

УДК 621.452.32

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Р. Г. Дадоян¹, А. Е. Михайлов², Д. А. Ахмедзянов³, А. Б. Михайлова⁴

¹razmik.ad@mail.ru, ²mikhailov.ugatu@gmail.com, ³ada@ugatu.ac.ru, ⁴alexandra11112007@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 09.03.2021

Аннотация. Выполнено исследование по определению облика перспективного рекуператора для малоразмерного газотурбинного двигателя, а также проведен анализ компоновки малоразмерного турбовального двигателя (ТВаД) с рекуператором для подогрева воздуха, отбираемого за компрессором, продуктами сгорания топливовоздушной смеси из-за свободной турбины на основе двигателя ТЖ-100. Выполнено исследование различных компоновок рекуператоров для МГТД, их теплогидравлических характеристик.

Ключевые слова: МГТД; ТВаД; ТВаД с регенерацией тепла; рекуператор; SLM; CFD.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к перспективным авиационным силовым установкам предъявляются требования по значительному снижению выбросов вредных веществ и повышению топливной эффективности. Программа VISION 2020 предполагает относительно параметров силовых установок летательных аппаратов 2000-х гг. снижение выбросов углекислого газа CO₂ на 50 %, выбросов оксидов азота NO_x на 80 %, снижение шума на 50 %. К 2050 г., согласно программе FLIGHTPATH 2050, выбросы CO₂ должны быть сокращены на 75 %, NO_x на 90 % и шум на 65 %.

ГТД традиционных схем не удовлетворяют перспективным требованиям по экологичности (шум, эмиссия CO, CO₂, NO_x) и топливной эффективности, устанавливаемым международными регуляторами. Для достижения целевых индикаторов по экологичности и топливной эффективности требуется переход к авиационным силовым установкам новой архитектуры. Дорожная карта развития авиационных двигателей от MTU Aero Engine (программа NEWAC)

включает авиационные двигатели следующих архитектур:

– двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД) со сверхвысокой степенью двухконтурности и редукторным приводом вентилятора;

– турбовинтовентиляторные двигатели с открытым или закапотированным винтовентилятором;

– ТРДД сложных термодинамических циклов с регенерацией тепла и промежуточным охлаждением;

– гибридные и полностью электрические силовые установки.

Согласно программе NEWAC, применение промежуточного охлаждения и регенерации тепла на полноразмерных двухконтурных турбореактивных двигателях позволит повысить КПД тепловой машины, снизить расход топлива на 30 % относительно уровня 2000-го г., выполнить термодинамический цикл двигателя при низком уровне степени повышения полного давления (~25), снизить уровень эмиссии NO_x. Согласно прогнозу, технологическая готовность ТРДД с промежуточным охлаждением и регенерацией тепла после 2035 г.

Программа формирования опережающего научно-технического задела ЦИАМ «Разработка технологий перспективных МГТД и АПД» предполагает завершение работ по созданию малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) «сложного» цикла с теплообменником уже к 2025 г.

В табл. 1 представлены удельные параметры малоразмерного газотурбинного двигателя без рекуператора и авиационного поршневого двигателя (АПД) [1].

Таблица 1

Сравнение удельных параметров МГТД без рекуператора и АПД

	<i>МГТД</i>	<i>АПД</i>
$C_{уд}$, кг/(л.с.·ч)	0,35	0,2
γ_m , кг/л.с	0,25...0,3	0,75...0,9

Из табл. 1 следует, что в настоящее время традиционный МГТД проигрывает АПД по удельному расходу топлива на 75 %, а по удельной массе выигрывает в три раза [1]. Исходя из вышесказанного, становится актуальной задача по разработке малоразмерного ТВаД с регенерацией тепла, что позволит снизить удельный расход топлива за счет установки рекуператора для подогрева воздуха из-за компрессора продуктами сгорания, поступающими из-за свободной турбины. Малоразмерный ТВаД с регенерацией тепла может широко применяться на различных малых летательных аппаратах (ЛА), самолетах, беспилотниках, вертолетах и других легких ЛА (рис. 1). Также может применяться в качестве привода для электрогенератора для гибридной силовой установки и др.



Рис. 1. Области применения малоразмерного ТВаД с регенерацией тепла

В настоящее время ведутся работы по разработке МГТД с регенерацией тепла в ЦИАМ им. П. И. Баранова на 350 л.с. и с удельным расходом топлива не более 0,23 кг/(л.с.·ч) [1]. Разработано техническое предложение на демонстрационный двигатель [1], изготовлена матрица экспериментального теплообменника (рис. 2), разработан проект экспериментального узла «Камера сгорания (КС) + теплообменник (ТО)».

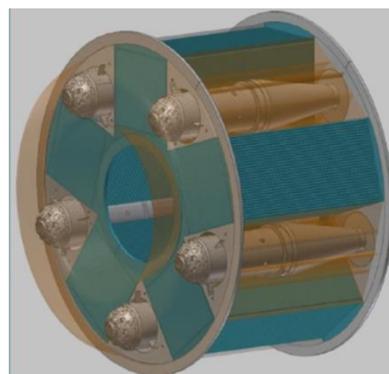


Рис. 2. 3D-модель интегрированных в КС теплообменных блоков

Узел «КС + ТО» обладает следующими характеристиками – расход воздуха через один блок ТО 0,165 кг/с, степень регенерации – не более 0,5, масса одного блока ТО – менее 4,8 кг [1].

Аналогичные работы ведутся в компании TURBOTECH (входит в состав SAFRAN, Франция). Компания ведет работы по разработке малоразмерного турбогенератора с регенерацией тепла для гибридной силовой установки TG-R55 – турбогенератор мощностью 55 кВт, общим КПД 28 %, сухой необорудованной массой 55 кг [2]. Двигатель выполнен по компактной одновальной схеме, применяются керамические роликовые подшипники, камера сгорания – многотопливная, используется трубчатый рекуператор для регенерации тепла (рис. 3) [2]. Двигатель уже в 2019 г. успешно прошел наземные испытания. Летные испытания и сертификация намечены на 2021 г. Предполагается выход на рынок уже в 2022 г. Также компания TURBOTECH ведет работы по созданию турбогенератора на 90 кВт.

Изделие на 90 кВт может быть выполнено в турбовинтовом варианте (рис. 4).



Рис. 3. Турбогенератор с регенерацией тепла TG-R55



Рис. 4. Турбовинтовой двигатель с регенерацией тепла TP-R90

Указанные работы демонстрируют актуальность создания малоразмерного турбовального двигателя с регенерацией тепла с целью импортозамещения зарубежных изделий для установки на отечественные легкие летательные аппараты.

В работе представлены результаты исследования по определению облика перспективного рекуператора для малоразмерного газотурбинного двигателя, а также анализ компоновки малоразмерного турбовального двигателя (ТВаД) с рекуператором для подогрева воздуха, отбираемого за компрессором, продуктами сгорания топливоздушной смеси из-за свободной турбины на основе двигателя TJ-100. Представлены теплогидравлические характеристики рекуператоров с эвольвентными трубками, полученными в Ansys CFX.

ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ TJ-100 И ТВАД С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ TJ-100

Турбореактивный двигатель TJ-100 выполнен по одновальной схеме, состоит из центробежного компрессора, кольцевой противоточной камеры сгорания, осевой турбины компрессора и выходного устройства (рис. 5). Двигатель TJ-100 на стенде представлен на рис. 6 (УГАТУ).

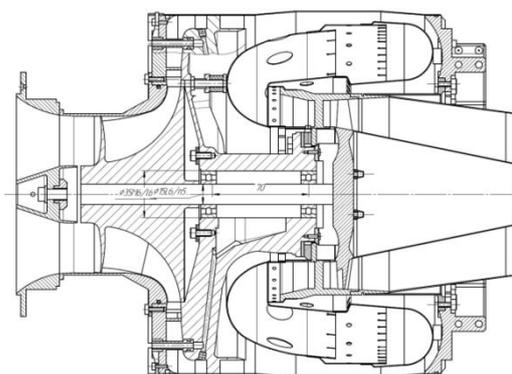


Рис. 5. Меридиональное сечение TJ-100

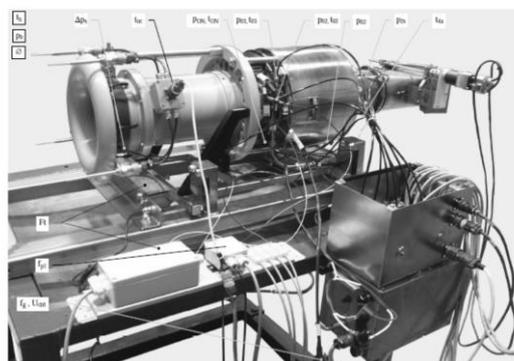


Рис. 6. TJ-100 на стенде в УГАТУ

Расход воздуха на входе в двигатель TJ-100 составляет 1,67 кг/с, температура газов перед турбиной – 1193 К, степень повышения давления воздуха – 4,5, обороты вращения ротора – 60000 об/мин, тяга двигателя – 1000 Н. Конвертация турбореактивного двигателя в турбовальный двигатель без регенератора позволяет получить мощность на валу 237,1 кВт при удельном расходе топлива 0,4891 кг/(кВт·ч) и физическом расходе топлива 0,0322 (кг/с). Применение регенерации тепла (степень регенерации 0,6) приводит к снижению мощности на валу на 13,8 % (204,4 кВт) и снижению удельного расхода топлива на 25,4 % (0,3647 кг/(кВт·ч)). Для достижения предыдущего уровня по мощности на валу необходимо увеличить температуру газов перед турбиной на 5,6 % до 1260 К. Повышение температуры газов приводит к достижению мощности на валу 237,1 кВт и снижению удельного расхода топлива на 29,8 % (0,3433 кг/(кВт·ч)). При этом физический расход топлива становится равным 0,0226 кг/с.

На рис. 7 представлено сравнение суммарной массы силовой установки (СУ) вместе с топливом для различных типов двига-

телей, устанавливаемых на один летательный аппарат при разной длительности полета [1]. Из рис. 7 следует, что применение регенерации тепла на МГТД позволяет выиграть у МГТД без регенерации, а также бензинового и дизельного АПД на протяжении пяти часов полета.

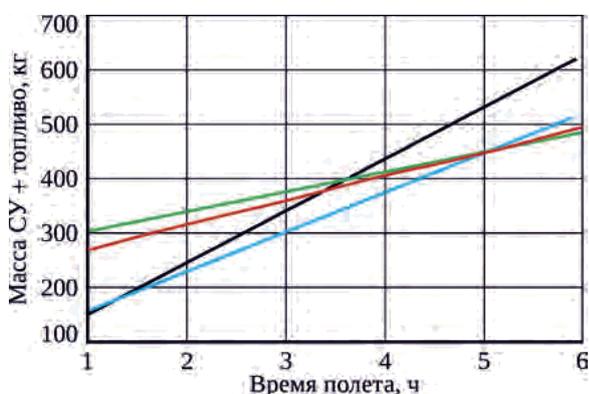


Рис. 7. Сравнение массы СУ вместе с топливом при разной длительности полета для различных типов двигателей: синяя линия – МГТД с рек.; черная – МГТД; красная – бензиновый АПД; зеленая – дизельный АПД

Далее представлено исследование по определению облика рекуператора для ТВаД с регенерацией тепла с мощностью на валу 204,4 кВт (274 л.с.).

ОБЗОР РЕКУПЕРАТОРОВ ДЛЯ МГТД

Классификация теплообменников насчитывает большое количество признаков, по которым можно классифицировать их. Традиционно выделяют два типа теплообменника (рекуператора) – пластинчатые и трубчатые. В свою очередь пластинчатые могут классифицироваться по поверхности пластин, то есть гладкие поверхности, оребренные поверхности, прерывистое оребрение со смещением (рис. 8), поверхность Френкеля (рис. 9) и другие. Трубчатые рекуператоры могут классифицироваться по форме поперечного сечения, то есть круглое сечение, эллиптическое сечение (рис. 10, а), профилированное сечение (рис. 10, б), витые трубки (рис. 10, в).

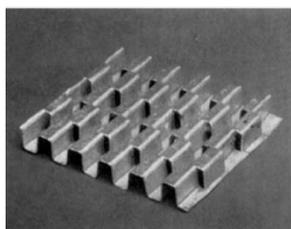


Рис. 8. Прерывистое оребрение со смещением

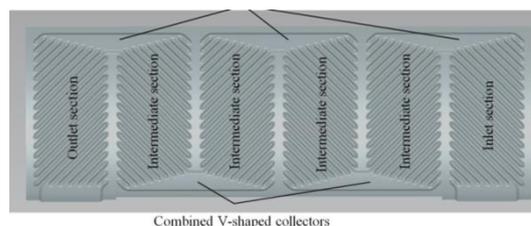
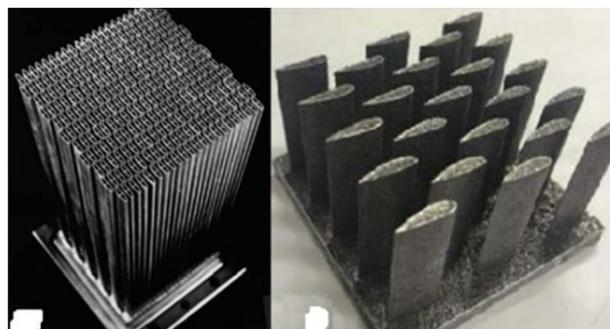


Рис. 9. Поверхность Френкеля [1]



а

б



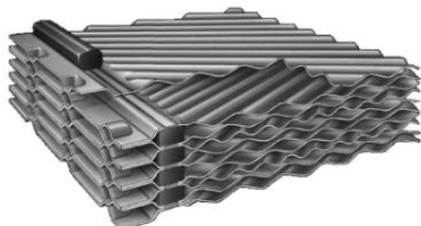
в

Рис. 10. Элементы трубчатых ТО [3]:
а – эллиптическое; б – профилированное;
в – витые трубки

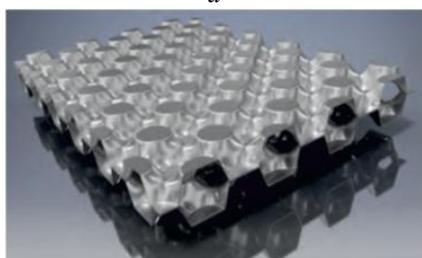
В настоящее время с развитием методов и средств топологической оптимизации, вычислительных мощностей различают взаимно-пористые ТО, в телах которых образованы каналы для теплоносителей, а поверхности данного пористого тела разграничивают течение двух теплоносителей, образуя две структуры каналов, герметичных по отношению друг к другу [3].

На рис. 11 и 12 представлены пластинчатые и взаимно-пористые теплообменники. Пластинчатые ТО обладают высокой эффективностью, высоким коэффициентом компактности, низкой массой и габаритами, при этом главными недостатками данных ТО являются низкая надежность, трудность обеспечения герметичности, сложная технология сварки/пайки пластин. Взаимно-пористые теплообменники могут быть изготовлены аддитивными технологиями, что позволяет разрабатывать теплообменники сложной геометрической формы с развитой

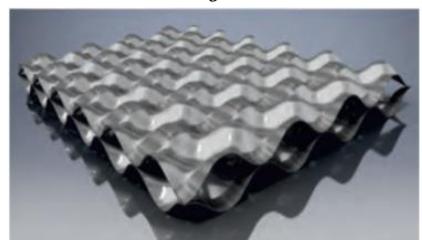
поверхностью теплообмена. Однако аддитивный способ изготовления предполагает удаление поддержек после изготовления (затруднительно), также деталь обладает высокой шероховатостью поверхности, требуется дальнейшая обработка поверхностей теплообмена (например, гидроабразивный метод).



а



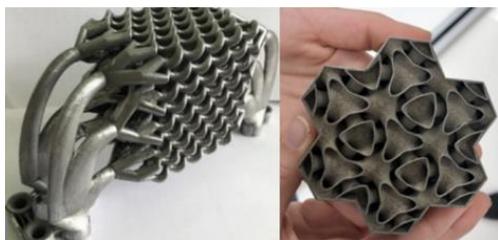
б



в

Рис. 11. Пластинчатые ТО:

а – ТО Alfa Laval Thermal, Inc., Richmond, VA;
б – ТО с микрохолмистыми поверхностями;
в – с зигзагообразными поверхностями [4]



а

б



в

Рис. 12. Взаимно-пористые ТО: а – ветвящийся древесный ТА [1]; б – ТО General Electric;
в – ТО с поверхностью Шварца D [1]

С учетом преимуществ и недостатков пластинчатых и взаимно-пористых ТО, а также технологических возможностей университета, объектами дальнейшего исследования будут взаимно-пористые теплообменники.

ПРОРАБОТКА РАЗЛИЧНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МГТД

Поскольку рекуператор должен обладать формой кольцевого канала, решено использовать эвольвентные трубки для обеспечения высокой плотности размещения трубок в кольцевом канале.

На следующем этапе выполнено исследование рекуператоров перекрестной схемы, в которых горячий газ протекает по трубкам снизу вверх, а холодный поток протекает слева направо, обтекая горячие трубки (рис. 13, 14).

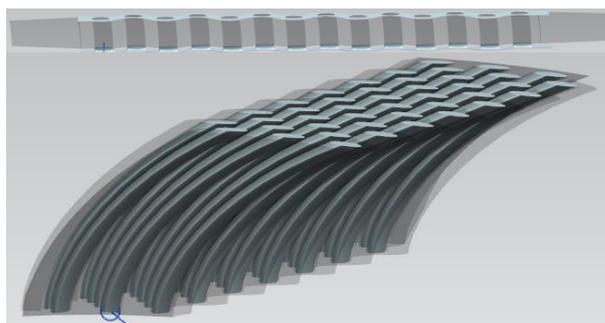


Рис. 13. Рекуператор с эвольвентными трубками.
Горячий газ течет по трубкам вверх

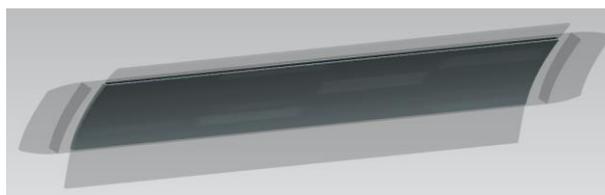


Рис. 14. Сплошная эвольвентная трубка.
Горячий газ течет по трубкам вверх

Выполнено исследование различных форм и размеров поперечных сечений эвольвентных трубок, также количества трубок и других параметров. Как и ожидалось, схема рекуператора, где горячий газ протекает по замкнутым трубкам, приводит к меньшим расходам газа через горячий контур и значительному падению коэффициента восстановления полного давления. Снижение расхода газа также приводит к снижению степени регенерации такой конструкции.

Следующие варианты теплообменника выполнены также по перекрестной схеме, но с протеканием холодного потока через трубки различного поперечного сечения, различного эшелонирования слева направо, а горячий газ обтекает трубки снизу вверх, подогревая холодный воздух в трубках (рис. 15 и 16).

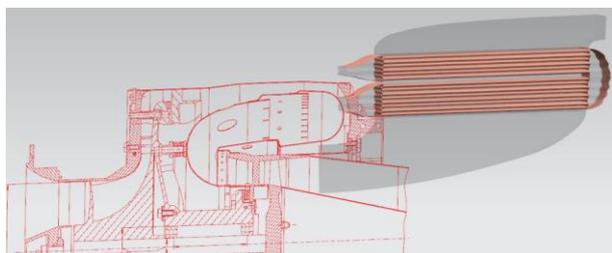


Рис. 15. Схема МГТД с трубчатым рекуператором с круглым поперечным сечением

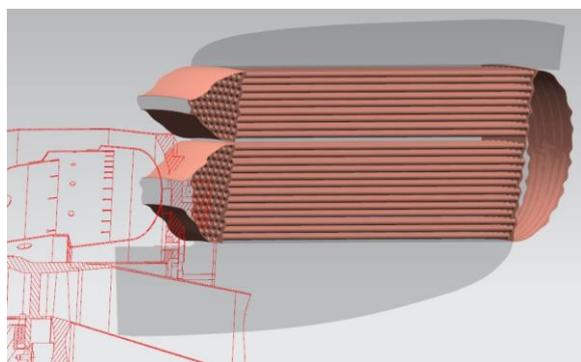


Рис. 16. Схема МГТД с трубчатым рекуператором со сужением трубок с круглым поперечным сечением

Особенностью данной компоновки ТВаД с рекуператором является петлевой эвольвентный рекуператор, в котором холодный воздух, отбираемый за компрессором, протекает сначала по оси вращения ротора двигателя, затем разворачивается и движется против оси ротора обратно на вход во фронтальное устройство камеры сгорания. При этом горячий газ протекает снизу вверх и подогревает холодный воздух внутри трубок.

Результаты численного моделирования рекуператоров на рис. 15 и 16 представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что вариант рекуператора на рис. 15 не обеспечивает необходимое количество расхода воздуха практически в 2 раза, а также не добывает расход газа через горячий контур. При этом достигается высокая степень регенерации (70,7 %). Увеличение количества трубок на

рис. 16 (увеличение количества до максимально возможного, исходя из их площади на входе) привело к примерно равным значениям расхода воздуха и газа 1,2 кг/с. При этом степень регенерации упала до 56 %.

Таблица 2

Результаты теплогидравлического анализа трубчатых рекуператоров

Параметр	Исходный	Со сужением
Расход воздуха, кг/с	0,753	1,17
Расход газа, кг/с	1,5	1,2
Степень регенерации	0,707	0,56
$\sigma_{\text{хол}}$	0,926	0,933
$\sigma_{\text{гор}}$	0,935	0,916

Увеличение трубок положительно повлияло на коэффициент восстановления полного давления в холодном контуре вследствие уменьшения сопротивления во входном канале (на входе в трубки их площадь возросла) и отрицательно – в горячем контуре (сопротивление возросло). Исследования других поперечных сечений (форм и размеров) показали схожие результаты.

Таким образом, использование трубок различного сечения при такой компоновке и таких расходах воздуха невозможно. Такие рекуператоры можно использовать в качестве теплообменника для подогрева или охлаждения небольшого расхода воздуха с высокой эффективностью.

Для достижения требуемых характеристик при необходимом количестве рабочих тел предложена схема рекуператора, в которой холодный воздух протекает слева направо по эвольвентным трубкам, разворачивается и движется против оси ротора также по эвольвентным трубкам. При этом горячий газ протекает по эвольвентным каналам снизу вверх, образованным эвольвентными трубками (рис. 17).



Рис. 17. Модель рекуператора с эвольвентными трубками

Численное моделирование рекуператора, изображенного на рис. 17, показало, что расход воздуха через холодный контур составляет 2,32 кг/с, а газа – 1,26 кг/с. Низкие значения расхода подогревающего газа при высоких расходах воздуха обеспечили степень регенерации 26,7 %. Коэффициенты восстановления полного давления в холодном и горячем контуре равны 0,961 и 0,934 соответственно. На рис. 18 представлены линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора.

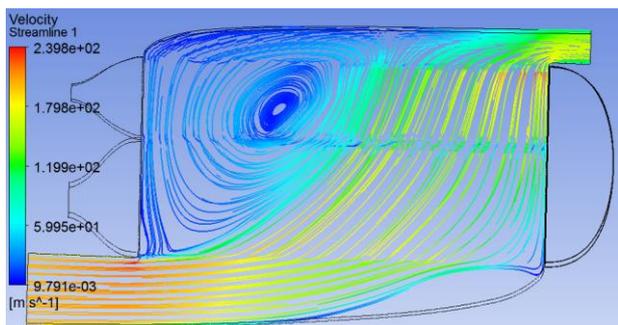


Рис. 18. Линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора

Из рис. 18 следует, что пониженный расход газа и низкая степень регенерации вызваны масштабной застойной областью. Низкий расход газа также приводит к снижению степени регенерации, помимо того, что застойная область не позволяет омывать всю поверхность теплообмена.

Из результатов на рис. 18 напрашивается установка направляющих в горячем контуре для выравнивания потока по форме канала в горячем контуре и повышения эффективности подогрева. Исследования по направляющим выполнены для различного количества образуемых каналов.

На рис. 19 представлена модель эвольвентного рекуператора с девятью направляющими и десятью каналами.

В табл. 3 и на рис. 20 представлены результаты расчета рекуператора с эвольвентными трубками и 10 каналами при различных режимах работы рекуператора.

На рис. 21 представлены линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора с десятью каналами в горячем контуре. Из табл. 3 следует, что максимальная степень регенерации равна 38,7 %, при этом коэффициент восстановления полного давления в горячем контуре значительно упал ввиду увеличения расхода газа и уровня

скоростей в каналах в горячем контуре. Увеличение расхода газа достигнуто путем уменьшения статического давления на выходе из контура. Из рис. 21 следует, что если избавиться от застойных областей в каналах горячего контура, то можно обеспечить необходимый расход газа без повышения уровня скоростей в каналах, что должно поспособствовать повышению и степени регенерации, и коэффициента восстановления полного давления в горячем контуре.

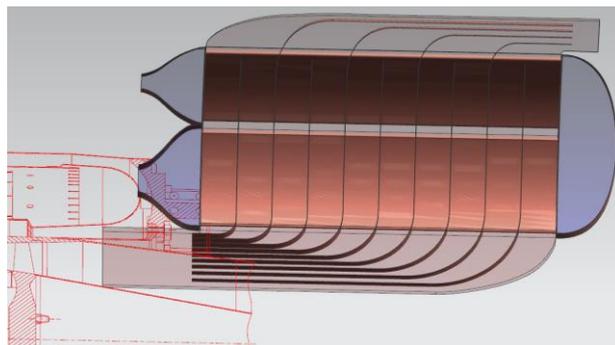


Рис. 19. Модель рекуператора с эвольвентными трубками и 10 каналами в горячем контуре

Таблица 3

Результаты расчета рекуператора с эвольвентными трубками и 10 каналами

Параметр	<i>m. 1</i>	<i>m. 2</i>	<i>m. 3</i>	<i>m. 4</i>	<i>m. 5</i>
Расход воздуха, кг/с	2,142	1,793	1,68	1,68	1,68
Расход газа, кг/с	1,175	1,175	1,168	1,44	1,578
Степень регенерации	0,276	0,313	0,322	0,367	0,387
$\sigma_{\text{хол}}$	0,954	0,967	0,97	0,97	0,97
$\sigma_{\text{гор}}$	0,914	0,914	0,9141	0,863	0,813

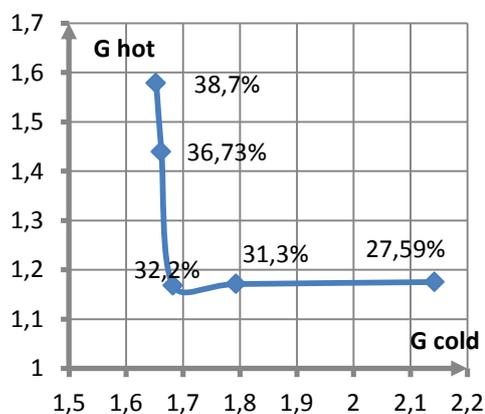


Рис. 20. Зависимость степени регенерации от расходов воздуха и газа в рекуператоре с эвольвентными трубками и 10 каналами

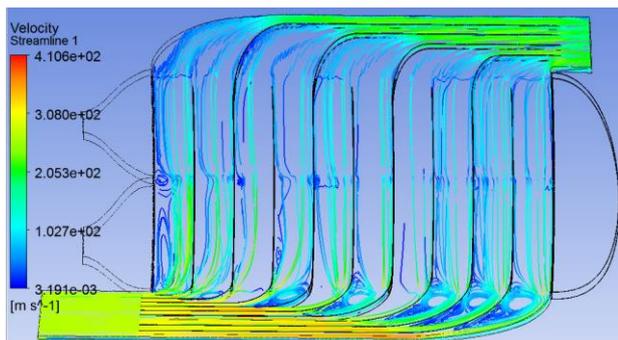


Рис. 21. Линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора с 10 каналами

Следующая конструкция рекуператора выполнена с обрезанными направляющими в горячем контуре на входе (рис. 22). Результаты численного моделирования представлены в табл. 4.

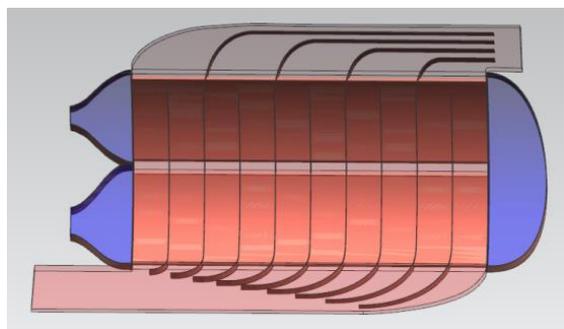


Рис. 22. Модель рекуператора с эвольвентными трубками и 10 обрезанными на входе каналами в горячем контуре

Таблица 4

Результаты расчета рекуператора с эвольвентными трубками и 10 обрезанными каналами

Параметр	т. 1	т. 2
Расход воздуха, кг/с	1,659	1,649
Расход газа, кг/с	1,281	1,782
Степень регенерации	0,344	0,426
$\sigma_{\text{хол}}$	0,97	0,971
$\sigma_{\text{гор}}$	0,922	0,83

На рис. 23 представлены линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора с десятью обрезанными каналами в горячем контуре.

Из табл. 4 следует, что в расчетной точке 2 степень регенерации достигла 42,6 %,

при этом за счет обрезки входных направляющих коэффициент восстановления давления в горячем контуре вырос на несколько процентов.

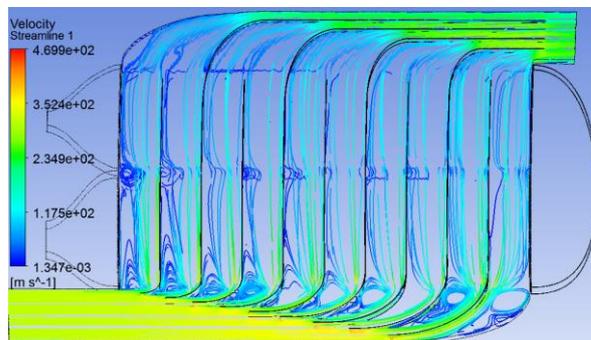


Рис. 23. Линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора с 10 обрезанными каналами

На рис. 23 наблюдаются все те же отрывы и застойные области, что и на рис. 21.

Для оценки возможности изготовления рекуператоров данной архитектуры методами аддитивного производства выполнено опытное изготовление десяти секторов теплообменника, представленных на рис. 22 и 24, методом селективного лазерного плавления SLM. Результаты изготовления представлены на рис. 25, 26 и 27.

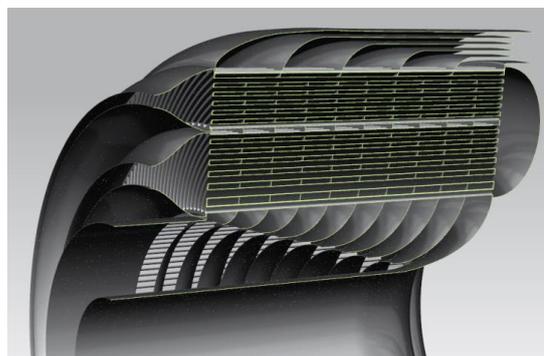


Рис. 24. CAD-модель изготавливаемого образца

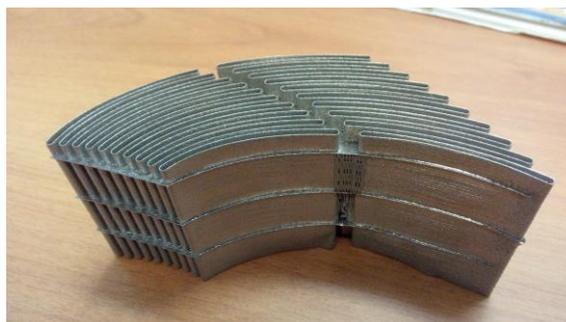


Рис. 25. SLM-образец (вид 1)



Рис. 26. SLM-образец (вид 2)



Рис. 27. SLM-образец (вид 3)

На рис. 25–27 наблюдается достаточная точность геометрии в нижней части конструкции (у подложки) и деформации наносимых слоев в верхней части образца. Также наблюдается высокая шероховатость поверхностей теплообмена. Получены рекомендации по повышению толщины стенки детали. С другой стороны, имеющаяся конструкция, ее стенки представляют собой обводы для контуров рекуператора и не доработаны с точки зрения напряженно-деформированного состояния, анализа потери форм. Дальнейшая конструктивная проработка аналогичной конструкции рекуператора позволит повысить жесткость конструкции и увеличить шансы на удачное изготовление SLM-технологией. Также необходима последующая чистовая обработка поверхности теплообмена, например, гидроабразивными или электроэрозионными методами обработки.

Следующая компоновка рекуператора предполагает наличие 14 направляющих

в горячем контуре и наклон радиальной составляющей горячего контура (рис. 28).

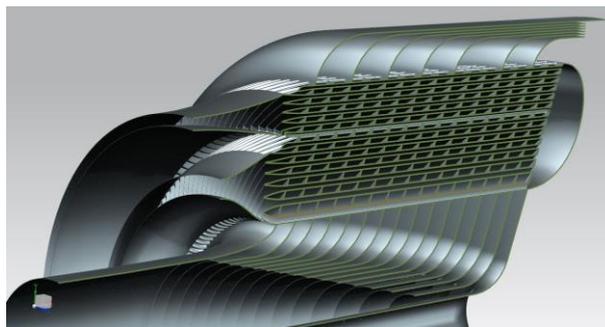


Рис. 28. Эвольвентный рекуператор с наклоном и 15 каналами

В настоящей работе все расчеты выполнены на блочно-структурированной сетке, последняя из которых представлена на рис. 29.

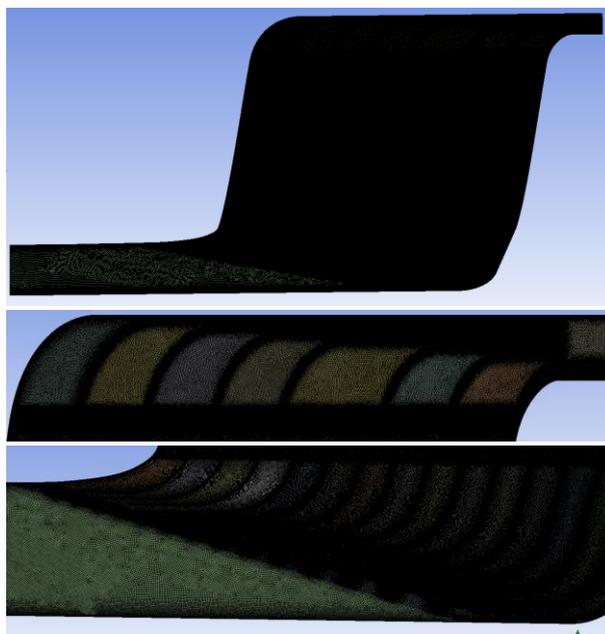


Рис. 29. Блочно-структурированная сеточная модель для домена горячего контура эвольвентного рекуператора с наклоном и 15 каналами

Во всех расчетах используются одинаковые граничные условия (табл. 5), одинаковые площади входа и выхода и настройки моделей теплопереноса (Total Energy), турбулентности (SST) и рабочих тел.

Таблица 5
Граничные условия во всех расчетных моделях

ГУ	Холодный контур	Горячий контур
Полное давление на входе, Па	455962	111026
Полная температура на входе, К	487,18	917,72
Статическое давление на выходе	Var	Var

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования по определению облика перспективного рекуператора для малоразмерных газотурбинных двигателей.

Предложена компоновка турбовального двигателя с регенерацией тепла, в которой имеется петлевой эвольвентный рекуператор. Холодный воздух, отбираемый за компрессором, протекает сначала по оси вращения ротора двигателя, затем разворачивается и движется против оси ротора обратно на вход камеры сгорания. При этом горячий газ протекает снизу вверх и подогревает холодный воздух внутри трубок. В эвольвентный канал в горячем контуре добавляются направляющие для обеспечения равномерного обтекания эвольвентных трубок для холодного потока.

Исследование эвольвентного петлевого рекуператора с десятью каналами продемонстрировало удовлетворительные характеристики рекуператора. Достигнута степень регенерации 42,6 %, при этом коэффициент восстановления полного давления в горячем контуре равен 0,83.

Для улучшения теплогидравлических характеристик рекуператора необходимо определить оптимальную форму в радиальном направлении эвольвентного канала, также геометрию входного канала для обеспечения безотрывного течения и равномерного обтекания трубок.

После решения вышепоставленной задачи необходимо провести исследование по определению влияния количества эвольвентных трубок, радиус скруглений сечения трубки, длины эвольвентных трубок и других геометрических характеристик с целью получения зависимостей и рекомендаций по повышению эффективности работы рекуператора.

Также необходимо исследовать влияние геометрии входных и выходных каналов горячего и холодного контура на распределение потока в сечении, на потери полного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осипов И. В., Ломазов В. С.** Разработка малоразмерных ГТД различного типа на базе унифицированного газогенератора // *Авиационные двигатели*. 2019. Т. 4, № 5. С. 11–18. [I. V. Osipov, V. S. Lomazov, "Development of various types of small-scale gas turbine engines based on a unified core engine", (in Russian), in *Aviacionnie dvigately*, vol. 4, no. 5, pp. 11-18, 2019.]
2. **Turbotech Safran.** NoSQL databases. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.turbotech-aero.com/>.pdf (дата обращения 28.02.2021). [Turbotech Safran. NoSQL databases (2021, Nov. 28). [Online]. Available: <https://www.turbotech-aero.com/.nosqlpbs.pdf>]
3. **Перспективы** применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей / Л. А. Магеррамова [и др.] // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2019. Т. 18, № 3. С. 81–98. [L. A. Magerramova, et al., "Prospects for the use of additive technologies for the creation of parts and assemblies of aircraft gas turbine engines and ramjet engines", (in Russian), in *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, vol. 18, no. 3, pp. 81-89, 2019.]
4. **Развитие** методик расчета и проектирования теплообменных аппаратов авиационного назначения / А. Л. Светлаков [и др.] // *Авиационные двигатели*. 2019. Т. 4, № 5. С. 37–44. [A. L. Svetlakov, et al., "Development of calculation and design methods for aviation heat exchangers", (in Russian), in *Aviacionnie dvigately*, vol. 4, no. 5, pp. 37-44, 2019.]

ОБ АВТОРАХ

ДАДОЯН Размик Геворгович, асп. каф. авиац. двигателей. Дипл. магистра по двигателям летательных аппаратов (УГАТУ, 2015). Иссл. в обл. аэродинамики компрессоров.

МИХАЙЛОВ Алексей Евгеньевич, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 2010). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2015). Иссл. в обл. рабочих процессов ГТД на установившихся и неустановившихся режимах работы.

АХМЕДЗЯНОВ Дмитрий Альбертович, проф. каф. авиац. двигателей, декан ФАДЭТ. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. раб. процессов в авиац. ГТД на установившихся и неустановившихся режимах, разработки мат. моделей сл. техн. объектов, САПР авиац. ГТД.

МИХАЙЛОВА Александра Борисовна, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. имитационного и 3D-CAD/CAE-моделирования процессов в компрессорах авиационных ГТД.

METADATA

Title: Small gas turbine engine with heat regeneration.

Authors: R. G. Dadoyan¹, A. E. Mikhailov²,
D. A. Akhmedzyanov³, A. B. Mikhailova⁴

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹razmik.ad@mail.ru, ²mikhailov.ugatu@gmail.com,
³ada@ugatu.ac.ru, ⁴alexandra11112007@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 1 (91), pp. 22-32, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: A study was carried out to determine the appearance of a promising recuperator for a small-sized gas turbine engine, as well as an analysis of the layout of a small-sized turboshaft engine with a recuperator for heating the air taken after the compressor by the combustion products of the air-fuel mixture based on the TJ-100 engine. A model of TVaD with a regenerator based on the TJ-100 engine has been developed. A study of various layouts of recuperators for MGTE, their thermohydraulic characteristics was carried out.

Key words: small gas turbine engine; turboshaft engine; turboshaft engine with heat regeneration; recuperator; SLM; CFD.

About authors:

DADOYAN, Razmik Gevorgovich, Postgraduate student, Dept. of Aircraft engines. Master's degree in aircraft engines design (USATU, 2015).

MIKHAILOV, Alexey Evgenyevich, Assoc. Prof., Dept. of Aircraft engines. Dipl. engineer in aircraft engines design (USATU, 2008). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2015).

AKHMEDZYANOV, Dmitriy Albertovich, Prof., Dean of Aircraft Engines, Energy and Transportation Engineering. Dipl. engineer in aircraft engines design (USATU, 1997). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2000). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2007).

MIKHAILOVA, Alexandra Borisovna, Assoc. Prof., Dept. of Aircraft engines. Dipl. engineer in aircraft engines design (USATU, 2008). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2011).