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, 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 HAIC (High Altitude Ice Crystals) были модернизированы для создания условий кристаллического и смешанного обледенения, соответствующих изменениям авиационных правил. В настоящее время Россия не располагает возможностью провести испытания изделий авиационной техники в полном соответствии с изменившимися нормами летной годности. Участие в проекте HAIC позволило научному коллективу ФГУП «ЦАГИ» разработать стенд и методику для исследований физики процессов обледенения в полностью кристаллических условиях с учетом обсуждаемых с европейскими коллегами в ходе реализации проекта требований к условиям обледенения в полете. Для создания необходимой методической и научной базы в обеспечение сертифицированной методики исследований изделий авиационной техники в кристаллических и смешанных условиях, гармонизированной с вновь введенными нормами летной годности, сотрудничество с европейскими партнерами продолжается в рамках проекта MUSIC-HAIC.