



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2020, № 1, с. 1-5.

Поступила: 10.06.2020

Окончательный вариант: 13.06.2020

© УлГУ

УДК 004.942

## Моделирование обледенения приемника воздушных давлений с помощью программного комплекса FENSAP-ICE

Алексанин Н.Д.<sup>1,2\*</sup>, Ефременков И.В.<sup>1</sup>

\*[Nickx73@yandex.ru](mailto:Nickx73@yandex.ru)

<sup>1</sup>УлГУ, Ульяновск, Россия

<sup>2</sup> АО «УКБП», Ульяновск, Россия

---

В статье рассматривается численное моделирование обледенения приемника воздушных давлений при помощи программного комплекса FENSAP-ICE. Целями данной работы являются определение проблемных областей приемника, в которых происходит наибольшее нарастание льда и его общей массы, который образуется на поверхности данного устройства. Результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными исследованиями приемника в аэрохолодильной трубе.

**Ключевые слова:** обледенение, численное моделирование, приемник воздушных давлений, математическое моделирование

---

### Введение

В авиации, в основе одного из самых распространенных способов вычисления приборной скорости летательного аппарата лежит аэрометрический метод. При помощи приемника воздушных давлений, измеряется скоростной напор встречного потока воздуха, действующего на летательный аппарат. Под скоростным напором ( $q$ ) понимается полное давление потока воздуха ( $P_n$ ) за вычетом атмосферного ( $P_{ст}$ ):  $q = P_n - P_{ст}$ . Если не учитывать сжимаемость воздуха, то приборную скорость ( $V_{пр}$ ) можно получить следующим образом:

$$q = \frac{\rho V_{пр}^2}{2}, \text{ откуда } V_{пр} = \sqrt{\frac{2q}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(P_n - P_{ст})}{\rho}} \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха

Известно, что во время полета на различных высотах при низких температурах воздуха на поверхности отдельных частей летательного аппарата (крыло, руль высоты, возду-

хозаборники и т.п.) происходит образование льда, которое также затрагивает и поверхность приемника воздушных давлений.

Образование льда на поверхности приемника, нарушает правильное восприятие им воздушного потока, так как в процессе обледенения может произойти закупорка льдом воспринимающих каналов приемника, что нарушит адекватное измерение давлений и как следствие приведет либо к неверному значению воздушной скорости, либо к ее полной утрате, что в свою очередь может послужить причиной катастрофической ситуации. Ко всему прочему, образование льда на стойке приемника, как показывает практика, нарушает восприятие статического давления. При проектировании системы обогрева важно определить области на поверхности приемника, в которых происходит наибольшее нарастание льда, определить массу льда и понять какой граничной (минимальной) мощностью должен обладать обогрев, чтобы устранить проблему обледенения.

## 1. Исходные данные и этапы расчета

В качестве объекта исследования был взят, многофункциональный приемник воздушных давлений МПВД с двухконтурным обогревом. Исследование обледенения выполнялось в соответствии с заданными режимами набегающего потока, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы исследования

№ режима	Скорость потока $V_{п}$ , м/с	Высота $H$ , м	Давление $P_{п}$ , Па	Температура набегающего потока $T_{п}$ , К	Водность LWC, г/м <sup>3</sup>	Диаметр капель $d_{к}$ , мкм	Время обледенения $t$ , сек
1	85	3000	70123	268,65	0,26	7	600
2	112	4000	61661	262,15	0,24	10	600
3	112	5000	54052	255,65	0,42	15	600
4	139	6000	47217	249,15	0,42	15	600

Моделирование было выполнено в программном комплексе ANSYS FENSAP-ICE и включало следующие этапы:

- Расчет аэродинамики приемника (содержит в основе численные решения уравнений Навье-Стокса с моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса или Эйлера);
- расчет параметров движения и осаждения водной среды в воздушном течении с использованием модуля DROP3D программного пакета ANSYS FENSAP-ICE (осуществляется в Эйлеровой постановке);
- расчет формы льдообразования с использованием модуля ICE3D программного пакета ANSYS FENSAP-ICE (в основе расчета формы льдообразования принимается термодинамическая модель Мессингера).

Для расчета в программном комплексе Siemens NX была построена 3D-модель приемника на рис. 1. В сеточном генераторе Ansys Meshing была создана тетраэдральная сетка, состоящая из 497256 конечных элементов со сгущением в областях камер восприятия полного и статического давлений. Модель турбулентности, применяемая в расчетах – Спаларт-Аллмарас. Шероховатость поверхности приемника –  $R_a 0,8$ . Расчет выполнен в стационарном режиме. Критерий схождения –  $10^{-6}$ . Физическая модель состояния воздуха – идеальный газ. Для приемника были заданы граничные условия первого рода – Temperature, K. В расчете принималось только однофазное состояние частиц (водные капли). Продолжительность обледенения для всех режимов – 600 с.

Все параметры атмосферы взяты по ГОСТ–4401 в соответствии с выбранной высотой полета.

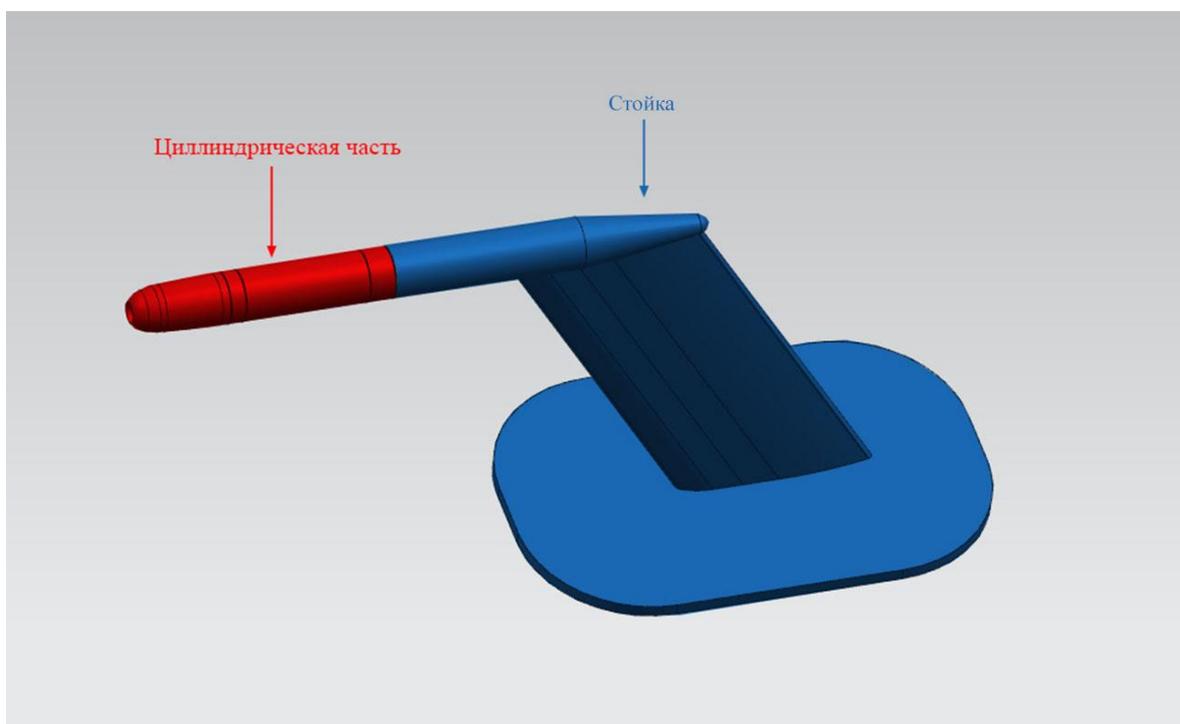


Рис. 1. Области деления приемника

## 2. Результаты расчета

Полученные распределения льда по поверхности приемника при некоторых режимах исследования в FENSAP-ICE и сравнение их с экспериментальными исследованиями в аэрохолодильной трубе показаны на рис. 2. Видно, что при численном моделировании и при натуральных исследованиях лёд образуется приблизительно в одних и тех же местах. Самое большое его скопление оказывается на задней части стойки приемника. Из этого следует, что при проектировании системы обогрева, эту область приемника следует обеспечить более мощным обогревом, чем его цилиндрическую (воспринимающую) часть, где обледенение происходит менее интенсивно.

Общая масса льда в зависимости от режима исследования, а также масса льда в зависимости от части приемника представлена в таблице 2.

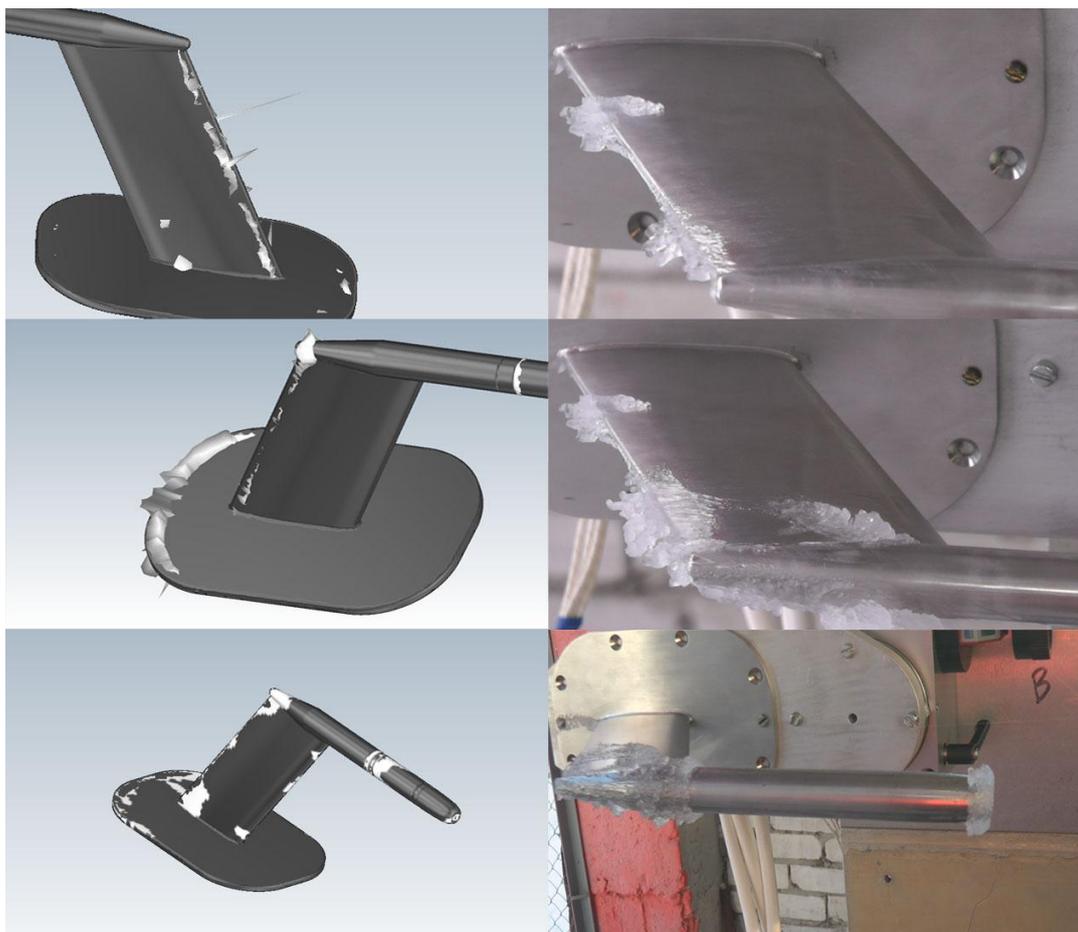


Рис. 2. Полученные распределения льда по поверхности приемника

Таблица 2. Общая масса льда

№ режима	Общая масса льда, М (кг)		
	Стойка	Цилиндрическая часть (воспринимающая область)	Общая масса льда
1	0,036	0,004	0,040
2	0,024	0,003	0,027
3	0,023	0,002	0,025
4	0,011	0,001	0,012

## Заключение

В ходе исследования обледенения приемника воздушных давлений удалось выяснить, что при заданных режимах работы программный комплекс FENSAP-ICE позволяет с достаточной точностью выявить области образования льда на поверхности приемника воз-

душных давлений, что в дальнейшем будет полезным при проектировании противообледенительных систем для подобных устройств. Также полученные данные будут использованы в составлении общей численной методики исследования приемников воздушных давлений. К сожалению, пока нельзя точно утверждать о сходимости толщины льда и его общей массы полученной численным путем в FENSAP-ICE и при реальных исследованиях, работа в этом направлении ведется.

## Список литературы

1. Агульник А.Б., Индруленайте Я.А. *Опыт применения программного комплекса FENSAP-ICE для моделирования обледенения крыла самолета*. Полярная механика, 2016.
2. Кучерявый А.А. *Авионика: Учебное пособие*. СПб.: Издательство «Лань», 2016. 452 с. (+ вклейка, 8 с.). (Учебники для вузов. Специальная литература).
3. Galal Mohamed Galal Ibrahim. *Numerical investigation of atmospheric icing on wind turbine blades*. Memorial University of Newfoundland St. John's Newfoundland and Labrador. March 2017.
4. Hong Zhi Wang. *3D Conjugate Heat Transfer Simulation of Aircraft Hot-Air Anti-Icing Systems*. Department of Mechanical Engineering McGill University Montreal, Québec, 2005.
5. Nagappan, Nikisha Maria, "Numerical Modeling of Anti-Icing Using an Array of Heated Synthetic Jets". 2013. Dissertations and Theses.
6. Wagdi G. Habashi, François Morency and Héloïse Beaugendre. *FENSAP-ICE: a comprehensive 3D Simulation Tool for In-flight Icing*. Computational Fluid Dynamics Laboratory, McGill University. December 2001.