

Государственный контракт № 14.740.11.1072 от 24 мая 2011 г.

Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг.

Мероприятие № 1.2.2: Проведение научных исследований научными группами под руководством кандидатов наук

Проект: «Разработка методов создания высокоэффективных противообледенительных систем на основе сочетания супергидрофобных наномодифицированных поверхностей, устройств их обогрева и сдува жидкой пленки»

Руководитель проекта: Кашеваров Алексей Васильевич (ФГУП «ЦАГИ»)

Аннотация выполненных работ

Этап 1. Выбор направления исследований, подготовительные работы

Понижение температуры и увеличение влажности наружного воздуха часто вызывает обледенение деталей летательных аппаратов: планера, воздухозаборников, частей входного устройства гидротурбинного двигателя, стоек переднего корпуса и направляющего аппарата компрессора, воздушных винтов. Наиболее интенсивное обледенение наблюдается в полете на высотах ниже 3-5 км при температурах воздуха от +5 до -12 °С, если в воздухе содержится вода в жидком состоянии (в слоисто-кучевых облаках и в переохлажденном дожде) или в виде кристаллов льда.

В настоящее время существуют множество способов предохранения летательных аппаратов от обледенения. Ни один из разработанных способов не является в полной мере эффективным, экономически малозатратным и неприемлем с экологической точки зрения. Такие приемы приводят к нежелательному увеличению веса самолета, к необходимости немедленного взлета после наземной обработки поверхности антиобледенительной жидкостью, однако не избавляют полностью от обледенения в полете или при посадке. В связи с этим возрастает дополнительная экологическая нагрузка на природу в окрестностях аэропортов и оживленных летных коридоров. Установка противообледенительной системы вызывает ухудшение летно-технических и эксплуатационных данных самолета в полете вследствие уменьшения тяги или мощности, повышение расхода топлива, увеличения веса и усложнения конструкции.

Кроме обледенения элементов конструкции самолета при определенных метеорологических условиях (температуре и влажности воздуха, направлении и скорости ветра) может иметь место обледенение проводов электрических линий, в частности, из-за ледяного дождя.

Во многих странах мира уделяется значительное внимание разработкам методов повышения эффективности решения проблемы обледенения, как в режиме полета летательных аппаратов, так и в режиме ледяного дождя. Полное понимание физики процесса обледенения до настоящего времени еще не достигнуто – проблема характеризуется большим разнообразием не только режимов образования льда, но и широким диапазоном размеров и других параметров капель конденсата в реальных условиях.

В Отчете проведен анализ многочисленной научно-технической литературы, посвященной проблеме обледенения самолетов, и имеющихся экспериментальных данных по созданию и применению супергидрофобизирующей наномодификации материалов. В последнее время возникла идея для борьбы с обледенением изменить свойства поверхности летательного аппарата. Одним из путей решения проблемы обледенения летательных аппаратов может быть сочетание метода нанотехнологии со свойствами

супергидрофобности. Исследования по применению супергидрофобных противообледенительных нанопокровов, приводящих к снижению адгезии льда, начинаются во всем мире, например, в США, Китае, Японии, Канаде и Италии. В России накоплен большой опыт по созданию супергидрофобных покровов. Исследованием их применения для защиты летательного аппарата от обледенения будет заниматься наша научная группа.

В настоящее время в ЦАГИ на стенде, обеспечивающем создание искусственных условий обледенения, начинаются экспериментальные работы по исследованию адгезии барьерного льда с поверхностями, имеющими различные покровы (работа проводится в сотрудничестве с немецкой фирмой IFAM). Для этого введен в строй стенд искусственных условий обледенения, создано устройство, обеспечивающее получение барьерного льда, разработан прибор для измерения адгезии, изготовлены образцы поверхности с различными покровами.

В ЦАГИ начата разработка более совершенного стенда искусственных условий обледенения, который позволит проводить исследования на натуральных отсеках крыла в более широком диапазоне температур наружного воздуха. Налажено сотрудничество с организациями, занимающимися наномодификацией поверхностей, и изготавливающих противообледенительные системы.

Основной целью данной работы является поиск новых комбинированных методов защиты ЛА от обледенения, позволяющих значительно сократить энергозатраты, массу средств защиты и, в конечном итоге, повысить безопасность и регулярность полетов ЛА в условиях обледенения.

При выполнении работ этапа проведена сравнительная оценка эффективности противообледенительных систем разных типов, сопоставлены ожидаемые показатели эффективности новых противообледенительных систем с показателями существующих аналогов, обоснованы целесообразность использования наномодифицированных поверхностей и необходимость использования средств аэрофизического эксперимента.

Рассматриваемая работа сконцентрирована, в частности, на внедрении нанотехнологий в противообледенительные системы авиационных датчиков – приемников воздушного давления, датчиков углов атаки и т.п. На первом этапе работы была разработана экспериментальная модель, состоящая из расположенных рядом, без взаимного затенения в потоке двух приемников воздушного давления ПВД-К-4 разработки ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения»: обычного и с наномодифицированной поверхностью.

Получены следующие результаты:

1. Проведен анализ научно-технической литературы и имеющихся экспериментальных данных по созданию и применению супергидрофобизирующей наномодификации материалов.

2. Показано, что с точки зрения выбора исследований наиболее перспективной является разработка комбинированных противообледенительных систем авиационных датчиков. Это обусловлено важностью их противообледенительной защиты для обеспечения безопасности полетов и относительно малой сложности внедрения нового звена технологического процесса в производство.

3. Другим важным направлением исследований выбрана разработка комбинированной противообледенительной системы крыла и двигателя самолета, принцип действия которой сводится к нагреву передней кромки обтекаемой поверхности, удалению части жидкой пленки, благодаря ее сдуву, и удалению льда с необогреваемой части поверхности, подвергнутой наномодификации, благодаря аэродинамическим силам.

4. Проведены теоретические оценки основных параметров двухфазного потока, характеризующих процесс обледенения на поверхности в газочапельном потоке:

- наименьшего радиуса капель, ниже которого частицы не будут улавливаться цилиндрическим импактором (что, в принципе, искажает их массовый спектр);

- минимального значения мощности подогревателя, необходимой для теплового метода сброса наледи на входной части приемника давления.

5. Разработана, спроектирована и сконструирована экспериментальная модель, состоящая из расположенных рядом двух приемников воздушного давления ПВД-К-4 (разработка ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения») без взаимного затенения в потоке: обычного и с наномодифицированной супергидрофобной поверхностью, созданной в ИФХЭ РАН.

6. Разработана методика экспериментальных исследований данной модели. В результате испытаний определяются и сравниваются:

- минимально необходимая мощность обогрева для удаления льда;
- время закупорки льдом динамического отверстия изделия после выключения обогрева;
- время оттаивания датчика после включения обогрева;
- размер и форма образующегося льда.

7. Разработана методика испытаний плоских наномодифицированных поверхностей в случае образования барьерного льда. В результате испытаний определяются:

- сила сцепления барьерного льда с поверхностью образцов, имеющие различные покрытия (или различную обработку поверхности), при различных температурах наружного воздуха и скорости воздушного потока;
- размер и форма образующегося льда.

8. Стенд искусственного обледенения ЦАГИ модернизирован для целей планируемого эксперимента. Разработаны и созданы устройства для управления и измерения параметров аэродисперсного потока стенда в составе:

- системы криогенного охлаждения воздушного потока;
- оптической системы определения размеров водяных капель.

9. Стенд искусственного обледенения ЦАГИ оснащен необходимой аппаратурой для исследования взаимодействия наномодифицированных образцов с аэродисперсным потоком, моделирующим полет в облаке переохлажденных капель. В частности, подготовлена система сбора, обработки и регистрации данных аэрофизического эксперимента в целях получения единого электронного протокола эксперимента.

Этап 2. Теоретические и экспериментальные исследования обледенения моделей с наномодифицированными поверхностями

Основной целью данной работы являются теоретические и экспериментальные исследования обледенения моделей с наномодифицированными поверхностями для создания высокоэффективных противообледенительных систем. Для исследования влияния наномодификации поверхности на характер ее обледенения важно проведение экспериментов по наглядному сопоставлению с «обычными» образцами. Описанная в отчете по первому этапу Проекта установка позволяет провести такое сопоставление в широкой области управляющих параметров (скорости потока, несущего капли; температуры атмосферы; мощности системы обогрева, необходимой для устранения первичной наледи на испытуемом устройстве).

Конкретной целью этих экспериментов являлась минимизация затрачиваемой энергии и оптимизация временного режима ее затрат для обеспечения работоспособности входных устройств приемников воздушного давления.

Кроме того, получаемые экспериментальные данные являются ценной информацией для углубленного понимания природы обледенения. В связи с этим одновременно с проведением опытов выполнялись теоретические исследования поведения капель (образовавшихся в результате таяния первичной наледи) на поверхности с известными характеристиками взаимодействия жидкости с твердым телом и несущим газом. В качестве

таких характеристик использовались классические концепции краевого угла смачивания и поверхностного натяжения.

Рассматриваемая работа сконцентрирована, в частности, на внедрении нанотехнологий в противообледенительные системы авиационных датчиков – приемников воздушного давления, датчиков углов атаки и т.п. Перечисленные устройства являются сравнительно простыми в изготовлении и легко заменяемыми, поэтому процессы внедрения новой технологии и ввода в эксплуатацию датчиков нового поколения могут быть сравнительно быстро реализованы. В то же время датчики параметров воздушного потока являются весьма ответственной частью самолета. В последние годы ряд авиационных происшествий был связан именно с выходом из строя датчиков в условиях обледенения, что приводило к неправильным показаниям скорости для автопилота и, если пилотом вовремя не замечалась ошибка, к аварии. В повышении надежности эксплуатации этих устройств заинтересованы как их производители, так и эксплуатанты авиационной техники. Удачное внедрение новой технологии на примере авиационных датчиков послужит ее дальнейшему распространению на противообледенительные системы других частей самолетов и вертолетов (ПОС крыла, двигателя, винтов и т.д.), образцы-демонстраторы которых также будут разрабатываться в ходе выполнения работы.

В результате экспериментальных исследований, при скоростях потока до 80 м/с, наблюдался выраженный противообледенительный эффект, достигнутый при помощи наномодифицированной супергидрофобной поверхности. Положительный результат заключается в:

- понижении граничной мощности подогрева, на которой появляется венчик льда на трубке приемника воздушного давления (до 50 %);
- полном отсутствии образования барьерного льда;
- в уменьшении времени восстановления работоспособности датчика скорости самолета после его замораживания до нулевых показаний (до 150 %);
- снижении мощности подогрева, необходимой для полного удаления льда с поверхности.

Это подтверждает правильность выбранного направления исследований. Проблема распространения полученного положительного эффекта на большие скорости воздушного потока подчеркивает необходимость проведения дальнейших исследований в широком диапазоне параметров обледенения и типов поверхностей.

При выполнении работ этапа на основе предложенных при исполнении предыдущего этапа методик и программ проведены экспериментальные исследования модели с наномодифицированной поверхностью на стенде искусственного обледенения ФГУП «ЦАГИ». При проведении математического моделирования эволюции капель конденсата на поверхности и расчетов, необходимых, в том числе, для организации последующего аэрофизического эксперимента, применялись методы механики сплошных сред и теоретические оценки на основе безразмерных критериев подобия. С учетом полученных результатов разработаны методики дальнейших экспериментальных исследований.

При выполнении отдельных видов работ этапа по Государственному контракту использовались: стенд искусственного обледенения ФГУП «ЦАГИ», персональные ЭВМ.

При выполнении поисковых научно-исследовательских работ этапа для условий искусственного обледенения испытана модель, состоящая из расположенных рядом двух приемников воздушного давления без взаимного затенения в потоке: обычного и с наномодифицированной супергидрофобной поверхностью. Испытания проведены для трех режимов, отличающихся скоростью набегающего потока.

На режиме 20 м/с имеется выраженный противообледенительный эффект, достигнутый при помощи наномодифицированной поверхности. Положительный результат заключается в понижении приблизительно в 2 раза граничной мощности, на которой появляется венчик льда на трубке приемника, в уменьшении времени размораживания датчика на 2 минуты и

снижении мощности, необходимой для полного удаления льда с поверхности, а также в смещении вниз по потоку границы барьерного льда.

На режиме со скоростью воздушного потока 40 м/с антиобледенительные свойства наномодифицированной поверхности привели к уменьшению граничной мощности обогрева на 33 % и уменьшению времени оттаивания датчика, однако различия обычного и наномодифицированного датчиков уменьшились по сравнению с предыдущим режимом. Граница образования барьерного льда на наномодифицированной поверхности также была смещена значительно ниже по потоку по сравнению с обычной стальной. При номинальной мощности обогрева на обычном датчике образовывались смоченные поверхности у начала трубки и рос барьерный лед на конической части. На наномодифицированной поверхности указанные явления отсутствовали.

На режиме со скоростью воздушного потока 76.5 м/с при значениях напряжения и тока до граничных величин $U = 18$ В и $J = 1.7$ А наблюдался антиобледенительный эффект наномодифицированной поверхности, выражающийся в полном отсутствии ледяных образований на ней, в то время как на поверхности обычного датчика образовался барьерный лед. При понижении напряжения и тока до граничных значений $U = 18$ В и $J = 1.7$ А на наномодифицированной поверхности начал образовываться лед по механизму «сухого» обледенения, что обусловлено остыванием конической части датчика и ее наклоном к направлению скорости потока. Это позволяет предполагать, что барьерный лед в аналогичной ситуации на плоской поверхности образовываться не будет. Необходимо провести эксперименты на плоской поверхности, что может быть сделано при помощи разработанной модели профиля крыла с обогревом. Снижения граничной мощности обогрева при образования венчика на трубке приемника не замечено, время оттаивания датчика было больше, чем у обычного.

При увеличении скорости в рассмотренном диапазоне 20 – 76.5 м/с и постоянстве температуры потока можно говорить как об ухудшении антиобледенительных характеристик поверхности, связанных с лобовым соударением капель (уменьшение граничной мощности обогрева при образовании венчика льда, уменьшение времени оттаивания датчика), так и о сохранении антиобледенительных свойств, препятствующих образованию барьерного льда.

На основе физических соображений получено выражение для оценки скорости перемещения капли по поверхности твердого тела в зависимости от угла смачивания, отношения высоты деформированной капли к толщине пограничного слоя, скорости увлекающего потока, поверхностного натяжения и отношения коэффициентов вязкости жидкости и воздуха.

Этап 3. Продолжение теоретических и экспериментальных исследований моделей с наномодифицированными поверхностями

На настоящем этапе выполнения Проекта были продолжены экспериментальные и теоретические исследования как процессов, предшествующих попаданию микрокапель на тело в аэродисперсном потоке, так и влияния свойств его поверхности на скорость обледенения.

Для математического обеспечения эксперимента важно описать эволюцию массового спектра и температуры капель, впрыскиваемых в поток форсункой. С этой целью развита физическая модель кинетики капель в турбулентном потоке, сталкивающихся друг с другом, сливающихся и дробящихся. Предложенная модель и соответствующий численный алгоритм позволяют учесть прохождение факела распыла форсунки под произвольным углом, через градиентный поток воздуха. Кроме того, для начала процесса обледенения существенна информация о степени переохлаждения первоначально «теплых» капель перед столкновением с поверхностью тела. Эта же характеристика определяет и мощность подогревателя, потребную для предотвращения обледенения или плавления уже образовавшейся наледи.

Экспериментальные исследования проведены в двух направлениях, ориентированных в основном на выяснение роли свойств поверхности на темп изучаемого процесса. Во-первых, завершено изучение эволюции наледи на практически важных авиационных датчиках при значениях скорости, влажности и температуры потока, характерных для условий полета в переохлажденном облаке или тумане (60 м/с, ~ 1 г/м³ и -8° С, соответственно). Получен обширный набор фотоснимков для эталонного и исследуемого (с наномодифицированной поверхностью) датчиков, наглядно демонстрирующих развитие наледи при различных мощностях подогревателя. Во-вторых, проведены широкие параметрические исследования пластинок с обычными и наномодифицированными участками поверхности при скоростях, характерных для условий приземного ветра, несущего большое количество переохлажденной влаги (~ 10 м/с, -7° С, ~ 10 г/м³). В частности, изменение расстояния между форсункой и исследуемой моделью позволило просто варьировать степень переохлаждения капель.

Накопленный экспериментальный материал и соответствующая физико-математическая модель позволяет описать процесс обледенения тел в широком диапазоне управляющих параметров и полностью соответствует плану подотчетного этапа Проекта.

На данном этапе выполнения Проекта предусмотрено проведение дальнейших аэрофизических экспериментов по исследованию обледенения изготовленной ранее модели, включающей эталонный и исследуемый авиационные датчики и обработка данных. На стенде искусственного обледенения в соответствии с методикой, изложенной в предыдущем отчете, были произведены дальнейшие испытания модели, состоящей из приемника воздушного давления ПВД-К4 с наномодифицированными супергидрофобными поверхностями и аналогичного приемника без обработки. Исследования проводились при температуре воздушного потока -8° С для режима со скоростью течения 60 м/с. Влажность потока при этом была равна 0.83 г/м³. Целями экспериментов были уточнение результатов, полученных на предыдущем этапе и проверка стойкости наномодифицированной поверхности к многократно повторяющемуся обледенению.

При сопоставлении результатов экспериментов отмечено существенное отличие динамики образования льда на охлаждаемой передней кромке для обычного и наномодифицированного датчиков. На передней кромке обычного датчика происходило образование кольца льда, в то время как на кромке наномодифицированного датчика лед образовывался в виде отдельных фрагментов, которые затем смыкались. Выдвинута гипотеза о том, что в этом случае первоначальное образование льда обусловлено дефектами смачиваемости поверхности. Действительно, капли, попадая при движении на такой участок поверхности, увеличивают площадь контакта с ней, что и приводит к их замерзанию. Бегущие по супергидрофобной поверхности капли имеют небольшой размер (10–100 мкм), поэтому время их замерзания достаточно мало при условии предварительного охлаждения благодаря теплообмену с поверхностью. Замерзшие на дефектах смачиваемости капли становятся центрами льдообразования, которое далее в основном идет по механизму кристаллизации переохлажденных капель, попадающих на растущий лед из потока. Таким образом, чрезвычайно важной задачей становится максимально возможное уменьшение как размеров дефектов смачиваемости, так и их числа, приходящегося на единицу поверхности.

В рамках аэрофизического эксперимента по исследованию обледенения изготовленных на предыдущих этапах необогреваемых макетов элементов конструкции ЛА (эталонных и с наномодифицированной поверхностью) в аэродисперсный поток помещалась державка, на которой устанавливалось до трех образцов наномодифицированных материалов и один эталонный образец (из того же материала), не подвергнутый наномодификации. Была проведена серия испытаний, в которых варьировались значения основных параметров многофазного потока и расположение форсунки для распыления воды.

В результате сопоставления данных экспериментов были выявлены следующие характерные особенности:

- контрольный образец покрывался сплошной коркой льда, на остальных капли коагулировали в более крупные и замерзали;
- –подбором скорости и угла атаки при небольшой температуре воздуха можно было добиться полного уноса капель с обработанной поверхности при продолжающемся обледенении на необработанной. Примером являлся режим $V=6$ м/с, $t=-3^{\circ}\text{C}$, $l=3.85$ м, $\alpha=10^{\circ}$, $w=7$ г/м³;
- при увеличении скорости замерзание воды на обработанных пластинах интенсифицировалось;
- при увеличении удаления форсунки на скоростном режиме $V=6$ м/с процесс обледенения супергидрофобных пластин ослабевал;
- при увеличении удаления на скоростном режиме $V=10$ м/с процесс обледенения супергидрофобных пластин усиливался.

В рамках проведения теоретических оценок, необходимых для организации аэрофизического эксперимента по исследованию обледенения на наномодифицированной поверхности с устройствами для удаления воды развита физическая модель (и соответствующий численный код) кинетики капель в турбулентном потоке с учетом их взаимных столкновений, слияния и дробления. Приведены результаты расчетов, проведенных в соответствии с развитой физико-математической моделью кинетики капель (впрыскиваемых под произвольным углом в градиентный поток, с учетом их столкновений, слияния, дробления и диффузии на пульсациях несущего газа) в условиях, характерных для проведенных экспериментов.

Разработана и изготовлена модель для исследования процессов образования барьерного льда, сдува жидкой пленки и электростатического заряжения поверхностей в двухфазном потоке. Она оснащена разбрызгивателем, который закрепляется на наномодифицированной пластине. Разбрызгиватель служит для удаления воды с поверхности модели. Материал, из которого изготовлен разбрызгиватель – фторопласт 4. Угол при вершине разбрызгивателя выбран равным 45° . Пластина из наномодифицированного материала так же, как и контрольная пластина, имеет отрицательный угол наклона к потоку. При разработке модели предполагалось, что эта конструктивная особенность обеспечит эффективный сдув воды при переходе от обычной поверхности к наномодифицированной. Проведенные эксперименты подтвердили это предположение. Обогрев передней кромки крыла осуществляется омическим нагревателем мощностью ~ 300 Вт. Центральная плоскость профиля модели перфорирована. Это позволяет избежать существенного перетекания тепла от нагревателя вдоль профиля и, соответственно, избежать недопустимого нагрева образцов. На боковой поверхности профиля под передней кромкой образца установлены 3 термопарных датчика для контроля температуры модели во время испытаний. Конструкция модели позволяет измерять заряд пластин в ходе эксперимента. Для этого производится адаптация соответствующего оборудования.

Разработаны методики экспериментальных исследований влияния мощности системы обогрева на процесс образования барьерного льда; скорости потока на процесс образования барьерного льда; разбрызгивателя на процесс образования барьерного льда.

Подготовлен и создан макет элемента конструкции ЛА с наномодифицированной поверхностью с устройствами для удаления воды (подогрева и сдува жидкой пленки). Макет выполнен в виде профиля крыла с нагревателем установленным в передней кромке. Конструкция макета позволяет устанавливать различные образцы наномодифицированной поверхности, обтекаемой потоком, и различные модели разбрызгивателей жидкой пленки.

По результатам исполнения работ этапа можно дать следующее заключение:

1. Проведенные эксперименты для режима 60 м/с и температурой -8°C в целом подтверждают результаты, полученные на предыдущем этапе для режимов со скоростями 20 м/с, 40 м/с и 80 м/с и температурой -11°C .
2. Как на передней кромке, так и на конической части наномодифицированного ПВД первоначальное образование льда предположительно обусловлено наличием дефектов

смачиваемости поверхности. Чрезвычайно важной задачей становится максимально возможное уменьшение как размеров дефектов смачиваемости, так и их числа, приходящегося на единицу поверхности.

3. При многократном образовании льда на наномодифицированной поверхности (4 цикла с намораживанием льда в течение 30 мин) происходит нарушение супергидрофобных свойств на участках нарастания льда.

4. Наблюдаемое нарушение супергидрофобности не носило необратимый характер и было устранено обработкой поверхности специальным раствором.

5. Проведенные консультации с разработчиком поверхности – Институтом физической химии и электрохимии показали возможность устранения выявленного недостатка поверхности – нарушения ее супергидрофобности в результате многократных испытаний в условиях обледенения за счет использования другой подложки для покрытия. Измененное покрытие будет применяться на моделях, разрабатываемых для дальнейших этапов.

6. Разработаны физико-математическая модель и соответствующий численный код для предсказания кинетики капель, впрыскиваемых под произвольным углом в градиентный поток, с учетом столкновений, слияния, дробления микрокапель и их диффузии вследствие пульсаций несущего газа. Приведены результаты расчетов в условиях, характерных для проведенных экспериментов.

На основании предварительного анализа опубликованных на настоящее время данных по сути проблемы можно отметить, что проведенные при выполнении работ этапа исследования обладают новизной в области физико-математического моделирования обледенения, а их уровень соответствует лучшим отечественным и мировым разработкам.

За истекший подотчетный период количество вышедших и подготовленных публикаций авторов – членов научного коллектива составило в высокорейтинговых российских журналах – 1, докладов на конференциях федерального и международного уровня – 4.

Результаты исследований в рамках настоящего этапа использованы в образовательно-профессиональной программе (разработан курс лекций) для студентов факультета аэромеханики и летательной техники Московского физико-технического института (государственного университета).

Этап 4. Экспериментальные исследования сочетания наномодифицированной поверхности с устройствами удаления жидкой пленки

На настоящем этапе выполнения Проекта были проведены экспериментальные исследования сочетания наномодифицированной поверхности с устройствами удаления жидкой пленки. Целью настоящего этапа Проекта было проведение исследований в нескольких направлениях:

- наблюдение за динамикой роста и срыва фрагментов наледи с поверхностей в составе модели прямого крыла конечного размаха, отличающихся физико-механическими свойствами (одна из них – поверхность традиционного авиационного материала, другая – наномодифицированного);
- теоретические оценки влияния сил электростатического взаимодействия модели с движущимися по ее поверхности фрагментами жидкости (в частности, каплями);
- разработка методики экспериментальных исследований временной эволюции электрического потенциала модели, обдуваемой воздухом, несущим микрокапли.

Важность этих направлений связана со следующими обстоятельствами.

К настоящему времени созданы физико-математические модели механических и электрических натяжений, возникающих в слое наледи вследствие градиентов температуры и плотности электростатической энергии. Однако теоретическое предсказание тех участков в объеме наледи, где могут возникнуть натяжения критического уровня и произойти отслоение

и отрыв части ее массы, в связи со стохастическим (вероятностным) характером этого процесса. Поэтому здесь особую роль играют эксперименты, позволяющие накопить материал, нужный для развития теории.

Далее, движение жидкой пленки в пограничном слое воздуха, обтекающего искривленную поверхность, образование ручейков, их распад на капли, динамика, теплообмен и отвердевание последних с образованием ледяных наростов представляет собой сложную проблему аэрогидродинамики и физики поверхностей. В процессе описания этих процессов также необходимо учитывать их стохастичность. На настоящем этапе работы целесообразно создание простой модели, позволяющей оценить скорости движения жидкости (в частности, капель) на дне пограничного слоя на теле с различными адгезионными характеристиками его поверхности.

Наконец, поскольку в процессе обледенения на теле, обтекаемом воздушно-капельным потоком, могут возникать электрические заряды, в рамках настоящего Проекта предусмотрена отладка методики измерения соответствующих характеристик явления.

На стенде искусственного обледенения в соответствии с разработанной ранее методикой были проведены дальнейшие экспериментальные исследования обледенения изготовленных макетов элементов конструкции ЛА с наномодифицированной поверхностью с устройствами для удаления воды. Макет выполнен в виде профиля крыла с нагревателем, установленным в передней кромке. Конструкция макета позволяет устанавливать различные образцы наномодифицированной поверхности, обтекаемой потоком, и различные модели разбрызгивателей жидкой пленки.

Исследования проводились в диапазоне температур воздушного потока $-8^{\circ} \div -6^{\circ} \text{C}$ при скорости течения 80 м/с и водности потока 0.57 г/м^3 для трех типов наномодификации поверхности дюралюминия. Наномодифицированные поверхности отличались способом придания супергидрофобных свойств, определяющихся силой адгезии льда с поверхностью и значением краевого угла смачивания. Сопоставление результатов экспериментов показало существенное влияние наномодификации поверхности модели на развитие наледи – по истечении некоторого времени наблюдался срыв и унос кусков льда под действием динамического напора. На «обычной» поверхности происходил монотонный рост массы отвердевшей воды.

Ранее была предложена физико-математическая модель гидродинамики и теплообмена электрически нейтрального фрагмента жидкости, в частности, капли, движущейся по нейтральной наклонной поверхности, при заданных значениях угла смачивания и коэффициента поверхностного натяжения. На настоящем этапе эта модель обобщена на случай электрически заряженных участников взаимодействия. Предполагается, что часть массы капель, сталкивающихся с обтекаемым телом, уносит электрический заряд, оставляя равное по модулю количество зарядов на теле. Эту часть можно оценить на основе экспериментальных данных.

Создан объект испытаний по изучению электрического заряжения наномодифицированной поверхности бегущими по ней каплями. Им является макет элемента конструкции ЛА МЭК-11, разработанный на основе макета МЭК-10, созданного на предыдущем этапе. Макет МЭК-11 также выполнен в виде профиля крыла с нагревателем, установленным в передней кромке. В отличие от МЭК-10, на МЭК-11 отсутствует выступающий призматический разбрызгиватель. Исследуемая пластина изолирована от модели при помощи диэлектрической вставки и через электрод подключается к чувствительному электрометру. Конструкция макета позволяет устанавливать различные образцы наномодифицированной поверхности, обтекаемой потоком. Распыливающая воду форсунка изолируется от тракта аэродинамической трубы и заземляется.

Разработаны методики экспериментальных исследований, целями которых являются:

- получение информации о влиянии скорости потока на процесс заряжения исследуемой пластины бегущими по ней каплями;

- получение информации о влиянии водности потока на процесс заряжения исследуемой пластины бегущими по ней каплями;
- получение сравнительных характеристик электрического заряжения исследуемых образцов и контрольного образца из дюралюминия.

По результатам исполнения работ этапа можно дать следующее заключение:

1. Проведены дальнейшие экспериментальные исследования обледенения изготовленных макетов элементов конструкции ЛА с наномодифицированной поверхностью с устройствами для удаления воды.

2. Эксперименты показали существенное влияние наномодификации поверхности модели на развитие наледи. В то время как для такой поверхности наблюдается (по истечении некоторого времени) срыв и унос кусков льда под действием динамического напора, на «обычной» поверхности происходит монотонный рост массы отвердевшей воды.

3. Предложена простая физико-математическая модель электростатического взаимодействия с поверхностью твердого тела капли, поляризованной в поле электрически заряженной поверхности. Численные исследования показали уменьшение скорости капли при учете электростатических сил.

4. Создана методика экспериментальных исследований и спроектирован макет конструкции для изучения электрического заряжения наномодифицированной поверхности бегущими по ней каплями.

На основании предварительного анализа опубликованных на настоящее время данных по сути проблемы можно отметить, что проведенные при выполнении работ этапа исследования обладают новизной в области экспериментальных методов исследования обледенения, а их уровень соответствует лучшим отечественным и мировым разработкам.

Результаты исследований в рамках настоящего этапа изложены в трех статьях в высокорейтинговых журналах и в четырех докладах на конференции федерального уровня.

Результаты исследований в рамках настоящего этапа использованы в образовательно-профессиональной программе (разработан курс лекций) для подготовки молодых ученых в аспирантуре ФГУП «ЦАГИ».

Усовершенствованные методы экспериментальных исследований процессов льдообразования могут применяться при создании современных высокообледенительных систем с широким спектром областей применения.