

УДК 629.7.067.5:621.452.322.037.015-52

**Ф.Ш. ГЕЛЬМЕДОВ, А.В. ГОРЯЧЕВ, Н.Е. ГОРЯЧЕВА, А.И. ЛАНШИН,  
Е.В. ПАВЛЮКОВ, С.Б. ПЕТРОВ, А.В. ХАРЛАМОВ, С.В. ЧИВАНОВ**

*ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И.Баранова», Москва, Россия*

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ОБЛЕДЕНЕНИЯ И ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРДД**

В ЦИАМ им. П.И. Баранова созданы и откалиброваны стенды, позволяющие имитировать условия максимально длительного и максимально кратковременного обледенения в соответствии с Российскими и Зарубежными нормативными документами в широком диапазоне режимных параметров. На стендах возможно проведение на современном уровне испытаний в условиях обледенения авиационных двигателей, а также других объектов авиационной техники в оптимальных с технико-экономической точки зрения условиях. На откалиброванном стенде Ц-1А проведены испытания экспериментального двигателя в условиях искусственного обледенения. На основе обработки экспериментальных данных получены количественные оценки эффектов загромождения проточных частей ледяными наростами и снижения к.п.д. вентилятора. Проведен расчётный анализ по оптимизации закона управления двигателем.

**обледенение, противообледенительная защита, газотурбинный двигатель, экспериментальные исследования**

#### **Введение**

При эксплуатации самолетов с ТРДД в сложных метеорологических условиях возможно обледенение двигателя, сопровождающееся образованием ледяных наростов и существенным изменением форм лопаток рабочего колеса и спрямляющего аппарата вентилятора, подпорных ступеней (КНД) и других входных элементов ТРДД. Этот процесс значительно влияет на аэродинамические и аэроупругие характеристики вентилятора и КНД, приводя к снижению тяги двигателя, повышению температуры газа перед турбиной, росту вибраций конструкции ТРДД. Для обеспечения приемлемого уровня безопасности полётов необходимо обеспечить эффективную работу противообледенительной защиты (ПОЗ) двигателя, продемонстрировав соответствие требованиям российских или зарубежных нормативных документов. Наиболее надёжным способом подтверждения эффективности ПОЗ является проведение испытаний на специальных наземных стендах в условиях искусственного обледенения, по-

скольку при этом возможно точное моделирование нормированных условий при максимальной информативности испытаний.

В ЦИАМ им. П.И. Баранова, как в основном испытательном центре России, на основе высотных термобарокамер на протяжении длительного времени функционирует специальная экспериментальная база [1]. Она включает стенды У-9М, Ц-2, Ц-1А (табл. 1).

Таблица 1  
Параметры стендов для испытаний объектов в условиях обледенения

Стенд	У-9М	Ц-2	Ц-1А
Минимальная температура потока, °С	-40	-30	-30
Максимальная имитируемая высота, км	7	15	15
Макс. число Маха	0,3	0,85	0,6
Водность, г/м <sup>3</sup>	до 3		
Дисперсность, мкм	15 – 50		
Имитируемые условия обледенения	Макс. длительные и макс. кратковременные		

В последнее время указанные стенды подверглись глубокой модернизации с целью обеспечения

возможности проведения испытаний в соответствии с изменившимися нормативными требованиями.

Стенды позволяют проводить сертификационные испытания в соответствии с Российскими (АП-25, АП-33), так и зарубежными (FAR-25, FAR-33, CS-25, CS-E) нормативными документами.

На указанных стендах были проведены испытания ряда авиационных двигателей в условиях обледенения и оценена эффективность их противообледенительной защиты.

## 1. Конструкция стендов

Все указанные в табл. 1 стенды имеют аналогичную конструкцию, поэтому их устройство показано на примере стенда Ц-1А.

Основным элементом стенда является аэродинамическая труба (АДТ), расположенная внутри термобарокамеры. На выходе из АДТ помещается испытуемый двигатель. Возможно проведение испытаний в компоновке как с подсоединённым, так и с отсоединённым трубопроводом [1].

На вход в АДТ подаётся холодный воздух от высоко-компрессорной станции (ВКС), влажность воздуха в сечении объекта поддерживается на уровне 95...100%. Обводнение потока осуществляется путём распыления воды через форсунки, смонтированные на водораспылителем коллекторе. Имитация требуемой высоты осуществляется за счёт отсоса воздуха из ТБК эксгаустерами через выхлопной диффузор. Измерение параметров воздушного потока (давление, скорость, температура, влажность) производится с помощью датчиков, установленных в мерном участке АДТ.

Схема коллектора для распыления воды показана на рис. 1, а. Конструкция коллектора предусматривает установку 48 форсунок. Для повышения равномерности распыления воды по сечению потенциальной части струи потока на форсунках установлены генераторы локальных вихрей (рис. 1, б).

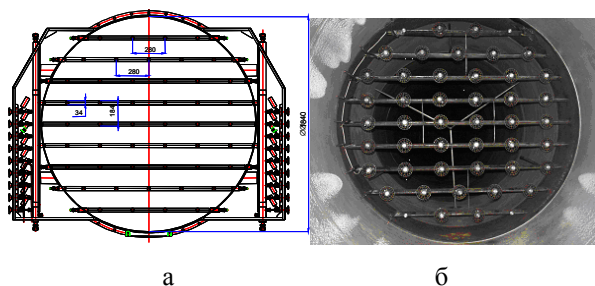


Рис. 1. Водораспылительный коллектор: а – схема, б – генераторы локальных вихрей

## 2. Методика проведения испытаний

Методика проведения калибровочных и основных испытаний рассматривается на примере испытаний экспериментального ТРДД.

Конфигурация аэродинамической трубы (АДТ) оптимизируется расчётным путём. Целью оптимизации является минимизация толщины пограничного слоя, обеспечение максимального размера потенциального ядра потока в месте установки двигателя, достижение требуемой степени переохлаждения капель и недопущение чрезмерного выпадения капель на стенку АДТ.

Перед проведением испытаний объекта проводится калибровка стенда. Калибровочные испытания включают: аэродинамическую калибровку, калибровку стенда на равномерность обводнения потока, калибровку стенда по водности (LWC) и размеру капель ( $D_{50}$  и MVD). В результате калибровки должны быть получены градуировочные зависимости, режимные и настроечные значения параметров, обеспечивающие требуемые характеристики газодинамического и обводненного потока. Ниже представлены результаты калибровочных испытаний стенда Ц-1А.

**2.1. Аэродинамическая калибровка.** Аэродинамическая калибровка стенда проводится без установленного двигателя. В результате проведения калибровок были получены следующие результаты:

- В ядре потока неравномерность распределения полного давления не превышает 1% и величина интенсивности продольных пульсаций полного дав-

ления в месте установки объекта испытаний не превышает 1%.

- Граница потенциального ядра потока в месте установки объекта испытаний в горизонтальной плоскости составляет  $\pm 500$  мм, а в вертикальной плоскости  $\pm 600$  мм от оси АДТ.

**2.2. Калибровка на равномерность обводнения.** Целью калибровки на равномерность обводнения потока является получение равномерно обводненного потока в сечении установки объекта испытаний.

В сечении установки объекта на выходе из АДТ монтировалась мерная решётка, изготовленная из прутка 5 мм. Во время испытаний решётка обдувалась охлажденным водовоздушным потоком, а затем проводился обмер толщины наростшего слоя льда с помощью штангенциркуля. Проводилась доводка коллектора для распыления воды с точки зрения получения наилучшей равномерности.

В результате получены распределения толщины льда (рис. 2) и относительные значения водности на решётке во всей области изменения скорости на входе в двигатель.

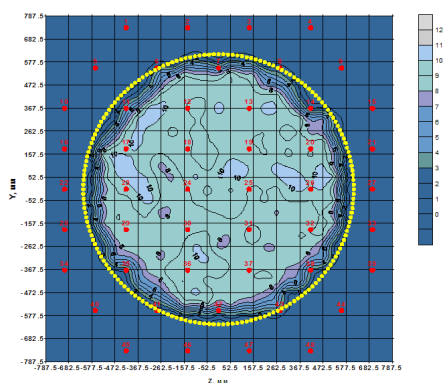


Рис. 2. Распределение толщины льда на решётке при скорости потока 182 м/с

На рис. 2 представлены данные для скорости 182 м/с. Распределение толщин льда на решётке показывает, что неравномерность распределения относительного значения водности на данных режимах не превышает  $\pm 25\%$  в ядре потока. На рис. 2 красными точками показано геометрическое

положение форсунок водного коллектора относительно решётки.

**2.3. Калибровка по водности и размеру капель.** Целью калибровки стенда по водности ( $LWC$ ) и размеру капель ( $D_{cp}$  и  $MVD$ ) является определение условий, при которых коллектор для распыления воды генерирует капли необходимого размера с заданной водностью равномерно по сечению потока.

При проведении калибровки по водности и размеру капель двигатель стенд не устанавливается, а во входном сечении АДТ монтируются измерительные приборы.

Для измерения водности  $LWC$  и размеров капель (среднеарифметического диаметр  $D_{cp}$  и медианный диаметр  $MVD$ ) использовался прибор фазодоплеровский анализатор частиц (ФДАЧ). Пределы измерения  $D_{cp}$  и  $MVD$  прибором ФДАЧ – от 5 до 250 мкм, а  $LWC$  – до 3 г/м<sup>3</sup>.

Данные по  $LWC$ , замеренные прибором ФДАЧ, в зависимости от  $LWC_{calc}$  представлены на рис. 3.

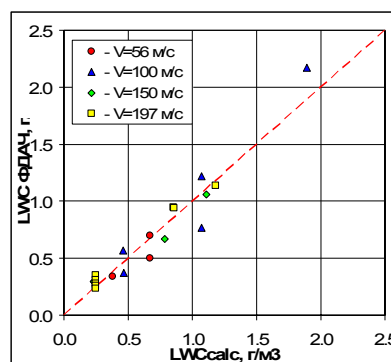


Рис. 3. Зависимость  $LWC_{ФДАЧ}$  от  $LWC_{calc}$

Анализ значений водности (рис. 3), измеренных прибором ФДАЧ, позволяют рекомендовать значение  $LWC_{calibr}$  для оценки водности, рассчитываемое как:

$$LWC_{calibr} = LWC_{calc},$$

где  $LWC_{calibr}$  – водность потока, измеренная прибором ФДАЧ;

$LWC_{calc}$  – водность потока, рассчитанная на основании измерений объёмных расходов воды и воздуха в сечении установки объекта.

На основе измерений размеров капель прибором ФДАЧ построены градуировочные зависимости для среднеарифметического  $D_{cp}$  и медианного  $MVD$  диаметров капель. Одна из таких зависимостей, полученная при скорости потока 197 м/с, представлена на рис. 4.

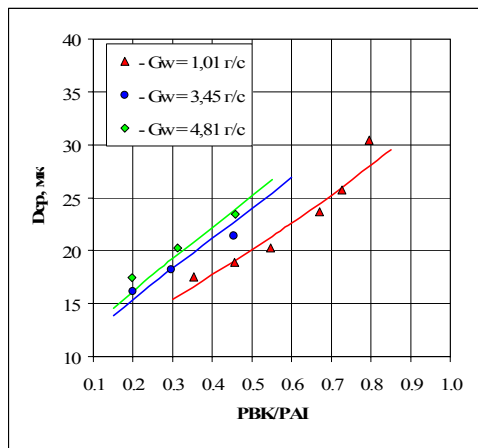


Рис. 4. Зависимость  $D_{cp}$  от  $PBK/PAI$ ,  $V = 197$  м/с

Полученные данные обобщены с помощью корреляционных зависимостей вида:

$$D_{cp} = A \cdot Gw^m / ((PBK/PAI)^n + B);$$

$$MVD = A \cdot Gw^m / ((PBK/PAI)^n + B),$$

где  $Gw$  – расход воды через одну форсунку;

$PBK$  – статическое давление воздуха в ТБК за водовоздушным коллектором;

$PAI$  – давление воздуха перед форсунками;

$A, B, m, n$  – коэффициенты.

Для значений  $D_{cp} \approx 20$  мкм и  $MVD \approx 20$  мкм, характерных при проведении испытаний, абсолютная максимальная ошибка при определении  $D_{cp}$  и  $MVD$  не превышает  $\pm 2,0$  мкм.

### 3. Испытания двигателя

На откалиброванном стенде Ц-1А были проведены испытания экспериментального двигателя в условиях искусственного обледенения.

Были проведены 4 серии испытаний двигателя на разных режимах в условиях обледенения. Условия испытаний: имитируемые высота 2,75 – 4,58 км, и число М полета 0,34 – 0,39, статическая температура

на входе в двигатель  $-18 \dots -26^\circ\text{C}$ , влажность  $LWC$  0,3 – 1,1 г/м<sup>3</sup>, размер капель  $MVD$  15 – 23 мкм, время обводнения 1 – 20 мин., в том числе циклически.

На основании визуального анализа фотоснимков и экспериментальных данных, полученных при испытаниях экспериментального двигателя, выявлены особенности обледенения поверхностей лопаток и проточных частей вентилятора и входа в КНД экспериментального ТРДД.

На поверхности носка кока двигателя наблюдалось нарастание льда толщиной от 15 до 80 мм.

На поверхностях рабочих лопаток вентилятора зафиксировано образование ледяных наростов сложной формы (рис. 5).

В области корыта лопатки происходило образование наростов толщиной до 10 мм. В продолжение испытания наблюдались периодические сбросы льда.

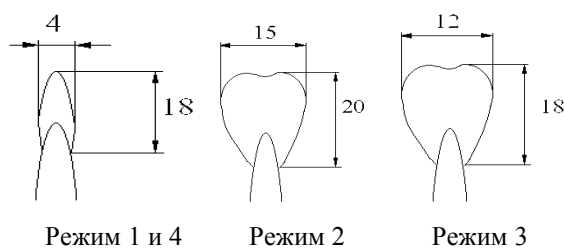


Рис. 5. Формы льда на лопатках вентилятора

На лопатках спрямляющего аппарата наблюдалось образование ледяных перьев длиной до 40 мм, при этом загромождение проходного сечения составляло около 10 – 12%.

### 4. Анализ влияния обледенения на характеристики двигателя

Для расчета характеристик двигателя при обледенении, используется математическая модель ТРДД, базирующаяся на принципах, изложенных в [2]. На основе обработки экспериментальных данных получены количественные оценки эффектов загромождения проточных частей ледяными наростами и снижения к.п.д. вентилятора. При этом получены следующие значения оценочных коэффициентов

тов: загромождения  $K_G = 0,871$ ; снижения к.п.д. вентилятора  $\eta_{ad} = 0,692$ .

На основе проведенного анализа определены значения идентификационных коэффициентов, введенных в программу поверочного расчета характеристик вентилятора с учетом влияния обледенения. Согласно расчетным оценкам, при приведенной частоте вращения вентилятора  $\bar{n}_{np} = 0,8$  в связи с обледенением ожидается следующее изменение параметров вентилятора ТРДД с большой степенью двухконтурности  $m = (\pi^*_{в\ расч} = 1,56)$  в оптимальной точке: уменьшение расхода воздуха – на  $\delta G \approx 20\%$ ; уменьшение степени повышения давления – на  $\delta \pi^* \approx 8\%$ ; снижение КПД – на  $\delta \eta \approx 32\%$ .

Для подпорных ступеней (КНД) принято допущение, что обледенению (равномерному по окружности) подвергаются лишь передние кромки разделительной перегородки и лопаток входного направляющего аппарата (ВНА). Исходя из этого, в качестве основного фактора принято возникновение радиальной неравномерности потока на входе в первую ступень КНД. На этом основании с учетом опыта исследования модельных ступеней с имитацией радиальной неравномерности приняты следующие значения идентификационных коэффициентов:  $K_G = 0,871$ ;  $\bar{\eta}_p = 0,935$ .

Согласно расчетным оценкам, вследствие обледенения при приведенной частоте вращения  $\bar{n}_{np} = 0,8$  происходит следующее изменение параметров КНД: уменьшение расхода воздуха – на  $\delta G \approx 5\%$ ; снижение КПД – на  $\delta \eta \approx 1,5\%$ .

Влияние обледенения вентилятора, КНД и других входных элементов двигателя на изменение тягово-экономических характеристик ТРДД в значительной степени зависит от закона подачи топлива в двигатель.

Для рассмотренного перспективного ТРДД, близкого по схеме и параметрам к эксперименталь-

ному двигателю, испытанному в условиях искусственного обледенения, проведены расчеты его основных параметров в условиях полета  $H = 2 - 6$  км,  $M = 0,3 - 0,5$ , при стандартной температуре атмосферного воздуха и с обледенением при температуре, соответствующей условиям испытаний экспериментального двигателя на стенде Ц-1А, на режимах, характеризующих относительной приведенной частотой вращения вентилятора  $n_{np} = 0.6 \div 0.8$ .

Влияние обледенения оценивалось при 8 разных условиях управления двигателем – табл. 2. Во втором столбце табл. 2 приведен перечень параметров, которые поочередно поддерживались неизменными при оценке влияния обледенения и изменения  $T^*_н$ . В третьем и четвертом столбцах табл. 2 приведены соответствующие значения относительного изменения тяги двигателя  $\delta R$  и температуры газа перед турбиной  $\delta T^*_{c(газ)}$ .

Таблица 2

Оценка влияния обледенения

№	Параметр, поддерживаемый постоянным при наступлении обледенения	$\delta R$ , %	$\delta T^*_{c(газ)}$ , %
1	Приведенная частота вращения вентилятора	–(32÷36)	–(4÷5)
2	Физическая частота вращения вентилятора	–(27÷30)	–(2,5÷4)
3	Крутящий момент на валу ТНД	–(18÷21)	–(0,3÷0,8)
4	Отношение полного давления за турбиной к $P_n$ ( $P^*_m / P_n$ )	–(5÷6)	+(3÷4)
5	Отношение полного давления за вентилятором к $P_n$ ( $P^*_в / P_n$ )	+(6÷7)	+(6,5÷8)
6	Отношение полного давления на выходе из наружного контура к $P_n$	+(5÷6,6)	+(6÷7,5)
7	Перепад давлений в сопле $\pi^*_c = P^*_{см} / P_n$	+(3,4÷5)	+(5,7÷7,1)

Видно, что применение законов управления, предполагающих поддержание заданных значений (при фиксированных  $T_n^*$  и  $\alpha_{PUD}$ ) частоты вращения вентилятора или крутящего момента на валу вентилятора, при оцениваемом обледенении вентилятора и КНД приводит к падению тяги на 30 – 20%. Напротив, поддержание полных давлений за вентилятором, на выходе из наружного контура или на выходе из смесителя в данном случае при обледенении и изменении  $T_n^*$  сопровождается ростом тяги на 3 – 7% вследствие увеличения подачи топлива и роста температуры газа перед турбиной на 6 – 8% с увеличением физической частоты вращения вентилятора на 10,3 – 12%. При необходимом для поддержания тяги двигателя (с точностью 1%) повышении температуры газа перед турбиной (на 6,1%) узлы двигателя, кроме вентилятора и КНД, работают в нормальном режиме, но существенно растёт часовой расход топлива – на 23,4%.

### Заключение

Созданные и откалиброванные в ЦИАМ им. П.И. Баранова стенды У-9М, Ц-2, Ц-1А позволяют имитировать условия максимально длительно и максимально кратковременного обледенения в соответствии с российскими и зарубежными нормативными документами в широком диапазоне режимных параметров. На стендах возможно проведение на современном уровне испытаний в условиях обледенения авиационных двигателей, а также других объектов авиационной техники в оптимальных с технико-экономической точки зрения условиях.

На откалиброванном стенде Ц-1А проведены испытания экспериментального двигателя в условиях искусственного обледенения.

На основе обработки экспериментальных данных получены количественные оценки эффектов загромождения проточных частей ледяными наростами и снижения к.п.д. вентилятора.

Расчётные оценки изменения характеристик двигателя в условиях обледенения показали, что применение законов управления, предполагающих поддержание заданных значений (при фиксированных  $T_n^*$  и  $\alpha_{PUD}$ ) частоты вращения вентилятора или крутящего момента на валу ТНД, при снижении эффективности работы вентилятора и КНД при обледенении приводит к падению тяги на 30 – 20%. Напротив, поддержание полных давлений за вентилятором, на выходе из наружного контура или на выходе из смесителя в данном случае при обледенении и изменении  $T_n^*$  сопровождается ростом тяги на 3 – 6% вследствие увеличения подачи топлива и роста температуры газа перед турбиной на 3 – 8%.

### Литература

1. Модернизация экспериментальной базы для проведения испытаний авиационной техники в условиях обледенения – ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Том II / А.Н. Антонов, А.В. Горячев и др. – М.: ЦИАМ, 2005. – 340 с.
2. Дружинин Л.Н., Швец Л.И., Ланшин А.И. Математическое моделирование ГТД на современных ЭВМ при использовании параметров и характеристик авиационных двигателей // Труды ЦИАМ – М.: ЦИАМ., 1979. – № 832. – 220 с.

*Поступила в редакцию 12.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.А. Жердев, Московский Государственный Технический Университет «МГТУ им. Н.Э.Баумана», Москва, Россия.