

ВОЗДУХО-ВОЗДУШНЫЙ ТЕПЛОБМЕННИК ДЛЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ТУРБИН ДВУХКОНТУРНЫХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)" (МАИ)
Ревант Редди Аббаварам, аспирант кафедры 203,
Валерий Григорьевич Нестеренко, к.т.н., доцент

Представлены результаты расчётных исследований, полученных с использованием комплекса ANSYS CFX, различных конструктивных схем и конфигураций трубчатых воздухо-воздушных теплообменников.

The results of design studies on various design schematics and configurations of cross-flow air-to-air tubular heat exchangers, carried out using ANSYS CFX are presented.

Ключевые слова: воздухо-воздушный теплообменник, коэффициент теплопередачи, эффективность системы воздушного охлаждения.

Key words: air-to-air heat exchanger, heat transfer coefficient, air cooling system efficiency.

В данной работе рассматривается возможность снижения температуры охлаждаемого воздуха, отбираемого за компрессором или в промежуточной ступени компрессора газогенератора двухконтурного авиационного воздушно-реактивного двигателя (ВРД), в воздухо-воздушном трубчатом теплообменнике (ВВТ), с прямыми или поворотными трубками малого диаметра, от 4,0 мм до 6,0 мм. Эта задача имеет важное практическое значение, поскольку уровень температуры газа на входе в турбину высокого давления (ТВД) повышается от одного поколения двигателей к другому поколению [1]. Растут также требования к надёжности и ресурсу авиационных ВРД. Чем выше температура газа перед ТВД, тем меньше могут быть её габариты и масса при той же величине аэродинамической нагрузки, т.е. при $\pi_r = \text{const}$.

Предполагается также в перспективе использовать существенно более сложные схемы воздушной системы ВРД, с промежуточным охлаждением за вентилятором и с рекуператором, установленным в выхлопной части двигателя. Поэтому область применения ВВТ расширяется и задача по повышению его эффективности становится особо актуальной.

Система охлаждения ТВД входит как составная часть воздушной системы двигателя. Наличие ВВТ позволяет снизить уро-

вень температур рабочих и сопловых лопаток ТВД, диска турбины, охладить опоры горячей части двигателя и т.д. Схема установки одного из реальных трубчатых ВВТ на корпусе камеры сгорания, во внутреннем контуре ВРД, представлена в [1,2]. В этой компоновке имеется отсечка охлаждаемого воздуха на крейсерском режиме работы ВРД с целью увеличения экономичности двигателя на этом режиме. Наружный диаметр трубок этого ВВТ равен 5,0 мм, толщина стенки 0,3 мм. Его конструктивно-геометрические характеристики: число трубчатых модулей, равномерно расположенных по окружности кольцевого кожуха $N_m = 64$; количество трубок в одном модуле $N_{m1} = 6$; общее количество трубок $N_\Sigma = 384$; длина одной трубки (в развертке) $l_1 = 679$ мм. Режимные параметры: по охлаждаемому воздуху внутри трубок - расход $G_1 = 6.45$ кг/сек, давление и температура газа на входе в ВВТ $p_{11} = 23$ бар и $T_{11} = 774$ К; по нагреваемому воздуху наружного контура - расход $G_2 = 40$ кг/сек, давление и температура газа на входе в ВВТ $p_{21} = 3.66$ бар и $T_{21} = 438$ К.

Этот теплообменник экспериментально исследован, были определены потери полного давления охлаждаемого воздуха внутри трубок, равные 8,5 %, и потери полного давления во внешнем контуре - это второй, наружный контур ВРД, которые составили 1,6%.

Величина снижения температуры охлаждаемого воздуха в



Рис. 1 Двухрядный, четырёх трубчатый, пяти поворотный и шести перекрёстный ВВТ, с наружным диаметром трубок 6,0 мм

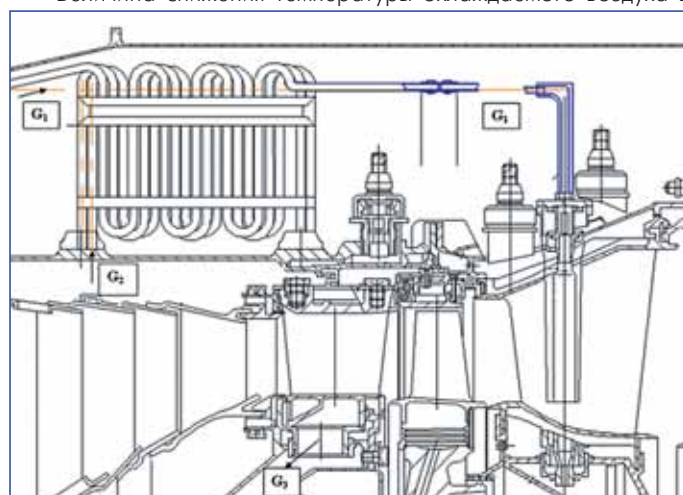
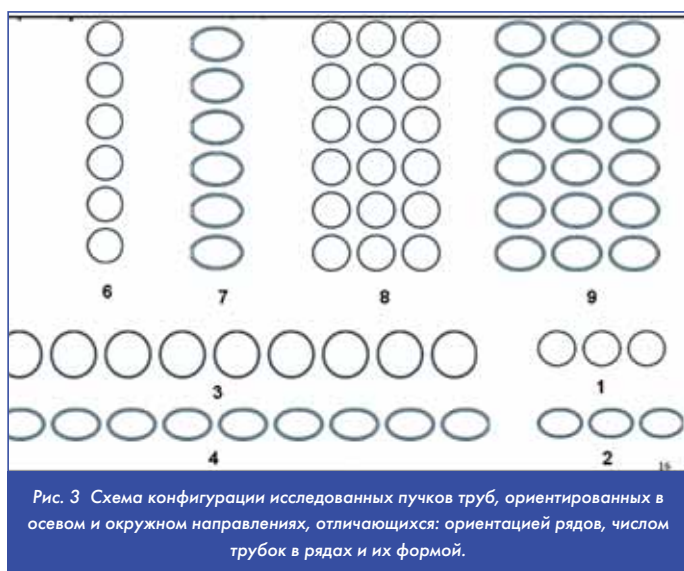


Рис. 2 Конструктивная схема модифицированного ВВТ, в котором охлаждается воздух, отбираемый: из промежуточной ступени компрессора G1 и за его последней ступенью G2



этом теплообменнике невысокая, она равна $\Delta T_{BVT} = 110^\circ$, коэффициент \mathcal{E} , характеризующий эффективность ВВТ, равен:

$$\mathcal{E} = (\Delta T_{BVT}) / (\Delta T_{max\ BVT}) = 0,38$$

При проектировании ВВТ требовалось достигнуть большей эффективности теплообмена $0,38 < \mathcal{E} \leq 0,69$, т.е. реализовать снижение температуры охлаждаемого воздуха до величины $100 < \Delta T_{BVT} \leq 200^\circ$.

Укажем также на то, что рабочие и сопловые лопатки ТВД современных авиационных ГТД имеют развитое плёночное охлаждение, поэтому в перспективных ВВТ требуется не только увеличить интенсивность охлаждения, но и расход охлаждаемого воздуха. На Рис. 1 представлен ВВТ, у которого наружный диаметр трубок увеличен до размера 6,0 мм. Кроме того, установлена ещё одна, дополнительная, четвёртая трубка для подвода увеличенного количества охлаждающего воздуха. Благодаря этому пропускная способность теплообменника увеличена вдвое. При этом, как показывают расчёты, выполненные в системе ANSYS CFX, температура охлаждаемого воздуха на выходе из этого ВВТ уменьшилась примерно на 20% из-за худшего прогресса потока воздуха в трубках большего диаметра.

Поэтому, для сохранения уровня интенсивности охлаждения, имеющегося в ВВТ, диаметр трубок которого равен 5,0 мм, описанном в [1, 2], в модифицированном ВВТ потребовалось добавить ещё одну поворотную секцию, и он стал семи поворотным, с большей на 25 % длиной трубок.

Другая проблема, применительно к ВВТ современных высокотемпературных двухконтурных ВРД, заключается в том, что в них осуществляется снижение температуры воздуха, отбираемого только из одного места, за какой-либо ступенью компрессора газогенератора. На Рис. 2 показана конструктивная схема ВВТ, к которому подводится воздух, отбираемый из разных ступеней компрессора. На ней представлен трёхтрубчатый теплообменник, где в одной трубке, диаметром 6,0 мм, охлаждается воздух G_1 , отбираемый из промежуточной ступени компрессора, а в двух других трубках, также диаметром 6,0 мм, охлаждается воздух G_2 , отбираемый за компрессором, из воздушной полости, расположенной над жаровой трубой камеры сгорания.

Отличие конструкции ВВТ, представленной на Рис. 2 от имеющихся прототипов [1, 2], заключается в следующем:

- на входе воздуха в ВВТ, из полости над жаровой трубой камеры сгорания охлаждаемый воздух поступает в две трубки ВВТ большего диаметра - 6,0 мм и одинаковой суммарной пропускной способностью, которая ранее имела у трёх трубок диаметром 5,0 мм. К третьей трубке рядного ВВТ, также диаметром 6,0 мм, подводится воздух, отбираемый из промежуточной ступени компрессора;

- на выходе воздуха G_1 из ВВТ, он поступает во внутреннюю полость СА ступени ТНД и далее в полость между дисками тур-



бины ТВД и ТНД. Воздух G_2 предназначен для охлаждения передней части диска и лопаток ротора ТВД. Таким образом, в этой конструктивной схеме в одном ВВТ охлаждается воздух, отбираемый из-за компрессора и его промежуточной ступени.

В ряде современных конструкций ВРД воздух, отбираемый из промежуточной ступени компрессора, или не охлаждается, или охлаждается в отдельном ВВТ. Конструктивная схема единого двухпоточного ВВТ позволит снизить потери давления воздуха в наружном контуре ВРД в том случае, если там устанавливаются два ВВТ, и существенно повысить интенсивность охлаждения элементов конструкции междисковой полости турбины - дисков и опор ротора.

С целью определения возможности повышения эффективности трубчатых ВВТ были также исследованы различные конфигурации пучков цилиндрических или овальных трубок, ориентированных как в осевом, так и в окружном направлениях. В показанных на Рис. 3 вариантах исследований пучков трубок все цилиндры имеют диаметр $d = 5,0$ мм, а диагонали овала (эллипса) 6,3 x 4,0 мм. Пучки номер 1...4 имеют рядную ориентацию, обеспечивающую минимум гидравлического сопротивления, а пучки номер 6...9 ориентированы в окружном направлении. Предметом исследований является выявление отличий в температуре охлаждаемого воздуха на выходе из пучка труб и величин потерь давления охлаждающего воздуха. Результаты этих исследований представлены на Рис. 4...6.

Расчёты в ANSYS CFX выполнялись с учётом наличия пограничного слоя при числе $Re \geq 10^5$. Исследованные линии тока и области интенсивного отрыва потока воздуха свидетельствуют о том, что с точки зрения гидравлического сопротивления рядное расположение трубок имеет существенное преимущество перед поперечным расположением трубок ВВТ. Этот вывод подтверждается данными, приведенными на графике Рис. 4. Вместе с тем, окончательное решение о целесообразности применения того или иного варианта проектирования следует принять только после оценки сравнительной эффективности рассматриваемых конфигураций трубок и их пучков по уровню охлаждения воздуха на выходе из всех исследованных девяти вариантов проектирования.

Графические зависимости изменения величин снижения температуры охлаждаемого воздуха, в прямых цилиндрических или овальных трубках малого диаметра, при изменении размеров их диаметра и длины, для вариантов трубок с гладкой стенкой и при наличии интенсификаторов теплообмена, высотой 0,3 мм, на внутренней поверхности трубок, показаны на Рис. 5 и 6.

Во всех вариантах исследований наилучшие результаты показывает трубка с кольцевыми турбулизаторами высотой 0,3 мм. Такого типа интенсификация теплообмена ранее подробно исследовалась в [3], однако новым является найденная расчётом

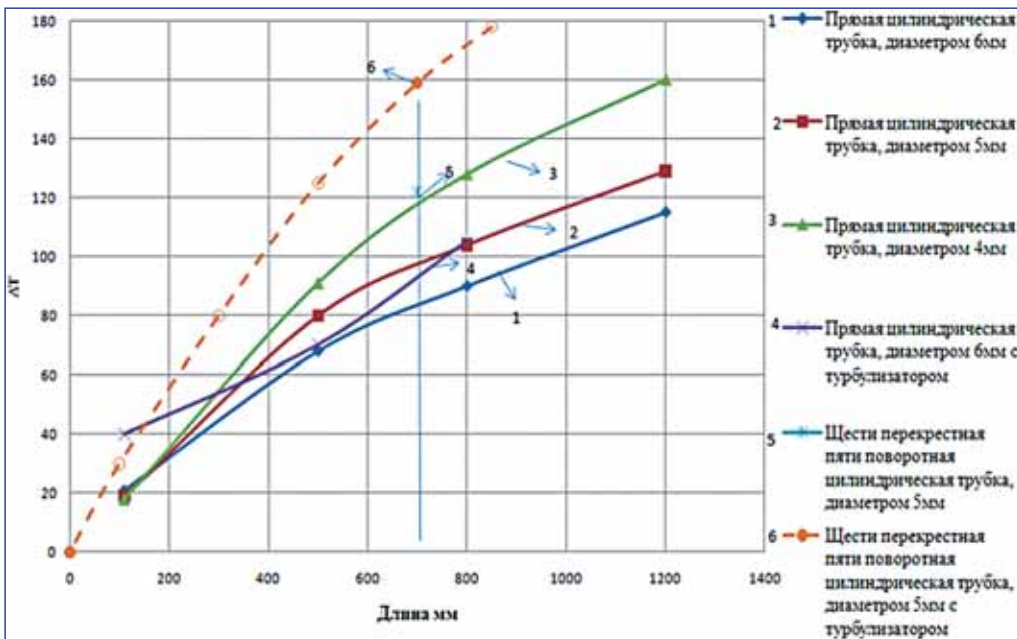


Рис. 5 Изменение величины снижения температуры охлаждаемого воздуха, на выходе из цилиндрических малоразмерных трубок, от их диаметрального размера и длины, при гладкой стенке и наличии интенсификаторов теплообмена потоков воздуха

величина оптимальной геометрии микроинтенсификатора теплообмена для трубок малого диаметрального размера. Расчёты с интенсификаторами теплообмена большей высоты, 0,5 мм, показали двойное увеличение уровня потерь давления внутри трубок ВВТ, они составили 42% от исходной величины давления на входе. Это недопустимо, поскольку из-за снижения давления охлаждённого воздуха он становится неприемлемым для его использования в системе охлаждения ТВД.

Заключение

1. Всего исследовано около 60-ти вариантов проектирования, по одной и той же методике, с применением комплекса ANSYS-CFX. Это важно с точки зрения обеспечения сопоставимости эффективности различных конструктивных решений трубчатой части ВВТ. В технической литературе [4,5,6,7], посвящённой исследованиям трубчатых ВВТ, имеется ограниченное число данных по эффективности малоразмерных трубок

той 0,3 мм в овальных и цилиндрических трубках малого диаметра $6,0 \text{ мм} \geq d \geq 4,0 \text{ мм}$.

разной формы - цилиндрических или овальных, малых диаметральных размеров, с кольцевыми микроинтенсификаторами теплообмена на их внутренних поверхностях.

2. При комбинированном отборе охлаждающего воздуха от компрессора в систему охлаждения турбин ТРДД и ТРДДф, включая его отбор от промежуточной ступени компрессора и за его последней ступенью, можно рекомендовать использование ВВТ, в котором одновременно охлаждаются оба потока воздуха.

3. Анализ параметров и конструкций современных ВВТ, применяемых в системе охлаждения ТВД, показал, что имеются резервы повышения их эффективности. Можно рекомендовать применение кольцевых интенсификаторами теплообмена высоко-

Литература

1. А. Ревант Редди, Нестеренко В.Г.. Конструктивные методы совершенствования критичных узлов системы охлаждения современных высокотемпературных ТВД авиационных ГТД // Научно-технический вестник Поволжья, - 2018 - № 5. - С. 73-77.
2. А. РевантРедди, Нестеренко В. Г.. Совершенствование системы охлаждения современных высокотемпературных ТВД авиационных ГТД // Научно-технический вестник Поволжья, - 2017- № 6. - С. 75-79
3. Калинин Э. К. Эффективные поверхности теплообмена: монография // М.: Энергоатомиздат, 1998. - 408 С.
4. Иноземцев А.А., Семёнов А.Н., Рубинов В.О. и др. Воздухо-воздушный теплообменник для системы охлаждения опор авиационного двигателя ПС-90А // Двигатель, -2008 - №1. - С.
5. Cengel.Y.A., Ghajar A.J., Heat and Mass Transfer, 5-th edition. Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2013- 902 P.
6. Кулиниченко В.Р. Справочник по теплообменным расчетам: монография // Киев.1990. -165 С.
7. Incropera F. P., Lavine A.S. and De Witt D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6-th edition. John Wiley & Sons, 2007- 997 P.

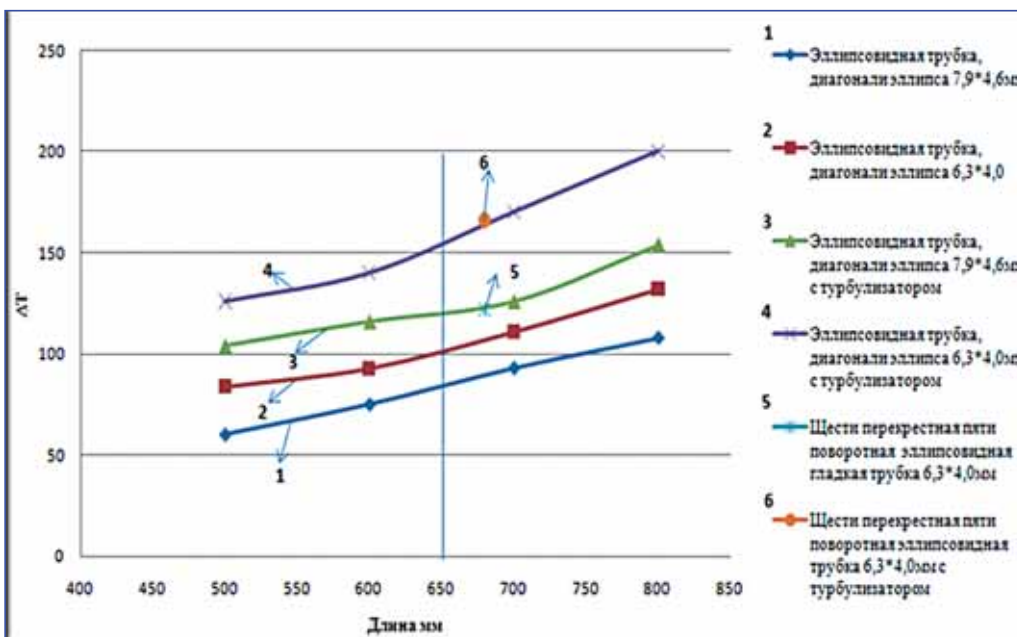


Рис. 6 Изменение величины снижения температуры охлаждающего воздуха на выходе из овальных малоразмерных трубок, в зависимости от размеров диагоналей овала, длины трубок и наличия интенсификаторов теплообмена потока воздуха

Связь с авторами:
revman16388@gmail.com
valerinsterenko@yandex.ru