

# Конкурс имени профессора Н.Е. Жуковского 2012 года

## ПРЕМИЯ I СТЕПЕНИ В ОБЛАСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**«Разработка методологии аэродинамического проектирования однорядных и биротативных вентиляторов для авиационных двигателей нового поколения с широкохордными стреловидными лопатками с большой степенью двухконтурности, основанная на 3D и 4D расчётах стационарного и нестационарного вязкого течения и 3D оптимизации лопаточных венцов»**

*В.И. Милешин, И.А. Браилко, И.К. Орехов, С.В. Панков*

*(Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова)*

Данная работа представляет современную методологию аэродинамического проектирования вентиляторов перспективных двигателей, которая основана на развитии модифицированной схемы С.К. Годунова для сквозного расчета 3D вязкого (3D RANS) течения в лопаточных венцах вентиляторов как в приближении "mixing plane", так и в полной нестационарной постановке (4D URANS) и 3D решении обратной задачи для построения оптимальной лопатки вентилятора.

Для расчета течения в венцах вентилятора используются новейшие численные методы, основанные на решении осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса (4D URANS) с расчетом потоков газодинамических параметров через грани ячеек на основе решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва. При расчете стационарного течения (3D RANS, программный комплекс ЦИАМ «3D-IMP-MULTI») используется модифицированная неявная схема Годунова второго порядка аппроксимации по пространственным переменным (TVD). Переход от нестационарной задачи к стационарной (3D RANS) производится путем осреднения параметров потока в окружном направлении в приближении "mixing plane". Процедура осреднения в окружном направлении на поверхности в межвенцовом зазоре (поверхность "mixing plane") сохраняет потоки массы, энергии и импульса, что не нарушает консервативность исходной разностной схемы, исключает отражение скачков уплотнения от поверхности осреднения внутрь расчетной области, позволяет рассчитывать течение с развитыми отрывными зонами и определять границу устойчивой работы вентилятора и компрессора. Используются дифференциальные модели турбулентности  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , SST.

Для расчета нестационарного течения (4D URANS, программный комплекс ЦИАМ «3DFS») потоки через грани ячейки вычисляются по методу Годунова—Колгана. Для численного интегрирования по времени используется неявный метод Гира второго порядка аппроксимации для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений, получающихся после пространственной

дискретизации уравнений Навье—Стокса, и двойной шаг по времени — физическому и «псевдовремени», с итерациями по «псевдовремени» для нахождения приращения величин в нестационарном процессе.

Решение 3D обратной задачи также проводится в рамках модифицированной схемы Годунова—Колгана, но только в подвижных сетках. В отличие от прямой задачи, в которой рассчитывается 3D вязкое течение по известной геометрии лопатки вентилятора, в 3D обратной задаче (программный комплекс ЦИАМ «3D-INVERSE.EXBL») геометрия оптимизированной лопатки вентилятора должна быть найдена в результате решения обратной задачи по заданному распределению нагрузки на поверхности лопатки. Для устранения проблемы самопересечения поверхностей сторон давления и разрежения лопатки в окрестности задней кромки при решении 3D обратной задачи строится только одна поверхность: либо поверхность стороны давления, либо поверхность стороны разрежения лопатки. Вторая поверхность лопатки находится из условия заданного распределения толщины лопатки.

На основе представленной методологии были спроектированы высокоэффективные модельные ступени двухконтурных вентиляторов С179-2 и С180-2 (с КПД  $\eta_{ад}^* \geq 0,915 \dots 0,92$  и более) и вентиляторы для перспективных авиационных ГТД с широкохордными лопатками с переменной стреловидностью, включая вентилятор двигателей ПД-14 (ОАО «Авиадвигатель»). Вентилятор двигателя ПД-14 прошел полный цикл испытаний в составе модельной установки (ступень С180-2) и в составе натурного двигателя. При этом везде показал хорошие аэродинамические ( $\eta_{ад}^* \geq 0,92$ ) и прочностные характеристики.

В рамках европейской программы VITAL были спроектированы две модели закапотированных биротативных двухконтурных вентиляторов CRTF1 и CRTF2A нового поколения с титановыми и углепластиковыми лопатками. Испытания на стенде Ц-3А ЦИАМ показали их высокую газодинамическую и акустическую эффективность при уровне  $\eta_{ад}^* \approx 0,92$ .

Проведен анализ влияния распределения аэродинамической нагрузки на аэродинамические и акустические характеристики винтовентилятора СВ-27 двигателя Д-27. Предложены некоторые варианты улучшенного распределения нагрузки и соответствующие модификации лопастей СВ-27 на основе решения 3D обратной задачи с целью улучшения акустических характеристик при различных значениях тяги. На основе обобщения расчетных и экспериментальных результатов исследования винтовентиляторов типа «открытый ротор» в рамках европейской программы DREAM спроектирован вариант «открытого ротора» COMBI22. Проведенные в 2012 г. испытания COMBI22 в аэродинамических трубах ЦАГИ Т-104 и Т-107 подтвердили высокий уровень газодинамических и акустических параметров, заложенных в проект.