

УДК: 533.6, 519.6

Методика расчета обледенения воздушных судов в широком диапазоне климатических и скоростных параметров. Применение в рамках норм летной годности НЛГ-25

К. Э. Сорокин^{1,а}, А. А. Аксёнов², С. В. Жлуктов², А. А. Бабулин³,
В. И. Шевяков³

¹ООО «ТЕСИС»,

Россия, 127083, г. Москва, ул. Юннатов, д. 18, оф. 705

²Объединенный институт высоких температур РАН,

Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13

³ПАО «Корпорация «Иркут», филиал «Региональные самолеты»,

Россия, 115280, г. Москва, Ленинская слобода, д. 26

E-mail: ^а ks@flowvision.ru

Получено 03.05.2023, после доработки — 05.07.2023.

Принято к публикации 14.08.2023.

Сертификация самолетов транспортной категории для эксплуатации в условиях обледенения в России ранее проводилась в рамках требований приложения С к «Авиационным правилам» (АП-25). Во введенном в действие с 2023 года, взамен АП-25, документе «Нормы летной годности» (НЛГ-25) добавлено и приложение О. Отличительной особенностью приложения О является необходимость проведения расчетов в условиях большой водности и с крупными каплями воды (500 мкм и более). При таких параметрах дисперсного потока определяющими становятся такие физические процессы, как срыв и разбрызгивание пленки воды при попадании в нее крупных капель. Поток дисперсной среды в таких условиях является существенно полидисперсным. В данной работе описываются модификации методики расчета обледенения самолетов IceVision, реализованной на базе программного комплекса FlowVision, необходимые для проведения расчетов обледенения самолетов в рамках приложения О.

Главное отличие методики IceVision от известных подходов заключается в использовании технологии Volume of fluid (VOF — объем жидкости в ячейке) для отслеживания изменения формы льда. Внешнее обтекание самолета рассчитывается одновременно с нарастанием льда и его прогревом. Лед присутствует в расчетной области явно, в нем решается уравнение теплопереноса. В отличие от лагранжевых подходов, в IceVision эйлера расчетная сетка не перестраивается полностью. Изменение объема льда сопровождается только модификацией ячеек сетки, через которые проходит контактная поверхность.

В версии IceVision 2.0 реализован учет срыва водяной пленки, а также отскока и разбрызгивания падающих капель на поверхности самолета и льда. Диаметр вторичных капель рассчитывается с использованием известных эмпирических корреляций. Скорость течения пленки воды по поверхности определяется с учетом действия аэродинамических сил, силы тяжести, градиента гидростатического давления и силы поверхностного натяжения. Результатом учета поверхностного натяжения является эффект поперечного стягивания пленки, приводящий к образованию потоков воды в форме ручейков и ледяных отложений в виде гребнеобразных наростов. На поверхности льда выполняется балансовое соотношение, учитывающее энергию падающих капель, теплообмен между льдом и воздухом, теплоту кристаллизации, испарения, сублимации и конденсации. В работе приводятся результаты решения тестовых и модельных расчетных задач, демонстрирующие эффективность методики IceVision и достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: обледенение, поверхность самолета, крупные переохлажденные капли воды

UDC: 533.6, 519.6

Methodology of aircraft icing calculation in a wide range of climate and speed parameters. Applicability within the NLG-25 airworthiness standards

K. E. Sorokin^{1,a}, A. A. Aksenov², S. V. Zhlukto², A. A. Babulin³,
V. I. Shevyakov³

¹“TESIS” LLC,

off. 705, 18 Unnatov st., Moscow, 127083, Russia

²Joint Institute for High Temperatures RAS,
13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

³Regional Aircraft Branch of Irkut Corporation JSC,
26 Leninskaya Sloboda, Moscow, 115280, Russia

E-mail: ^a ks@flowvision.ru

Received 03.05.2023, after completion — 05.07.2023.

Accepted for publication 14.08.2023.

Certifying a transport airplane for the flights under icing conditions in Russia was carried out within the framework of the requirements of Annex C to the AP-25 Aviation Rules. In force since 2023 to replace AP-25 the new Russian certification document “Airworthiness Standards” (NLG-25) proposes the introduction of Appendix O. A feature of Appendix O is the need to carry out calculations in conditions of high liquid water content and with large water drops (500 microns or more). With such parameters of the dispersed flow, such physical processes as the disruption and splashing of a water film when large drops enter it become decisive. The flow of a dispersed medium under such conditions is essentially polydisperse. This paper describes the modifications of the IceVision technique implemented on the basis of the FlowVision software package for the ice accretion calculations within the framework of Appendix O.

The main difference between the IceVision method and the known approaches is the use of the Volume of fluid (VOF) technology to the shape of ice changes tracking. The external flow around the aircraft is calculated simultaneously with the growth of ice and its heating. Ice is explicitly incorporated in the computational domain; the heat transfer equation is solved in it. Unlike the Lagrangian approaches, the Euler computational grid is not completely rebuilt in the IceVision technique: only the cells containing the contact surface are changed.

The IceVision 2.0 version accounts for stripping the film, as well as bouncing and splashing of falling drops at the surfaces of the aircraft and ice. The diameter of secondary droplets is calculated using known empirical correlations. The speed of the water film flow over the surface is determined taking into account the action of aerodynamic forces, gravity, hydrostatic pressure gradient and surface tension force. The result of taking into account surface tension is the effect of contraction of the film, which leads to the formation of water flows in the form of rivulets and ice deposits in the form of comb-like growths. An energy balance relation is fulfilled on the ice surface that takes into account the energy of falling drops, heat exchange between ice and air, the heat of crystallization, evaporation, sublimation and condensation. The paper presents the results of solving benchmark and model problems, demonstrating the effectiveness of the IceVision technique and the reliability of the obtained results.

Keywords: ice accretion, airplane surface, large super-cooled water droplets

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 957–978 (Russian).

1. Введение

В атмосферном воздухе, помимо основного состава (кислород, азот и т. д.), присутствуют водяной пар, капли воды, кристаллы льда и различные примеси (пыль, продукты сгорания различных топлив, споры растений, соли и пр.). Количество дисперсных примесей, которые являются ядрами конденсации и кристаллизации воды, изменяется во времени, по высоте и вдоль поверхности земли. Непрерывное движение и перемешивание воздушных масс обуславливают постоянное изменение концентрации влаги в воздухе и определяют процесс формирования облаков, тумана, дождя, снега и града. При определенных условиях водяные капли могут находиться в облаках в переохлажденном состоянии или выпадать на поверхность земли в виде переохлажденного дождя, мгновенно кристаллизуясь при контакте с холодной поверхностью воздушного судна (ВС). Возможность обледенения поверхности ВС может возникать как при полетах в тропосфере на высотах до 7 км у полюсов и до 16 км на экваторе, так и при наступлении соответствующих метеоусловий во время стоянки на аэродроме.

Морфологическая классификация облаков включает в себя 10 основных форм, которые подразделяются на виды и разновидности. В зависимости от высоты нижнего основания различают три яруса облаков: верхний, средний и нижний. Перистые облака верхнего яруса, которые находятся на высоте около 6000 м, состоят из ледяных кристаллов, которые не приводят к образованию льда на холодной поверхности ВС. Обледенение ВС наиболее вероятно при полете в облаках нижнего и среднего ярусов. К основным видам облаков, в которых возможно обледенение, относят кучевые и слоистые облака. Риск обледенения поверхности ВС в кучевых облаках высок в диапазоне температур от 0° С до -20° С. Обледенение при температурах ниже -40° С маловероятно. Вертикальное перемещение облака изменяет его состав. Восходящие потоки переносят капли в более высокие слои атмосферы и способствуют увеличению их размеров. Поэтому риск обледенения высок в достаточно широком диапазоне высот. В слоистых облаках преобладают переохлажденные капли с температурой около -15° С. При попадании ВС в зону слоистых облаков также высока вероятность обледенения. Капли дождя или морось из любого типа облаков вызывают обледенение при контакте с поверхностью, имеющей температуру ниже 0° С. Опасность обледенения возрастает с увеличением размера капель.

Интенсивность обледенения в режиме полета зависит от метеорологических условий, скорости, геометрии и размеров ВС. При моделировании обледенения необходимо рассматривать все режимы полета: взлет, набор высоты, крейсерский режим, снижение, ожидание, посадку. Наиболее опасным с точки зрения обледенения несущих поверхностей ВС является полет в режиме ожидания (над аэродромом). Стоянка ВС при отрицательных температурах в условиях интенсивных осадков также может сопровождаться образованием ледяных отложений. В том числе возможно образование льда в зонах, прилегающих к обогреваемым поверхностям, за счет стекания с них воды в жидкой фазе и ее замерзания при попадании на поверхности с отрицательной температурой. Такой эффект наблюдается при таянии снега на обогреваемом остеклении кабины экипажа или при выпадении на него переохлажденных осадков. При этом вода, которая стекает вниз по фюзеляжу, может растекаться в форме ручейков и замерзать в виде гребневидных ледяных наростов. Опасность при этом представляют возмущения потока, возникающие на взлете из-за таких наростов: при попадании на вход приемников давления эти возмущения искажают показания системы воздушных сигналов. Основными метеорологическими параметрами, от которых зависит интенсивность обледенения как в режиме полета, так и во время стоянки на аэродроме, являются: количество сконденсированной воды, содержащееся в единице объема атмосферного воздуха (водность), температура воздуха и размер капель.

Сертификация самолетов транспортной категории для эксплуатации в условиях обледенения в России проводится в рамках требований приложения С к «Авиационным правилам»

(АП-25). Процедура сертификации для полетов в условиях обледенения предполагает испытания аэродинамических моделей ВС в аэродинамических трубах и летные испытания с имитаторами ледяных наростов. Размеры и формы ледяных отложений определяются в полетах в естественных условиях обледенения, в полетах за танкерами, разбрызгивающими воду, и при продувках элементов ВС в специальных климатических трубах. Перечисленные экспериментальные методики являются трудоемкими и дорогостоящими. Поэтому в рамках процедуры сертификации допустимо опираться на результаты расчетов форм ледяных отложений на поверхностях ВС с дальнейшим их подтверждением при полетах в естественных условиях обледенения.

В европейских сертификационных требованиях CS-25 кроме приложения С используется также приложение О, в котором условия обледенения дополняются необходимостью учета крупных переохлажденных капель воды. Введение приложения О предлагается также и в проекте нового российского сертификационного документа «Нормы летной годности» (НЛГ-25). В связи с этим актуальной является задача модификации имеющихся расчетных инструментов определения форм и размеров ледяных отложений для условий приложения О. С точки зрения численного моделирования приложение О отличается от приложения С необходимостью проведения расчетов при большой водности с каплями диаметром до 500 мкм и более (до 40 мкм в приложении С). При этом основными физическими процессами, определяющими динамику формирования ледяных наростов, являются срыв пленки воды с поверхности и разбрызгивание пленки при попадании в нее крупных капель. Поток дисперсной среды в таких условиях становится полидисперсным, а срывающиеся капли имеют не только другой диаметр (обычно меньший, чем средний диаметр капель в рамках приложения О), но и отличную от выпадающих капель температуру.

Помимо расчетов, которые должны проводиться в соответствии с текущими и перспективными сертификационными требованиями, практическую важность представляет моделирование обледенения, реализующегося и в других режимах эксплуатации ВС. Наиболее критичными из них являются упомянутый выше режим стояночного обледенения, а также режимы обледенения крыла и других несущих элементов ВС с учетом работы установленных на таких элементах противообледенительных систем (ПОС) различного типа [Yamazaki, Jemkov, Sakaue, 2021]. В том числе необходимы расчеты влияния работы ПОС на динамику формирования льда при полетах в климатических режимах, как описанных в приложении С, так и в рамках перспективных требований приложения О.

Первые работы с описанием алгоритмов и методов расчета форм и размеров ледяных наростов, образующихся на различных твердых поверхностях, были опубликованы в конце 40-х – начале 50-х годов [Ludlam, 1951; Messinger, 1953]. В указанных публикациях впервые были определены сухой и влажный режимы обледенения, а также сформулированы основные идеи по моделированию обледенения. Более совершенные модели появились в конце 70-х годов. В работе [Lozowski, Stallabras, Hearty, 1979] представлена термодинамическая модель нестационарного роста льда на неподвижном цилиндре в результате выпадения на его поверхность переохлажденных капель воды. За последние десятилетия различными исследовательскими группами разработаны 2D- и 3D-модели и расчетные методики, предназначенные для определения форм ледяных отложений на поверхностях ВС. Они реализованы в следующих программах вычислительной гидродинамики (ВГД/CFD): LEWICE (США) [Wright, Rutkowski, 1999; Wright et al., 2015], ONERA (Франция) [Villedieul, Trontin, Chauvin, 2014], TRAJICE (Великобритания) [Wright, Gent, Guffond, 1997], CANICE (Канада) [Pueyo, Chocron, Kafyeke, 2001], CIRA (Италия) [Mingione, Brandi, 1998], FENSAP-ICE (Канада) [Aliaga et al., 2011], 2DFOIL-ICE (Нидерланды) [Hospers, Hoeijmakers, 2011], NSMB-ICE (Франция) [Pena, Naorau, Laurendeau, 2016], NSCODE-ICE (Канада) [Lavoie, Bourgault-Côté, Laurendeau, 2018]. Дальнейшее развитие программных средств для численного моделирования обледенения стимулируется ужесточением как требований к кон-

струкции ВС, предназначенных для полетов в условиях обледенения, так и сертификационных требований, закрепленных авиационными правилами, принятыми в разных странах.

В настоящее время большая часть расчетов обледенения, в том числе с учетом присутствия в потоке крупных капель, проводится в коммерческих программных комплексах (ПК) ANSYS FENSAP-ICE и SIEMENS STAR-CCM. Эти ПК широко используются во всем мире для 3D-моделирования образования ледяных наростов на поверхностях ВС. При этом аналогичный программный продукт отечественного производства, который был бы признан российскими сертификационными органами, отсутствует.

В статье приводится описание развития методики для расчетов обледенения поверхностей ВС в полной 3D-постановке IceVision, реализованной в составе российского ВГД ПК FlowVision [Аксёнов, 2017]. В ПК FlowVision для решения задачи обледенения развит соответствующий функционал и реализован набор математических моделей, которые описаны в настоящей работе. Методика IceVision включает в себя не только специальные настройки эмпирических констант математических моделей, реализующих расчет обледенения, но и требования к расчетным сеткам и к стратегии расчета обледенения.

Отличие методики IceVision от известных подходов заключается в использовании технологии Volume of fluid (VOF — объем жидкости в ячейке) для отслеживания движения поверхности льда. В этой методике решается нестационарная задача непрерывного нарастания льда, который присутствует в расчете явно в виде отдельной фазы. Внешнее обтекание самолета рассчитывается одновременно с изменением формы льда и его прогревом. В отличие от лагранжевых подходов к построению расчетной сетки (FENSAP-ICE, LEWICE), в IceVision эйлерова расчетная сетка не перестраивается. Изменение объема льда сопровождается модификацией только тех ячеек сетки, через которые проходит контактная поверхность. Это обеспечивает устойчивый расчет роста ледяных отложений произвольной формы.

В ПК FlowVision для моделирования двухфазного течения воздуха и капель используется многоскоростная модель взаимопроникающих континуумов в приближении «Эйлер – Эйлер», в рамках которой реализован учет распределения капель по размерам. Численный алгоритм учитывает существенное различие временных масштабов физических процессов, сопровождающих обледенение поверхности ВС: двухфазного внешнего течения, течения водяной пленки, роста льда. Методика расчета обледенения IceVision предполагает возможность проведения расчетов сухого и влажного режимов обледенения. Модель автоматически определяет зоны сухого и мокрого льда. В сухой зоне температура контактной поверхности определяется с учетом сублимации льда. Во влажной зоне учитывается течение водяной пленки по поверхности льда. В версии IceVision 2.0 реализованы учет срыва пленки воды с поверхности льда, а также учет разбрызгивания выпадающих капель и пленки. В IceVision 2.0 предполагается, что температура капель, срывающихся с поверхности льда, равна температуре пленки (т. е. температуре плавления льда). Диаметр вторичных капель рассчитывается с использованием известных эмпирических корреляций. В реализацию расчета течения жидкой пленки в версии IceVision 2.0, помимо учета действия аэродинамических сил, добавлен учет силы тяжести, градиента гидростатического давления и силы поверхностного натяжения. Результатом учета поверхностного натяжения является эффект поперечного стягивания пленки, приводящий к образованию потоков воды в форме ручейков и к формированию ледяных отложений в виде гребнеобразных наростов. Замерзание пленки происходит за счет испарения воды и теплоотдачи в лед и в воздух. IceVision 2.0 позволяет моделировать конденсацию водяного пара на поверхности пленки / сухой поверхности льда или ВС и таяние / сублимацию льда при соответствующих локальных условиях.

В статье представлены результаты тестирования и апробации методики IceVision. Результаты расчетов в ПК FlowVision хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами расчетов в других ПК.

2. Методика IceVision

Методика IceVision имеет следующие отличительные особенности.

1. Процесс роста льда моделируется с использованием метода VOF.
2. Образование и изменение формы льда моделируются одновременно с непрерывным расчетом обтекания ВС двухфазным потоком. Контактная граница «воздух – лед» перемещается по расчетной области не более чем на размер локальной расчетной ячейки за шаг задачи. Данный метод можно охарактеризовать как метод расчета непрерывного нарастания льда.
3. Расчетная сетка перестраивается только в ячейках, через которые проходит контактная поверхность (граница «воздух – лед»). Контактная поверхность делит расчетную ячейку на две. Формы этих ячеек определяются положением и ориентацией границы «воздух – лед». Смещение границы инициирует автоматическую локальную перестройку сетки. Ячейки расчетной сетки, не содержащие поверхность льда, сохраняют свою первоначальную форму.
4. В ледяной фазе решается нестационарное уравнение теплопроводности.
5. Методика учитывает распределение капель дисперсной фазы по размерам. Количество полос спектра размеров ограничено только ресурсами компьютера, необходимыми для оперативного хранения соответствующих переменных полидисперсной модели.
6. Методика предусматривает возможность реализации трех режимов обледенения твердой поверхности: сухого, жидкого и влажного [Алексеевко, Приходько, 2013]. В сухом режиме капли воды мгновенно затвердевают при контакте с поверхностью льда или холодной поверхностью ВС. В жидком режиме температура поверхности выше температуры замерзания воды, лед не образуется, вода присутствует на поверхности только в виде жидкой пленки. Во влажном режиме переохлажденные капли на твердой поверхности образуют пленку, часть которой в нижних слоях превращается в лед, а оставшаяся часть растекается по поверхности под действием аэродинамической силы, силы тяжести, градиента гидростатического давления и силы поверхностного натяжения, действующей на линии контакта пленки со льдом и с поверхностью ВС. Во влажном режиме скорость нарастания льда определяется балансом энергии, в котором учитываются энергия капель, теплообмен пленки с воздухом и со льдом, испарение воды и скрытая энергия фазовых переходов.
7. Методика учитывает срыв пленки с поверхности ВС и с поверхности льда.
8. Методика учитывает разбрызгивание крупных капель, выпадающих на поверхность ВС, и разбрызгивание жидкой пленки при попадании в нее крупных капель.
9. Математическая модель включает уравнения внешнего двухфазного потока с учетом взаимодействия несущей (воздух + пар) и дисперсной (переохлажденные капли воды) фаз. Моделирование двухфазного дисперсного течения осуществляется в приближении «Эйлер – Эйлер» (взаимопроникающих континуумов). Обмен импульсом, энергией и массой между фазами определяется соответствующими источниковыми членами.

Численное интегрирование уравнений в частных производных в ПК FlowVision основано на методе конечных объемов и методе расщепления по физическим переменным [Aksenov et al., 2015]. Во всех ячейках решаемые уравнения аппроксимируются разностной схемой высокого порядка точности. Криволинейная граница расчетной области обрезает исходные шестигранные

ячейки без упрощения формы границы. Решение в областях с большими градиентами параметров течения и геометрическими особенностями границ уточняется посредством автоматической локальной адаптации расчетной сетки. Обзор технологий, реализованных в ПК FlowVision, представлен в работе [Аксёнов, 2017].

3. Математическая модель

Математическая модель, используемая в методике IceVision, предполагает, что в расчетной области могут присутствовать четыре фазы: газ (смесь воздуха с водяным паром), переохлажденные капли воды, пленка воды и лед. Криволинейная поверхность льда разделяет две среды: трехфазную среду «газ + капли + пленка» и однофазную твердую среду «лед». Такая движущаяся по неподвижной (эйлеровой) сетке контактная поверхность делит расчетные ячейки прямоугольной сетки на многогранники произвольной формы, принадлежащие разным средам. Отметим, что исходная расчетная ячейка также может быть многогранником произвольной формы, если она примыкает к криволинейной границе расчетной области (к поверхности ВС). Пленка может течь как по поверхности льда, так и по поверхности ВС. На поверхности льда выполняются балансы массы и энергии между всеми четырьмя фазами. Эти балансовые соотношения определяют граничные условия для уравнений, решаемых в сопряженных средах. Таким образом, в расчетной области решается многофазная сопряженная задача.

Изменение формы поверхности льда рассчитывается с использованием усовершенствованного метода VOF [Hirt, Nicholls, 1981], реализованного в ПК FlowVision. Перенос поверхности льда описывается уравнением для объемной доли льда в расчетной ячейке (переменной VOF):

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\dot{m}_i S_{cell,base}}{\rho_i \Omega_{cell}}. \quad (1)$$

Здесь F — переменная VOF для льда (принимает значения от 0 до 1); \dot{m}_i — удельная массовая скорость кристаллизации воды / плавления льда; $S_{cell,base}$ — площадь поверхности льда в ячейке; Ω_{cell} — объем ячейки, примыкающей к поверхности льда со стороны среды «газ + капли»; ρ_i — плотность льда. Поверхность льда реконструируется по результирующему распределению переменной VOF на каждом шаге по времени. Ячейка, в которой $0 < F < 1$, содержит поверхность льда. В программе поверхность льда в каждой ячейке является плоской.

На поверхности льда выполняется баланс потоков энергии между фазами:

$$\left[(h_d - h_f) + \frac{1}{2} V_d^2 \right] \dot{m}_d + (\lambda_g + \lambda_{g,t}) \frac{T_{g,cell} - T_f}{y_{g,cell}} - \dot{m}_{evap(subl)} \Delta h_{evap(subl)} = \lambda_i \frac{T_f - T_{i,cell}}{y_{i,cell}} - \dot{m}_i \Delta h_{fusion}. \quad (2)$$

Здесь \dot{m}_d — удельный поток массы капель на поверхность льда или корпуса ВС; $\dot{m}_{evap(subl)}$ — удельный поток массы пара с поверхности / на поверхность, обусловленный испарением пленки или сублимацией льда / конденсацией пара; h_d — термодинамическая энтальпия воды при температуре капель; h_f — термодинамическая энтальпия воды при температуре пленки или поверхности льда; $\Delta h_{evap(subl)}$ — скрытая теплота испарения пленки или сублимации льда; Δh_{fusion} — скрытая теплота плавления льда; V_d — скорость капель; $T_{g,cell}$ и $T_{i,cell}$ — температуры газа и льда в центрах соседних ячеек, примыкающих к поверхности льда с двух сторон; T_f — температура пленки или поверхности льда; $y_{g,cell}$ и $y_{i,cell}$ — расстояния от центров примыкающих ячеек до поверхности льда; λ_g — молекулярный коэффициент теплопроводности газа; $\lambda_{g,t}$ — турбулентный коэффициент теплопроводности газа; λ_i — коэффициент теплопроводности льда.

В режиме сухого обледенения удельная массовая скорость кристаллизации определяется только потоками выпадающей и сублимируемой влаги:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_d - \dot{m}_{subl}, \quad (3)$$

и соотношение (2) используется для вычисления температуры поверхности льда $T_f < 273,15$ К. Во влажном режиме температура пленки на поверхности льда полагается равной температуре кристаллизации, $T_f = 273,15$ К, и соотношение (2) используется для вычисления \dot{m}_i .

Удельный поток массы пара с поверхности пленки или льда с учетом стефановского течения определяется следующим выражением:

$$\dot{m}_{evap(subl)} \cdot (1 - Y_{vap,f}) = \left(\frac{\mu_g}{S c_g} + \frac{\mu_{g,t}}{S c_{g,t}} \right) \frac{Y_{vap,f} - Y_{vap,cell}}{y_{g,cell}}. \quad (4)$$

Здесь $\mu_g, \mu_{g,t}, S c_g, S c_{g,t}$ — динамические коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости газа, молекулярное и турбулентное числа Шмидта газа. Массовая доля пара в центре примыкающей ко льду расчетной ячейки $Y_{vap,cell}$ находится в результате решения уравнения массопереноса для соответствующей компоненты газовой фазы (см. ниже). Массовая доля пара на поверхности пленки или сухого льда определяется выражением

$$Y_{vap,f} = X_{vap,f} \frac{m_{vap}}{m_{v,a}}, \quad (5)$$

где $m_{v,a} = X_{vap,f} m_{vap} + (1 - X_{vap,f}) m_{air}$ — локальная молярная масса газа на поверхности пленки или сухого льда, m_{vap} — молярная масса пара, m_{air} — молярная масса воздуха. Молярная доля пара на поверхности определяется выражением

$$X_{vap,f} = \frac{p_{vap}(T_f)}{p}, \quad (6)$$

где $p_{vap}(T)$ определяется табулированной зависимостью парциального давления насыщенного пара от температуры.

В фазе «лед» решается уравнение энергии:

$$\rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_i}{C_{p,i}} \nabla h_i \right). \quad (7)$$

Здесь h_i — термодинамическая энтальпия льда, $C_{p,i}$ — удельная теплоемкость льда.

Динамика несущей фазы в среде «газ + капли» описывается осредненными по Рейнольдсу уравнениями неразрывности, импульсов, энергии и переноса массовой доли пара:

$$\frac{\partial(\varphi_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_g \rho_g \mathbf{V}_g) = Q_M, \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\varphi_g \rho_g \mathbf{V}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_g \rho_g \mathbf{V}_g \otimes \mathbf{V}_g) = -\varphi_g \nabla p + \varphi_g \rho_g \mathbf{g} + \nabla \cdot (\varphi_g \widehat{\boldsymbol{\tau}}) - Q_V, \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\varphi_g \rho_g h_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_g \rho_g h_g \mathbf{V}_g) = -\nabla \cdot (\varphi_g \mathbf{J}_q) + \varphi_g \frac{dp}{dt} + \varphi_g (\widehat{\boldsymbol{\tau}} : \widehat{\mathbf{S}} + \rho \varepsilon) - Q_T, \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\varphi_g \rho_g Y_{vap})}{\partial t} + \nabla \cdot (\varphi_g \rho_g Y_{vap} \mathbf{V}_g) = -\nabla \cdot (\varphi_g \mathbf{J}_{vap}) + Q_M. \quad (11)$$

Здесь $\varphi_g = 1 - \varphi_d$ — относительный объем несущей фазы (φ_d — относительный объем дисперсной фазы); ρ_g — плотность газа; \mathbf{V}_g — скорость газа; p — давление; $\widehat{\boldsymbol{\tau}} = (\mu_g + \mu_{g,t}) \left(2\widehat{\mathbf{S}} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{V}_g)\widehat{\mathbf{I}} \right)$ — тензор вязких напряжений; $\widehat{\mathbf{S}}$ — тензор скоростей деформации; $\widehat{\mathbf{I}}$ — единичный тензор; Q_V — источниковый член, обусловленный обменом импульсом между фазами (см. ниже); h_g — термодинамическая энтальпия газа; $\mathbf{J}_q = -(\lambda_g + \lambda_{g,t})\nabla T_g + \mathbf{J}_{vap} h_{vap}(T_g) + \mathbf{J}_{air} h_{air}(T_g)$ — тепловой поток; $\mathbf{J}_{air} = 1 - \mathbf{J}_{vap}$ — диффузионный поток воздуха, где $h_{vap}(T_g)$ и $h_{air}(T_g)$ — энтальпии воздуха и пара

при температуре газовой фазы T_g ; ε — скорость диссипации турбулентной энергии; Q_T — источниковый член, обусловленный обменом энергией между фазами (см. ниже); Y_{vap} — массовая доля пара; $J_{vap} = -\left(\frac{\mu_g}{Sc_g} + \frac{\mu_{g,t}}{Sc_{g,t}}\right) \nabla Y_{vap}$ — диффузионный поток пара, где Sc_g , $Sc_{g,t}$ — молекулярное и турбулентное числа Шмидта газовой фазы; Q_M — источниковый член, обусловленный обменом массой между фазами (см. ниже).

Для замыкания уравнений динамики несущей фазы в соответствии с гипотезой Буссинеска применяется подходящая модель турбулентности. В ПК FlowVision [Аксёнов, 2017] в рамках URANS-подхода реализовано несколько моделей. В том числе стандартная модель k - ε , модели SA и SST k - ω . Расчеты, результаты которых представлены в работе, проводились на относительно грубых расчетных сетках с использованием стандартной модели k - ε и пристеночных функций FlowVision [Жлуктов, Аксёнов, 2015; Жлуктов, Аксёнов, Савицкий, 2018], т. е. в высокорейнольдсовом приближении. Применение реализованных в ПК FlowVision моделей турбулентности обеспечивает расчет тепловых и массовых потоков с контактной поверхности с учетом шероховатости этой поверхности. Используемая при этом величина эквивалентной песочной шероховатости h_s может быть определена как постоянная величина или рассчитана с применением известных эмпирических корреляций, например, [Shin, Bond, 1992]. В реализованной в ПК FlowVision модели пристеночных функций влияние шероховатости учитывается посредством замены молекулярной вязкости на эффективную в соответствии с моделью, описанной в работе [Souders, Hirt, 2002]:

$$\mu_{g,eff} = \mu_g + a_h \rho_g h_s. \quad (12)$$

Здесь a_h — калибровочный коэффициент модели, который определяется параметрами расчетной сетки и набегающего двухфазного течения: $a_h = F(y_{max}^+, T_\infty, V_\infty, MVD, LWC_\infty)$, где y_{max}^+ — максимальное значение сеточного безразмерного критерия Y^+ в ячейках, примыкающих к поверхности ВС, полученное по результатам расчета двухфазного обтекания «чистого» профиля (без пленки и ледяных отложений), T_∞ , V_∞ — значения температуры и скорости набегающего потока, MVD — средний объемный диаметр частиц дисперсной фазы, LWC_∞ — величина водности набегающего потока. Задание функциональной зависимости a_h представляет собой одну из особенностей описываемой расчетной методики IceVision и осуществляется путем проведения предварительной серии расчетов на этапе валидации модели. Пристеночные профили скорости, температуры и переменных используемой модели турбулентности модифицируются соответствующим образом.

Динамика дисперсной фазы в среде «газ + капли» описывается в континуальном приближении уравнением переноса частиц, уравнением импульсов, уравнением энергии и уравнением переноса массы:

$$\frac{\partial n_d}{\partial t} + \nabla \cdot (n_d \mathbf{V}_d) = \nabla \cdot \left(\frac{v_{d,t}}{Sc_{d,t}} \nabla n_d \right), \quad (13)$$

$$\frac{\partial (V_{di} M_d n_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (V_{di} M_d n_d \mathbf{V}_d) = \nabla \cdot \left(\frac{v_{d,t}}{Sc_{d,t}} \nabla (V_{di} M_d n_d) \right) - n_d \frac{\pi d^3}{6} \nabla_i p + n_d \frac{\pi d^3}{6} \rho_d g_i + Q_{Vi}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial (h_d M_d n_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (h_d M_d n_d \mathbf{V}_d) = \nabla \cdot \left(\frac{v_{d,t}}{Sc_{d,t}} \nabla (h_d M_d n_d) \right) + Q_T, \quad (15)$$

$$\frac{\partial (M_d n_d)}{\partial t} + \nabla \cdot (M_d n_d \mathbf{V}_d) = \nabla \cdot \left(\frac{v_{d,t}}{Sc_{d,t}} \nabla (M_d n_d) \right) - Q_M. \quad (16)$$

Здесь n_d — объемная концентрация капель, ρ_d — плотность воды, V_{di} — i -я декартова компонента скорости капель, g_i — i -я декартова компонента вектора силы тяжести, $v_{d,t}$ — кинематический

коэффициент турбулентной вязкости дисперсной фазы, который полагается равным кинематическому коэффициенту турбулентной вязкости несущей фазы, $Sc_{d,t}$ — турбулентное число Шмидта дисперсной фазы, M_d — масса капли, h_d — термодинамическая энтальпия капель. Источники межфазного обмена импульсом, энергией и массой имеют вид

$$Q_{Vi} = n_d \frac{\pi d^3}{8} \rho_g \frac{C_D}{d} |V_g - V_d| (V_{gi} - V_{di}), \quad (17)$$

$$Q_T = n_d \pi d^2 Nu_d \frac{\lambda_g}{d} (T_g - T_d), \quad (18)$$

$$Q_M = n_d \pi d \frac{Sh_d}{Sc_g} \mu_g (Y_{vap,sat}(T_d) - Y_{vap}). \quad (19)$$

Здесь d — диаметр капель, T_d — температура капель, $Y_{vap,sat}(T_d)$ — массовая доля пара на поверхности частицы, определяемая давлением насыщенного пара при температуре T_d . В ПК FlowVision реализованы следующие корреляции для коэффициента сопротивления [Crowe, Sommerfeld, Tsuji, 1998], для чисел Нуссельта и Шервуда [Abramzon, Sirignano, 1989] частиц:

$$C_D = \frac{21,12}{Re_d} + 6,3 Re_d^{-0,5} + 0,25, \quad (20)$$

$$Nu_d = 2 + 0,552 Re_d^{1/2} Pr_g^{1/3}, \quad (21)$$

$$Sh_d = 2 + 0,552 Re_d^{1/2} Sc_g^{1/3}. \quad (22)$$

Здесь $Re_d = \frac{\rho_g |V_g - V_d| d}{\mu_g}$ — число Рейнольдса для капель, Pr_g — число Прандтля для несущей фазы.

Решение уравнений (8)–(11) и (13)–(16) позволяет определить удельный поток массы капель воды на обтекаемую поверхность: $\dot{m}_d = -\rho_d V_d \cdot \mathbf{n}$, где \mathbf{n} — локальная нормаль к поверхности.

Во влажном режиме удельный поток массы воды, формирующей пленку, определяется выражением

$$\dot{m}_f = \dot{m}_d - \dot{m}_i - \dot{m}_{evap(subl)}. \quad (23)$$

Толщина растекающейся по поверхности жидкой пленки не разрешается расчетной сеткой. Течение пленки определяется решением уравнения переноса объемной доли пленки в расчетной ячейке f (переменной VOF для пленки), которое выводится из закона сохранения массы. Дискретная форма этого уравнения имеет вид

$$\frac{f_{cell}^{n+1} - f_{cell}^n}{\Delta \tau_f} + \sum_{sides} F_{side} = \frac{S_{cell,base}}{\Omega_{cell} \rho_d} \dot{m}_f. \quad (24)$$

Здесь $\Delta \tau_f$ — шаг интегрирования уравнения переноса объемной доли пленки по времени. Поток пленки в соседнюю ячейку, примыкающую к поверхности льда, вычисляется с использованием схемы против потока:

$$F_{side} = \begin{cases} \frac{|V_{f,cell}| \cdot \delta_{f,cell} \cdot L_{side}}{\Omega_{cell}}, & V_{f,cell} \cdot \mathbf{n}_f > 0, \\ \frac{|V_{f,nei}| \cdot \delta_{f,nei} \cdot L_{side}}{\Omega_{nei}}, & V_{f,nei} \cdot \mathbf{n}_f < 0. \end{cases} \quad (25)$$

Здесь с индексом $cell$ записаны величины, относящиеся к текущей ячейке, а с индексом nei — величины, относящиеся к соседней ячейке; L_{side} — длина линии, разделяющей соседние ячейки на контактной поверхности; вектор \mathbf{n}_f — нормаль к грани между ячейками, направленная из

текущей ячейки в соседнюю; δ_f — толщина пленки. Толщина пленки в ячейке определяется выражением

$$\delta_{f,cell} = \frac{f_{cell} \cdot \Omega_{cell}}{S_{cell,base}}. \quad (26)$$

Скорость растекания пленки определяется балансом сил, действующих на элементарный объем пленки. Учитываются аэродинамическая сила, сила тяжести, градиент гидростатического давления внутри пленки, а также сила поверхностного натяжения, действующая на линии контакта пленки с поверхностью:

$$\mathbf{V}_f = \frac{\delta_f}{2\mu_f} \boldsymbol{\tau}_w + \frac{\delta_f^2}{3\nu_f} \left(\mathbf{g}^\tau - g^n \cdot \nabla(\delta_f) + \beta \frac{\sigma_f(\cos \theta - 1)}{\rho_f \delta_f \Delta_\perp^{cl}} \cdot \mathbf{n}^{cl} \right). \quad (27)$$

Здесь $\boldsymbol{\tau}_w$ — вектор касательного напряжения на поверхности «лед–корпус», по которой течет пленка на стороне газа; μ_f , ν_f — динамический и кинематический коэффициенты вязкости воды при температуре 273,15 К; \mathbf{g}^τ — тангенциальная к поверхности составляющая вектора силы тяжести; g^n — нормальная к поверхности компонента вектора силы тяжести; β — поправочный коэффициент перед слагаемым, учитывающим силу поверхностного натяжения; σ_f — коэффициент поверхностного натяжения воды при температуре 273,15 К; θ — угол смачивания, определяется свойствами поверхности, по которой течет пленка (лед или корпус ВС); \mathbf{n}^{cl} — нормаль к линии контакта пленки с поверхностью в расчетной ячейке, направленная в сторону мокрой части поверхности; Δ_\perp^{cl} — размер сечения ячейки плоскостью, представляющей поверхность, по которой течет пленка в ячейке, измеряемый в направлении, перпендикулярном к линии контакта. Пленка может перетекать с мокрой поверхности льда или корпуса ВС на сухую. При этом замерзание/незамерзание пленки определяется балансом (2).

Учет взаимодействия пленки с внешним двухфазным потоком позволяет моделировать срыв пленки. В ПК FlowVision реализовано несколько моделей уноса жидких пленок с поверхности. При решении задач обледенения ВС рекомендуется использовать критерий, основанный на оценке величины отношения толщины пленки к локальному радиусу кривизны поверхности в расчетной ячейке:

$$C_{fs} = \frac{\delta_{cell,f}}{R_{cell}}. \quad (28)$$

При превышении указанным отношением заданной минимальной величины, излишек массы пленки над величиной, необходимой для соблюдения критерия, передается во внешнюю двухфазную среду «воздух + капли» в виде вторичных капель дисперсной фазы. При этом в дисперсную фазу передаются импульс и энергия пленки, уносимые срывающейся массой воды. Диаметр срывающихся вторичных капель либо может совпадать с одной из расчетных полос размерного спектра дисперсной фазы, либо может быть определен на основе одной из известных эмпирических корреляций.

Модель взаимодействия дисперсной фазы с поверхностью учитывает отскок и разбрызгивание крупных капель воды, выпадающих на поверхность сухого льда или на сухую поверхность ВС, а также разбрызгивание пленки при попадании в нее крупных капель. При решении задач обледенения предполагается, что режим разбрызгивания реализуется только при выпадении на поверхность капель воды, диаметр которых превышает 40 мкм. Режим взаимодействия капель с поверхностью определяется безразмерной величиной [Wang et al., 2021]

$$k_C = \frac{We}{Oh^{0,4}}, \quad (29)$$

где $We = \frac{\rho_d d V_{dn}^2}{\sigma_d}$ — число Вебера, рассчитываемое по нормальной к поверхности составляющей скорости каплей V_{dn} ; σ_d — поверхностное натяжение вещества дисперсной фазы; $Oh = \frac{\mu_d}{\sqrt{\rho_d d \sigma_d}}$ — число Онезорге. При значении $k_C \geq 77$ реализуется режим разбрызгивания. Нормальная и тангенциальная составляющие скорости вторичных каплей при этом определяются следующими корреляциями [Honsek, 2005]:

$$\frac{V_{dn,2}}{V_{dn}} = -(0,12 + 0,002\theta_d), \quad (30)$$

$$\frac{V_{d\tau,2}}{V_{d\tau}} = (0,85 + 0,0025\theta_d). \quad (31)$$

Здесь $0^\circ < \theta_d < 90^\circ$ — угол выпадения каплей, отсчитываемый от нормали к поверхности. Для расчета относительного диаметра и массы вторичных каплей, а также относительного потока концентрации и потока массы вторичных каплей используются корреляции [Wang et al., 2021]

$$\frac{d_2}{d} = \max(0,05, 8,72 \exp(-0,02812494 \cdot k_C)), \quad (32)$$

$$\frac{M_2}{M} = \left(\frac{d_2}{d}\right)^3, \quad (33)$$

$$\frac{\dot{n}_2}{\dot{n}_d} = \min(1000, 1,675 \cdot 10^{-5} \cdot k_C^{2,539}), \quad (34)$$

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_d} = \min\left(1, \frac{\dot{n}_2 M_2}{\dot{n}_d M_d}\right), \quad (35)$$

где $\dot{n}_d = n_d V_{dn}$, $\dot{m}_d = M_d n_d V_{dn}$ — удельные потоки концентрации и массы частиц, выпадающих на поверхность. Также реализован учет демпфирования выпадающих каплей при наличии на поверхности жидкой пленки [Schmehl et al., 1999] посредством модификации корреляции (35):

$$\frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_d} = 1 - \left[1 - \min\left(1, \frac{\dot{n}_2 M_2}{\dot{n}_d M_d}\right)\right] \exp\left(-\frac{\delta_f}{d}\right). \quad (36)$$

Если условие $k_C \geq 77$ не выполняется, то возможны либо отскок, либо полный влив каплей в жидкую пленку. Режим отскока реализуется при выполнении условия

$$10 \leq We \leq \frac{1320}{La^{0,18}}, \quad (37)$$

где $La = \frac{\rho_d d \sigma_d}{\mu_d^2}$ — число Лапласа. Предполагается что в режиме отскока капли взаимодействуют с поверхностью абсолютно упруго.

4. Исследование сеточной сходимости

В ПК FlowVision была проведена верификация описанной выше расчетной методики. Верификационный анализ включает в себя исследование сеточной сходимости численного алгоритма при решении двух тестовых задач. Задачи на расчет влажного режима обледенения крылового профиля NASA0012 и задачи на расчет растекания жидкой пленки по наклонной поверхности в режиме формирования ручейков. Каждая задача решалась на нескольких последовательно сгущающихся сетках.

4.1. Влажный режим обледенения

Моделируются образование и рост льда на поверхности аэродинамического профиля NASA0012 во влажном режиме обледенения. Задача решается в двухмерной постановке. Условия соответствуют эксперименту gun 308 в климатической аэродинамической трубе *NASA Glenn Icing Research Tunnel (IRT)* [Wright, Rutkowski, 1999]. Параметры набегающего потока: давление $p_\infty = 90760$ Па, скорость $V_\infty = 102,8$ м/с, $MVD = 20$ мкм, $LWC = 1$ г/м³, температура $T_\infty = 262,04$ К. Для данного режима обледенения характерны растекание жидкой пленки по поверхности профиля и формирование характерных рогообразных ледяных наростов.

Размеры проточной части расчетной области составляют 45×45 хорд профиля. С помощью автоматического генератора сетки были построены расчетные сетки со сгущением к обтекаемому профилю. На рис. 1 сравниваются формы ледяных наростов, полученные в ПК FlowVision на трех вариантах расчетной сетки с характерными размерами примыкающих к профилю ячеек, соответствующими значениям $y_{\max}^+ \approx 530, 300, 160$. Дополнительно на рисунке приведена экспериментальная форма льда, полученная в климатической трубе. Более подробно результаты валидационного анализа на нескольких расчетных режимах описаны в следующем разделе. Следует отметить, что на более подробных сетках результирующие формы ледяных наростов могут отличаться от экспериментальных данных. Такое поведение является особенностью технологии VOF, применение которой приводит к чрезмерной детализации формы льда при расчетах на подробных сетках, в том числе к воспроизведению элементов шероховатости льда. В результате, если не использовать дополнительные алгоритмы сглаживания, поверхность льда теряет сплошность, а форма льда становится нефизичной. Поэтому применение методики IceVision к расчетам обледенения поверхностей ВС предполагает проведение расчетов на сетках со значением y_{\max}^+ по ячейкам, примыкающим к поверхности профиля, не меньшим 150.

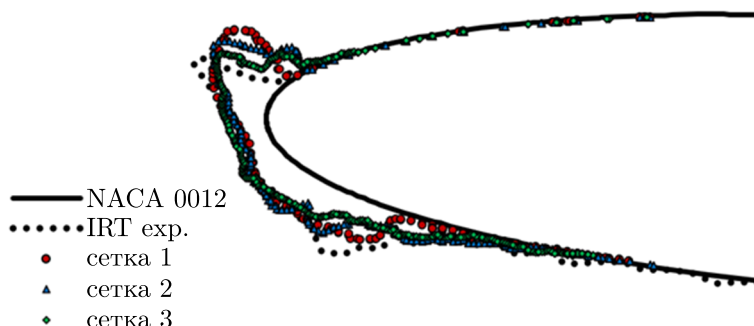


Рис. 1. Формы льда, образовавшегося на поверхности профиля NASA0012 через 3,85 мин после начала обледенения, в условиях, соответствующих эксперименту IRT RUN 308: сетка 1 — $y_{\max}^+ \approx 530$, сетка 2 — $y_{\max}^+ \approx 300$, сетка 3 — $y_{\max}^+ \approx 160$

4.2. Течение жидкой пленки по наклонной поверхности

Моделируется растекание жидкой пленки по наклонной поверхности в поле силы тяжести с учетом действия поверхностного натяжения на линии контакта пленки с подложкой при заданном линейном расходе, который обеспечивает режим течения, сопровождающийся формированием ручейков. На рис. 2 изображена постановка задачи, соответствующая постановке эксперимента, результаты которого описаны в работе [Gosset, 2017]. Угол наклона поверхности к горизонтали — $\alpha = 5^\circ$, ускорение свободного падения — $g = 9,81$ м/с², на верхней границе пластины задан линейный расход пленки $\Gamma = 0,05$ кг/м · с. Кинематический коэффициент вязкости, плотность жидкости и ее поверхностное натяжение равны соответственно $\nu = 5,86 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $\rho = 998$ кг/м³, $\sigma = 0,069$ Н/м. Серия верификационных расчетов проводилась при значении

поправочного коэффициента модели смачивания $\beta = 0,2$ и при средней величине угла смачивания $\theta_{mean} = 75^\circ$. Поскольку в реальности величина угла смачивания не является постоянной, а зависит от локальных условий в каждой точке поверхности, для обеспечения соответствия результатов расчетов экспериментальным данным угол смачивания рассчитывался в каждой точке поверхности в соответствии с нормальным распределением со среднеквадратичным отклонением $\theta_{var} = 10^\circ$. Верификационные расчеты проводились с разрешением контактной поверхности сетками в 100×100 , 150×150 и 200×200 расчетных ячеек.

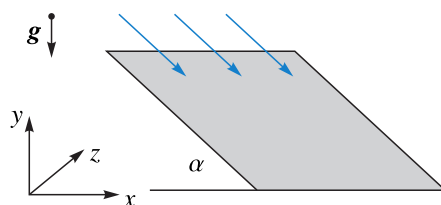


Рис. 2. Постановка задачи о растекании жидкой пленки по наклонной поверхности

На рис. 3 сравниваются картины течения пленки в режиме формирования ручейков, полученные в ПК FlowVision на трех вариантах расчетной сетки. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными описано в следующем разделе. Здесь также следует отметить наблюдающуюся сеточную зависимость результатов применения численной модели формирования ручейков, проявляющуюся в уменьшении поперечных размеров ручейков на более подробных сетках. Такое поведение решения связано с зависимостью соотношения, определяющего вклад поверхностного натяжения в баланс сил, действующих на пленку, от размера расчетной ячейки. При этом результаты расчета демонстрируют консервативность по массе и энергии пленки, а слияние ручейков на более подробных сетках обеспечивает качественно верный результат расчета.

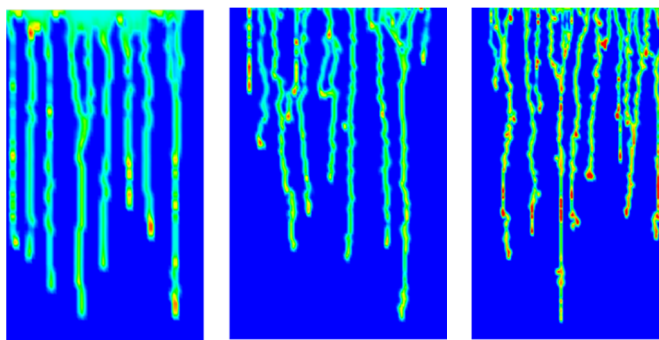


Рис. 3. Распределение толщины пленки при растекании по наклонной поверхности на сетках с разрешением поверхности 100×100 (слева), 150×150 (по центру), 200×200 (справа) расчетными ячейками

5. Валидация расчетной методики

Была проведена серия расчетов с целью валидации методики IceVision. Валидационный анализ включает в себя сравнение результатов численного решения двух описанных в предыдущем разделе типовых тестовых задач с известными экспериментальными данными и с результатами расчетов, проведенных в сторонних коммерческих программных пакетах.

5.1. Обледенение профиля NASA0012

В ПК FlowVision было проведено численное моделирование роста льда на поверхности аэродинамического профиля NASA0012 в сухом и влажном режимах обледенения. Задача решается

ется в двухмерной постановке. Условия соответствуют экспериментам, проведенным в климатической аэродинамической трубе *NASA Glenn Icing Research Tunnel* (IRT) [Wright, Rutkowski, 1999]: run 425, run 308 (результаты исследования сеточной сходимости расчетной методики для данного режима обледенения представлены в предыдущем разделе), run 403. Параметры набегающего потока:

- сухой режим (эксперимент IRT run 425): $p_\infty = 101\,000$ Па, $V_\infty = 67,1$ м/с, $MVD = 20$ мкм, $LWC = 1$ г/м³, $T_\infty = 244,51$ К;
- влажный режим (эксперимент IRT run 308): $p_\infty = 90\,760$ Па, $V_\infty = 102,8$ м/с, $MVD = 20$ мкм, $LWC = 1$ г/м³, $T_\infty = 262,04$ К;
- влажный режим (эксперимент IRT run 403): $p_\infty = 101\,000$ Па, $V_\infty = 102,8$ м/с, $MVD = 20$ мкм, $LWC = 0,55$ г/м³, $T_\infty = 262,04$ К.

Результаты указанных экспериментов используются в качестве опорных данных при сверке наиболее известных программных продуктов, предназначенных для численного решения задач обледенения, включая коммерческие пакеты LEWICE и FENSAP-ICE. Выбор указанных режимов обледенения обусловлен существенным различием результирующих форм ледяных наростов. В сухом режиме рост льда приводит к образованию на профиле равномерной ледяной шапки. Выбранные влажные режимы характеризуются образованием рогообразных ледяных наростов различной формы, что связано с различиями в количестве выпадающей влаги и в результирующем характере растекания водяной пленки.

Размеры проточной части расчетной области составляют 45×45 хорд профиля. Характерный размер примыкающих к профилю ячеек соответствует значению $y_{\max}^+ \approx 300$. На рис. 4–6 формы ледяных наростов, полученные в ПК FlowVision, сравниваются с результатами экспериментов и с результатами расчетов, проведенных в программе LEWICE [Wright, Rutkowski, 1999]. Из рисунков видно, что результаты, полученные в ПК FlowVision с использованием методики IceVision при моделировании обледенения профиля NACA0012 в различных режимах, хорошо согласуются с экспериментальными данными и расчетами в программе LEWICE.

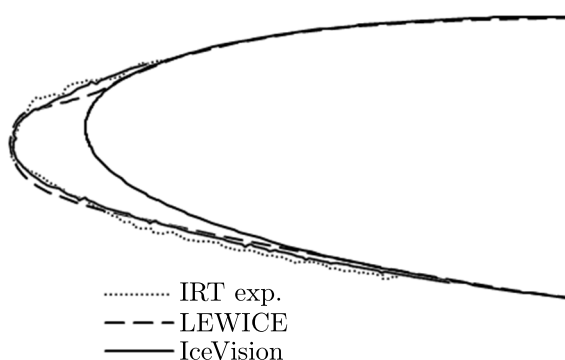


Рис. 4. Формы льда, образовавшегося на поверхности профиля NACA0012 через 6 мин после начала обледенения, в условиях, соответствующих эксперименту IRT RUN 425 (сухой режим)

5.2. Течение жидкой пленки по наклонной поверхности

В ПК FlowVision было проведено численное моделирование растекания пленки по наклонной поверхности в поле силы тяжести в двух режимах формирования ручейков, отличающихся заданным линейным расходом. Описание постановки задачи и входных параметров дано в предыдущем разделе. Расчетные режимы отличаются величиной заданного линейного расхода

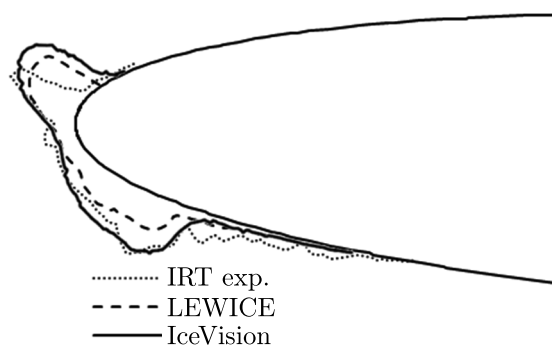


Рис. 5. Формы льда, образовавшегося на поверхности профиля NACA0012 через 5 мин после начала обледенения, в условиях, соответствующих эксперименту IRT RUN 308 (влажный режим, водность $LWC = 1 \text{ г/м}^3$)

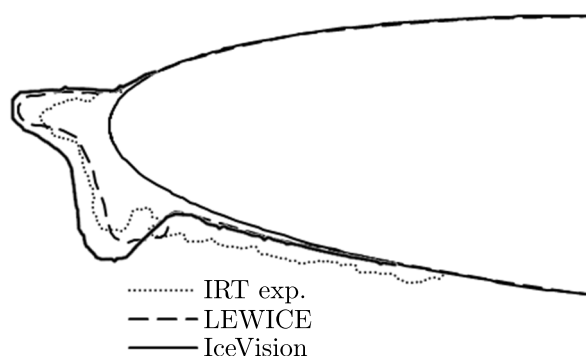


Рис. 6. Формы льда, образовавшегося на поверхности профиля NACA0012 через 8 мин после начала обледенения, в условиях, соответствующих эксперименту IRT RUN 403 (влажный режим, водность $LWC = 0,55 \text{ г/м}^3$)

пленки, равного $0,05 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ и $0,15 \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ соответственно. Характерным отличием указанных режимов является увеличение поперечного размера ручейков при увеличении линейного расхода.

Валидационные расчеты проводились при значении поправочного коэффициента модели смачивания $\beta = 0,2$, при средней величине угла смачивания $\theta_{mean} = 75^\circ$ со среднеквадратичным отклонением $\theta_{var} = 10^\circ$ на сетке с разрешением контактной поверхности в 100×100 расчетных ячеек. На рис. 7 и 8 результаты, полученные в ПК FlowVision, сравниваются с результатами эксперимента и с результатами расчетов, представленными в работе [Gosset, 2017]. Из рисунков видно, что результаты, полученные в ПК FlowVision с использованием модели формирования ручейков, применяемой в рамках реализации методики IceVision, на качественном уровне хорошо согласуются как с экспериментальными данными, так и с результатами расчетов, проведенных в стороннем программном пакете вычислительной гидродинамики.

6. Расчетные случаи стояночного обледенения и обледенения в полете

В ПК FlowVision с использованием описанной расчетной методики IceVision были проведены расчеты модельных режимов обледенения поверхностей ВС. Решалась задача стояночного обледенения фюзеляжа в результате стекания воды с обогреваемой поверхности ветрового остекления с последующим ее замерзанием в виде характерных гребневидных наростов под кабиной экипажа. Были проведены расчеты обледенения аэродинамического профиля NACA0012 в условиях, соответствующих эксперименту run 308 в климатической аэродинамической трубе NASA

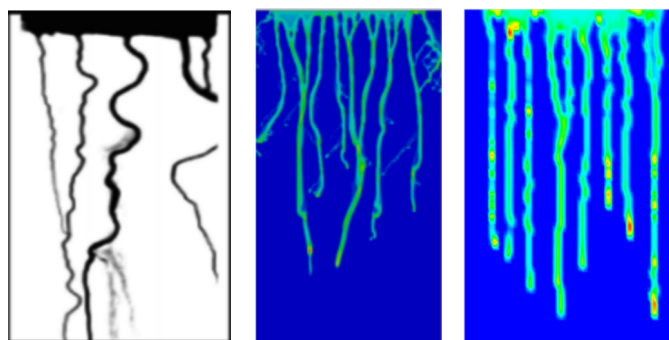


Рис. 7. Распределение толщины пленки по наклонной поверхности при заданном линейном расходе $0,05 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ по результатам эксперимента (слева), по результатам расчета, опубликованным в работе [Gosset, 2017] (по центру), по результатам расчета во FlowVision (справа)

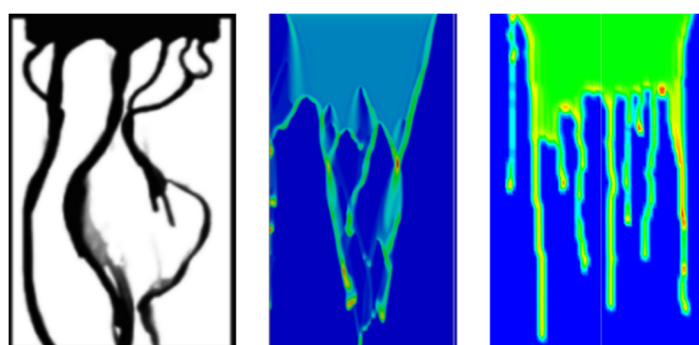


Рис. 8. Распределение толщины пленки по наклонной поверхности при заданном линейном расходе $0,15 \text{ кг/м} \cdot \text{с}$ по результатам эксперимента (слева), по результатам расчета, опубликованным в работе [Gosset, 2017] (по центру), по результатам расчета во FlowVision (справа)

Glenn Icing Research Tunnel (IRT), с численной имитацией работы ПОС, сопровождающейся формированием барьерного льда.

6.1. Расчет стояночного обледенения фюзеляжа транспортного ВС

Было проведено численное моделирование формирования гребневидных ледяных наростов под кабиной экипажа транспортного ВС в результате стекания воды в виде ручейков с обогреваемой поверхности ветрового остекления. Расчеты проводились с применением численной имитации выпадения влаги на поверхность остекления кабины в виде ледяного дождя при задании различной степени интенсивности осадков.

На рис. 9 изображены геометрическая модель расчетной области и расстановка используемых граничных условий. Расчет проводился в трехмерной постановке для половины поверхности передней части фюзеляжа, включающей поверхность остекления, в условиях атмосферного опорного давления $p_0 = 101\,000 \text{ Па}$ и отрицательной величины опорной температуры $T_0 = 268,15 \text{ К}$ с учетом действия силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. На всех внешних поверхностях проточной части расчетной области, за исключением плоскости симметрии, секущей поверхность фюзеляжа, и части верхней поверхности, на которой заданы параметры выпадающего на остекление потока жидких капель, задано граничное условие типа «вход/выход»: полное давление $p_{tot} = 0$, полная температура в газовой фазе $T_{tot} = 0$, условия нулевого градиента для всех остальных расчетных переменных сплошной и дисперсной фаз. На части верхней поверхности расчетной области заданы граничные условия, определяющие поток жидких капель: средний

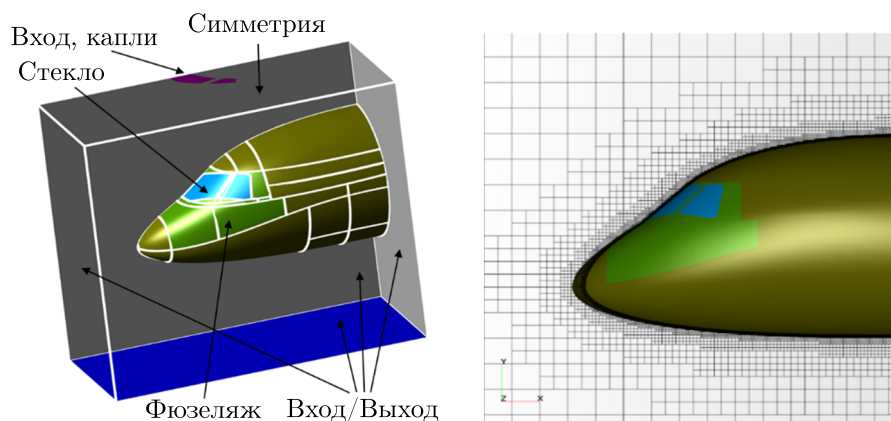


Рис. 9. Постановка граничных условий (слева) и расчетная сетка (справа) для модельной задачи на расчет стояночного обледенения

объемный диаметр каплей — $MVD = 526$ мкм, водность — $LWC = 1$ и 5 г/м³, вертикальная составляющая скорости дисперсной фазы — $V_{dy} = -2,1233$ м/с, а также условия нулевого полного давления и нулевой полной температуры для газовой фазы. На поверхности ветрового остекления задано граничное условие, соответствующее непроницаемой границе расчетной области с фиксированной положительной температурой поверхности $T_w = 308,15$ К. На остальной части поверхности фюзеляжа задано аналогичное граничное условие, но с фиксированной температурой поверхности, равной значению опорной температуры в расчетной области $T_w = 268,15$ К.

Расчеты проводились при значении поправочного коэффициента модели смачивания $\beta = 0,2$, при средней величине угла смачивания $\theta_{mean} = 75^\circ$ со среднеквадратичным отклонением $\theta_{var} = 10^\circ$. Расчеты проводились на равномерной прямоугольной сетке с четырьмя уровнями адаптации расчетных ячеек к поверхности фюзеляжа и общим числом расчетных ячеек порядка 750 000 (рис. 9). Расчет внешнего обтекания корпуса воздушно-капельным потоком проводился со значением конвективного числа CFL двухфазного течения, равным 10. Нестационарный процесс растекания пленки по поверхности рассчитывался явным образом с числом CFL течения пленки, равным 1. Расчет образования ледяной фазы проводился при значении числа CFL для источника фазы (отношение объемного источника фазы в расчетной ячейке к объему ячейки), равном 0,1.

На рис. 10 изображены формы ледяных наростов, полученные в ПК FlowVision по результатам расчетов со значением водности выпадающей на остекление капельной фазы, равным 1 г/м³. Формы льда имеют выраженные гребневидные очертания, частично повторяющие формы ручейков, которые принимает поток воды, стекающий с обогреваемой поверхности. На рис. 11 изображены формы ледяных наростов, полученные по результатам расчетов с увеличенным значением водности выпадающей на остекление капельной фазы, равным 5 г/м³. Результаты демонстрируют прямую зависимость площади и сплошности покрытия ледяной коркой поверхности фюзеляжа от интенсивности осадков или, что то же, от начального количества кристаллической снежной массы, которая могла быть накоплена на поверхности ветрового остекления до включения системы обогрева.

6.2. Расчет полетного режима обледенения профиля с имитацией работы ПОС

Было проведено численное моделирование роста льда на поверхности аэродинамического профиля NASA0012 во влажном режиме обледенения с имитацией работы ПОС, установленной на носке профиля. Задача решается в двумерной постановке. Параметры набегающего потока соответствуют условиям эксперимента run 308 в климатической аэродинамической трубе NASA

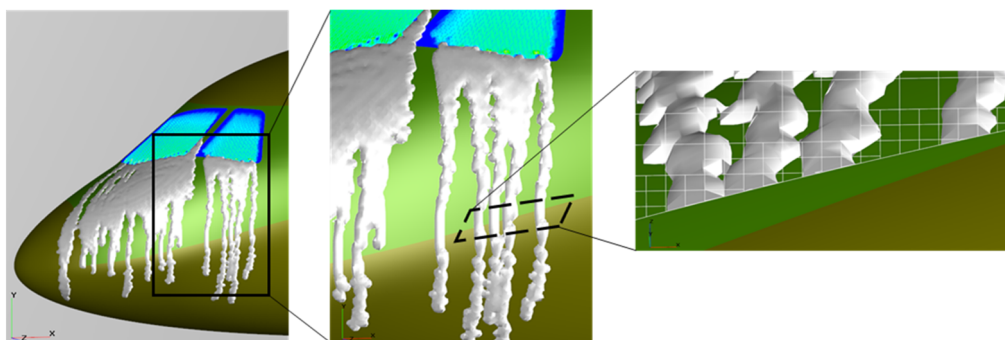


Рис. 10. Результаты расчета стояночного обледенения при водности $LWC = 1 \text{ г/м}^3$: общий вид (слева), формы ледяных наростов под кабиной экипажа (в центре), формы гребневидных наростов в сечении плоскостью, нормальной к поверхности фюзеляжа (справа)

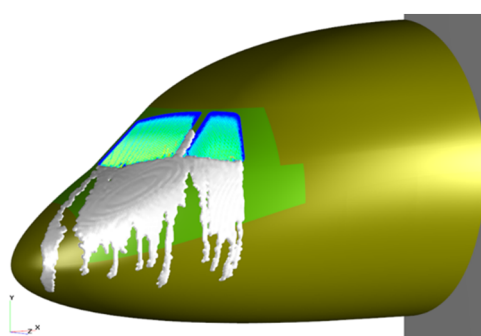


Рис. 11. Результаты расчета стояночного обледенения при водности $LWC = 5 \text{ г/м}^3$

со среднеобъемным диаметром капель, заданным в соответствии с требованиями приложения С и перспективного приложения О: $p_\infty = 101\,000 \text{ Па}$, $V_\infty = 102,8 \text{ м/с}$, $MVD = 20/500 \text{ мкм}$, $LWC = 1 \text{ г/м}^3$, $T_\infty = 264,04 \text{ К}$. На рис. 12 изображена расстановка используемых на поверхности профиля граничных условий. На большей части поверхности профиля задано граничное условие, соответствующее непроницаемой границе расчетной области с адиабатическим граничным условием для уравнения энергии. На части носка профиля используется граничное условие, имитирующее работу ПОС посредством указания фиксированной величины теплового потока с непроницаемой поверхностью. Проведено исследование зависимости результирующей формы ледяных наростов от заданной удельной мощности ПОС $q_{\text{ПОС}} = 3, 6, 10 \text{ кВт/м}^2$.

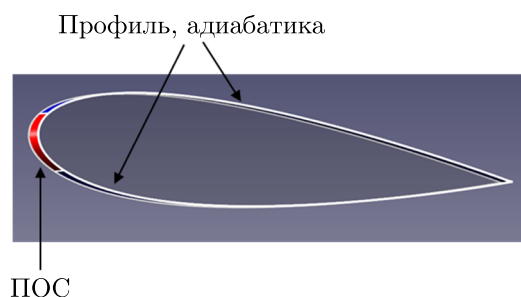


Рис. 12. Постановка задачи на расчет обледенения профиля NASA0012 с имитацией работы ПОС

Размеры проточной части расчетной области составляют 45×45 хорд профиля. Характерный размер примыкающих к профилю ячеек соответствует значению $y_{\text{max}}^+ \approx 300$. На

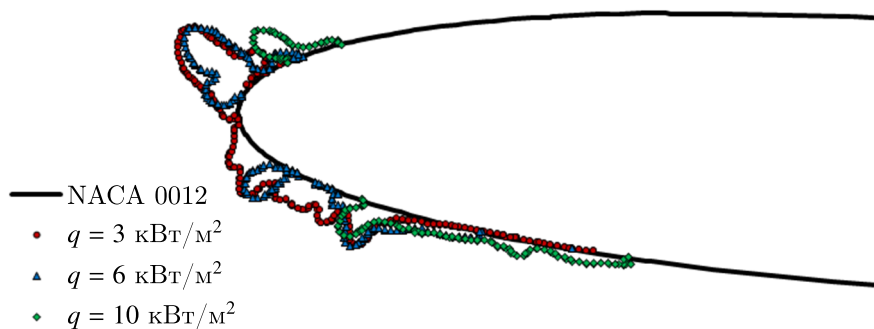


Рис. 13. Результаты исследования имитации различных режимов работы ПОС на носке профиля NASA0012, среднеобъемный диаметр капель в набегающем потоке — 20 мкм

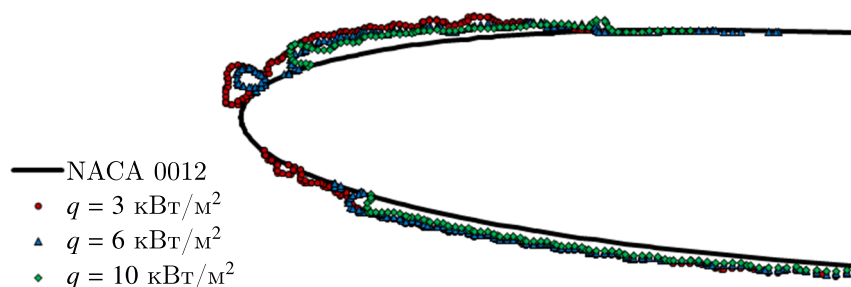


Рис. 14. Результаты исследования имитации различных режимов работы ПОС на носке профиля NASA0012, среднеобъемный диаметр капель в набегающем потоке — 500 мкм

рис. 13, 14 приведены формы ледяных наростов, полученные с использованием расчетной методики IceVision, реализованной в ПК FlowVision, в условиях, соответствующих приложению С и в условиях присутствия в потоке крупных капель воды при варьировании мощности ПОС. Расчетное время процесса обледенения и одновременной работы ПОС составляет около 3 минут. Результаты проведенных расчетов демонстрируют, что увеличение количества выпадающей на профиль влаги в режиме крупных капель приводит к уменьшению массы льда в области работы ПОС и к увеличению объема ледяных отложений на периферийной части профиля. Это объясняется снижением интенсивности теплоотвода с контактной поверхности ПОС при увеличении толщины жидкой пленки и с последующим растеканием и замерзанием пленки при реализации соответствующих термодинамических условий на поверхности профиля за границами действия ПОС. При этом увеличение мощности ПОС, независимо от размеров капель в набегающем потоке, ведет к уменьшению массы льда на его поверхности, вплоть до формирования рогообразных наростов на границе ПОС, характерных для режима роста барьерного льда.

7. Заключение

В работе представлены математическая модель обледенения поверхностей ВС, реализованная в ПК FlowVision, и модифицированная расчетная методика IceVision. Течение влажного воздуха и переохлажденных капель воды моделируется в приближении взаимопроникающих континуумов. Формирующиеся ледяные наросты моделируются отдельной фазой, в которой решается нестационарное уравнение теплопроводности. Движение поверхности льда рассчитывается с использованием технологии VOF. Методика предоставляет возможность моделировать как сухой, так и влажный режимы обледенения. При моделировании влажного режима обледенения математическая модель автоматически определяет зоны сухого и влажного льда. Учитывается течение водяной пленки по поверхности льда. На поверхности ВС пленка может нагреваться

или замерзать соответственно локальному балансу энергии. На поверхности льда пленка имеет постоянную температуру 273,15 К. Балансы массы и энергии позволяют вычислить локальную скорость намерзания или таяния ледяной корки. Методика IceVision учитывает возможность отрыва пленки и разбрызгивания пленки при попадании в нее крупных капель, а также различные режимы взаимодействия капель с твердой поверхностью (отскок, влив и разбрызгивание). В рамках реализованной методики доступна возможность задания распределения дисперсной фазы по размерам капель. Результаты численного решения тестовых задач, полученные в ПК FlowVision с использованием методики IceVision, хорошо согласуются с экспериментальными данными и с результатами численного моделирования в других программах. Апробация представленной модифицированной методики IceVision для решения модельных задач демонстрирует качественно правильное описание процесса формирования ледяных образований на поверхностях ВС в режимах стояночного обледенения и в режиме полета при включении противообледенительной системы.

Список литературы (References)

- Аксёнов А. А.* FlowVision: Индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование. — 2017. — Т. 9, № 1. — С. 5–20. — DOI: 10.20537/2076-7633-2017-9-5-20
- Aksenov A. A.* FlowVision: Industrial'naja vychislitel'naja gidrodinamika [FlowVision: Industrial computational fluid dynamics] // Computer Research and Modeling. — 2017. — Vol. 9, No. 1. — P. 5–20 (in Russian).
- Алексеенко С. В., Приходько А. А.* Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчетов // Ученые записки ЦАГИ. — 2013. — Т. XLIV, № 6. — С. 25–57.
- Alekseenko S. V., Prihod'ko A. A.* Chislennoje modelirovanije obledeneniya tsylindra i profilja. Obzor modeley i rezul'taty raschetov [Numerical simulation of ice accretion on cylinder and airfoil. Review of models and calculations] // Proceedings of TsAGI. — 2013. — Vol. XLIV, No. 6. — P. 25–57 (in Russian).
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А.* Пристеночные функции для высокорейнольдсовых расчетов в программном комплексе FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 6. — С. 1221–1239. — DOI: 10.20537/2076-7633-2015-7-6-1221-1239
- Zhluktov S. V., Aksenov A. A.* Pristenochnye funkicii dlja vysokoreynoldsovyh raschetov v programmnom komplekse FlowVision [Wall functions for high-Reynolds calculations in FlowVision software] // Computer Research and Modeling. — 2015. — Vol. 7, No. 6. — P. 1221–1239 (in Russian).
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Савицкий Д. В.* Высокореинольдсовы расчеты турбулентного теплопереноса в программном комплексе FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование. — 2018. — Т. 10, № 4. — С. 461–481. — DOI: 10.20537/2076-7633-2018-10-4-461-481
- Zhluktov S. V., Aksenov A. A.* Vysokoreynoldsovye raschety turbulentsogo teploperenosa v programmnom komplekse FlowVision [High-Reynolds number calculations of turbulent heat transfer in FlowVision software] // Computer Research and Modeling. — 2018. — Vol. 10, No. 4. — P. 461–481 (in Russian).
- Abramzon B., Sirignano W. A.* Droplet vaporization model for spray combustion calculations // Int. J. of Heat and Mass Transfer. — 1989. — Vol. 32, No. 9. — DOI: 1605-1618.10.1016/0017-9310(89)90043-4
- Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Savitskiy D. V., Bartenev G. Y., Pokhilko V. I.* Simulation of 3D flows past hypersonic vehicles in FlowVision software // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Vol. 653. — P. 012072. — <https://iopscience.iop.org/volume/1742-6596/653> (accessed: 26.04.2023). — DOI: 10.1088/1742-6596/653/1/012072
- Aliaga C. N., Aubé M. S., Baruzzi G. S., Habashi W. G.* FENSAP-ICE-Unsteady: unified in-flight icing simulation methodology for aircraft, rotorcraft, and jet engines // Journal of Aircraft. — 2011. — Vol. 48, No. 1. — P. 119–126. — DOI: 10.2514/1.C000327.
- Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Yu.* Multiphase flows with droplets and particles. — CRC Press LLC, 1998. — 471 p.
- Gosset A.* Prediction of rivulet transition in anti-icing applications // 7th European conference for aeronautics and aerospace sciences. — 2017. — DOI: 10.13009/EUCASS2017-482

- Hirt C.W., Nicholls B.D.* Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *J. Comput. Phys.* — 1981. — Vol. 39. — P. 201. — DOI: 10.1016/0021-9991(81)90145-5
- Honsek R.* Development of a three-dimensional Eulerian model of droplet-wall interaction mechanisms // Master's thesis. — McGill University, Montreal, Québec, Canada. — 2005.
- Hospers J., Hoeijmakers H.W.M.* Numerical simulation of SLD ice accretions // *Proceedings SAE 2011 (Chicago, USA, 2011)*. — P. 1–18. — <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2011-38-0071/> (accessed: 26.04.2023). — DOI: 10.4271/2011-38-0071
- Lavoie P., Bourgault-Côté S., Laurendeau E.* Numerical algorithms for infinite swept wing ice accretion // *Computers and Fluids*. — 2018. — Vol. 161. — P. 189–198. — DOI: 10.1016/j.compfluid.2017.11.015
- Lozowski F.H., Stallabras J.R., Hearty P.F.* The icing of an unheated non-rotating cylinder in liquid water droplet-ice crystal clouds // *National Research Council (NRC)*. — 1979. — Laboratory report LTR-LT-96.
- Ludlam F.H.* The heat economy of a rimed cylinder // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. — 1951. — Vol. 77, No. 1. — P. 663–666. — DOI: 10.1002/qj.49707733410
- Messinger B.L.* Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed // *Journal of the Aeronautical Sciences*. — 1953. — Vol. 20, No. 1. — P. 29–42. — DOI: 10.2514/8.2520
- Mingione G., Brandi V.* Ice accretion prediction on multielement airfoils // *Journal of Aircraft*. — 1998. — Vol. 35, No. 2. — P. 240–246. — DOI: 10.2514/2.2290
- Pena D., Haorau Y., Laurendeau E.* A single step ice accretion model using level-set method // *Journal of Fluids and Structures*. — 2016. — Vol. 65. — P. 278–294. — DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.06.001
- Pueyo A., Chocron D., Kafyeke F.* Improvements to the ice accretion code CANICE // *Proceedings of the 8th Canadian Aeronautics and Space Institute (CASI) Aerodynamic Symposium (Toronto, Canada, 2001)*. — P. 9.
- Schmehl R., Roskamp H., Willmann M., Witting S.* CFD analysis of spray propagation and evaporation including wall film formation and spray/film interaction // *Int. J. of Heat and Fluid Flow*. — 1999. — Vol. 20. — P. 520–529. — DOI: 10.1016/S0142-727X(99)00041-7
- Shin J., Bond T.H.* Experimental and computational ice shapes and resulting drag increase for a NACA 0012 Airfoil // *NASA*. — 1992. — Tech. Mem. 105743.
- Souders D.T., Hirt C.W.* Modeling roughness effects in open channel flows // *Flow Science Technical Note (FSI-02-TN60)*. — 2002. — 10 p.
- Villedieul P., Trontin P., Chauvin R.* Glaciated and mixed-phase ice accretion modeling using ONERA 2D icing suite // *6th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference (Atlanta, GA, 2014)*, *AIAA Paper 2014-2199*. — DOI: 10.2514/6.2014-2199
- Wang Q., Lin X., Lin Y., Ma J., Xiao J., Wu Y., Wang J.* Effects of surface roughness on splashing characteristics of large droplets with digital inline holographic imaging // *Cold Regions Science and Technology*. — 2021. — Vol. 191. — 103373. — DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103373
- Wright W., Rutkowski A.* Validation results for LEWICE 2.0 // *NASA*. — 1999. — Tech. rep. CR 1999-208690.
- Wright W., Gent R., Guffond D.* DRA/NASA/ONERA collaboration on icing research part II — prediction of airfoil ice accretion // *NASA*. — 1997. — Tech. rep. CR-202349.
- Wright W., Struk P., Bartkus T., Addy G.* Recent advances in the LEWICE icing model // *SAE*. — 2015. — Technical Paper 2015-01-2094. — DOI: 10.4271/2015-01-2094
- Yamazaki M., Jemkov A., Sakaue H.* A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation // *Aerospace*. — 2021. — Vol. 8. — P. 188. — DOI: 10.3390/aerospace8070188