

## РАЗВИТИЕ МОДЕЛИ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ICEVISION2.0 В СВЕТЕ НОВЫХ ТРЕБОВАНИЙ НОРМ ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ

А.А. Аксенов<sup>1</sup>, А.А. Бабулин<sup>2</sup>, С.В. Жлуктов<sup>1</sup>, М.К. Окулов<sup>2</sup>,  
К.Э. Сорокин<sup>1</sup>, **В.И. Шевяков**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТЕСИС, Москва, andrey@tesis.com.ru

<sup>2</sup>Филиал «Региональные самолёты» ПАО «Корпорация «Иркут»,  
Москва, A\_Babulin@ssj.irkut.com

В России при сертификации самолётов транспортной категории для эксплуатации в условиях обледенения используются требования Приложения «С» к «Авиационным правилам» АП-25, описывающие условия обледенения. В европейских сертификационных требованиях CS-25, кроме Приложения «С», используется Приложение «О», в котором рассматриваются крупные переохлаждённые водяные капли. В настоящее время использование Приложения «О» предлагается в проекте нового российского сертификационного документа «Нормы лётной годности» (НЛГ-25), введение которого ожидается в ближайшее время. Учитывая это, необходимо иметь инструмент определения форм и размеров ледяных отложений и для условий Приложения «О».

С точки зрения численного моделирования обледенения главное в Приложении «О» – это большая водность и капли большого диаметра (до 500 мкм и более). При таких параметрах дисперсного потока на первый план выходят такие физические факторы, как срыв плёнки воды и разбрызгивание плёнки при попадании в неё крупных капель. При этом поток дисперсной среды становится существенно мультидисперсным, так как срывающиеся капли имеют не только другой диаметр (обычно меньше, чем средний диаметр капель в рамках Приложения «О»), но и другую температуру.

Для расчёта обледенения самолётов в рамках Приложения «О» модель обледенения IceVision [1], реализованная в рамках программного комплекса FlowVision [2], была модифицирована. В модели IceVision изменение формы льда рассчитывается с использованием технологии VOF. Внешнее обтекание самолёта

рассчитывается одновременно с изменением формы льда и его прогрева. Шаг по времени, за который изменяется форма льда, может на два и более порядков превосходить шаг по времени, с которым интегрируются уравнения внешнего обтекания, тем не менее, остаётся малой величиной относительно отрезка времени обледенения. В отличие от лагранжевых подходов (Fensap ICE, StarCCM+, Lewice), в IceVision эйлерова расчётная сетка не перестраивается. Она автоматически адаптируется соответственно заданным критериям адаптации, например, в области прохождения границы раздела лед-воздух. Такой подход обеспечивает устойчивый расчёт образования ледяных отложений произвольной формы.

В новой версии модели IceVision 2.0 учитываются срыв плёнки воды с поверхности льда и разбрызгивание падающих капель и плёнки на поверхностях самолета и льда. В модели IceVision 2.0 предполагается, что температура срывающихся капель равна температуре плёнки (т.е. температуре плавления льда). Диаметр вторичных капель рассчитывается с использованием известных эмпирических корреляций.

В модели IceVision 2.0 при расчёте течения воды по твёрдой поверхности учитывается действие аэродинамических сил, силы тяжести и силы поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение создаёт эффект поперечного стягивания плёнки. Это приводит к образованию потоков воды и ледяных отложений в форме ручейков. На поверхности льда выполняется балансовое соотношение, в котором учитываются энергия падающих капель, теплообмен между льдом и воздухом, теплота кристаллизации и теплота испарения / сублимации. Моделируются конденсация водяного пара на поверхности плёнки / сухого льда и таяние льда при соответствующих локальных условиях.

В докладе представлено валидационное исследование модели IceVision 2.0 на различных экспериментальных тестах, опубликованных в открытой литературе.

## **Литература**

1. A.A. Aksenov, P.M. Byvaltsev, S.V. Zhluktoy, K.E. Sorokin, A.A. Babulin, V.I. Shevyakov. Numerical simulation of ice accretion on airplane surface. AIP Conference Proceedings 2125, 030013 (2019).
2. Аксенов А.А. FlowVision: индустриальная вычислительная гидродинамика // Компьютерные исследования и моделирование, 2017, Т.9, N.1, с. 5–20.