

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМИТАТОРОВ ЛЬДА ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.В. Левицкий, П.М. Николаев, А.А. Никуленко, А.О. Шардин, А.А. Юстус (ФГУП «ЦАГИ»)

Рассмотрена система автоматизированного моделирования имитаторов льда, использующихся в аэродинамическом эксперименте для исследования влияния обледенения на летно-технические характеристики летательных аппаратов. Изготовление моделей обледенения осуществляется с применением аддитивной SLA-технологии (методом лазерной стереолитографии). Приведено описание основных модулей системы, включая: автоматизированное формирование сечений, воспроизводящих форму льда; построение поверхности по набору сечений; каталог описаний сечений; генератор шероховатости, имитирующей поверхность льда.

Ключевые слова: летательный аппарат, обледенение, стереолитография, математическая модель, аэродинамическая модель.

Обледенение летательных аппаратов, возможное во время полета, ухудшает их аэродинамические характеристики. Наледи, образующиеся на аэродинамических поверхностях, изменяют характеристики устойчивости, управляемости, увеличивают лобовое сопротивление, приводят к неконтролируемым срывам потоков и т.д. Для исследования влияния наледей на характеристики, а также разработки способа борьбы с обледенением необходимо всестороннее исследование физических процессов возникновения и характера изменения формы льда в зависимости от условий полета. Оценка влияния обледенения включает как экспериментальные исследования в аэродинамических трубах, так и использование программных средств компьютерного моделирования.

Экспериментальные исследования в аэродинамических трубах проводятся на моделях летательных аппаратов с имитацией различных форм льда на передних кромках агрегатов [1], на которых возможно образование наледи (крыле, хвостовом оперении, лопастях винтов и т.д.). В связи с этим работы, направленные на повышение уровня автоматизации и уменьшения сроков подготовки производства имитаторов льда для аэродинамических поверхностей, представляются важными и актуальными. В настоящей работе приведено описание разработанной автoра ми системы автоматизированного моделирования имитаторов льда для изготовления моделей обледенения методом лазерной стереолитографии.

Исходные данные для математического моделирования обледенения

Для изготовления моделей обледенения методом лазерной стереолитографии необходима пространственная (трехмерная) модель детали, имитирующей наледь. Исходя из опыта, в процессе экспериментальной отработки влияния обледенения на конкретную аэродинамику одной модели исследуется более 20 различных форм льда. В следствие этого необходима разработка параметризированной трехмерной модели формирования обледенения для оперативного изготовления различных конфигураций обледенения. Такая модель за счет заранее разработанных алгоритмов позволит моделировать различные формы льда без существенных затрат времени.

Исходными данными для построения геометрической поверхности, определяющей форму льда, являются наборы сечений. Отдельные сечения строятся по таблицам точек, передаваемых специалистами по аэродинамике как результат измерений реальной наледи, полученной в ходе экспериментальных исследований в аэрохолодильной аэродинамической трубе.

Первым этапом является подготовка исходных данных для формирования сечений. Для решения поставленной задачи разработана методика ввода исходных данных в параметризованную модель наледи. Каждая точка, входящая в состав конечного профиля, формирующего наледь, имеет три параметра x , y , z , определяющие ее пространственное положение.

Ввод параметров x , y , z , осуществляется на основе текстовых файлов с исходными данными о форме льда в различных сечениях. Формат файла данных представляет собой набор записей в виде строк с тремя координатами каждой точки. Файл данных считывается в рабочую структуру системы. Она представляет собой таблицу, где ее строки определяют координаты точек профиля, а столбцы – варианты наборов точек (рис. 1).

Согласно данным управляющей таблицы происходит присваивание зна-

x1 (mm)	7.0531	20.8239	30.7971	32.1017	2.3056	1.8439	2.8986	6.1363	4490.1	8436.5
y1 (mm)	24.0112	31.6636	35.6986	34.1727	-13.9826	11.3785	10.543	15.4676	23.7444	11.2205
z1 (mm)	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	-46.024	-23.4252
x2 (mm)	4.157	16.4966	25.7246	27.7005	4.955	0.5408	1.4493	3.5971	4490.1	8436.5
y2 (mm)	18.8386	28.3989	32.5653	32.7338	-20.3374	6.6807	6.6799	10.7914	28.2843	16.3352
z2 (mm)	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	-49.6991	-28.8219
x3 (mm)	2.3327	13.488	19.5652	24.7778	8.8829	0.0007	0.3823	1.4309	4490.1	8436.5
y3 (mm)	13.5	25.6805	29.7918	30.2158	-26.3263	-0.0805	1.4059	5.3957	32.1083	20.6918
z3 (mm)	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	-53.2045	-33.3188
x4 (mm)	0.3394	10.8681	14.8551	19.6493	13.2647	0.9699	-0.0362	-0.0026	4490.1	8436.5
y4 (mm)	7.805	22.9627	25.2475	27.6978	-32.483	-7.0362	-0.0349	0.0597	36.835	25.7956
z4 (mm)	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	-57.2323	-35.8275
x5 (mm)	0.0509	7.2848	10.8696	16.3616	16.7506	2.8778	1.087	1.4944	4490.1	8436.5
y5 (mm)	0.0019	19.5209	21.4023	24.8201	-36.7012	-12.625	-2.8246	-3.2374	40.3164	33.3556
z5 (mm)	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	4490.1	8436.5	10967.5	13947.1	-61.2732	-39.2298
x6 (mm)	0.8838	4.8611	6.1594	10.8813	19.547	8.2972	2.1739	3.002	4490.1	8436.5
y6 (mm)	-6.9055	14.8183	16.1538	20.1439	-41.8133	-18.7498	-6.3533	-8.2734	45.5679	38.0968

Рис. 1. Управляющая таблица параметров

¹ «Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13009».

чений параметров – координат точек аэродинамического профиля льда. Число точек, определяющих аэродинамический профиль, может быть разным. В дереве параметризированной модели льда присутствует полный массив, состоящий из считанного набора точек, в том числе и тех, которые не используются в данном конкретном сечении. Эти значения задаются на этапе формирования управляющей таблицы.

Генерация сечения описывающего форму льда

Формирование профиля льда осуществляется путем построения гладкого сплайна по заданному в таблице набору точек относительно абсолютной системы координат. Сплайн строится методом аппроксимации с точностью, зависящей от точности описания координат исходного массива точек. При формировании сплайна, обеспечивается непрерывность вектора касательной и кривизны по всей длине кривой. Степень гладкости зависит от требований к построению внешних продольных обводов аэродинамических поверхностей.

В качестве математического описания сплайна используется составная кривая Безье третьей степени, каждый сегмент которой описывается следующим выражением [2]:

$$\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{R}_{1i}(1-t)^3 + 3\mathbf{R}_{2i}t(1-t)^2 + 3\mathbf{R}_{3i}t^2(1-t) + \mathbf{R}_{4i}t^3,$$

где i – номер сегмента составной кривой Безье ($i = 1, \dots, N$), N – общее число сегментов составной кривой, t – параметр сплайна ($0 \leq t \leq 1$), $\mathbf{r}_i(t)$ – точка на i -ом сегменте кривой, соответствующая параметру t , $\mathbf{R}_{1i}, \mathbf{R}_{2i}, \mathbf{R}_{3i}, \mathbf{R}_{4i}$ – точки характеристической ломаной i -ого сегмента кривой Безье третьей степени.

Для обеспечения непрерывности вектора касательной на стыке двух сегментов параметрической кривой необходимо соблюдение следующего условия [2]:

$$\frac{\mathbf{r}'_i(1)}{|\mathbf{r}'_i(1)|} = \frac{\mathbf{r}'_{i+1}(0)}{|\mathbf{r}'_{i+1}(0)|}, i = 1, \dots, N-1,$$

где $\mathbf{r}'_i(t)$ – первая производная по параметру t .

Условие непрерывности кривизны на стыке двух сегментов параметрической кривой описывается выражением [2]:

$$\frac{|\mathbf{r}'_i(1) \times \mathbf{r}''_i(1)|}{|\mathbf{r}'_i(1)|^3} = \frac{|\mathbf{r}'_{i+1}(0) \times \mathbf{r}''_{i+1}(0)|}{|\mathbf{r}'_{i+1}(0)|^3}, i = 1, \dots, N-1,$$

где $\mathbf{r}''_i(t)$ – вторая производная по параметру t .

Для построения сплайна, аппроксимирующего с заданной точностью и условиями по гладкости, может быть использован алгоритм, описанный в работе [3]. В большинстве современных систем геометрического моделирования имеются соответствующие реализации для построения сплайнов по набору точек.

После формирования исходного сплайна, описывающего форму льда в определенном сечении, необходима операция масштабирования для совмещения с геометрией аэродинамической модели. Для этого в параметрическую структуру введен уникальный

идентификатор, позволяющий осуществлять приведение величины масштаба сплайна к масштабу конкретного аэродинамического профиля. Масштабирование выполняется путем умножения точек профиля на матрицу изотропного масштабирования \mathbf{M}_s .

$\mathbf{M}_s = [\mathbf{M}_{ij}]$, $\mathbf{M}_{ij} = (S \text{ при } i = j, 0 \text{ при } i \neq j)$, $i, j = 1, 2, 3$, где S – величина масштаба.

Дополнительно в параметризованную модель льда включен параметр, отвечающий за изменение формы профиля наледи в заданном сечении. Его значение определяется данными из управляющей таблицы.

Следующим этапом формирования параметризированной модели льда была разработка методики смещения построенного профиля льда к системе координат отличной от абсолютной системы координат. Это необходимо для автоматизированного формирования кривых, описывающих форму льда в нужном месте на пространственной геометрии различных летательных аппаратов. Система координат, отличная от абсолютной, названа локальной. В локальной системе координат задаются точки \mathbf{P}_L для ориентации начала построения сечений. При ориентации профиля в трехмерном пространстве с помощью матрицы поворота \mathbf{M}_R и вектора смещения \mathbf{V} рассчитываются координаты точек \mathbf{P}_M , соответствующие его новому, смещенному положению:

$$\mathbf{P}_M = \mathbf{M}_R \mathbf{P}_L + \mathbf{V}.$$

Ориентация кривых, описывающих различные формы льда в пространстве, осуществляется путем задания отдельных матриц поворота и векторов смещения для каждого конкретного профиля. Привязка матрицы поворота и вектора смещения выполняется с использованием уникального идентификатора, назначенного каждому профилю.

Каталог сечений, определяющих форму льда

Следующим этапом разработки параметризированной модели формы льда стало создание (на базе исполнительного файла) каталога с расширенной копией исходных данных. Структура расширенной копии представляет собой группу примитивов, в данном случае состоящих из массива точек, кривой с функцией масштабирования, а также набора параметров. Входными данными для ее формирования стали: базовая точка – начало локальной системы координат, а также направления осей локальной системы координат, определяющих ориентацию строящегося профиля в пространстве относительно геометрии аэродинамической модели.

Рассмотрим алгоритм работы автоматизированной системы моделирования имитатора льда. Сначала формируется тестовый рабочий файл в САПР с набором пространственных систем координат для каждого отдельного сечения (рис. 2). Импортинг профилей льда в рабочий файл происходит из каталога сечений. Для генерации профиля льда в заданном

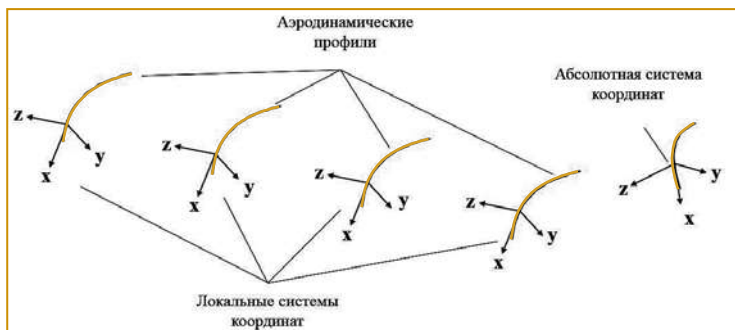


Рис. 2. Импортирование профилей льда в рабочий файл

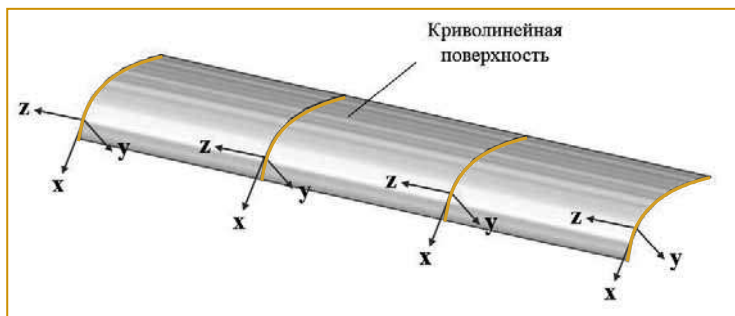


Рис. 3. Генерация криволинейной поверхности льда

сечении пользователю необходимо выбрать локальную систему координат и ее базовую точку. Наличие данных элементов в рабочем файле САПР является обязательным. В результате единичного обращения к базе каталогов в рабочем файле моделируются мас-

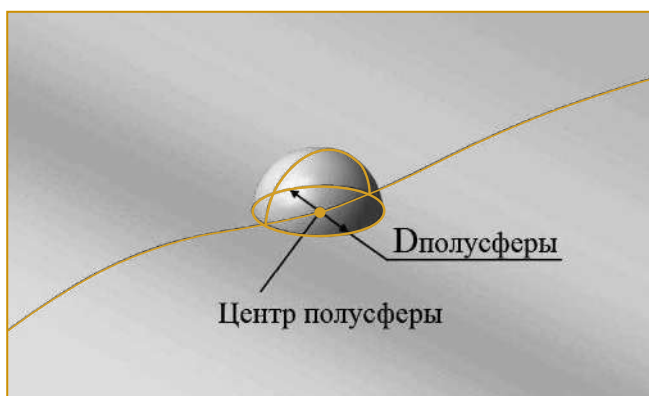


Рис. 4. Характерная бугристость поверхности

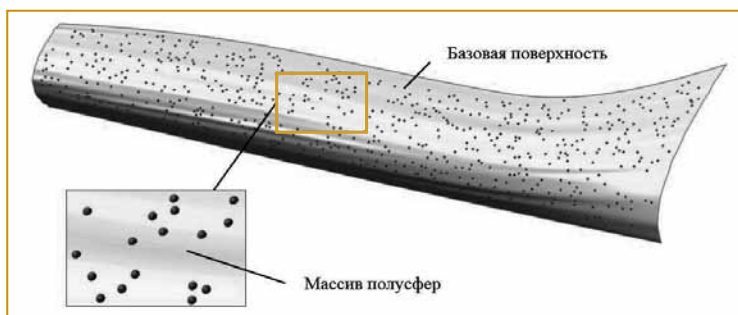


Рис. 5. Формирование шероховатости поверхности льда

сив точек, аэродинамический профиль льда, примитивы масштабирования и параметры, отвечающие за изменение формы и масштаба профиля.

На рис. 2 показаны результаты моделирования в тестовом рабочем файле аэродинамических профилей льда. Смоделированные профили привязаны к локальным системам координат и могут быть свободно ориентированы в пространстве при изменении ориентации соответствующих систем координат.

Построение базовой поверхности льда

Следующим этапом работы с параметризованной моделью льда является создание на базе профилей льда, моделируемых в рабочем файле САПР, криволинейной поверхности.

Генерация криволинейной поверхности льда осуществляется путем построения поверхности по набору сечений (рис. 3). Для этого может быть использован один из известных алгоритмов. Например, метод Кунса [1]. Реализация данной функции присутствует в большинстве современных систем трехмерного моделирования. В ней последовательно выбираются аэродинамические профили, из которых будет состоять будущая поверхность. Так как число профилей будущей поверхности не ограничено и может достигать высоких значений, их ввод в ручном режиме является достаточно трудоемким. Для осуществления данной операции в автоматическом режиме написана специальная макропрограмма. В макропрограмме используется информация о числе и порядке созданных сечений, а также их уникальные идентификаторы. По этой информации формируются входные данные для процедуры построения поверхности.

Формирование шероховатости на базовой поверхности льда

Финальным этапом создания поверхности, характеризующей форму льда, является задание шероховатости соответствующей моделируемой наледи. Под шероховатостью в данном случае понимается наличие нелинейной бугристости на всей аэродинамической поверхности. Бугристость при этом может быть определена как фиксированное число полусфер (рис. 4)

заданного диаметра, располагаемых на криволинейной поверхности. Отличительной особенностью формирования полусфер является принадлежность их центров поверхности льда, наличие гарантированного отступа поверхностей полусфер друг от друга, а также отступа от полусфер от края базовой поверхности льда.

Процесс создания требуемой бугристости был разделен на следующие этапы:

- генерация на поверхности льда массива точек с использованием датчика случайных чисел;

- построение на поверхности льда сфер с центрами в точках сгенерированного массива;
- отсечение участков поверхности сфер, пересекающихся с базовой поверхностью;
- организация вырезов в базовой поверхности в местах пересечения со сферами;
- соединение полученных поверхностей в единый математический объект.

Для решения поставленных задач был написан специальный макрос формирования бугристости поверхности. Результат реализации разработанного макроса представлен на рис. 5. Полученная шероховатость поверхности тестового примера имеет следующие характеристики: число полусфер, формирующих бугристость — 700 ед., минимальное расстояние поверхностей полусфер от края базовой поверхности — 5 мм, минимальное расстояние между полусферами — 1 мм.

Заключение

Разработана параметризованная математическая модель на платформе САПР высокого уровня для автоматизированного формирования имитаторов обледенения с использованием исходных данных о формах льда. Полученный в результате проведенной

работы набор технических решений позволяет формализовать работу конструкторов, проектирующих аэродинамические модели для исследования влияния различных форм льда на летные характеристики разрабатываемых летательных аппаратов.

Результаты работы создают основу для оперативного моделирования различных вариантов обледенения передних кромок крыла, оперения, лопастей винтов, воздухозаборников ТРД и т. д. в экспериментальных исследованиях, проводимых в аэродинамических трубах.

Список литературы

1. *Kashevarov A.V.* On the Hydrothermodynamics of the Icing of a Wing Profile in the Air-Crystalline Flow / Kashevarov A.V., Levchenko V.S., Miller A.B., Potapov Y.F., Stasenko A.L. // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2018. Т. 63. № 6. p. 782-788.
2. *Пратт, М.* Вычислительная геометрия, применение в проектировании и на производстве/М. Пратт., А. Фокс — М.: Мир, 1982. — 304 с.
3. *Белкин В.К.* Аппроксимация табличной функции на плоскости параметрическим кубическим сплайном с использованием метода наименьших квадратов/В.К. Белкин, В.Д. Вермель, П.М. Николаев//Труды ЦАГИ. — 1994. — № 2555. — С. 1–21.

*Левицкий Александр Вячеславович — инженер-конструктор 1 категории,
Николаев Прокопий Михайлович — д-р техн. наук, начальник отдела,
Никуленко Алексей Алексеевич — ведущий инженер-конструктор,
Шардин Антон Олегович — начальник отдела,
Юстус Александр Анатольевич — ведущий инженер ФГУП «ЦАГИ».*
Контактный телефон +7(495)556-26-62.
E-mail: prokopiy.nikolaev@tsagi.ru

«Лаборатория Касперского» получила патент в области искусственного интеллекта

«Лаборатория Касперского» запатентовала технологию на базе машинного обучения для мониторинга промышленных установок и другого сложного оборудования. Технология легла в основу Kaspersky Machine Learning for Anomaly Detection (MLAD) — детектора аномалий, предназначенного для раннего выявления и предотвращения кибератак, отказов оборудования, сбоев технологических процессов и других критических ситуаций на производстве.

В отличие от систем с применением машинного обучения классические системы мониторинга реализуют контроль жестко заданных параметров, что ограничивает возможности оператора объекта: зачастую он может реагировать только на нарушения, развитие которых уже предопределено.

Запатентованная технология «Лаборатории Касперского» и детектор аномалий Kaspersky MLAD предполагают концептуально иной подход. Решение способно анализировать взаимосвязь сигналов телеметрии, «запоминать» их поведение в штатном режиме работы и предсказывать технологические показатели на некоторое время вперед. Если разница между прогнозируемыми и фактическими значениями превышает определенный порог, система информирует о потенциальном отклонении: проблемном оборудовании, неверных действиях персонала или злонамеренных вмешательствах в работу объекта. Это позволяет предотвратить критические ситуации, минимизировать риски простоев, внезапные поломки, а также увеличить срок службы агрегатов.

[Http:// www.kaspersky.ru](http://www.kaspersky.ru)

На комбинате Свеза в Санкт-Петербурге тестируется мобильное приложение, которое моментально определяет число листов шпона и фанеры в стопе готовой продукции

Использование утилиты практически сводит к нулю вероятность претензий клиентов из-за несоответствия числа листов фанеры или попадания в упаковку листов разных толщин.

Алгоритм работы с утилитой прост. Упаковщик делает снимок пачки на мобильный телефон, приложение моментально обрабатывает фотографию и выдает информацию о числе листов фанеры и слоев шпона в них. Если среди листов фанеры обнаруживается несоответствия по толщине, приложение получает сигнал об ошибке. Утилита позволяет моментально определить число листов фанеры в стопе, а также установить соответствие этих листов единой толщине. Иннова-

ция не только устраняет фактор ошибки, но и экономит рабочее время персонала — до последнего времени подсчет листов фанеры в упаковке готовой продукции производился вручную.

Утилита была специально разработана компанией на базе существующей программы, которая автоматизирует подсчет различных предметов. Сотрудники Центра технологического развития (ЦТР) комбината Свеза собственными силами создали шаблон для подсчета листов шпона и форму для перевода этого числа в листы фанеры. В настоящий момент приложение используется на петербургском комбинате в тестовом режиме. В ноябре запланирован окончательный ввод программы в эксплуатацию.

[Http://www.sveza.ru](http://www.sveza.ru)