

02, февраль 2016

УДК 629.7.067.5

**Экспериментальная отработка процесса калибровки потока,
содержащего ледяные кристаллы, в обеспечение проведения
сертификационных испытаний**

*Горячев П.А., магистр
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и
жизнеобеспечения»*

*Научный руководитель: Жердев А.А., д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Жулин В.Г., научный сотрудник
Россия, 111116, г. Москва, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
отделение 300 «Авиационные газотурбинные двигатели»*

*Савенков В.В., младший научный сотрудник
Россия, 111116, г. Москва, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,
отделение 300 «Авиационные газотурбинные двигатели»
crio@bmstu.ru*

Введение

В ЦИАМ выполняется работа по экспериментальной отработке методики процесса калибровки потока, содержащего ледяные кристаллы (ЛК), на демонстрационном стенде Ц-2 в обеспечение проведения сертификационных испытаний перспективных авиационных двигателей в «расширенных» условиях обледенения в соответствии с отечественными и зарубежными нормативными документами (АП-33.68, FAR-33, CS-E) [1,2,3].

На основе выработанных технических требований выпущено ТЗ на проведение калибровочных испытаний потока, содержащего ЛК, на стенде Ц-2, и выполнена отладка технологических процессов и оценка возможных режимов работы систем генерирования, транспортировки и ввода ЛК в поток, определены размеры генерируемых ЛК.

Цель данной работы заключается в определении эффективности возможных методов проведения калибровочных испытаний потока, содержащего кристаллы льда, так как от объективности и достоверности экспериментальных данных, получаемых в

процессе калибровочных испытаний потока, главным образом зависит возможность подтверждения соответствия имитируемых условий нормативным требованиям и успешность выполнения сертификационных испытаний исследуемого объекта испытаний.

В дальнейшем на основе опыта выполнения калибровочных испытаний потока на демонстрационном стенде Ц-2 необходимо разработать рекомендации и методику для проведения калибровочных испытаний потока на высотно-климатическом стенде Ц-1А в обеспечение выполнения сертификационных испытаний новейших образцов авиационных техники в “расширенных” условиях обледенения.

В данной статье представлены основные результаты калибровочных испытаний потока при экспериментальном определении степени неравномерности распределения ЛК в потоке по сечению АДТ.

1. Экспериментальная отработка методов калибровки потока, содержащего ледяные кристаллы.

В процессе выполнения работы экспериментально опробованы два метода оценки степени неравномерности распределения ЛК в потоке по сечению АДТ:

а) Определение степени неравномерности распределения ЛК без впрыска воды и при положительной температуре основного потока воздуха.

Транспортировка ЛК осуществлялась в потоке пассивного воздуха семью эжектирующими устройствами из 19 возможных. При проведении испытаний распыл потока с ЛК осуществлялся из семи сопел, расположенных в центральной части сечения АДТ.

Вылетая из сопел, ЛК продолжали движение в струе потока воздуха, выходящей из сопел. При движении в теплой среде (температура основного потока: +12°C) по тракту и на срезе АДТ происходил нагрев потока воздуха и ЛК, вследствие чего ЛК подтаивали и осаждались на прутьях решетки (рис. 1).

В процессе проведения испытаний оценена область потока, в которой присутствовали ЛК. Для решения этой задачи на расстоянии 450 мм от среза АДТ установлена калибровочная решётка. Диаметр пятна обледенения на калибровочной решётке составил ~ 350 мм.

Наросты льда на мерной решётке



Рис. 1. Общий вид мерной решётки с наростами льда

Выполненные испытания (рис. 1) подтверждают возможность выполнения калибровки потока данным методом, однако расстояние от коллектора ЛК до сечения решётки в данной компоновке составляло около 1000 мм, что не соответствует компоновке оборудования при выполнении испытаний на реальном объекте.

Повторные испытания, выполненные в компоновке, соответствующей расстоянию от коллектора ЛК до сечения решётки 5400 мм, не позволило получить нарастания льда на решётке, что свидетельствует о том, что ЛК достигали поверхности решётки в расплавленном состоянии.

Расчётные оценки подплавления ЛК внутри АДТ показывают, что улучшение процесса нарастания льда на решётке требуется выполнения дополнительных калибровочных испытаний потока с вариацией температуры основного потока АДТ в пределах от $+5^{\circ}\text{C}$ до $+15^{\circ}\text{C}$ (при фиксированной скорости набегающего потока и расстояния от коллектора ледяных кристаллов до мерной решётки).

В процессе выполнения дальнейшей работы следует экспериментально определить величину температуры основного потока, требуемой для получения величин ледяных наростов, в процессе проведения испытаний, достаточных для выполнения оценки качественного и количественного распределения ЛК в потоке на срезе АДТ. Кроме того, следует выполнить оптимизацию положения сопел для распыла ЛК при условии удовлетворительной степени неравномерности распределения ЛК в сечении мерной решётки на каждом режиме испытаний.

б) Определение степени неравномерности распределения ЛК в условиях смеси фаз и при отрицательной температуре несущего потока воздуха.

Для реализации данного метода калибровки потока на стенде Ц-2 смонтирован участок АДТ с водораспыливающим коллектором. На срезе АДТ установлена мерная решётка. Расстояние от коллектора для распыла ЛК и мерной решетки составляет ~ 5м.

На рисунке 2 представлен общий вид установки с установленным водораспыливающим коллектором и мерной решёткой.

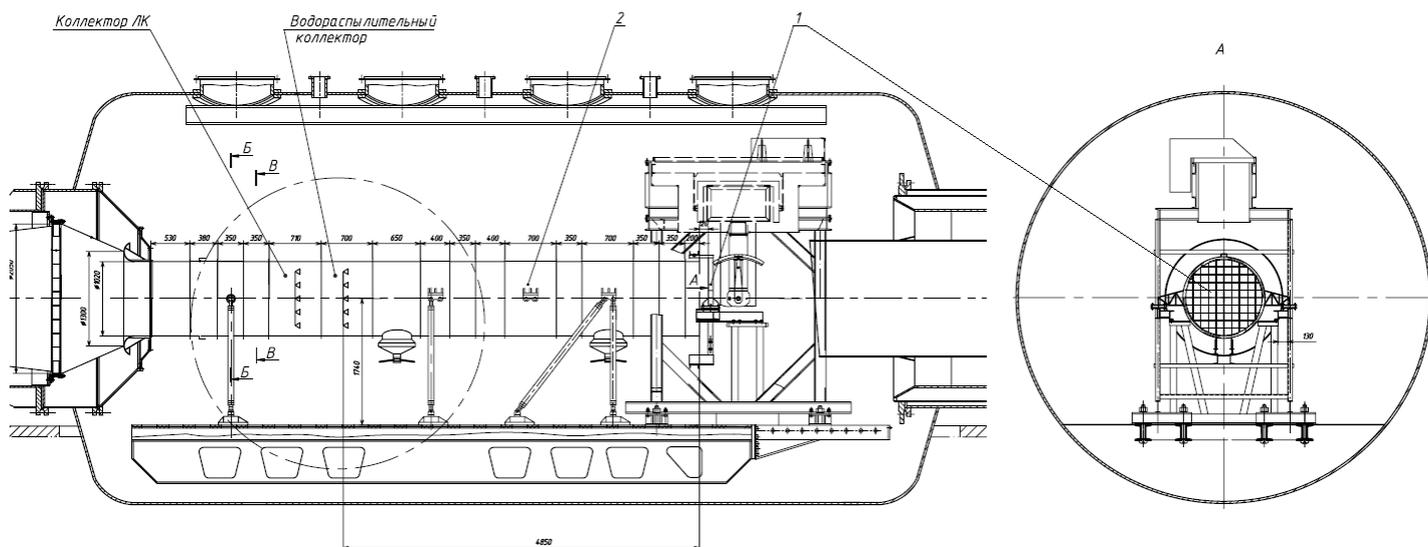


Рис.2. Общий вид установки для проведения калибровочных испытаний потока с ЛК: 1 – мерная решётка, 2 – АДТ

Транспортировка ЛК осуществлялась в потоке пассивного воздуха семью эжектирующими устройства из 19 возможных. При проведении испытаний распыл потока с ЛК осуществлялся из семи сопел, расположенных в центральной части сечения АДТ.

Распыл капель воды в потоке осуществлялся форсунками водораспыливающего коллектора.

В соответствии с представленной схемой на рисунке 2 на расстоянии от среза АДТ (120мм) размещена решетка. Решетка изготовлена из прутка 5,2 мм с ячейкой 110 мм.

В таблице представлены режимы калибровочных испытаний потока содержащего ЛК.

№ режима	Содержание в потоке воздуха жидких капель воды LWC, г/м ³	Содержание в потоке воздуха кристаллов льда IWC, г/м ³	Скорость потока в АДТ V _п , м/с	Температура потока в АДТ T _п , °C
1	0,3	1	27	-22
2	0,3	1,17	63	-22

После каждого режима калибровочных испытаний выполнен обмер получившихся ледяных наростов на прутьях мерной решётки, и определена степень неравномерности распределения ЛК и капель воды в сечении мерной решётки.

На рисунке 3 и 4 представлены распределения величин наростов льда на мерной решётке.

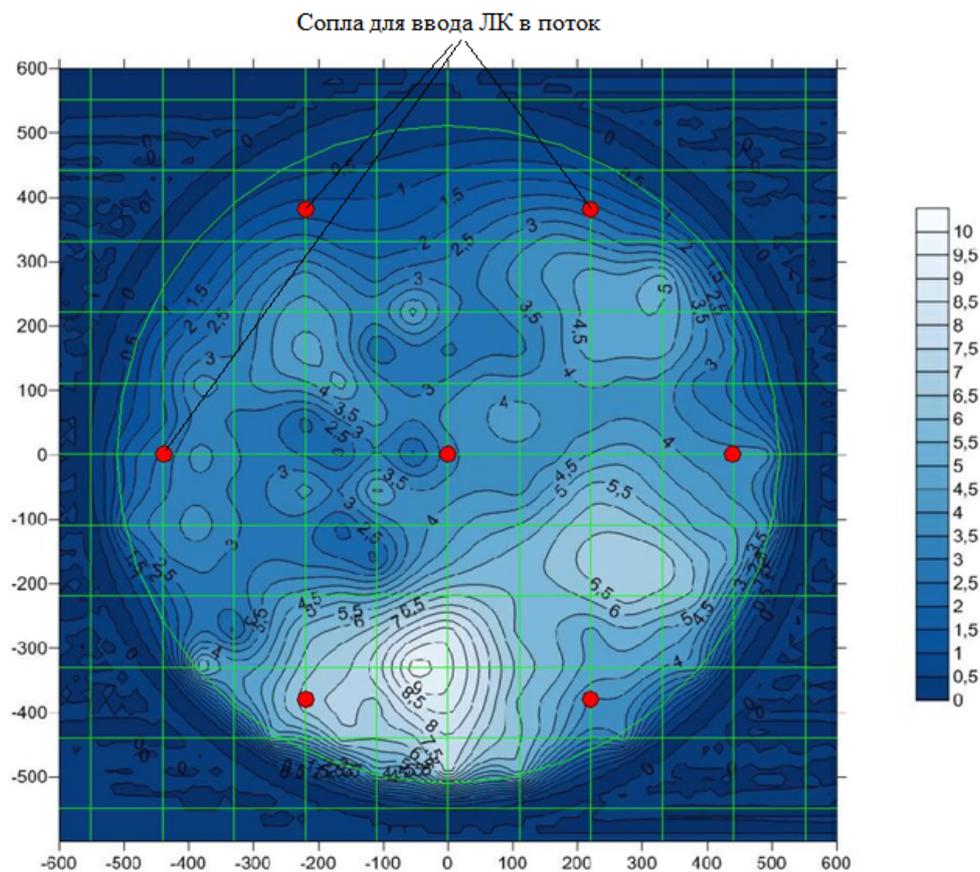


Рис. 3. Распределение величин наростов льда на прутьях мерной решётки (режим №1). Степень неравномерности распределения ЛК: ±23%

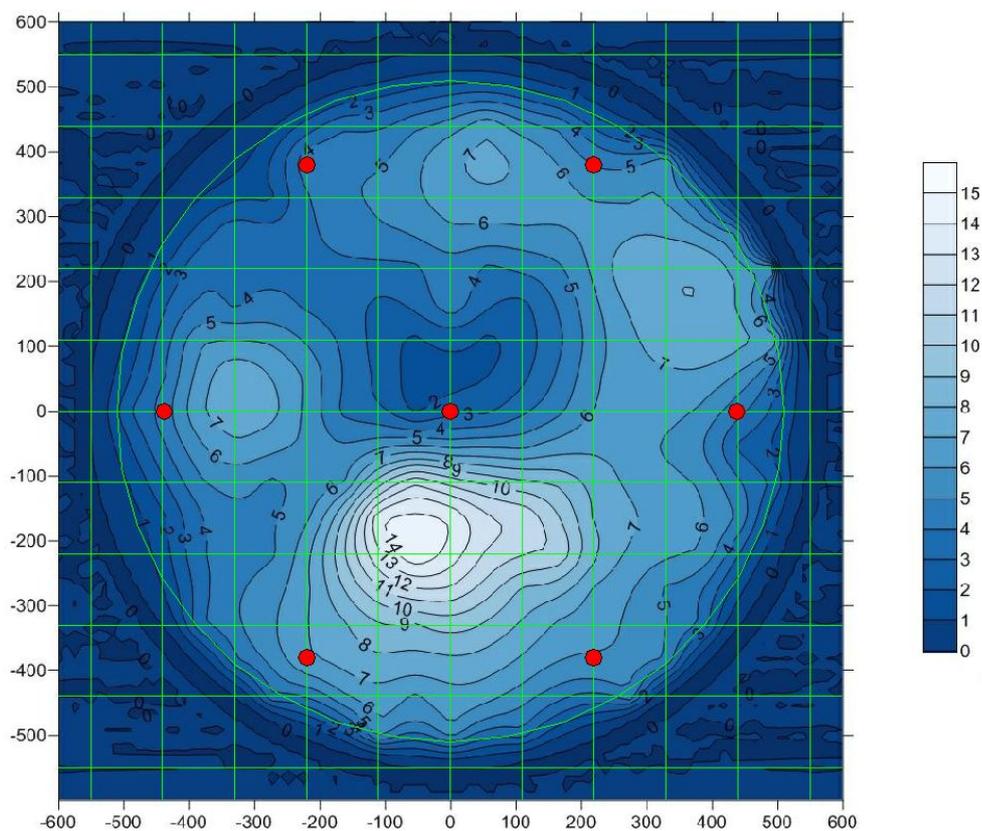


Рис. 4. Распределение величин наростов льда на прутьях мерной решётки (режим №2). Степень неравномерности распределения ЛК в сечении мерной решётки: $\pm 26\%$

В процессе выполнения режимов калибровочных испытаний отмечена трудность в определении вклада в общую величину ледяного нароста отдельно кристаллической и жидкой фаз при совместной работе водораспыливающего коллектора и коллектора для ввода ЛК в поток.

Экспериментальные данные, полученные в процессе проведения калибровочных испытаний, в значительной степени отражают неравномерность распределения капель воды в потоке в сечении мерной решётки на срезе АДТ, поэтому в процессе дальнейших испытаний следует скорректировать настройки водораспыливающего коллектора для получения оптимальной степени равномерности распределения водности.

Применение данного метода калибровки потока в отличие от метода, описанного ранее, требует предварительной калибровки потока, содержащего капли воды, причем степень неравномерности распределения жидкой фазы в сечении потока должна быть значительно ниже, чем степень неравномерности распределения ЛК по сечению потока. Необходимо отметить, что при реализации данного метода проведения калибровочных

испытаний требуются дополнительные затраты на охлаждение основного потока воздуха для поддержания отрицательной температуры основного потока в АДТ.

Таким образом, требуется выполнение ряда дополнительных испытаний для отладки равномерности распределения жидкой фазы (LWC) по сечению потока.

Выводы

1. Выполнены калибровочные испытания потока, содержащего ЛК, на равномерность распределения кристаллов в сечении выхода из АДТ двумя методами:

- без впрыска воды и при положительной температуре основного потока воздуха,
- в условиях смеси фаз и при отрицательной температуре несущего потока воздуха.

2. Отработана методика обработки и представления экспериментальных данных, получаемых в процессе проведения калибровочных испытаний.

3. Показано, что калибровка потока, содержащего ЛК, по методу без впрыска воды и при положительной температуре основного потока воздуха

- позволяет получить реальное распределение ЛК в потоке,
- требует выполнения дополнительных калибровок с целью определения величины температуры основного потока, требуемой для эффективного роста ледяных наростов без подтаивания.

4. Показано, что калибровка потока, содержащего ЛК, в условиях смеси фаз и при отрицательной температуре несущего потока воздуха

- не позволяет получить наросты льда при отрицательной температуре потока и при отсутствии жидкой фазы в потоке,
- позволяет эффективно улавливать ЛК поверхностью мерной решётки в условиях смеси фаз,
- требует предварительной калибровки потока содержащего капли воды, причем степень неравномерности распределения жидкой фазы в сечении потока должна быть значительно ниже, чем степень неравномерности распределения ЛК по сечению потока.

5. При проведении дальнейших исследований рекомендуется применение метода калибровки потока по равномерности распределения ЛК без впрыска воды и при положительной температуре основного потока воздуха.

6. В процессе выполнения дальнейших работ требуется выполнение дополнительных калибровочных испытаний с целью определения оптимальной температуры основного потока АДТ (в пределах от +5°C до +15°C) для улучшения условий формирования льда.

Список литературы

- [1]. Airplane and Engine Certification Requirements in Supercooled Large Drop, Mixed Phase, and Ice Crystal Icing Conditions. Final Rule. Docket No. FAA–2014–0636, Federal Register, 2014. Available at: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2014-11-04/pdf/2014-25789.pdf> (accessed 06.07.2015).
- [2]. Draft Decision amending CS-E, CS-E Book 1, Subpart E – Turbines engines type substantiation, CS-E 780 Icing Condition, 2015. Available at: <https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/CS-E%20Amendment%204%20-%20Change%20Information.pdf> (accessed 06.07.2015).
- [3]. Авиационные правила, часть 33. Нормы лётной годности двигателей воздушных судов, п.33.68 (а*), Международный авиационный комитет, 2011. Режим доступа: http://standartgost.ru/g/%D0%90%D0%B2%D0%B8%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0_%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C_33 (дата обращения 06.07.2015).