

## ОТЗЫВ

научного руководителя, кандидата технических наук,  
доцента Нестеренко Валерия Григорьевича

на диссертацию Аббаварам Реванта Редди «Конструктивные методы повышения интенсивности охлаждения и снижения гидравлического сопротивления компактных воздухо - воздушных теплообменников, устанавливаемых в наружном контуре турбореактивных авиационных двигателей»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Аспирант кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» МАИ Аббаварам Ревант Редди (Индия) 1988 года рождения, получил степень бакалавра (2009) направлению «Авиационная техника» в Университете ANNA, CHENNAI а затем магистра (2011) в Birla Institute of Technology по направлению «Космотехника и ракетостроение». С марта 2014 года по март 2018 года являлся аспирантом кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» института № 2 МАИ.

Несмотря на то, что Аббаварам Ревант Редди поступил в аспирантуру МАИ не имея научного задела по теме диссертации, хорошая теоретическая подготовка, трудолюбие и нацеленность на результат позволили ему в короткий срок овладеть предметной областью научного исследования, изучить отечественные и зарубежные достижения в данной области и определить для себя направление исследований в области двигателестроения, конкретно, повышение эффективности теплообменных аппаратов, используемых в системах охлаждения турбин авиационных двигателей летательных аппаратов.

В настоящее время вопросам теплообмена и его интенсификации в теплообменных аппаратах различного назначения посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ, однако новые поколения авиационных турбин требуют поиска таких конструктивных решений, которые обеспечивают дальнейшее повышение их параметров и ресурса.

В работе Аббаварам Реванта Редди исследованы различные конструктивные способы повышения эффективности воздухо-воздушных теплообменников (ВВТ), спроектированных с целью охлаждения воздуха, отбираемого за компрессором или из его промежуточной ступени.

Критериями эффективности ВВТ являются достигнутый уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха, а также величины потерь давления: охлаждаемого воздуха на выходе из трубок ВВТ; охлаждающего воздуха, обтекающего трубки теплообменника снаружи. Наличие ВВТ позволяет дополнительно снизить температуру наиболее критичных деталей ротора турбины: рабочих лопаток и диска ротора турбины, опоры ротора и т.д. Как известно, ресурс узлов горячей части авиационных ГТД примерно вдвое меньше, чем ресурс узлов его холодной части. Поэтому выполненная исследовательская работа, конечной целью которой является повышение ресурса турбин авиационных двигателей, актуальна и имеет важное практическое значение.

В имеющейся в настоящее время технической литературе представлены критериальные зависимости, позволяющие рассчитывать трубчатые ВВТ любой формы и размеров. Однако, ознакомление с исходными экспериментальными данными, послужившими основанием для их составления, показывает, что для рассмотрения гидравлического сопротивления и теплообмена в трубках малых диаметральных размеров 4,0...6,0 мм с турбулизаторами, расположенными на их внутренней гладкой поверхности, необходимо выполнить специальное исследование с

тем, чтобы получить результаты, учитывающие особенности малых размеров и повышенного влияния пограничного слоя на эти результаты.

Предварительное планирование требуемых вариантов исследований показало, что их число составляет примерно около 60-ти вариантов, отличающихся диаметром, длиной и формой трубки, вариантами компоновки отдельных трубок в рядные или шахматные пучки, ориентированные вдоль продольной оси проточной части наружного контура ТРДД или поперёк, в окружном направлении и т.д. Исследованы трубки прямые и U-образные, перекрёстного тока, с одинаковой длиной прямых участков. Выявлено влияние отрывных участков при повороте потока на эффективность теплообмена на последующих прямых участках этих трубок ВВТ.

В представленной работе были также исследованы пучки из круглых малого диаметра 4,0 ...6,0 мм, овальных трубок, равной площади проходного сечения круглым трубкам, длиной от 100 до 800...1200 мм, при отсутствии или при наличии интенсификаторов теплообмена, устанавливаемых на внутренней поверхности этих трубок.

Такого объёма и содержания системных исследований ВВТ, выполненных с использованием программного комплекса ANSYS CFX, как показал проведенный поиск библиографических источников по этой тематике, ранее не выполнялось.

В результате этих исследований, безусловно имеющих практическую ценность для процесса проектирования новых ВВТ, получены зависимости, показывающие влияние размеров и формы трубок, при малом их диаметре, их компоновка в пучке, наличие и число поворотов потока и т.д. на снижение температуры охлаждаемого воздуха.

Необходимо отметить, что в исследованиях величин потерь давления подогреваемого воздуха в наружном контуре ТРДДф, обтекающего ВВТ, принята максимально допустимой величина  $\sigma = \Delta p/p \leq 2,0 \%$ , поскольку эта величина напрямую влияет на потери тяги двигателя.

Для нескольких вариантов ВВТ, например, ВВТ с диаметрами трубок 4,0, 5,0 и 6,0 мм, автором работы были выполнены расчёты по критериальным зависимостям, с использованием безразмерного параметра NTU (количество единиц переноса теплоты).

ВВТ с наружным диаметром трубок 5,0 мм, пяти поворотный, с радиусными поворотами на  $180^\circ$  потока охлаждаемого воздуха, протекающего внутри трубок, шести перекрёстный по наружному охлаждающему воздуху, испытывался на двигателе. Сравнение расчётных и экспериментальных данных показало, что расчёт по критериальным зависимостям отличается в меньшую сторону примерно на 10% от расчёта в системе ANSYS, и на 20% от экспериментальных данных.

Выполненный автором анализ структуры потока охлаждаемого воздуха, полученный при ANSYS – расчётах (линий тока и температур охлаждаемого воздуха в различных поперечных сечениях по длине трубок ВВТ, имеющих 6 прямых участков и 5 поворотов на  $180^\circ$ ), показал, что на всех прямых участках, за поворотами потока, имеются отрывные течения разной интенсивности, которые не учитывались при выполнении расчётов по интегральным зависимостям.

Всё вышесказанное показывает, что Аббаварам Ревант Редди достаточно глубоко разобрался в процессах теплообмена и гидравлического сопротивления, определяющих эффективность ВВТ.

Аббаварам Ревант Редди разработал новую конструктивную схему сдвоенного ВВТ, в которой в одном рядном ВВТ охлаждается воздух, отбираемый из разных мест компрессора. Дискретный отбор воздуха необходим для минимизации мощности, теряемой при отборе воздуха из проточной части компрессора, в том случае, когда можно использовать для нужд охлаждения воздух меньших давлений. Очевидно, что сдвоенный ВВТ рядной схемы имеет меньшее гидравлическое сопротивление,

поэтому предлагаемая автором конструкция может быть рекомендована для её практического применения.

Аббаварам Ревант Редди самостоятельно освоил сертифицированную программу CFD «ANSYS» и провел большой объем вычислений по разным методикам с целью определения эффективности рядных компактных ВВТ и отдельных малоразмерных трубок. Он разработал рекомендации по использованию полученных результатов его работы на практике.

Результаты диссертационной работы докладывались Аббаварам Ревантом Редди на международных и российских научно-технических конференциях, заседаниях кафедры 203 МАИ. Они опубликованы в трудах конференции и научных журналах, в том числе рекомендованных ВАК РФ.

Считаю, что диссертационная работа Аббаварам Ревант Редди «Конструктивные методы повышения интенсивности охлаждения и снижения гидравлического сопротивления компактных воздухо - воздушных теплообменников, устанавливаемых в наружном контуре турбореактивных авиационных двигателей» выполнена в полном объеме и соответствует требованиям ВАК РФ, а диссертант заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук.

Кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры 203 МАИ



В.Г. Нестеренко  
09/01/2019

Подпись Нестеренко В.Г. заверяю

Директор института № 2  
«Авиационные, ракетные двигатели  
и энергетические установки»  
кандидат технических наук



В.П. Монахова