

УДК 621.452.32

## ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО ГТД С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА

Р. Г. ДАДОЯН<sup>1</sup>, А. Е. МИХАЙЛОВ<sup>2</sup>, Д. А. АХМЕДЗЯНОВ<sup>3</sup>, А. Б. МИХАЙЛОВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>razmik.ad@mail.ru, <sup>2</sup>mikhailov.ugatu@gmail.com, <sup>3</sup>ada@ugatu.ac.ru, <sup>4</sup>alexandra11112007@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  $\text{CO}_2$  на 50 %, выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  на 80 %, снижение шума на 50 %. К 2050 г., согласно программе FLIGHTPATH 2050, выбросы  $\text{CO}_2$  должны быть сокращены на 75 %,  $\text{NO}_x$  на 90 % и шум на 65 %.

ГТД традиционных схем не удовлетворяют перспективным требованиям по экологичности (шум, эмиссия  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) 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  $\text{NO}_x$ . 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

|                        | МГТД       | АПД        |
|------------------------|------------|------------|
| $C_{уд}$ , кг/(л.с.·ч) | 0,35       | 0,2        |
| $\gamma_m$ , 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)».

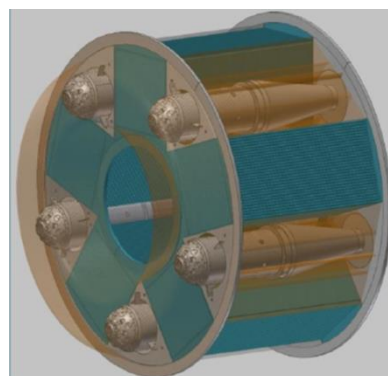


Рис. 2. 3D-модель интегрированных в КС теплообменных блоков

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).

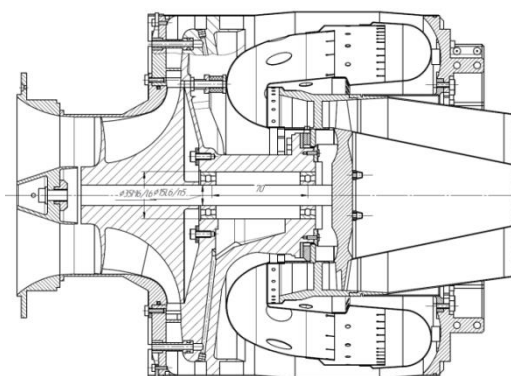


Рис. 5. Меридиональное сечение TJ-100

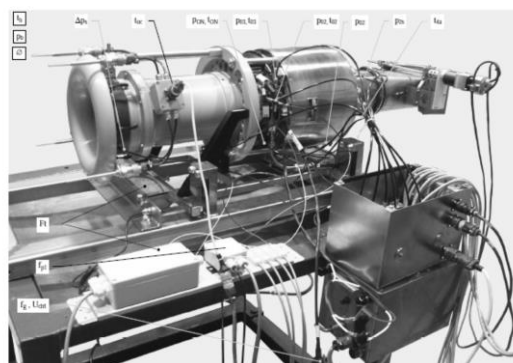
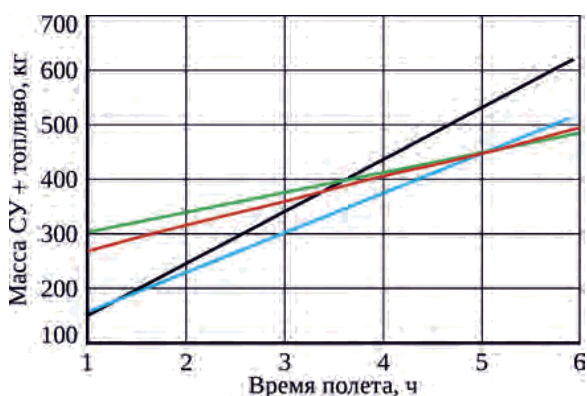


Рис. 6. TJ-100 на стенде в УГАТУ

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 рекуперации, а также бензинового и дизельного АПД на протяжении пяти часов полета.

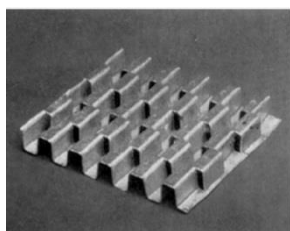


**Рис. 7.** Сравнение массы СУ вместе с топливом при разной длительности полета для различных типов двигателей: синяя линия – МГТД с рек.; черная – МГТД; красная – бензиновый АПД; зеленая – дизельный АПД

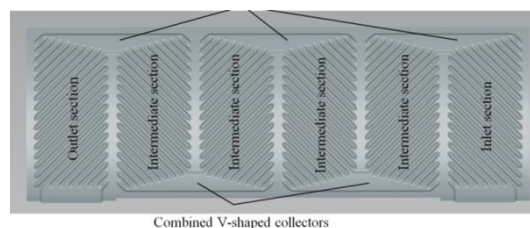
Далее представлено исследование по определению облика рекуператора для ТВаД с регенерацией тепла с мощностью на валу 204,4 кВт (274 л.с.).

### ОБЗОР РЕКУПЕРАТОРОВ ДЛЯ МГТД

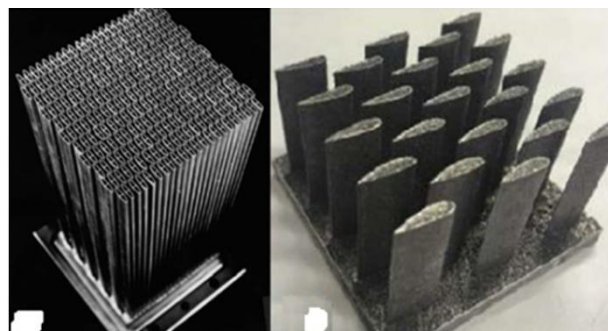
Классификация теплообменников насчитывает большое количество признаков, по которым можно классифицировать их. Традиционно выделяют два типа теплообменника (рекуператора) – пластинчатые и трубчатые. В свою очередь пластинчатые могут классифицироваться по поверхности пластин, то есть гладкие поверхности, 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



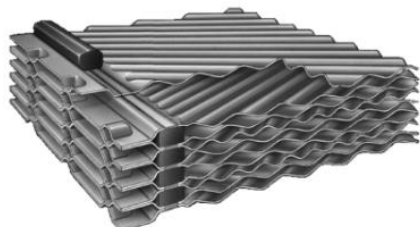
в

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

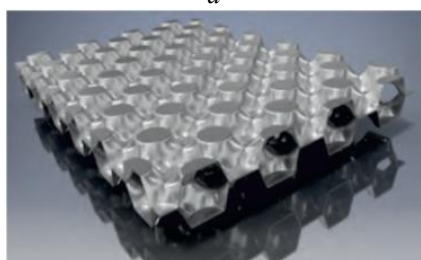
В настоящее время с развитием методов и средств топологической оптимизации, вычислительных мощностей различают взаимно-пористые ТО, в телах которых образованы каналы для теплоносителей, а поверхности данного пористого тела разграничивают течение двух теплоносителей, образуя две структуры каналов, герметичных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

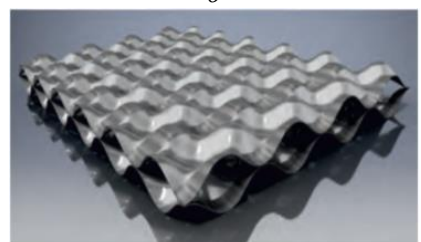
поверхностью теплообмена. Однако аддитивный способ изготовления предполагает удаление поддержек после изготовления (затруднительно), также деталь обладает высокой шероховатостью поверхности, требуется дальнейшая обработка поверхностей теплообмена (например, гидроабразивный метод).



а



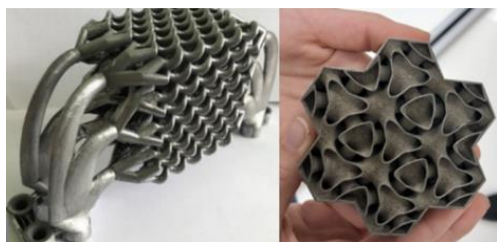
б



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

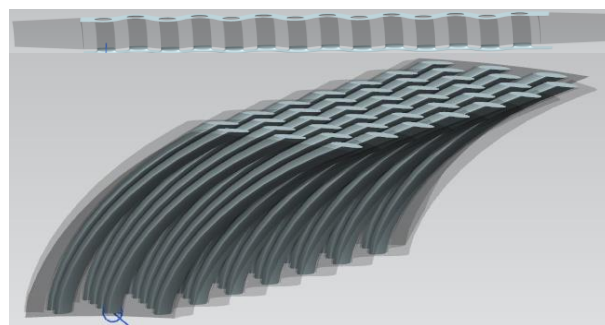
**Рис. 12.** Взаимно-пористые ТО: а – ветвящийся древесный ТА [1]; б – ТО General Electric;  
в – ТО с поверхностью Шварца D [1]

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

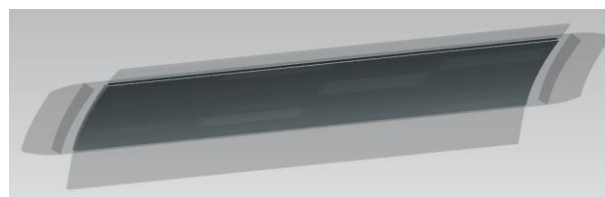
#### ПРОРАБОТКА РАЗЛИЧНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ РЕКУПЕРАТОРА ДЛЯ МГТД

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).

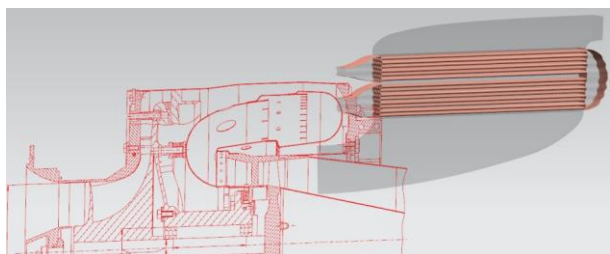


Рис. 15. Схема МГТД с трубчатым рекуператором с круглым поперечным сечением

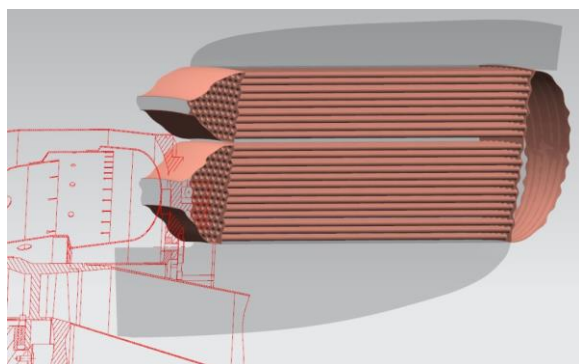


Рис. 16. Схема МГТД с трубчатым рекуператором со сужением трубок с круглым поперечным сечением

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 добирает 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).

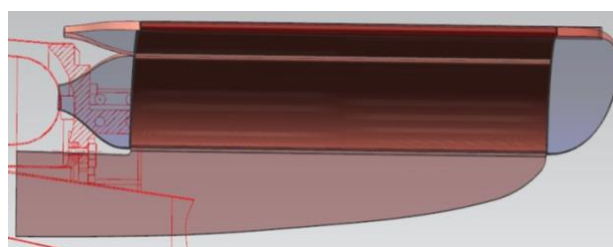


Рис. 17. Модель рекуператора с эвольвентными трубками

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.

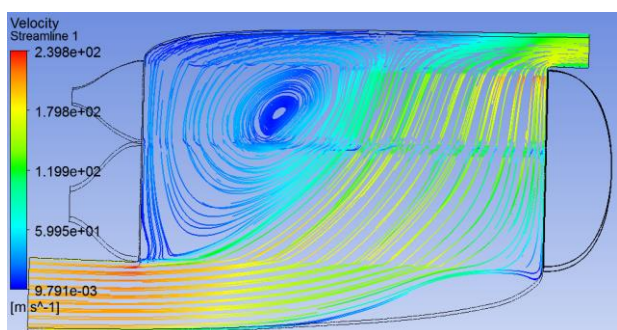


Рис. 18. Линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора

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.

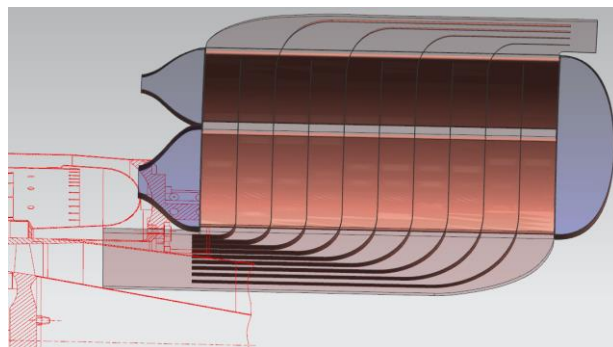


Рис. 19. Модель рекуператора с эвольвентными трубками и 10 каналами в горячем контуре

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       |

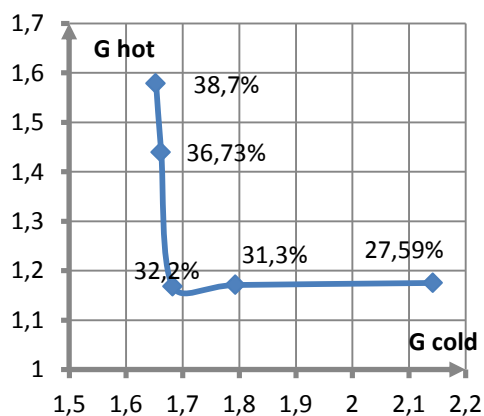
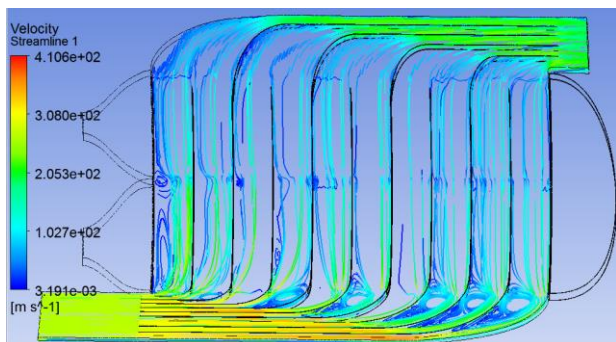
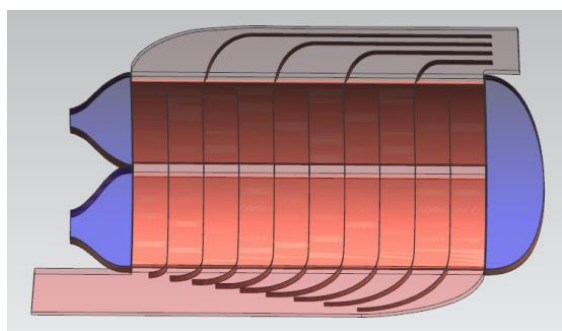


Рис. 20. Зависимость степени регенерации от расходов воздуха и газа в рекуператоре с эвольвентными трубками и 10 каналами



**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

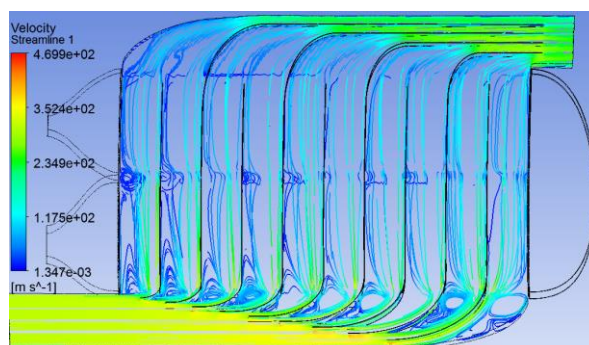
**Результаты расчета рекуператора с эвольвентными трубками и 10 обрезанными каналами**

| 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 |
| $\sigma_{хол}$       | 0,97  | 0,971 |
| $\sigma_{гор}$       | 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 %,

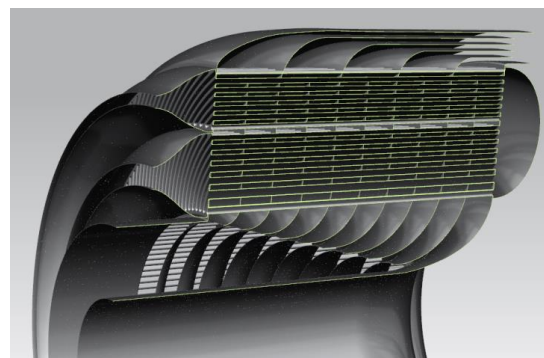
при этом за счет обрезки входных направляющих коэффициент восстановления давления в горячем контуре вырос на несколько процентов.



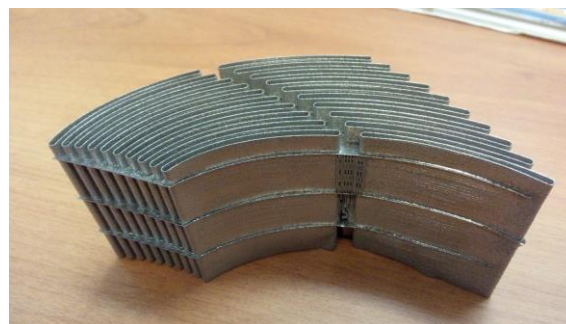
**Рис. 23.** Линии тока в горячем контуре эвольвентного рекуператора с 10 обрезанными каналами

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).

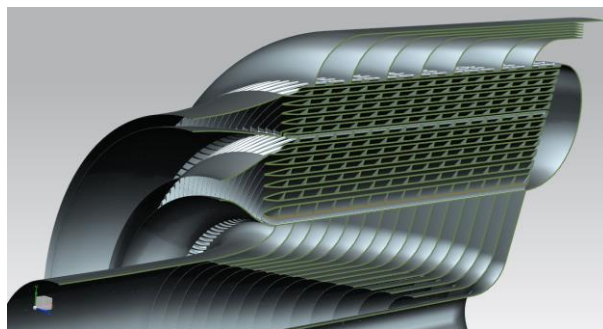


Рис. 28. Эвольвентный рекуператор с наклоном и 15 каналами

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

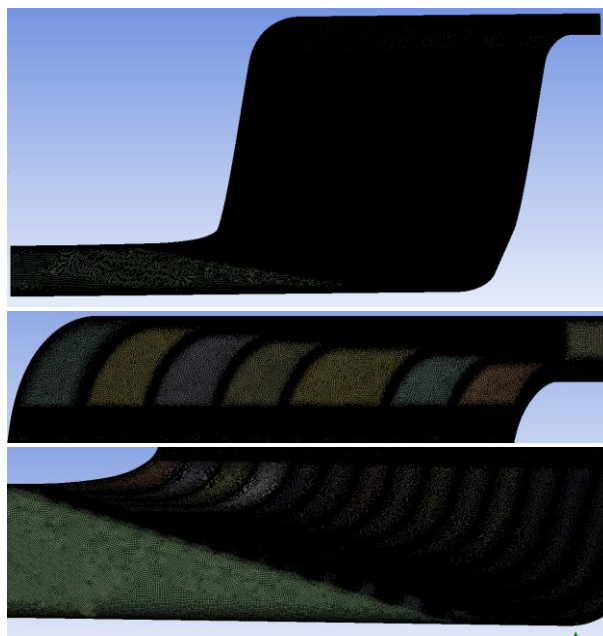


Рис. 29. Блочно-структурированная сеточная модель для домена горячего контура эвольвентного рекуператора с наклоном и 15 каналами

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 неуставившихся 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 неуставившихся 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. Dadoyan<sup>1</sup>, A. E. Mikhailov<sup>2</sup>,  
D. A. Akhmedzyanov<sup>3</sup>, A. B. Mikhailova<sup>4</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>razmik.ad@mail.ru, <sup>2</sup>mikhailov.ugatu@gmail.com,  
<sup>3</sup>ada@ugatu.ac.ru, <sup>4</sup>alexandra11112007@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).