

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный
технический университет
имени П.А. Соловьева»
(РГАТУ имени П.А. Соловьева)

Пушкина ул., д. 53, Рыбинск,
Ярославская обл., 152934.
Тел. (4855) 28-04-70. Факс (4855) 21-39-64.
E-mail: root@rgata.ru

28.03.2019 № 0801/914

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и инновациям
РГАТУ имени П.А. Соловьева
доктор технических наук, профессор

Кожина Татьяна
Дмитриевна
26 марта 2019 г.

Отзыв ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования "Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева"

на диссертационную работу Аббаварам Ревант Редди

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

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

Диссертация Аббаварам Ревант Редди посвящена разработке
конструктивных методов повышения эффективности работы трубчатых воздухо-
воздушных теплообменников (ВВТ) системы охлаждения турбины
газогенератора ТРДДф с малой степенью двухконтурности, устанавливаемых в
его наружном контуре. Особое внимание в работе уделяется созданию
конструктивного облика ВВТ, в котором пучок из этих трубок обеспечивает не

только снижение температуры *охлаждающего* воздуха, но и уменьшение гидравлического сопротивления проектируемого ВВТ и потерь давления *охлаждающего* воздуха при обтекании его трубчатых поверхностей, где протекает *охлаждаемый* воздух.

Актуальность избранной темы. Воздухо-воздушный теплообменник (ВВТ) в современных авиационных высокотемпературных ТРДД (ТРДДф) является частью систем охлаждения турбин. Поэтому, интенсивность её охлаждения во многом определяется снижением температуры охлаждаемого воздуха, отбираемого от компрессора и поступающего в ВВТ. В том случае, когда отдельные блоки ВВТ устанавливаются в наружном контуре ТРДД (ТРДДф) с малой степенью двухконтурности, становится необходимым снижать величину потерь полного давления воздуха, протекающего в его наружном контуре, поскольку эта величина напрямую влияет на тягу двигателя. Поэтому, рассматриваемые автором задачи – разработка конструктивных методов по увеличению интенсивности охлаждения воздуха, отбираемого от компрессора проектируемого авиационного ТРДД (ТРДДф) в ВВТ, и по снижению потерь давления воздуха в наружном контуре из-за установки ВВТ безусловно актуальны.

Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства. Государственная программа «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы» устанавливает основные направления совершенствования авиационных двигателей военного и гражданского назначения, которая включает в себя требования по повышению ресурса и надёжности. Обеспечение прочности и ресурса турбин газогенератора, при высоком уровне температуры газа на входе в турбины газогенераторов двигателей 5-го и 6-го поколений, порядка 1900...2100К, является особо сложной задачей, которая в настоящее время решается комплексно, как путём совершенствования их конструктивного облика, так и применением новых материалов с повышенной жаропрочностью,

совершенствованием теплозащитных покрытий и всей системы охлаждения горячей части двигателей в целом.

Целью работы Аббаварам Ревант Редди, является разработка конструктивных методов повышения интенсивности охлаждения и снижения гидравлического сопротивления компактных ВВТ, устанавливаемых в наружном контуре современных и перспективных турбореактивных авиационных двигателей.

Несмотря на то, что по теме диссертации к настоящему времени выполнено большое количество расчётно-экспериментальных работ, следует отметить, что при переходе от ТРДД 4-го поколения к двигателям 5-го и 6-го поколений требуется находить новые технические решения, в частности по созданию более эффективных конструкций трубчатых ВВТ.

Используемые автором методы исследования соответствуют современному уровню разработки конструктивного облика узлов воздушно-реактивных двигателей и основаны на лицензированном программном обеспечении, применяемом в авиадвигателестроении.

Оценка новизны, практической значимости результатов диссертации и рекомендации по их использованию. Новизна работы Аббаварам Ревант Редди состоит в том, что:

1. Полученные им результаты расчётной оценки уровня *снижения температуры охлаждаемого воздуха*, отбираемого от компрессора газогенератора авиационного двигателя с малой степенью двухконтурности, для различных вариантов проектирования блоков трубчатых ВВТ, разработанных автором, и *потерь давления охлаждающего воздуха* в наружном контуре ТРДД, где они устанавливаются, представлены в виде зависимостей, связывающие их характеристики с геометрическими размерами и формой трубок, а также режимными параметрами охлаждаемого и охлаждающего воздуха: длиной и диаметральными размерами трубок, геометрией овалов; формой трубок,

цилиндрической или овальной; конфигурацией и размерами трубок, объединённых в пучок, рядный или шахматный.

Числа Рейнольдса в исследованных вариантах ВВТ соответствуют их значениям, имеющимся в современных авиационных двигателях с малой степенью двухконтурности. В наружном контуре за вентилятором в пределах $10^5 \geq Re \geq 10^4$, а во внутреннем контуре, за компрессором высокого давления несколько более $Re \geq 10^5$.

2. Автор защищает результаты проведенных им исследований, имеющие непосредственное практическое значение на этапе увязки и согласования проектных параметров двигателя, в виде:

- снижения температуры и потерь давления *охлаждаемого* воздуха на выходе из трубок ВВТ малой размерности, диаметром 4,0...6,0 мм и овальных трубок, равных цилиндрическим по площади проходных сечений (трубки имели внутри гладкие стенки или стенки с местными выступами, кольцевыми интенсификаторами теплообмена малой высоты - $0,3 \text{ мм} \leq h \leq 0,5 \text{ мм}$;

- потерь давления *охлаждающего* воздуха второго контура, обтекающего с наружной стороны исследуемые пучки трубок, ориентированных в рядном или шахматном порядке, друг относительно друга, цилиндрической и овальной формы.

- новой и перспективной схемы U - образного ВВТ, в котором в одном ряду установлены трубки, к которым подводится охлаждаемый воздух из разных ступеней компрессора высокого давления. На выходе из трубок ВВТ этот воздух направляется на охлаждение различных деталей турбины газогенератора. Такая схема комбинированного ВВТ позволяет сократить число секций теплообменника, обойтись одним ВВТ, и, благодаря этому, снизить загромождение наружного контура и уменьшить в нём потери давления охлаждающего воздуха по сравнению с традиционной компоновкой, в которой в наружном контуре ТРДД требуется устанавливать несколько секций ВВТ,

отличающихся местоположением и температурой отбираемого из компрессора высокого давления охлаждаемого в ВВТ воздуха.

Результаты исследований Аббаварам Ревант Редди, в виде характеристики влияния отдельных конструктивных параметров ВВТ вполне обоснованно *можно рекомендовать к использованию* в конструкторских бюро, занимающихся проектированием авиационных теплообменников, а также в учебном процессе авиационных вузов.

Предлагаемые зависимости и конструктивные методы повышения эффективности трубчатых ВВТ будут способствовать сокращению сроков создания ВВТ повышенной эффективности и времени, необходимого на доводку двигателя в целом.

Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и заключений, выносимых на защиту, подтверждается использованием известных законов науки по теплообмену и интенсификации теплообмена, надёжными расчётными программами, а также удовлетворительным соответствием полученных результатов расчёта исходного варианта ВВТ, применяемого в настоящее время на одном из отечественных ТРДДф, с результатами его экспериментального исследования. Таким образом, можно считать, что сделанные в диссертационной работе выводы и рекомендации в должной мере достоверны.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению. Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и содержит 106 иллюстраций. Список литературных источников включает 58 наименований.

Каждая глава содержит анализ параметров и конструкции трубчатой части ВВТ, имеющихся в настоящее время в распоряжении проектировщиков материалов исследований по рассматриваемой задаче, результатов исследований автора и выводов, сделанных автором на этой основе.

Приведенные в диссертации данные, полученные автором на основе проведенных им исследований, позволяют выбрать конструктивные параметры

вариантов ВВТ для выбранной величины расхода охлаждающего воздуха: конфигурацию ВВТ с прямыми или U - образными трубками, их диаметр и длину, рядное или шахматное расположение трубок, форму их наружных и внутренних поверхностей (овальную или цилиндрическую), с интенсификаторами теплообмена или без таковых.

В главе 1 изложено обоснование целесообразности проведения исследований по улучшению характеристик трубчатых ВВТ, применяемых в системе охлаждения турбин современных и перспективных ТРДД, сформулирован перечень задач, которые автор предполагает решить в своей работе.

В главе 2 представлены результаты проведенных автором расчётных исследований по возможности снижения температуры охлаждаемого воздуха по методике NTU, которые позволяют сравнивать тепловую эффективность ВВТ с U - образными трубками рядного расположения, трёх разных диаметров – 4,0; 5,0 мм; 6,0 мм, образованных тремя или четырьмя трубками, которые позволяют формировать шесть разных модулей ВВТ, отличающихся расходом охлаждаемого воздуха примерно в 3 раза. Показано, что трубки самого малого диаметра наиболее эффективны, однако при одинаковом расходе охлаждаемого воздуха их количество должно быть увеличено.

В главе 3 представлены результаты расчётных исследований, полученных с использованием программного комплекса ANSYS CFX и учётом наличия пограничного слоя на стенках трубок, для ВВТ с прямыми или поворотными, цилиндрической или овальной формы трубками, рядного или шахматного расположения. Они по-разному ориентированы в ВВТ: по горизонтали, в соответствии с осью двигателя, или в поперечном направлении относительно этой оси. Получено, что в зависимости от выбранной ориентации трубок в ВВТ существенно изменяется величина их гидравлического сопротивления и уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха.

Результаты исследований представлены в достаточной степени подробности. Показаны конечно-элементные сетки переменной густоты, применённые автором для расчётных исследований эффективности различных конфигураций и размеров трубок, эпюры температуры охлаждаемого воздуха внутри трубок и линии тока внешнего охлаждающего воздуха.

Важно отметить, что выполненные автором, с использованием программного комплекса ANSYS CFX, многочисленные и весьма трудоёмкие расчёты вариантов геометрии и формы малоразмерных трубок, которые можно было бы применить в ВВТ, устанавливаемые в наружном контуре ТРДД (ТРДДф), позволили автору определить не только дополнительный, по сравнению с исходной конструкцией, уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха, но и величину потерь давления охлаждающего воздуха, т. е. гидравлическое сопротивление пучка трубок в исследованных конфигурациях ВВТ, отличающихся формой, размерами и расположением трубок относительно горизонтальной оси двигателя, который напрямую влияет на изменение тяги двигателя.

В главе 4 представлены результаты расчётных исследований с использованием программного комплекса ANSYS CFX, эффективности кольцевых интенсификаторов теплообмена, установленных на внутренней гладкой поверхности отдельных прямых и поворотных на 180° цилиндрических трубок.

Необходимо отметить, что в рассматриваемой диссертационной работе исследованы компактные ВВТ с U – образными, малоразмерными цилиндрическими и овальными трубками, диаметром 4,0...6,0 мм., где влияние особенностей течения и процессов теплообмена охлаждаемого воздуха на интенсивность снижения температуры охлаждаемого воздуха в ядре потока, значительно существеннее, чем в ВВТ большой размерности.

Задачей исследования, проведенного автором, являлось определение такой геометрии кольцевых выступов на гладкой стенке трубок ВВТ, которая не

приводила бы к развитым отрывам потока, т.е. к существенным потерям давления и снижению расхода охлаждаемого воздуха подаваемого в систему охлаждения турбины. Такая геометрия была автором определена, получены результаты по снижению температуры охлаждаемого воздуха примерно на 30% относительно трубок с гладкими стенками, при малых потерях давления охлаждаемого воздуха.

Эти данные существенно дополняют результаты аналогичных исследований, проведенных с трубками больших диаметральных размеров, перечень которых приведен в списке использованной литературы, приведенном в конце текста диссертации.

В главе 5 представлены обобщающие зависимости, количественные характеристики снижения температуры охлаждаемого воздуха и изменения гидравлического сопротивления пучков трубок ВВТ, при их наружном обтекании и варьировании размерами, конфигурацией и ориентацией пучка трубок относительно направления набегающего потока охлаждающего воздуха в наружном контуре двигателя.

В расчётном исследовании, с использованием программного комплекса ANSYS CFX, рассмотрено около 60-ти вариантов проектирования различных конструктивных решений ВВТ.

Проведение такого большого числа экспериментальных исследований и изготовление многочисленных моделей ВВТ было бы весьма затруднительно. Кроме того, пространственная структура теплообмена и течения охлаждаемого воздуха внутри малоразмерных прямых и U-образных трубок, которая в данном случае имеет особо важное значение, в настоящее время может быть получена только расчётом.

Диссертация Ревант Аббаварам Редди представляет собой полностью законченное исследование, в котором обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи работы, имеется новизна и практическая значимость результатов исследований, подтверждена их достоверность.

Замечания по оформлению диссертации: имеются грамматические и орфографические ошибки в тексте; не все сокращения, имеющиеся на полях рисунков, расшифрованы; на отдельных графиках имеется текст на английском языке.

Из недостатков работы можно отметить следующие.

1. В диссертации показана повышенная эффективность теплообмена в малоразмерных трубках ВВТ, при установке кольцевых интенсификаторов малой высоты, менее или равной 0,5 мм. Технологическое выполнение таких малых выступов на внутренней поверхности трубок затруднительно. Немного легче было бы выполнить спиральные выступы с соответственным шагом. Кроме того, можно было бы рассмотреть другие виды повышения эффективности теплообмена, например, при образовании шероховатостей внутренней гладкой стенки, полученных при прокатке трубок жидкостью с абразивом, когда не требуется использование специальной оснастки.
2. В диссертации не рассматриваются проблемы обеспечения напряжённо-деформированного состояния секций ВВТ ни на стадии их изготовления (изгиб малым относительным радиусом) ни в момент неравномерного теплового расширения при изменении режима работы двигателя.
3. Не понятно, каким образом можно использовать полученные результаты для ТРДД со средней и повышенной степенью двухконтурности в случае использования в их системе охлаждения ВВТ.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы, а указывают направления её дальнейшего развития.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.

Все основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 10-ти работах из списка, приведённого в автореферате, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК по заявленной научной специальности и 3

статьи в других рецензируемых журналах, проведена апробация работы на научно-технических конференциях высокого уровня, текст автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

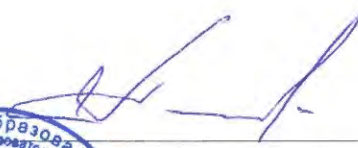
Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертационная работа Аббаварам Ревант Редди выполнена на высоком научном уровне. Результатом работы является решение важной задачи актуального направления в сфере авиадвигателестроения. Приведенные результаты можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие большое практическое и научное значение. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Аббаварам Ревант Редди заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05. - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Настоящий отзыв ведущей организации обсуждён и одобрен на заседании кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Соловьёва, протокол № 7 от 22 марта 2019 года.

Доктор технических наук,
профессор, заведующий
кафедрой «Авиадвигатели»
РГАТУ имени П.А. Соловьёва



Ремизов Александр
Евгеньевич

РГАТУ имени П.А. Соловьёва
Подпись удостоверяю
Начальник управления кадров

