



Аббаварам Ревант Редди

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

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель кандидат технических наук, доцент
Нестеренко Валерий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Модорский Владимир Яковлевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор

Попова Татьяна Валерьевна, кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», научный сотрудник.

Ведущая организация : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Защита состоится 22 апреля 2019 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,

<https://mai.ru/upload/iblock/317/Revant-dissertatsiya-29-december-1.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.08
д.т.н., профессор



Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации:

Современные и перспективные авиационные ГТД характеризуются уровнем температуры газа перед турбиной, величиной степени сжатия компрессора и уровнями ресурса и надёжности. Следовательно исследования по повышению эффективности системы охлаждения критичных узлов и деталей горячей части ГТД особенно актуальны. Они имеют важное практическое значение, поскольку ресурс узлов горячей части ГТД примерно в два раза меньше ресурса узлов его холодной части.

Указанные выше задачи требуют проведения исследовательских работ по повышению эффективности воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ), устанавливаемого в наружном контуре ТРДД с малой степенью двухконтурности (ТРДДм). Они имеют комплексный характер, поскольку, с одной стороны, требуется совершенствование самой конструкции ВВТ, а с другой - методов его проектирования и изготовления.

В выполненной работе рассмотрены два типа трубчатого ВВТ, с цилиндрическими и овальными трубками, имеющими одинаковую площадь поперечного сечения их внутренних каналов и одинаковую толщину стенок. С целью сопоставления их эффективности разработаны геометрические модели ВВТ одиночных труб разной длины и диаметрального размера (4,0; 5,0 и 6,0 мм), цилиндрической и овальной формы, а также ВВТ различных конфигураций, с рядными и шахматными пучками, составленными из цилиндрических или овальных трубок.

Ниже содержатся основные результаты расчётных исследований эффективности охлаждения различных конфигураций ВВТ и его трубок, выполненные с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Исследованы линии тока воздуха внутри и снаружи трубок, его температурное изменение от входа до выхода из трубок, гидравлическое сопротивление охлаждаемого воздуха внутри трубок и потери давления наружного, нагреваемого воздуха второго контура ТРДДм.

Параллельно с расчётом обтеканий и теплообмена трубчатых поверхностей ВВТ, выполненных с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Ряд тех же расчётов производился по двум другим методикам, в которых используется логарифмический температурный напор. Его удобно применять на начальном этапе проектирования ВВТ, а параметр NTU (Number of Transfer Units), характеризующий число единиц переноса тепла, целесообразно применять при поверочном расчёте конструкций ВВТ.

Результаты экспериментальных исследований ВВТ, изготовленного из трубок диаметром 5, 0 мм, сопоставлены с данными расчётов, произведенных по всем трём методикам.

Получено, что расчёты ВВТ, произведенные по программному комплексу ANSYS CFX, наиболее близки к экспериментальным данным и отличаются от них примерно на 10% в сторону повышения его эффективности.

Большой практический интерес и актуальность имеют результаты исследований овальных трубок с ламинаризаторами внутреннего, охлаждаемого потока закомпрессорного воздуха, выполненные с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Получено, что по сравнению с цилиндрическими трубками, имеющими эквивалентную площадь поперечного сечения, разница температур воздуха на входе и выходе из ВВТ увеличивается примерно на 20...30%.

Следует отметить, что использование программного комплекса ANSYS CFX позволяет сравнивать между собой большое число конструктивных решений ВВТ. Аналогичная задача, решаемая экспериментально, требует изготовления множества реальных конструкций, что, конечно, очень проблематично материально и требует большого времени.

Целью работы является:

Разработка конструктивных способов повышения эффективности воздухо-воздушных теплообменников перекрёстного тока, устанавливаемых в наружном контуре ТРДДм, обеспечивающих снижение температуры охлаждаемого воздуха, подводимого к рабочим лопаткам ТВД, при минимальном росте их гидравлического сопротивления, характеризуемого увеличением потерь давления, обтекающего ВВТ наружного воздуха второго контура ТРДДм, которое должно быть не более 1,5...2,0%.

Задачи работы:

1. Рассмотреть влияние конфигурации пучка, формы и диаметральных размеров трубок с гладкими внутренними поверхностями, их длины и т.д.; размерности и формы интенсификаторов теплообмена, установленных на внутренней поверхности трубок, в виде кольцевых выступов малой высоты, 0.15, 0.3 или 0.5 мм, отстоящих друг от друга с шагом, не более 5,0 мм, на их эффективность;
2. Выполнить расчётное исследование и анализ эффективности теплообмена - снижения температуры охлаждаемого воздуха и потери давления охлаждающего воздуха, обтекающего отдельные трубки, пучки трубок, трубчатый теплообменник в целом.

Научная новизна:

Новизна результатов исследований диссертационной работы заключается в том, что выявлено системное изменение структуры потока охлаждаемого воздуха в поперечных сечениях U – образных трубок, зависящее от их длины и диаметра, наличия поворотов потока, изменения формы трубок от цилиндрической к овальной, формы пучка и местоположения трубки в пучке.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований:

Получены зависимости влияния диаметральных размеров и длины малоразмерных трубок наружным диаметром $4,0 \text{ мм} \leq d \leq 6,0 \text{ мм}$ на уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха и на увеличение потерь давления охлаждающего и охлаждаемого воздуха, а также размеров микро выступов на внутренних гладких поверхностях каналов трубок, в которых протекает

охлаждаемый воздух, их влияние на интенсивность охлаждения этого воздуха и уровень увеличения потерь давления;

Рекомендации по повышению эффективности трубчатых ВВТ, спроектированных из малоразмерные трубок с наружным диаметром $4,0 \text{ мм} \leq d \leq 6,0 \text{ мм}$, где величина снижения температуры охлаждающего воздуха на выходе из ВВТ увеличена на 30...40%.

Разработана новая конструктивная схема комбинированного ВВТ рядного типа. В этом ВВТ трубки с охлаждаемым воздухом, который отбирается из разных ступеней КВД, устанавливаются в одном и том же ряду ВВТ. На выходе из ВВТ воздух, отличающийся давлением и температурой, направляется для охлаждения таких элементов конструкции турбины, как, например, опора ротора, боковые поверхности дисков ТВД и ТНД в междисковой полости, и др., требующих увеличения интенсивности их охлаждения.

Методология и методы диссертационного исследования:

Поставленные цели достигались путем расчетно-теоретических исследований. Для проведения вычислительных исследований использовались компьютерные технологии - программный комплекс ANSYS CFX. При этом результаты этих расчетов сравнивались с данными, полученными расчётом с помощью коэффициентов, обобщающих отдельные экспериментальные исследования и результатом исследований ВВТ, полученным на натурном ТРДДм.

Достоверность результатов работы определяется:

- сопоставлением поверочных расчётных значений температуры охлаждающего воздуха на выходе из ВВТ, установленного в наружном контуре ТРДДм АЛ 31, с экспериментальными данными, полученными при испытаниях ВВТ в системе реального двигателя;

- хорошей сходимостью результатов предварительного расчёта проектируемого ВВТ с его поверочным расчётом. Разница этих результатов составила порядка 10%, что вполне объяснимо более полным использованием влияющих на конечный результат конструктивных параметров ВВТ при его поверочном расчёте .

Личный вклад автора:

1. Автором разработаны электронные геометрические модели большого числа вариантов трубчатых элементов ВВТ, малых диаметральных размеров 4.0...6,0 мм, эффективность которых сопоставлена между собой, с использованием программного комплекса ANSYSCFX.

2. Выявлены особенности течения охлаждаемого и охлаждающего воздуха и изменения его температурного состояния на выходе из ВВТ в зависимости от диаметра, формы (цилиндрической или овальной) и длины трубок, наличия поворотных участков на 180° по их длине и мало размерных, высотой 0,15-0,5 мм, интенсификаторов теплообмена, установленных на их внутренней гладкой поверхности.

3. Сформулированы рекомендации по выбору конструктивных

параметров и повышению эффективности трубчатых ВВТ, устанавливаемых в наружном контуре ТРДДм.

Публикации по теме диссертации:

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК по специальности 05.07.05, 3 статьи в других рецензируемых журналах.

Апробация результатов работы:

Результаты работы доложены на следующих конференциях:

1. 30-й конгресс Международного совета авиационных наук , 26 - 30 сентября, ICAS 2016 г.
2. Международной конференции «Гагаринские чтения», МАИ, 2016 г.
3. 16th International Conference of Iranian Aerospace Society, Тегеран 2017г.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 50 наименований; изложена на 159 страницах машинописного текста, включающего 106 иллюстраций и 15 таблиц

Автор защищает следующие основные положения работы:

1. Результаты расчетных исследований эффективности ВВТ перекрёстного тока с гладкими трубками в рядных пучках, ориентированных в осевом или окружном направлениях, с поворотами потока относительно осевого направления, полученные из проекторочных и поверочных расчётов, с использованием методов NTU и в системе ANSYS CFX, а также их сопоставление с результатом экспериментального исследования натурального ВВТ.

2. Численные значения снижения температуры в гладких цилиндрических трубках ВВТ диаметром 4,0, 5,0 и 6,0 мм, полученные по интегральным зависимостям, для их использования на этапе эскизного проектирования. Программа MICROSOFT EXCEL для их автоматизированного расчёта этих характеристик.

3. Характеристики тепловой эффективности модулей ВВТ, полученные расчётом по методике NTU, для рядного расположения цилиндрических трубок, ориентированных в осевом направлении, диаметры которых равны 4,0, 5,0 и 6,0 мм.

4. Характеристики влияния длины и количества поворотов потока в гладких, цилиндрических трубках, диаметром 4,0, 5,0 и 6,0мм, и овальных, с диагоналями 7,9×4,6 мм и 6,3×4,0мм, и пучках трубок, на изменение температуры воздуха на выходе из ВВТ, полученные расчётом в системе ANSYS CFX, а также величины их гидравлического сопротивления.

5. Влияние интенсификаторов теплообмена, установленных в овальные трубки (7,9×4,6 мм и 6,3×4,0мм), на изменение температуры воздуха на выходе из ВВТ, полученные расчётом в системе ANSYS CFX.

6. Результаты сравнения уровня снижения температуры и изменения гидравлического сопротивления пучков трубок при изменении расположения

цилиндрических $\varnothing 5,0$ мм и овальных с диагоналями $6,3 \times 4,0$ мм трубок ВВТ, устанавливаемых вдоль оси двигателя или в окружном направлении.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении поставлены цели и задачи диссертационного исследования. Показана теоретическая и практическая значимость работы. Представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту, а также охарактеризован личный вклад автора в работе над диссертацией. Предполагается рассматривать как результаты проектных, так и поверочных расчётов, включая результаты численных исследований в пакете ANSYS CFX, а результаты проведенных исследований оценивать на основе компромисса между достигнутым уровнем снижения температуры охлаждаемого воздуха и потерь давления охлаждающего воздуха в наружном контуре ТРДДм. При этом будут учитываться также и потери давления воздуха внутри трубок, от входа охлаждаемого воздуха до его выхода.

В первой главе показаны конструктивные особенности объектов исследований, сформулированы цели и задачи диссертационной работы. В этой главе рассматриваются возможности повышения эффективности охлаждения воздуха, отбираемого за компрессором газогенератора двухконтурного ГТД, в воздухо - воздушном трубчатом теплообменнике (ВВТ), установленном в его наружном контуре.

Уровень температуры газа перед турбиной высокого давления (ТВД) ГТД постоянно повышается, от одного поколения двигателей к другому поколению. Растут также требования к их надёжности и ресурсу. Кроме того, чем выше температура газа перед ТВД, тем меньше могут быть её габариты и масса при той же величине аэродинамической нагрузки, т.е. при $\pi_T = \text{Const}$.

Максимальная температура газа перед турбиной достигла в настоящее время очень высоких величин, до значений $1750 \dots 1850 \text{K}$. Одновременно с этим в ТРДД выросли максимальные величины степени повышения давления в их компрессорах, которые достигли уровня $\pi_{\text{КС}}^* = 40 \dots 50$. Эта величина степени повышения давления в компрессоре привела к увеличению температуры воздуха за КВД до значения 1000K , т.е. без какого-то либо существенного промежуточного охлаждения этот воздух не может быть использован в системе охлаждения ТВД двигателя с такими параметрами.

Система охлаждения ТВД и ВВТ является общей частью всей воздушной системы двигателя, при этом наличие ВВТ позволяет снизить уровень температуры газа на входе в рабочие и сопловые лопатки ТВД, температуру диска турбины, охладить опоры горячей части двигателя и т.д. Снижение температуры охлаждающего воздуха имеет весьма важное значение для увеличения их ресурса и надёжности. Вместе с тем, при установке ВВТ возникают не только положительные, но и отрицательные факторы, которые должны учитываться и минимизироваться. Например, увеличивается масса двигателя, появляются дополнительные потери давления газа в наружном контуре двигателя и т.д.

В первой главе этой работы выполнено исследование конструктивных особенностей компактных воздухо - воздушных теплообменников (ВВТ), устанавливаемых в системе охлаждения турбины газогенератора ТРДД. Рассмотрены конструкции ВВТ с U – образными трубками перекрёстного тока, расположенных в рядном порядке вдоль направления потока воздуха в наружном контуре ТРДДм или в поперечном направлении, отличающимися диаметральными размерами трубок, количеством поворотных участков, их длиной и формой - цилиндрической или овальной.

В результате проведенных исследований получены следующие выводы:

1. Применение ВВТ в системе охлаждения ТВД современных и перспективных ТРДДм целесообразно, поскольку позволяет дополнительно снизить температуру охлаждающего воздуха, подаваемого во внутреннюю полость охлаждаемой лопатки ТВД, которая является критичным, по уровню надёжности и ресурса, элементом конструкции горячей части ВРД.

2. Анализ параметров и конструкции современных ВВТ, применяемых в системах охлаждения ТВД, показал, что имеются резервы повышения их эффективности, к которым относится, например, использование:

- овальных трубок с интенсификаторами теплообмена, обеспечивающих срывы потока охлаждаемого воздуха с внутренней стенки овала или цилиндра ВВТ;

- цилиндрических трубок малых диаметров, также с интенсификаторами теплообмена, и т.д.

3. Поворотные радиусные участки, устанавливаемые с целью ограничения высоты прямых трубок ВВТ, также являются интенсификаторами теплообмена прямых участков трубок ВВТ. Поэтому при расчётной оценке снижения температуры охлаждаемого воздуха на прямых участках U- образных трубок ВВТ надо учитывать индивидуальную структуру протекающего на этих участках потока охлаждаемого воздуха.

4. Потери давления охлаждаемого воздуха внутри трубок с интенсификаторами теплообмена, представляющими собой кольцевые выступы, расположенные на внутренней поверхности трубок, при увеличении их высоты могут составлять значительную величину. Это их свойство необходимо рассматривать при проектировании с тем, чтобы определять их оптимальные размеры.

Во второй главе представлены результаты расчетов по влиянию геометрических размеров, длины и диаметра, а также формы трубок в компактных ВВТ системы охлаждения турбины и конструктивных способов интенсификации теплообмена, на характеристики ВВТ.

Рассматривается два этапа проектной работы:

- проектный расчёт, в котором определяется суммарная длина и диаметр трубок, при заданной величине снижения температуры охлаждаемого воздуха на выходе из ВВТ;

- поверочный расчёт спроектированной конструкции модуля ВВТ, выполненный по методике NTU, в результате чего также определяется уровень

снижения температуры в проектируемом ВВТ.

В этом исследовании диаметральные размеры цилиндрических трубок изменяются от 4,0 мм до 6,0 мм. Диагональные размеры овальных трубок 6,3×4,0 мм, а заданный уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха изменяется от 90°К до 232°К. Результаты всех этих расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 Влияние уровня снижения температуры охлаждаемого воздуха и диаметального размера трубок на длину цилиндрической трубки

ΔT (К)	Цилиндр			Эллипс
	Ø6 мм GГ = 9,29 кг/с	Ø5 мм GГ = 6,45 кг/с	Ø4 мм GГ = 4,13 кг/с	6,3·4,0 мм GГ = 6,45 кг/с
	L (м)	L (м)	L (м)	L (м)
90	0.79712	0.617764	0.41021	0.579088
150	1.556991	1.196205	0.788909	1.121316
190	2.24546	1.713539	1.124242	1.606261
232	3.252225	2.461314	1.604739	2.307221

Диаметральные размеры трубок существенно влияют на интенсивность теплообмена и требуемую длину трубки при одном и том же диапазоне снижения температуры охлаждаемого воздуха. Из данных, представленных на Рис. 1 видно, что уменьшение диаметра трубы приводит к уменьшению длины трубы, необходимой для такого же снижения температуры. Так же видно, что эллиптические трубы требуют меньшей длины по сравнению с цилиндрическими трубами эквивалентной площади при одном и том же уровне снижения температуры охлаждаемого воздуха.

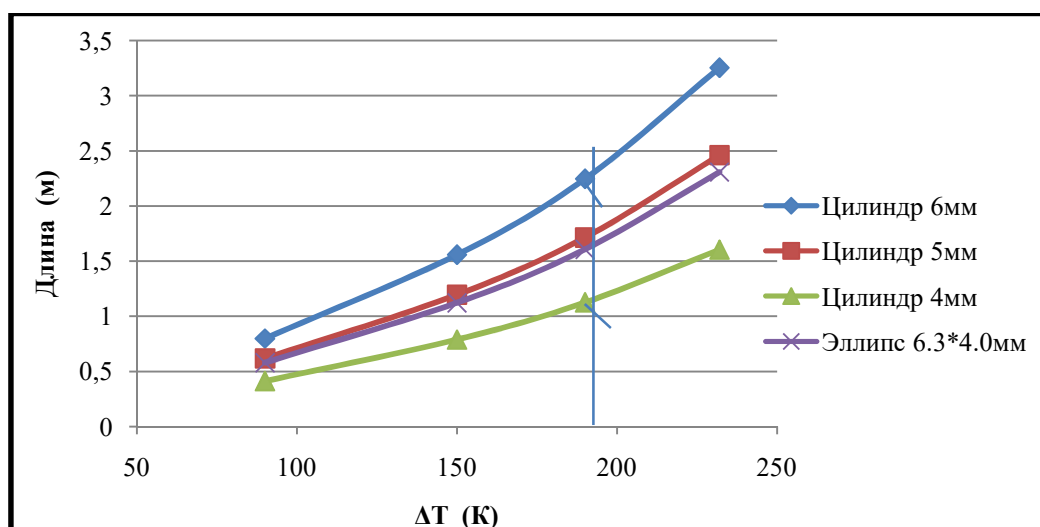


Рис.1 Зависимость $L = f(\Delta T_{\text{охл}}, D_{\text{тр}})$

Во второй части этой главы представлены результаты поверочных расчетов модуля ВВТ по методике NTU с трубками малого диаметра, которые были сопоставлены с данными эксперимента, проведенного при исследовании ВВТ в системе двигателя.

На Рис. 2 показана конструктивная схема исследуемого ВВТ, установленного в наружном контуре ГТД. Наружный диаметр этих трубок - 5,0 мм.

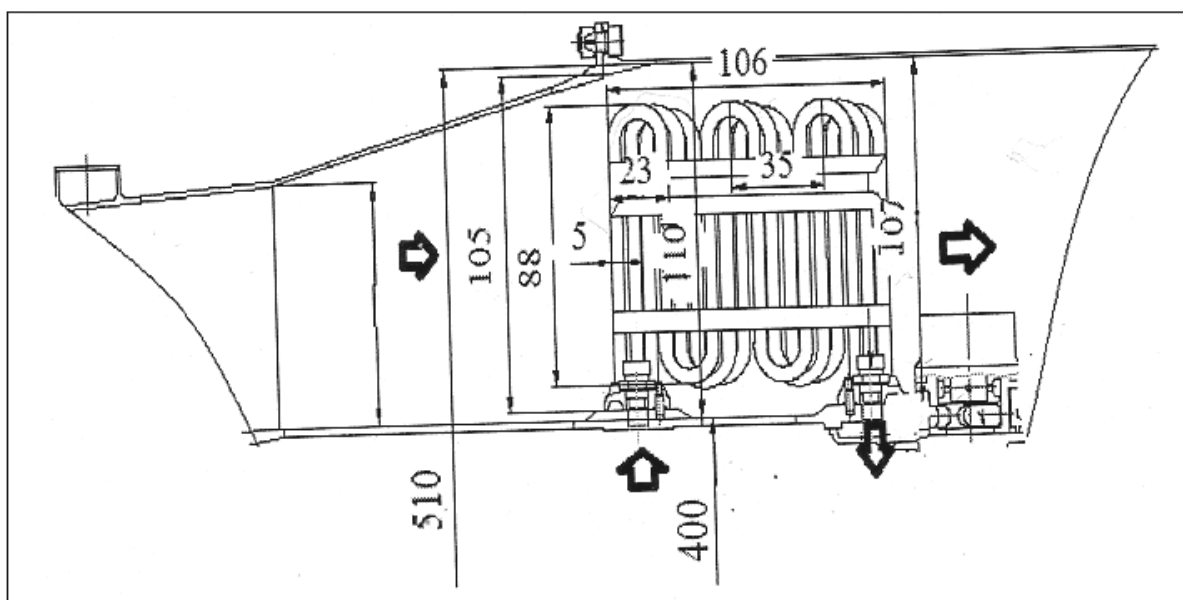


Рис. 2 Конструктивная схема ВВТ перекрёстного тока

Ниже представлены результаты исследований ВВТ и сопоставления их результатов с данными, полученными при исследовании прямых цилиндрических и овальных трубок диаметром 4,0 мм и 6,0 мм. Теплообменник, показанный на Рис. 2, имеет три трубы, которые имеют пять поворотных участков. Кроме того, были проведены расчеты для модификации этого теплообменника, который имеет большее число, четыре трубки и пять поворотных участков. Число Нуссельта для этого типа теплообменника изменяется от $Nu = 179$ для трубки диаметром 4,0 мм до $Nu = 245$ для трубки диаметром 6,0 мм. При этом диапазон изменения коэффициента теплоотдачи внутри труб ВВТ равен 2800...3250 Вт/м²К. Температура охлажденного воздуха на выходе из теплообменников для этих двух типов показана в таблицах 2 и 3.

Из данных этих таблиц видно, что при пропорциональном увеличении суммарного расхода воздуха через блок теплообменников, оба теплообменника имеют одинаковые характеристики по величине снижения его температуры на выходе. Преимущество использования теплообменника с четырьмя трубками состоит в том, что он может охлаждать большее количество воздуха, чем теплообменник с тремя трубками. Кроме того, из данных этих таблиц видно, что наиболее эффективна, по интенсивности снижения температуры охлаждающего воздуха трубка с минимальным диаметром, равным 4,0 мм.

Вместе с тем, нельзя делать выводы о достоинстве или недостатках применения трубок малых диаметров только по одной характеристике, их тепловой эффективности. Необходимо рассмотрение всех влияющих факторов, включая потери давления охлаждаемого воздуха внутри трубок и уровень изменения потерь давления воздуха в наружном контуре ТРДД, при установке в этом контуре блоков ВВТ. Кроме того, при выполнении 3D расчётов, в системе ANSYS CFX, полученные выше расчётные результаты могут быть скорректированы.

Таблица 2. ВВТ с 3-мя поворотными трубками, через которые входит охлаждаемый воздух, и 18-ю (3·6) пересечениями цилиндрических прямых участков поперечно обтекаемого пучка трубок

Диаметры трубок (мм)	Суммарный расход воздуха через блок теплообменников кг/с	Расход воздуха в одной трубке кг/с	ΔT К
6	9,28	0,0242	93
5	6,45	0,0168	112.5
4	4,128	0,01075	139.5

Таблица 3. ВВТ с 4-мя поворотными трубками, через которые входит охлаждаемый воздух, и 24-мя (4·6) пересечениями цилиндрических прямых участков поперечно обтекаемого пучка трубок

Диаметры трубок (мм)	Суммарный расход воздуха через блок теплообменников кг/с	Расход воздуха в одной трубке кг/с	ΔT К
6мм	12,384	0,02482	96.3
5мм	8,579	0,0168	116.5
4мм	5,504	0,01075	145

В третьей главе диссертации рассмотрены результаты исследований эффективности прямых и много поворотных цилиндрических и овальных гладких трубок малого диаметра, выполненных с использованием ANSYS CFX, с целью получения рекомендаций по их применению в ВВТ. Исходные данные для всех расчетов следующие:

по охлаждаемому воздуху - расход воздуха $G_1 = 6.45$ кг/с; давление на входе в ВВТ $p_{11} = 23,64 \cdot 10^5$ Па; температура воздуха на входе в ВВТ $T_{11} = 800$ К; скорость потока воздуха внутри трубок $W_1 = 70$ м/с.;

по нагреваемому воздуху второго контура ТРДДм - расход воздуха $G_2 = 40$ кг/с; давление на входе в ВВТ $p_{21} = 3,69 \cdot 10^5$ Па; температура на входе $T_{21} =$

450 К; скорость $W_2 = 57$ м/с.

Диаметральные размеры трубок и диагоналей овала: цилиндры – 6,0 мм, 5,0 мм, 4,0 мм; овалы (эллипс) – (7,9·4,6) мм и (6,3·4,0) мм. Длина трубок – от 0,11 м до 1,2 м.

В первой части третьей главы рассматриваются результаты исследований прямых одинарных цилиндрических и овальных трубок малого диаметра. Эти результаты приведены на Рис. 3 и 4.

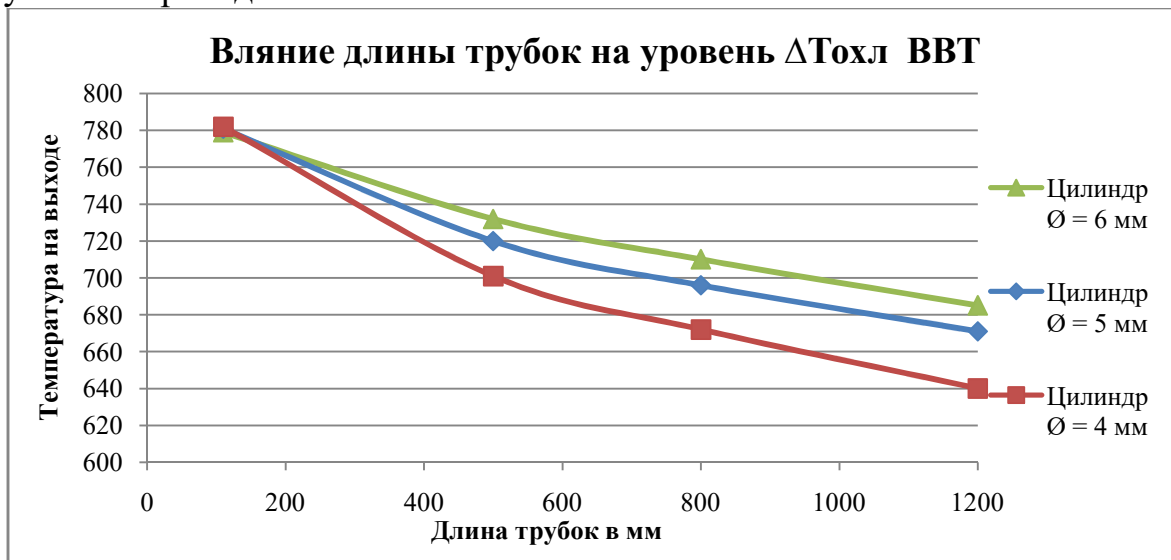


Рис. 3 Влияние длины гладких цилиндрических трубок на величину $\Delta T_{охл}$

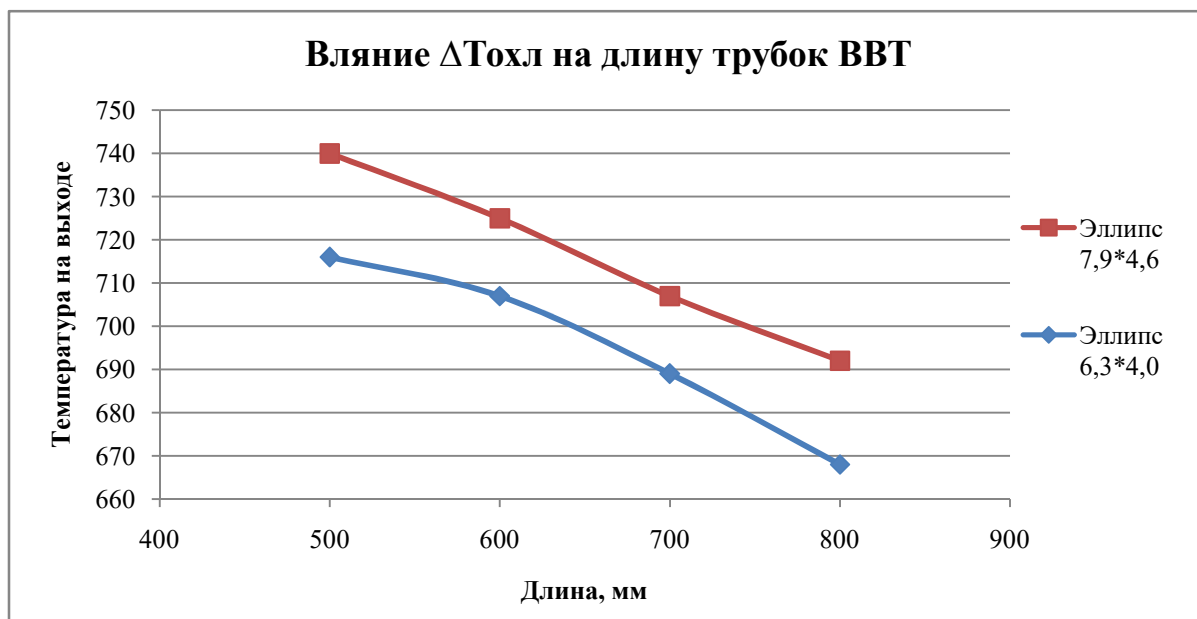


Рис. 4 Снижение температуры охлаждаемого воздуха на выходе из овальных (эллипсных) трубок ВВТ

Из этих графиков видно, что одинарные овальные трубки, по величине снижения температуры охлаждаемого воздуха, примерно на 30% более эффективны, чем одинарные цилиндрические трубы. Еще одно преимущество использования овальных труб состоит в том, что они имеют меньшее гидравлическое сопротивление, чем цилиндрические трубки.

Следующая часть исследования главы 3 посвящена много поворотным цилиндрическим ($D = 5,0$ мм) и овальным трубкам ($6,3 \times 4,0$ мм). Изменение температуры и эпюры скоростей потока охлаждаемого воздуха внутри цилиндрической трубки показано в Рис.5, а внутри овальной трубки - на Рис.6.

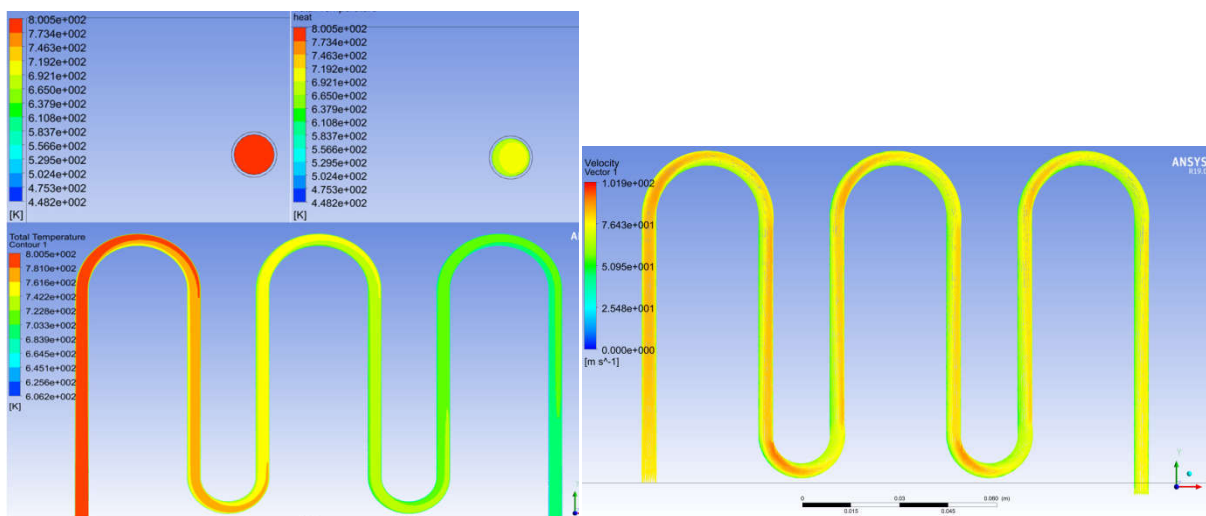


Рис. 5 Изменение температуры и эпюры скоростей потока охлаждаемого воздуха внутри много поворотной цилиндрической трубки, средняя температура воздуха на выходе 680 К

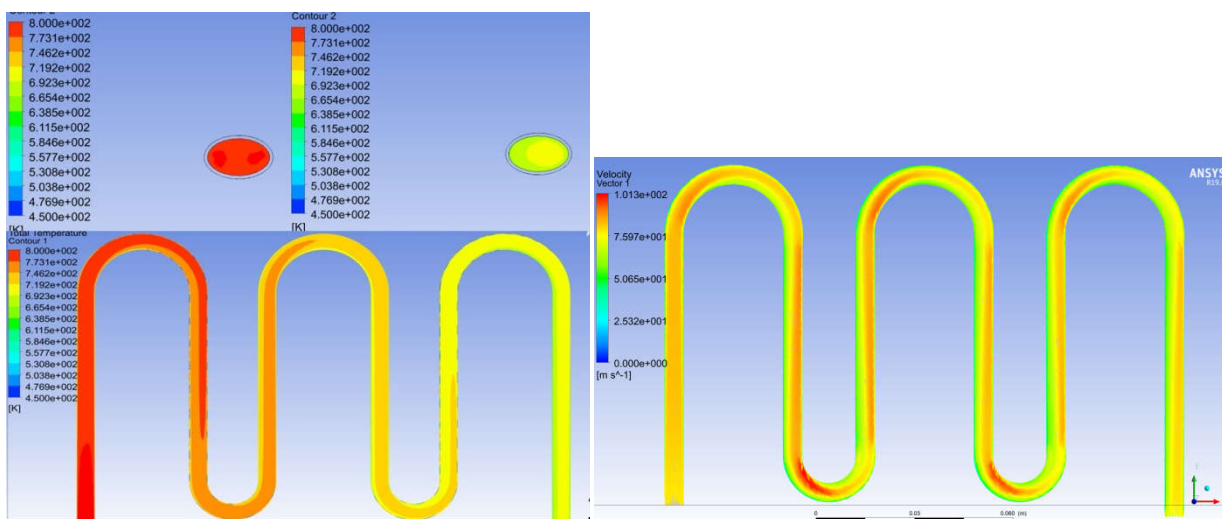


Рис. 6 Изменение температуры и эпюры скоростей потока охлаждаемого воздуха внутри много поворотной овальной трубки, средняя температура воздуха на выходе 678 К

В результате этих расчётных исследований было обнаружено, что в обеих трубках получены сходные характеристики по величине снижения температуры охлажденного воздуха.

Следующий этап исследований фокусируется на определении разницы в тепловых характеристиках цилиндрических и овальных труб, установленных по рядной или шахматной компоновочной схеме.

Рассмотрены два варианта геометрии трубок: цилиндрические с диаметром 6,0 мм и овальные трубки с диагональными размерами 7,9×4,6 мм, эквивалентные по площади проходных сечений и установленные в рядном или в шахматном порядке. Для корректности сравнения, длины всех вариантов были приняты одинаковыми - 800 мм. На Рис. 7 показаны эпюры температур охлаждаемого воздуха на выходе из цилиндрических и овальных трубок рядного пучка, а на Рис. 8 показаны эпюры температуры этих же трубок, установленных в шахматном порядке. График, показывающий тепловые характеристики этих вариантов проектирования ВВТ, показан на рис. 9

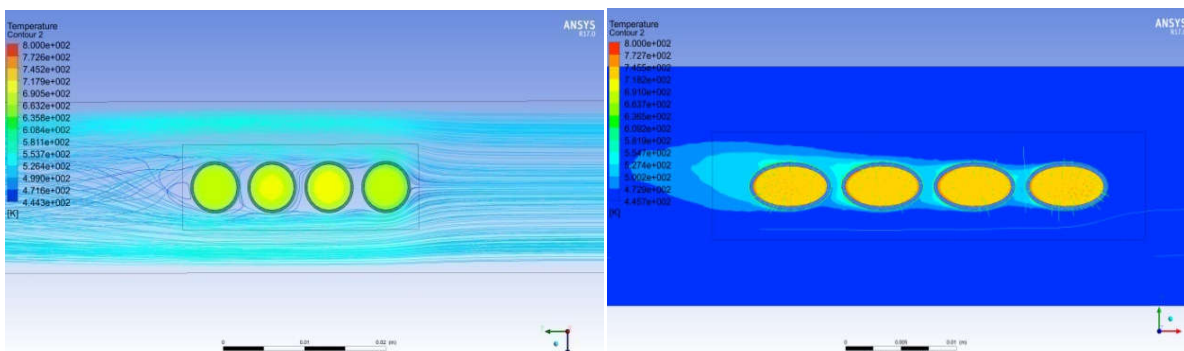


Рис. 7 Эпюры температур охлаждаемого воздуха на выходе из цилиндрических и овальных трубок рядного пучка

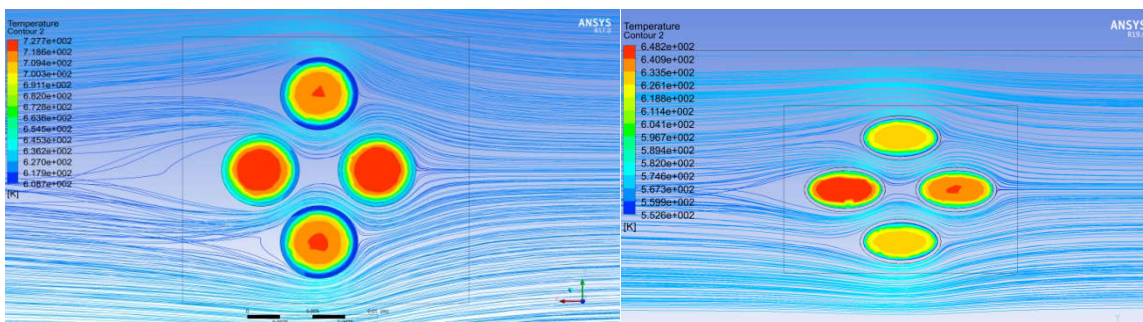


Рис. 8 Эпюры температур охлаждаемого воздуха на выходе из цилиндрических и овальных трубок собранных в шахматном порядке

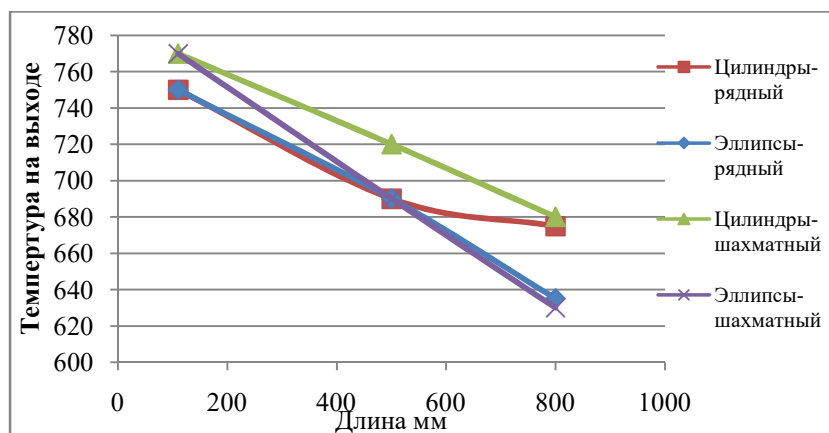


Рис. 9 Влияние длины трубок и их формы, круглой или овальной, на уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха в рядном и шахматном пучках

Видно, что в пучке трубок их характеристики существенно меняются. Как в рядном, так и в шахматном порядке расположения трубок, пучок овальных трубок имеет значительно лучшие характеристики по величине $\Delta T_{\text{охл.}}$, чем пучок цилиндрических трубок

В последнем разделе этой главы рассмотрены особенности потерь давления воздуха при наружном обтекании пучков рядных трубок, ориентированных вдоль или поперёк оси ГТД. Исследованные варианты показаны на Рис. 10. Графическое представление результатов показано на Рис.11.

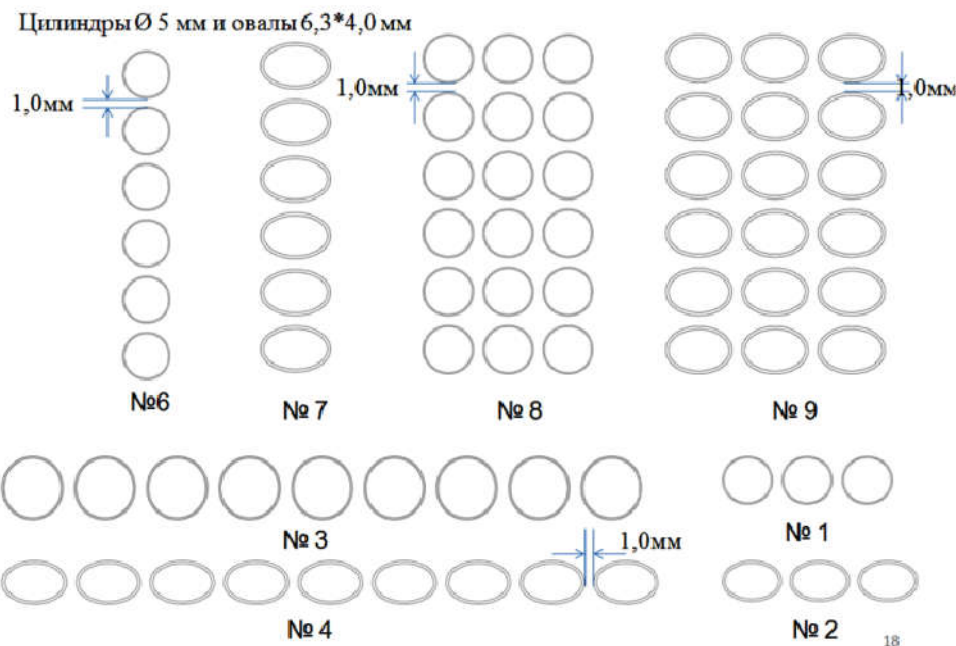


Рис. 10 Варианты исследованных цилиндрических и овальных трубок, установленных в осевые и поперечные пучки



Рис. 11 Изменение гидравлического сопротивления трубчатых пучков, отличающихся формой (цилиндр или эллипс), количеством трубок в одном пучке и их ориентацией относительно оси ГТД

Из Рис. 11 видно, что пучки труб, расположенные в окружном направлении от оси двигателя, имеют значительно более высокое гидравлическое сопротивление, чем пучки труб, расположенные в осевом направлении от этой оси, т.е. почти в два раза.

В четвертой главе рассматриваются результаты исследований влияния кольцевых интенсификаторов теплообмена в цилиндрических и овальных трубках малого диаметра, применяемых в ВВТ ГТД. На рис. 12 представлены геометрические размеры кольцевых выступов, выполненных на внутренней стенке прямой трубки, высотой 0,3 мм. Ниже даны размеры, характеризующие площадь поперечного сечения исследуемых трубок:

- трубка цилиндрической формы, $(\Delta \times D_{\text{вн}}) = 0,3 \times 5,4$ мм, где $d_1/d_2 = 4,8/5,4 = 0,89$; $(\Delta \times t) = 0,3 \times 6,0$ мм; $D \times d_2 = 6,0 \times 5,4$ мм;

- трубка эллипсной формы, её наружные и внутренние диагонали $4,0 \times 6,3$ мм и $3,4 \times 5,7$ мм, форма и размеры продольного сечения стенки аналогичны предыдущему варианту проектирования.

Было исследовано три разных комплекта трубок: цилиндрические трубки диаметром 6,0 мм и эллиптические трубки, размеры диагоналей $7,9 \times 4,6$ мм и $6,3 \times 4,0$ мм. Длина трубок варьировалась от 500 мм до 800 мм. Результаты расчетов, проведенных с использованием ANSYS CFX, представлены на Рис. 13. Из этого графика видно, что эллиптические трубки с интенсификаторами имеют гораздо более высокий уровень снижения температуры охлаждаемого воздуха, чем цилиндрические трубки, с такими же интенсификаторами, почти на 40%. В эллиптической трубке размером $6,3 \times 4,0$ мм охлаждаемый воздух снижает свою температуру на 200°K .

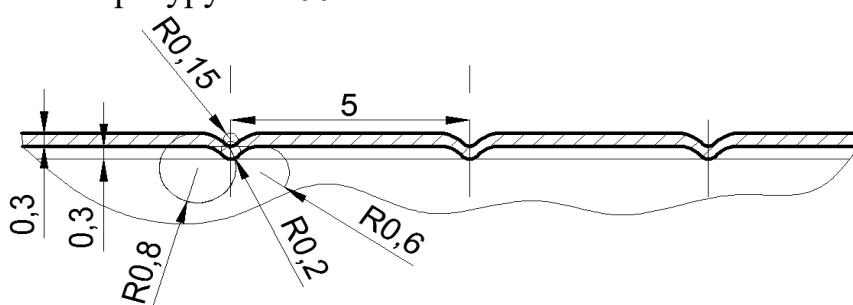


Рис. 12 Геометрические размеры интенсификаторов теплообмена, устанавливаемых в исследуемых трубках ВВТ

Следующим этапом этой работы является исследование снижения температуры охлаждающего воздуха и гидравлического сопротивления пяти перекрёстной цилиндрической трубки, диаметром 5,0 мм, и овальной трубки, с диагоналями овала $6,3 \times 4,0$ мм и интенсификаторами охлаждения внутреннего потока воздуха. Наружный контур этих трубок был показан на Рис. 14.

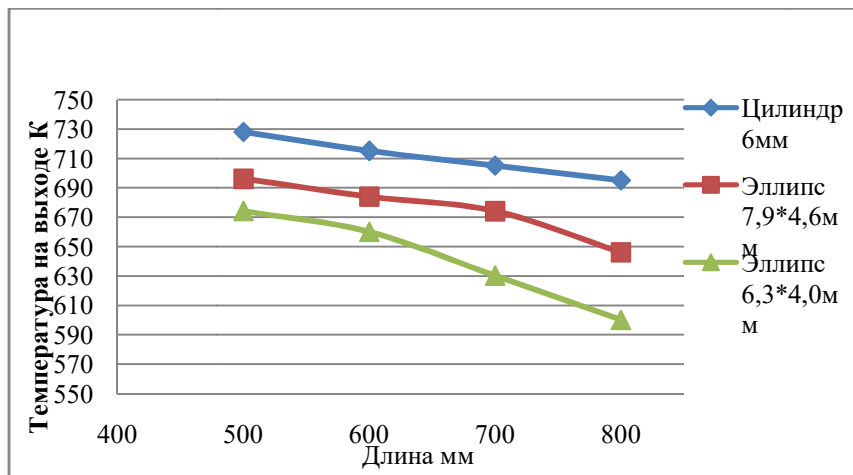


Рис. 13 График изменения температуры охлаждающего воздуха в градусах К на выходе их прямых цилиндрической и эллипсных трубок ВВТ с интенсификаторами теплообмена, температура входа 800°C

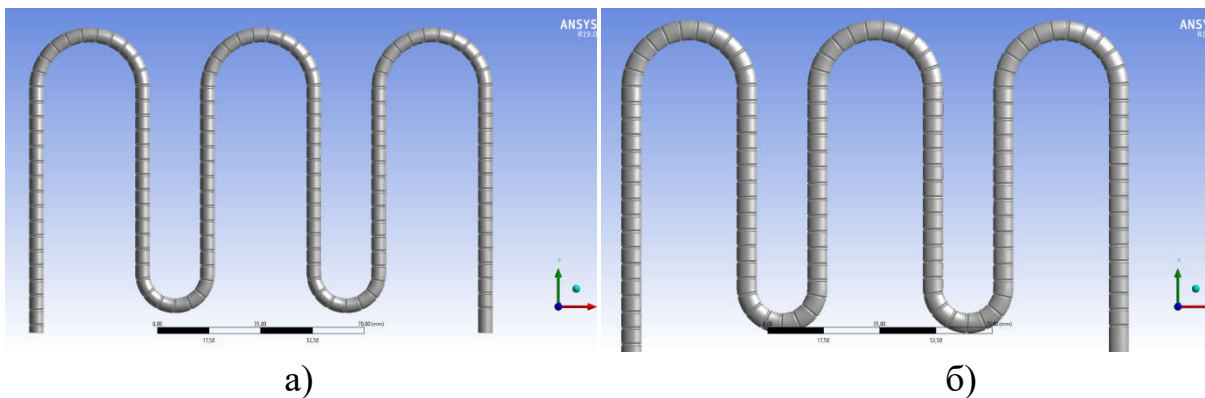


Рис.14 Наружный контур пяти поворотной а) цилиндрической трубки, диаметром 5,0 мм и б) овальной трубки, с диагоналями овала 6,3х4,0 мм с интенсификаторами теплообмена потоков воздуха

Поле скоростей потока в этих трубках показано на Рис. 15. Эпюра скоростей в верхней части поворотного канала показана на Рис 16.

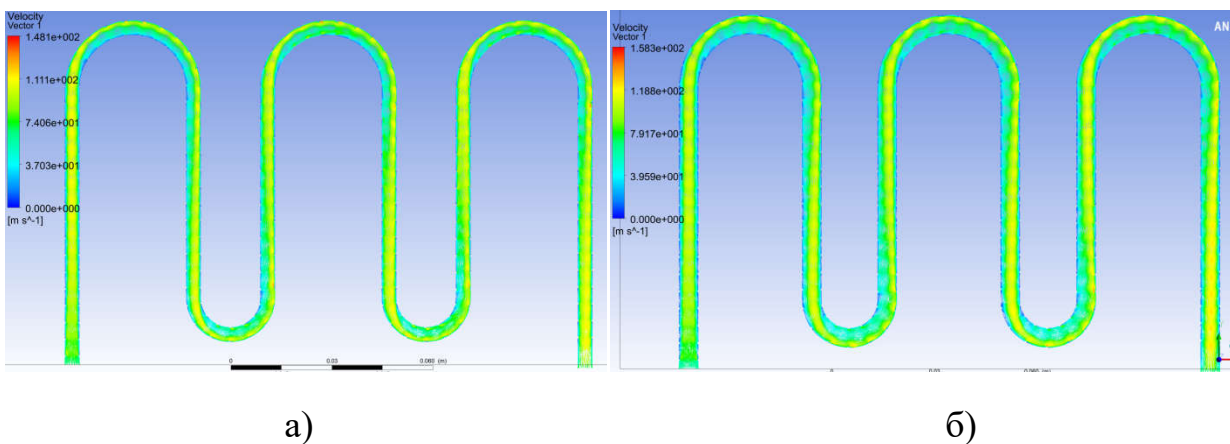


Рис. 15 Изменение поля скоростей воздуха по длине ВВТ с а) цилиндрическими трубками и б) овальными трубками

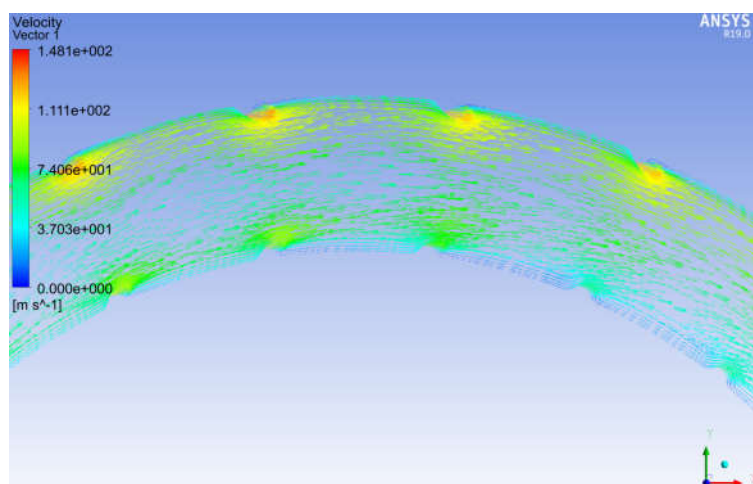


Рис. 16 Эпюра скоростей в верхнем канале трубки с поворотом потока

Таблица 4. Температура воздуха на выходе из изогнутых цилиндрических или овальных трубок длиной 680 мм

Параметр	Цилиндр	Овал (эллипс)
Температура (К) на выходе из трубок	641К	634К
$\Delta T_{\text{охл}}$	159К	166К

Таблица 5. Температуры воздуха и потери давления воздуха на выходе из овальных трубок длиной 500 мм с интенсификаторами теплообмена

Овальные трубки с интенсификаторами теплообмена (выступами)	ΔT К	σ (%)
0,15мм	94°	7
0,30мм	103°	21,5
0,50мм	120°	42,67

Из данных таблицы 4 чётко видно, что использование интенсификаторов теплообмена с кольцевыми выступами высотой 0.3 мм, устанавливаемых в прямые овальные трубки с диагоналями 6.3×4.0 мм, позволяет увеличить интенсивность охлаждения горячего воздуха, протекающего в трубках ВВТ, примерно на 30 %, $\Delta T_{\text{охл}} = 160^\circ$.

Потери давления в овальных трубках ВВТ, при использовании кольцевых интенсификаторов теплообмена, высотой не более 0,3 мм, в трубках овальной формы, с диагоналями 6.3×4.0 мм, должны быть не более 20 - 25 %.

В пятой главе представлено сопоставление результатов расчётных исследований изменения температуры охлаждающего воздуха в различных модификациях теплообменников, диаметром трубок 5,0 мм.

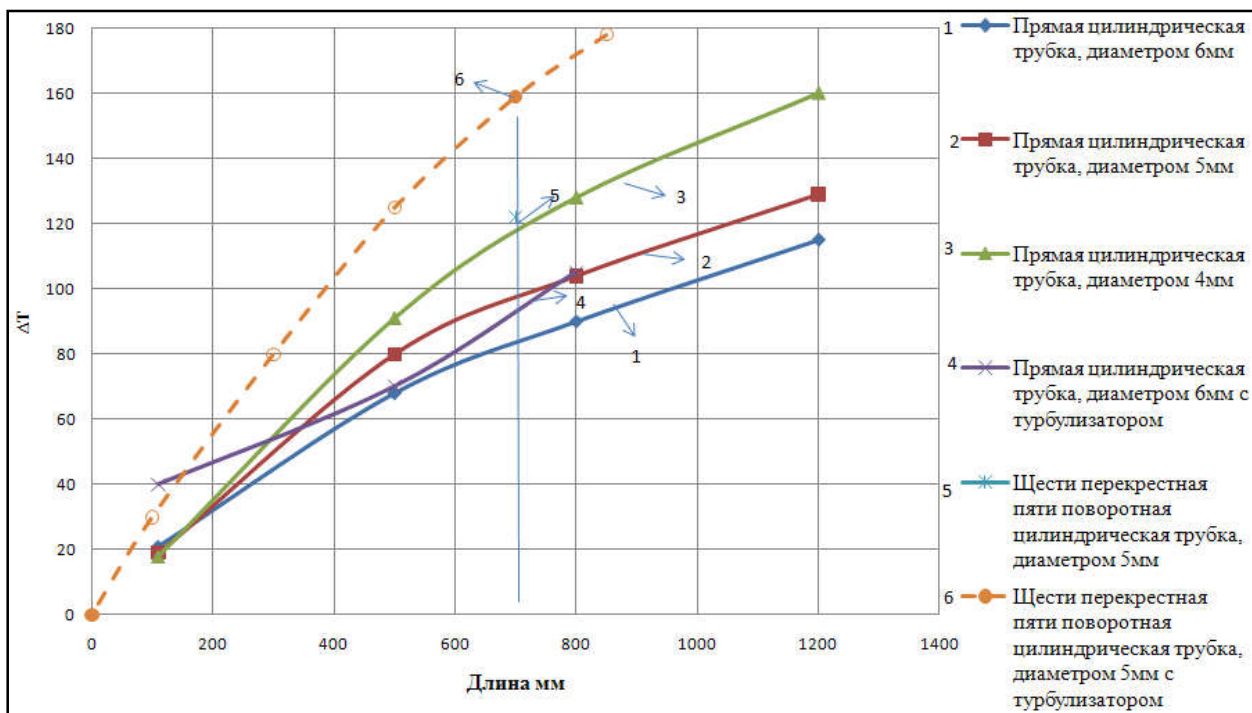


Рис. 17 Зависимости изменения величины снижения температуры охлаждаемого воздуха, в прямых малоразмерных цилиндрических трубках с поворотами потока этого воздуха на 180° , в зависимости от их диаметра и длины, при гладкой стенке и наличии интенсификаторов теплообмена на внутренней поверхности трубок, высотой $0,3$ мм.

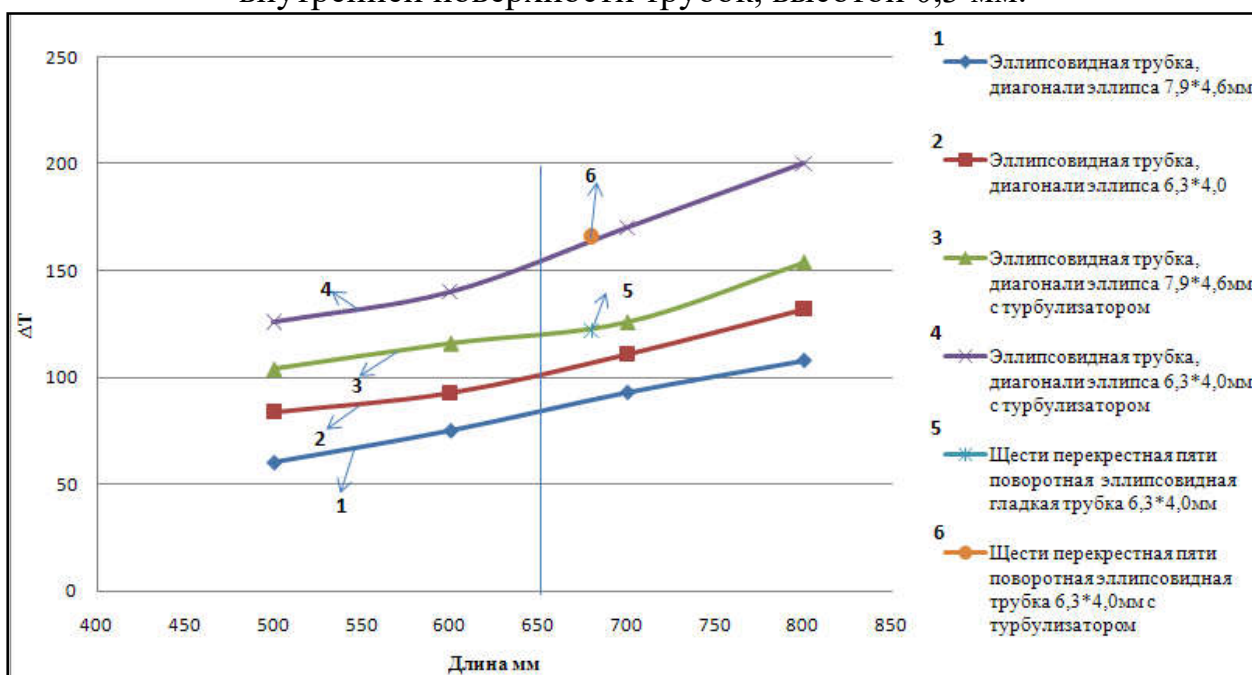


Рис. 18 Зависимости изменения температуры охлаждаемого воздуха на выходе из одиночных прямых эллипсных трубок и этих трубок с поворотами потока воздуха на 180° в зависимости от их длины, размеров диагоналей эллипса и наличия интенсификаторов теплообмена потока воздуха

В ВВТ, показанном на Рис. 19, имеется три трубки большого диаметра – $6,0$ мм. В одной трубке этого ВВТ охлаждается воздух G_1 , отбираемый из

промежуточной ступени КВД, а в двух других - также диаметром 6,0 мм, охлаждается воздух G_2 , отбираемый на выходе из КВД - из канала I, расположенного над жаровой трубой камеры сгорания.

На выходе из этого комбинированного ВВТ, охлаждённый воздух G_1 поступает во внутреннюю - дефлекторную полость соплового аппарата (СА) ступени турбины НД, и далее из неё - в полость между дисками турбин ВД и НД ТРДДм. Воздух G_2 предназначен для охлаждения деталей ТВД в междисковой полости.

Таким образом, в этой конструктивной схеме комбинированной системы охлаждения, устанавливается один ВВТ рядного типа. Его гидравлическое сопротивление существенно ниже, чем в ранее применяемой схеме с двумя ВВТ. Немаловажно также, что увеличение диаметрального размера наружного контура двигателя в этом случае не требуется.

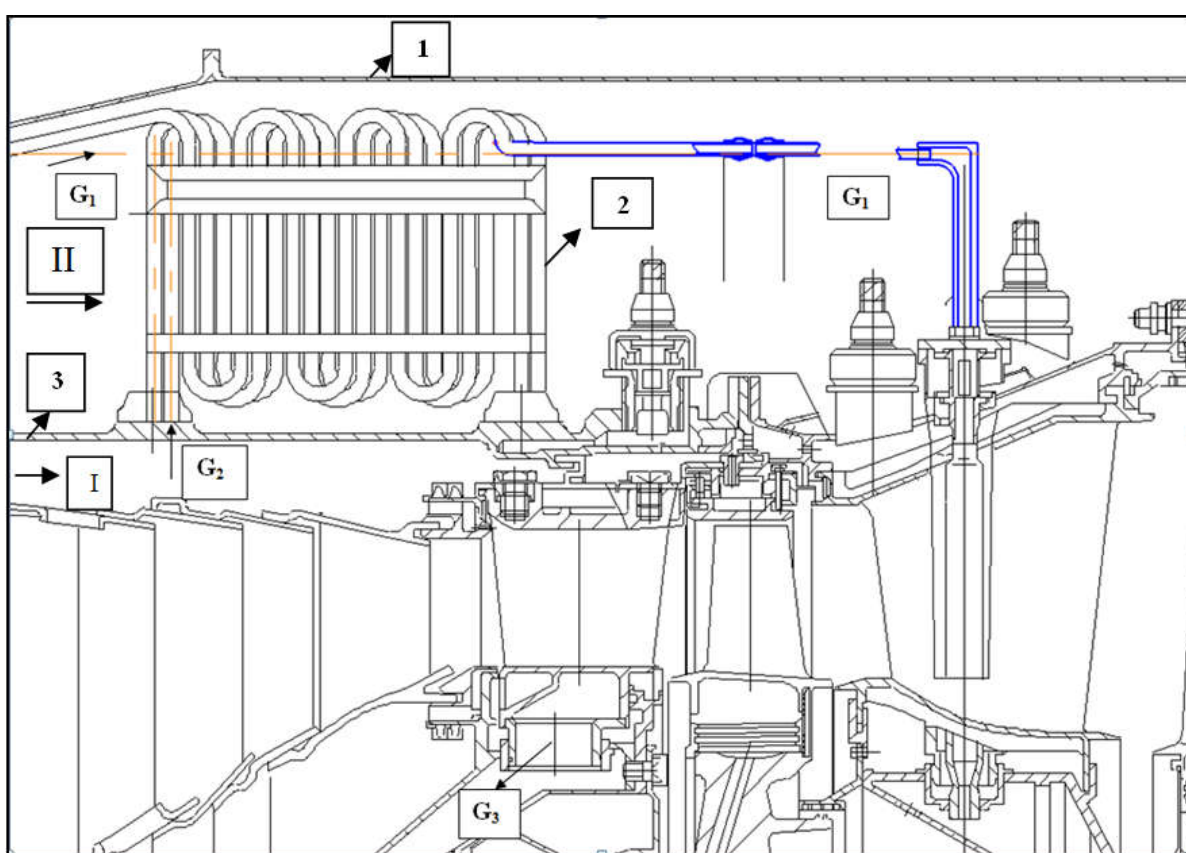


Рис. 19 Конструктивная схема комбинированного ВВТ, в котором охлаждается воздух, отбираемый: из промежуточной ступени G_1 и за последней ступенью компрессора G_2

В заключение данного раздела и всей работы в целом на Рис. 20 представлен перечень проектных работ, необходимых при разработке конструкции ВВТ авиационного ГТД, предназначенного для системы охлаждения ТВД ТРДДм.

Этот теплообменник обеспечивает понижение температуры подводимого к турбине высокого давления воздуха для охлаждения её сопловых и рабочих лопаток, дисков, деталей корпуса и опоры ротора.



Рис.20 Этапы проектных работ по созданию ВВТ системы охлаждения ТВД авиационного ГТД

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение ВВТ в системе охлаждения ТВД современных и перспективных ТРДДм целесообразно, поскольку позволяет дополнительно снизить температуру охлаждающего воздуха, подаваемого во внутреннюю полость охлаждаемой лопатки ТВД, которая является критичным элементом конструкции горячей части ВРД по уровню его надёжности и ресурса.

2. Анализ параметров и конструкции современных ВВТ, применяемых в системе охлаждения ТВД, показал, что имеются резервы повышения их эффективности, к которым относится следующее:

- использование овальных трубок с интенсификаторами теплообмена, обеспечивающих отсутствие утолщения пограничного слоя по длине трубки;
- использование цилиндрических трубок малых диаметров, также с интенсификаторами теплообмена, и т.д.

3. Поворотные радиусные участки, устанавливаемые с целью ограничения высоты прямых трубок ВВТ, также являются интенсификаторами теплообмена на прямых участках трубок ВВТ. Поэтому при расчётной оценке снижения температуры охлаждаемого воздуха на прямых участках U-образных трубок ВВТ надо учитывать структуру протекающего потока .

4. Потери давления охлаждаемого воздуха внутри трубок с интенсификаторами теплообмена, представляющими собой кольцевые выступы в проточную часть трубки, составляют значительную величину, и это их

свойство необходимо рассматривать при проектировании с тем, чтобы искать способы их уменьшения.

5. В результате выполненных расчётных исследований получены количественные характеристики снижения температуры охлаждаемого воздуха и изменения их гидравлического сопротивления при обтекании малоразмерных одиночных трубок ВВТ, диаметром 4.0, 5.0 и 6.0 мм, собранных в пучки, охлаждаемые наружным воздухом, изогнутые, с периодически повторяющимися поворотами потока на 180° и отличающиеся:

формой трубок, цилиндрической или овальной, равнозначной по площади их поперечных сечений;

внутренней поверхностью трубок - гладкой или с установленными внутри трубок кольцевыми интенсификаторами теплообмена, высотой 0,15, 0,3 и 0,5 мм.

6. 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 ВВТ.

7. При отборе охлаждающего воздуха от компрессора в систему охлаждения турбин ТРДДм, включая его отбор от промежуточной ступени компрессора и за его последней ступенью, можно рекомендовать использование ВВТ, конструктивная схема которого представлена на Рис. 5.24, в котором охлаждаются оба потока воздуха.

Публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Аббаварам Р.Р., В.Г. Нестеренко. Конструктивные особенности и эффективность компактных воздухо-воздушных теплообменников, устанавливаемых в системе охлаждения турбин двухконтурного воздушно реактивного двигателя// Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=98253>

2. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В. Г. Воздухо-воздушный теплообменник для системы охлаждения турбин двухконтурных воздушно реактивных двигателей // Научно-технический журнал "Двигатель". 2018. №5. С. 10-12.

3. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В.Г. Воздухо-воздушные теплообменники системы охлаждения ротора турбины высокого давления в современных авиационных турбореактивных двухконтурных двигателях // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание, 2018. №11. URL: <http://engjournal.ru/catalog/arse/teje/1827.html>

4. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В. Г. Особенности проектирования и повышения эффективности трубчатых, воздухо – воздушных теплообменников, устанавливаемых в системах охлаждения современных и перспективных турбин ГТД // Научно–технический вестник Поволжья. 2017. №4. С. 48–50.

5. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В.Г. Совершенствование системы охлаждения современных высоко температурных ТВД авиационных ГТД// Научно–технический вестник Поволжья. 2017. №6. С. 75–78.

6. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В.Г. Конструктивные методы совершенствования критичных узлов системы охлаждения современных высоко температурных ТВД авиационных ГТД // Научно–технический вестник Поволжья.2018. №5. С. 73–77.

Публикации в других изданиях:

7. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В.Г. Нестеренко В.В. и др. Исследование и анализ эффективности систем воздушного охлаждения лопаток турбин высокого давления ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 7. С. 83–93.

8. Аббаварам Р.Р., Нестеренко В. Г. Improvement of the design and methods of designing tubular air-to-air heat exchangers cooling systems of gas turbines// ICAS 2016 г. URL:

https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2016/data/papers/2016_0433_paper.pdf

9. Аббаварам Р. Р., Ле Т.З., Богданович В.И. Конструктивное совершенствование критичных узлов и деталей современных и перспективных авиационных двигателей летательных аппаратов// сб. труд. XLII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 12-15 апреля 2016).– М.: Изд-во МАИ, 2016,-Т. 3. – С. 50–51 (753 с.)

10. Abbavaram R. R., Le T.Z., Bogdanovich V.I., Nesterenko V. G. «Use of Finite Element Method (ANSYS Workbench) in the engineering analysis of thermal and stress state of the critical components of the rotor and stator assemblies of turbine gas generators used in modern civil turbofan engines // Proceedings of the 16th International Conference of Iranian Aerospace Society 2017 (Tehran, 21-23 February 2017). –Т.: K. N. Toosi University of Technology, 2017, - V. 1. (2330 p.).