

УДК 629.7.536.27

Классификация высокоэффективных рекуператоров газотурбинных двигателей

Ардатов К.В.*, Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А*****

Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: ardatov-k@yandex.ru*

***e-mail: valerinesterenk@yandex.ru*

****e-mail: yurav@mai.ru*

Аннотация

Объектом исследования являются конструктивные схемы и элементы конструкции рекуператоров газотурбинных двигателей (ГТД) и газо турбинных установок (ГТУ). В рекуператоре – газо-воздушном теплообменнике сжатый в компрессоре воздух подогревается выхлопными газами, что увеличивает термодинамические параметры цикла ГТД, как тепловой машины. Надежность и ресурс работы рекуперативного газотурбинного двигателя в значительной степени зависит от надежности работы рекуператора, что в свою очередь определяется его конструкцией. В настоящее время совершенствование конструкций рекуператоров ГТД идёт несколькими путями: - для стационарных ГТУ, где масса и габариты рекуператора не имеют принципиального значения, используют выносные трубчатые рекуператоры, конструкция таких рекуператоров отработана и надежна. - с целью снижения массы и габаритов рекуператоров авиационных и транспортных ГТУ в конструкциях рекуператоров применяют интенсификаторы теплообмена различных конструкций и высокоэффективные теплопередающие поверхности

различного типа. - совершенствованием методик комплексного теплогидравлического расчета рекуператоров. Поскольку существует множество классификаций конструкций рекуператоров ГТД, есть необходимость как-то их упорядочивать, т.е. разделять их, по наиболее существенным и принципиальным конструктивным признакам.

Ключевые слова: рекуператоры, газо-воздушные теплообменники, эффективность и надежность ГТД

Введение

Схема турбовальных ГТД и стационарных ГТУ с промежуточным подогревом рабочего тела, используемая в ТВД и ТВЛД с регенерацией тепла, хорошо известна [7]. Принцип её заключается в использовании части тепла, имеющегося в выхлопных газах или на выходе из турбины газогенератора, для подогрева воздуха, выходящего из компрессора перед его поступлением в камеру сгорания. Таким образом, горячие газы, выходящие из турбины с температурой $(T_{г.}^*)_4$, попадая в рекуператор - теплообменник, охлаждаются до температуры $[(T_{г.}^*)_4]'$, тогда как воздух, поступающий из компрессора, нагревается от температуры $(T_{в.}^*)_2$ до $[(T_{в.}^*)_2]$. В отличие от цикла без регенерации, при использовании рекуператора температура воздуха на входе в камеру сгорания увеличивается, поэтому для получения той же температуры газа перед турбиной $(T_{г.}^*)_3$ требуется меньший расход топлива G_T .

Удельный расход топлива $С_e$ в ГТД характеризуется величиной расхода топлива в час, отнесённой к мощности силовой установки. Именно эта величина определяет топливную экономичность двигателя. Эффективность узла рекуператора

характеризуется другой, безразмерной величиной, называемой степенью регенерации тепла [5], которую определяет соотношение действительной величины подогрева закомпрессорного воздуха на выходе из рекуператора к его теоретически возможной максимальной величине:

$$\sigma_p = \{[(T_{в}^*)_2]' - (T_{в}^*)_2\} / [(T_{г.}')_4 - (T_{в}^*)_2], \quad (1)$$

Применение регенерации тепла в авиационных ГТД требует создания малогабаритных и лёгких теплообменников. Эта проблема в настоящее время ещё не нашла своего технического решения. Разрабатываемые на различных отечественных предприятиях отрасли пластинчатые рекуператоры с поверхностями типа Френкеля [4], например, проект АЛ-34 с управляемой регенерацией тепла [4], так и не были доведены до серийного изготовления. Не решённой до настоящего времени технической задачей оказалось соединение пластин рекуператора между собой при их малой толщине в 0,1 мм, поскольку большая толщина этих пластин приводит к неприемлемым весовым характеристикам этого узла. Пластинчатый рекуператор должен иметь массу не более 50-ти кг, что составляет примерно треть сухой массы современного ТВЛД Т800-ЛНТ 801, который равен 150 кг. Однако, разработка демонстратора рекуператора АЛ-34 показала, что при использовании технологии сварки происходит прожиг соединений, а пайка не имеет требуемых прочностных свойств. Для наземных ГТУ казалось бы проблем минимизации массовых и габаритных характеристик не существует. Предприятием ФГУП «Салют» был разработан локомотивный ГТД с пластинчатым рекуператором мощностью 1 МВт ГТД-1С с высокой степенью регенерации $\sigma_p = 0,9$, его масса составляла примерно 1000 кг. При проведение испытаний были выявлены

конструктивные проблемы, в соединениях пластин, вследствие не плотностей этих соединений и происшедшего перемешивания части горячего газа и холодного воздуха реальная эффективность этого рекуператора была $\sigma_p = 0,6$.

Высокая степень регенерации возможна во вращающихся теплообменниках, однако при степени повышения давления в компрессоре более 4...5 они не применяются из-за сложности создания уплотнений, разделяющих воздушную и газовую полости.

Данная статья основывается на исследованиях по возможностям повышения эффективности и надежности работы рекуператоров ГТУ, проводимых на кафедре конструкции двигателей летательных аппаратов МАИ с 2010 года [29..30].

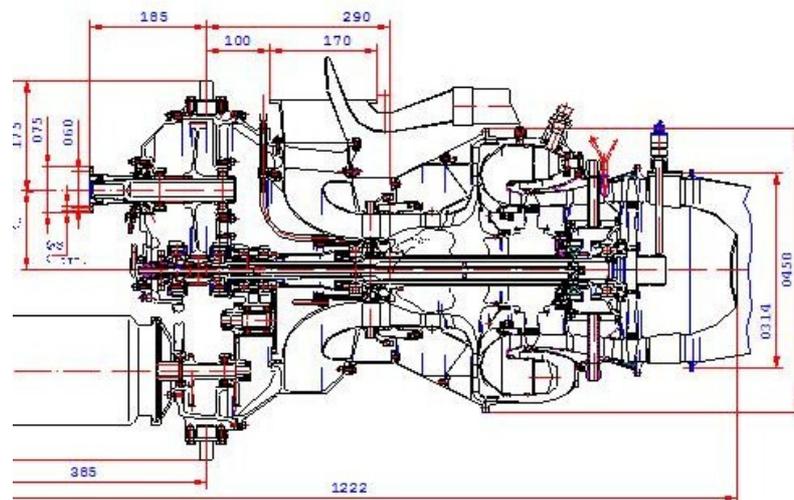


Рис. 1. Конструктивная схема двигателя НК-123BP-B

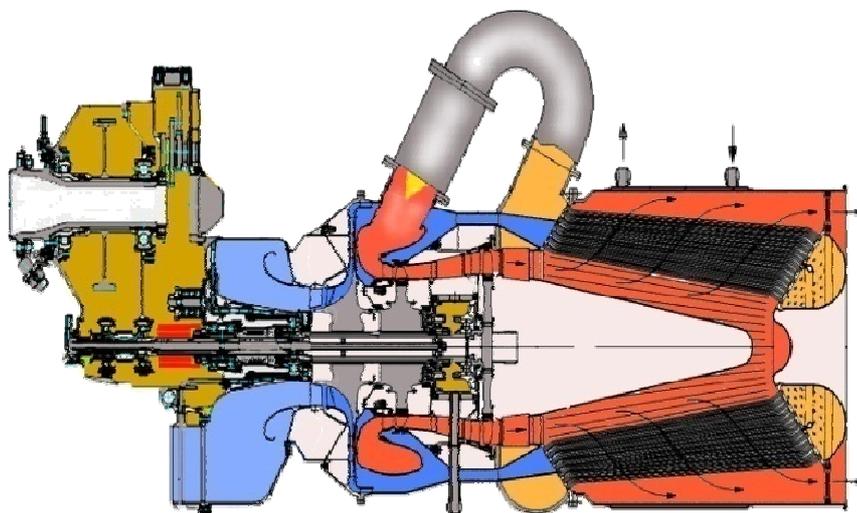


Рис. 2. Конструктивная схема двигателя НК-123 с встроенным рекуператором

На Рис. 1 показан продольный разрез проекта малоразмерного ГТД НК-123ВР-В (при взлёте величина $N=500$ л.с., $C_e=0,297$ кг./л.с.час), который может быть использован на вертолётках типа Ансат или Ка-226. Он имеет осецентрибежный компрессор, в котором размер канала в сечении на выходе из центробежного колеса имеет предельно малую величину 4,6 мм, снижающую его газодинамическую эффективность. Параметры двигателя, на крейсерском режиме полёта, при $H = 6$ км: мощность $N_{кр}= 249$ л.с.; $\pi_{к}^*=8,6$; $(T_{г.}^*)_3 \approx 1150$ К. Сухая масса двигателя равна 120 кг, величина удельного расхода топлива на крейсерском режиме полёта не высокая, $C_e = 0,257$ кг/л.с.·час. Эта величина в значительной степени определяется низкой температурой газа перед турбиной газогенератора. Поэтому массовые характеристики этого ТВлД не оптимальны.

Ниже, на Рис. 2, показана конструктивная схема модификации ТВлД НК-123-ВР-В, у которого исключена одна ступень осевого компрессора, поэтому степень сжатия компрессора уменьшилась до величины $\pi_{к}^* \approx 4,6$. Очевидно, что в данном

случае мощность двигателя также уменьшилась, пропорционально уменьшению площади на входе в его компрессор по сравнению с ТВЛД НК-123ВР-В, поэтому эти варианты проектирования можно сравнивать только по величине удельного расхода топлива. В выхлопной системе этого ГТД установлен пластинчатый рекуператор, имеющий расчётную величину $\sigma_p=0,6\dots0,7$. Расчёты показывают, что применение рекуператора полностью компенсирует снижение степени сжатия в компрессоре этого двигателя, полученная величина $C_e = 0,22$ кг./л.с.час.

В целом эффективность рекуператора зависит как от термодинамических параметров ГТД, так и от особенностей его конструктивной схемы. Большие величины степени повышения давления π_k^* в компрессоре, например, значения (16... 20), для величин термодинамической мощности ГТД в пределах $350 \leq N_{\text{терм}} \leq 3500$ л.с. и температур газа перед турбиной газогенератора $1150 \leq (T_{г.}^*)_3 \leq 1450$ К на крейсерском режиме полёта вертолёта, приводят к получению малых высот лопаток последних ступеней осевого компрессора и первых ступеней турбины газогенератора. В связи с этим снижается КПД ГТД из-за роста относительных радиальных зазоров над лопатками рабочих колёс и уменьшения величин числа Рейнольдса. Таким образом, введение регенерации тепла уменьшает оптимальную степень повышения давления в компрессоре и тем в большей степени, чем выше величина σ_p .

Большой интерес представляет зависимость изменения удельного расхода топлива от выбираемой величины степени регенерации в ГТД. Оценочные расчёты показывают, что при варьировании величиной степени регенерации тепла в пределах $0,4 \leq \sigma_p \leq 0,9$, например, при широко используемой в настоящее время

величине $(T_{г.}^*)_3 = \text{Const} = 1400\text{K}$, параметр $C_e = f(\pi_k^*; \sigma_p)$ изменяется неоднозначно. Так, при $(\pi_k^*) = 20$ величина $\Delta C_e = 0,01$, а при $(\pi_k^*) = 8$ величина $\Delta C_e = 0,06$, т.е эта разница значительно увеличивается. Снижение удельного расхода топлива при $(\pi_k^*) = 8$ в абсолютных величинах весьма значительно и составляет от 0,215 до 0,155 кг/л.с.·час, что указывает на высокую эффективность и необходимость применения рекуператоров для такого типа ГТД.

Исследование и анализ рекуператоров различных типов и конструкций

В данной работе рассматриваются классификационные признаки и особенности конструкций трубчатых и пластинчатых рекуператоров, обеспечивающих высокий уровень их тепловой эффективности. Описаны 11 различных типов исполнения трубчатых и пластинчатых рекуператоров отличающихся их конфигурацией и назначением.

Первый тип – трубчатые рекуператоры, применение которых обосновано в стационарных ГТУ с высокими степенями повышения давления в компрессоре. Недостатком рекуператоров первого типа являются большие габариты и масса, а достоинством высокая надежность и отработанность их конструкций. Одним из возможных путей увеличения эффективности трубчатых рекуператоров среднеразмерных ГТУ является применение рекуператора со спиральными трубами, описанной в патенте EP 2428731 A2 [18].

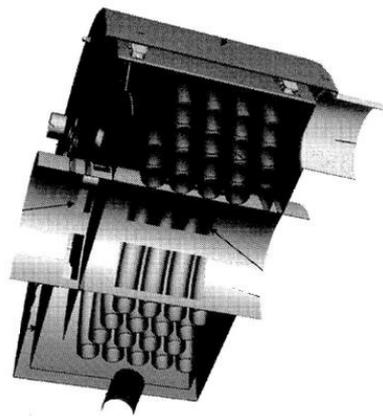


Рис. 3. Принципиальная схема трубчатого рекуператора со спиральными трубами воздушного тракта

Другим путем повышения эффективности трубчатых рекуператоров является применение оребренных трубок, примером оригинального и высокоэффективной конструкции является труба с двусторонним оребрением фирмы Эшер-Висс [1].

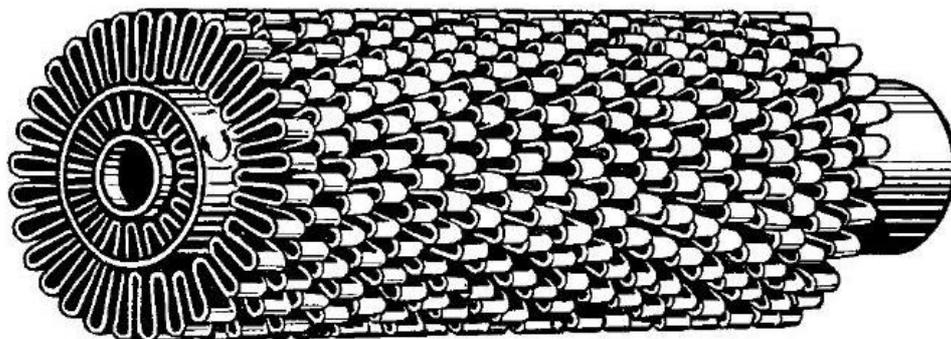


Рис. 4. Труба с двусторонним оребрением

Снижение габаритных размеров и массы трубчатого рекуператора за счет повышения его эффективности можно осуществить используя конструкцию теплопередающей матрицы последнего с плоскими трубами тракта высокого давления описанную в патенте EP 1995516 B1 [19].

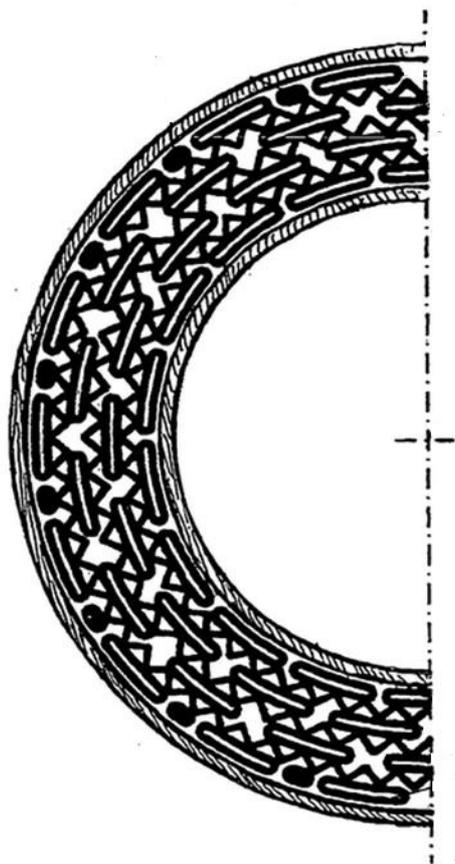


Рис. 5. Принципиальная схема трубчатого рекуператора с плоскими трубами воздушного тракта

Второй тип – пластинчатые рекуператоры, применение которых обосновано в случае жестких ограничений по массе и габаритам для силовой установки в целом. Основным достоинством пластинчатых рекуператоров является их высокая эффективность, обусловленная на несколько порядков большей, чем у трубчатых рекуператоров, удельной (на единицу объема) площади теплопередающей поверхности. Недостатком рекуператоров второго типа является низкая надежность [2..3].

Анализируя запатентованные конструкции пластинчатых рекуператоров можно сделать вывод, что основной схемой организации течения теплоносителей

является схема перекрестного тока, одной из потенциальных возможностей повышения эффективности работы пластинчатых рекуператоров подобной схемы в силовых установках с широким диапазоном режимов работы является использование в конструкции подводящих каналов дросселирующих устройств, подобных описанных в патенте WO 2001063175 A2 [28], которые повышают эффективность теплообмена в рекуператоре на режимах малого газа.

1. По типу организации течения теплоносителей по поверхностям теплообмена (прямоточные, противоточные, перекрестного тока).

Анализируя запатентованные конструкции пластинчатых рекуператоров можно сделать вывод, что основной схемой организации течения теплоносителей является схема перекрестного тока, патенты RU 2384803 C2 [8], RU 2395775 C1 [9], RU 2364812 C1 [10], RU 2350874 C1 [11], RU 2347996 C1 [12] и др.

2. По уровню выбранной величины степени регенерации σ_p , от которой зависят S - площадь теплопередающей поверхности, и m - масса теплообменника, соответственно, рекуператоры авиационных и наземных ГТД) можно сделать следующее заключение: выбираемые при проектировании характеристики пластинчатого рекуператора следует разделить на две группы.

Одна группа - авиационные ГТД, где степень регенерации должна быть не выше $\sigma_p = 0,6..0,65$. При этом, например, для ТВЛД РД-1600, СУ вертолета Ка-62 мощностью $N=1350$ л.с., сухой массой 200 кг. масса рекуператора должна составлять не более 40 %, т.е. равна 80 кг.

Для наземных ГТД степень регенерации может быть значительно более высокой и доходить до значений $\sigma_p = 0,9$. Однако, необходимость значительного увеличения площади теплопередающих поверхностей приводит к значительному увеличению массы узла рекуператора и металлоёмкости всей конструкции, и как это было указано во Введении, масса пластинчатого рекуператора для ГТУ-1С, мощностью 1МВт, может составлять, вместе с массой выхлопного устройства, 1000 кг при расчётном значении $\sigma_p = 0,9$. На Рис. 6 показано это существенное, более чем в десять раз изменение массы рекуператора при увеличении величины $\sigma_p = 0,6$ до 0,9. Как видно, эта зависимость не является прямо пропорциональной и по характеру изменения массы рекуператора разделена на две области: первая, в пределах $\sigma_p = 0,6$ до 0,75, вторая - от величины $\sigma_p = 0,75$ до 0,9. Интенсивность снижения массы рекуператора при уменьшении степени регенерации от 0,75 до 0,6 уменьшается и тем в большей степени, чем меньше будет выбрана при проектировании величина σ_p . Таким образом, при проектировании необходимо оптимизировать выбираемые величины σ_p и массы рекуператора m .

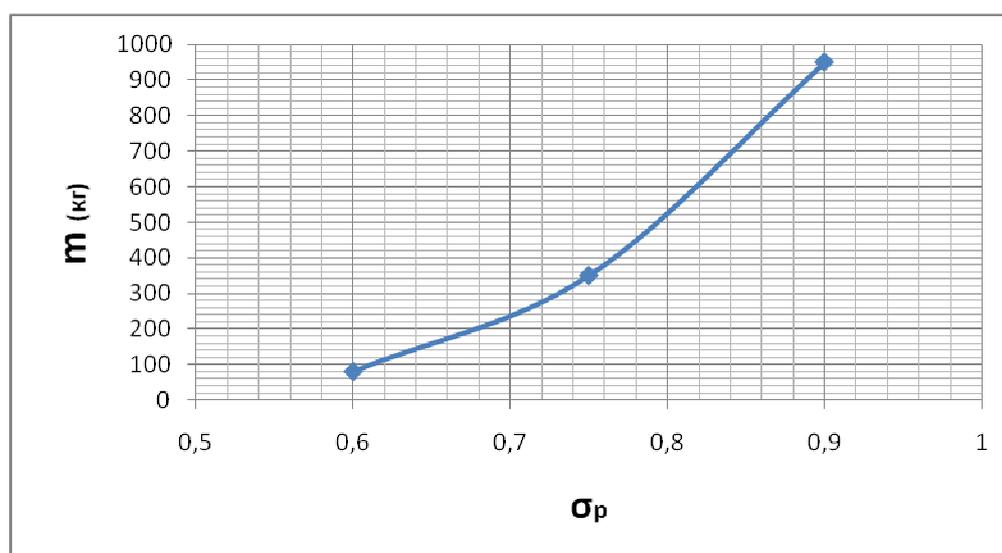


Рис. 6. Зависимость массы рекуператора от степени рекуперации при одинаковой мощности на валу ЭУ

3. Встроенные в выхлопной тракт или выносные в виде отдельного, вынесенного из проточной части ГТУ, блока.

4. По числу заходов теплоносителей.

а. однозаходные.

б. многозаходные.

в. комбинированные (с одним заходом по одному из теплоносителей и несколькими по другому).

Основной схемой организации течения теплоносителей, как для встроенных, так и для выносных пластинчатых рекуператоров является комбинированная: многозаходная по холодному теплоносителю (сжатый, закомпрессорный воздух) и однозаходная по горячему теплоносителю (выхлопные газы) [2], а также патенты RU 2364812 C1 [10], RU 2350874 C1 [11], RU 2347996 C1 [12].

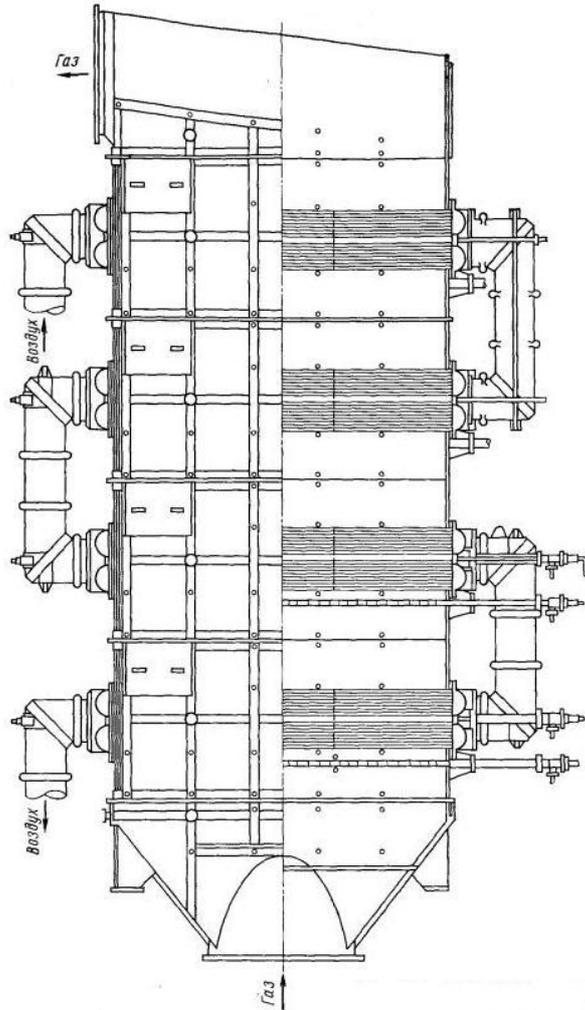


Рис. 7. Выносной пластинчатый рекуператор многозаходный по воздуху и однозаходный по газу

5. По типу поверхности теплообмена.

а. «гладкие» поверхности теплообмена.

Теплопередающие поверхности этого типа представляют собой листовый прокат для пластинчатых рекуператоров) либо тонкостенные трубки (для трубчатых) [3].

б. оребренные поверхности теплообмена.

б1. «гладкое» оребрение.

б2. «прерывистое» оребрение.

б3. «прерывистое» со смещением.

б4. оребрение припаянными (приваренными) ребрами.

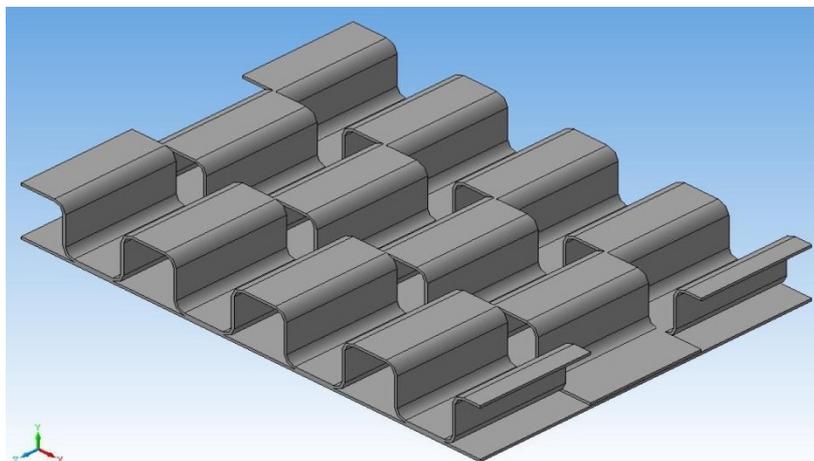


Рис. 8. Оребрение припаянными ребрами со смещением

б5. с компланарным направлением оребрения.

б6. с двухсторонним оребрением.

г. поверхности теплообмена с локальными пристенными турбулизаторами
потока теплоносителя.

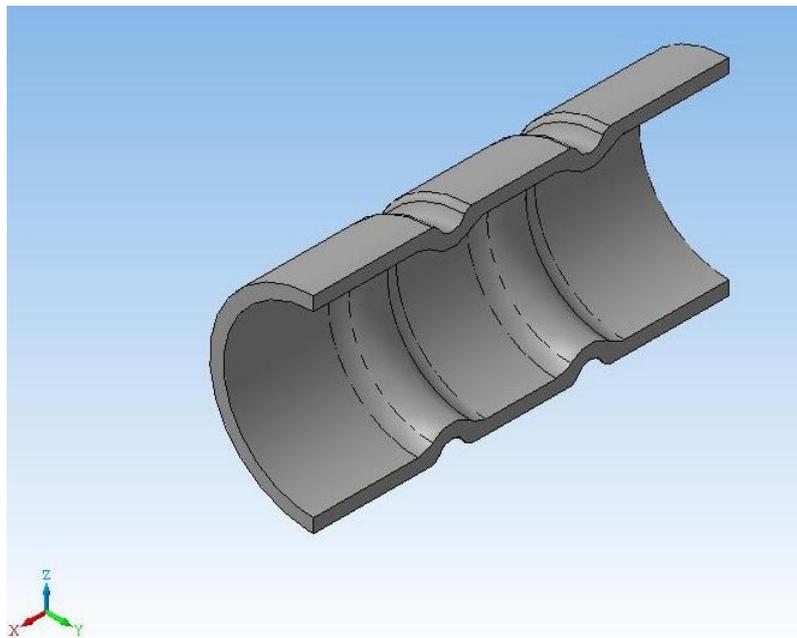


Рис. 9. Турбулизаторы в виде выштамповок перпендикулярных направлению течения потока теплоносителя

б. По типу применяемых интенсификаторов теплообмена.

а. выштамповки преимущественно ортогональные направлению течения потока теплоносителя.

б. одиночные локальные турбулизаторы («штырьковые» или «луночные») форма которых обеспечивает турбулизацию потока теплоносителя независимо от его направления течения относительно турбулизатора.

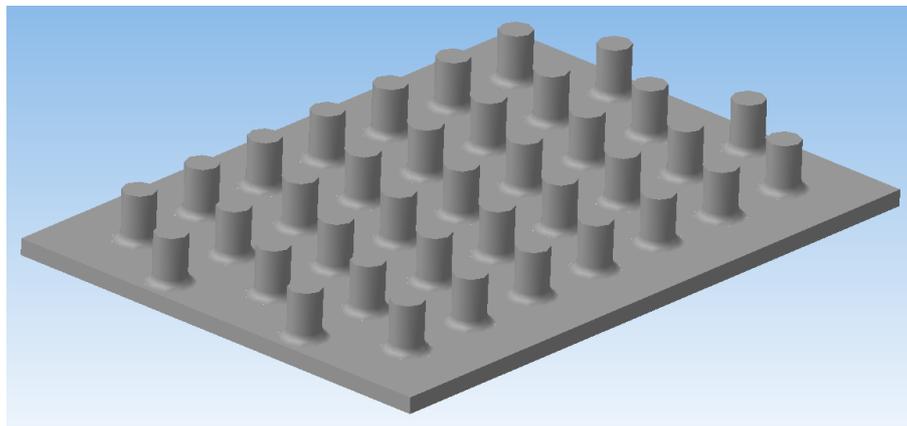


Рис. 10. Штырьковые турболизаторы

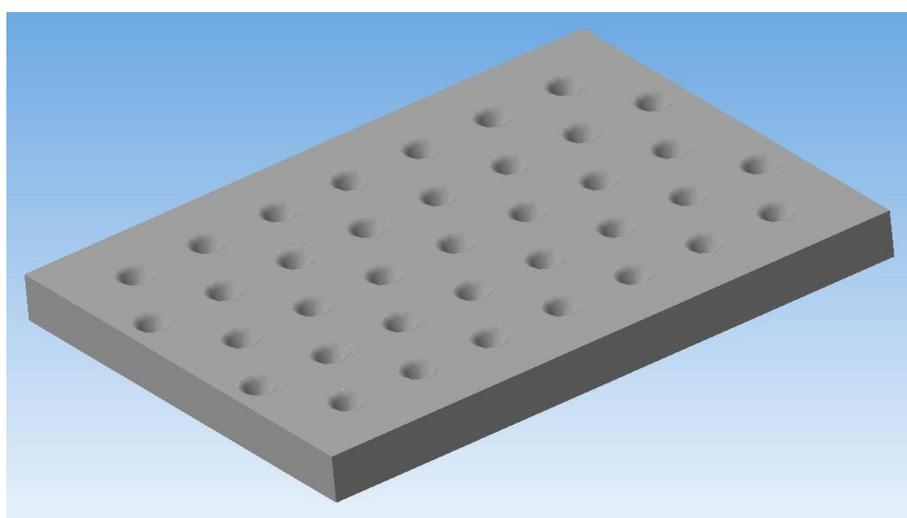


Рис. 11. Луночные турболизаторы

в. турболизаторы являющиеся неотъемлемой составляющей частью поверхности теплообмена обеспечивающие непосредственное газодинамическое взаимодействие скрещивающихся струй теплоносителя.

Возможно использование и особых поверхностей теплообмена с выштамповками сферической формы, различного размера расположенных в шахматном порядке, патент RU 2342616 C1 [13].

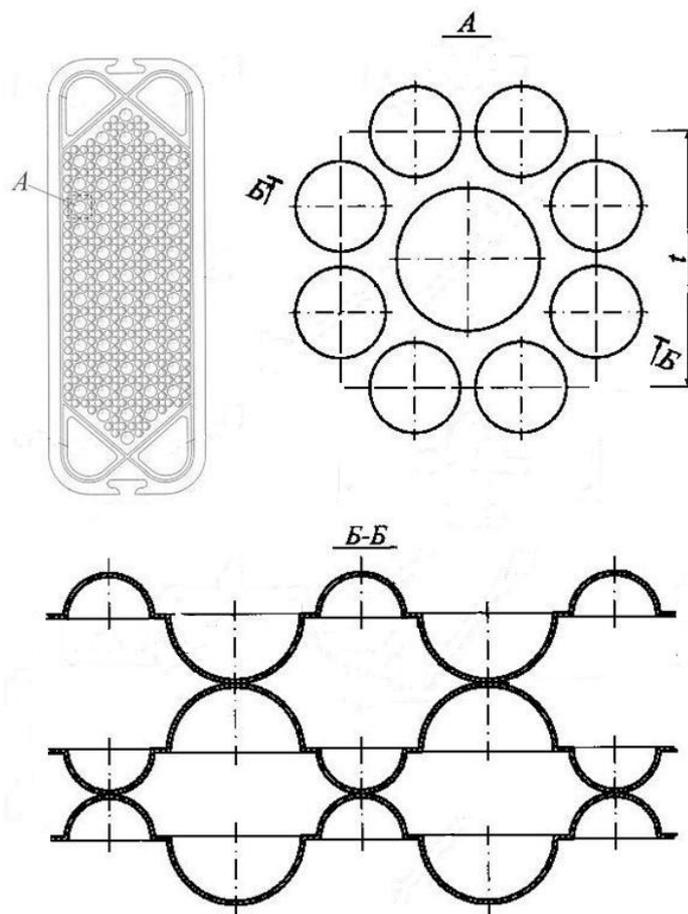


Рис. 12. Схема теплопередающих пластин рекуператора с «луночными» выштамповками

Возможно также совмещение в одной поверхности теплообмена, технических решений изложенных в двух вышеназванных патентах, перекрестного прямого гофрирования и мелких выштамповок сферической формы.

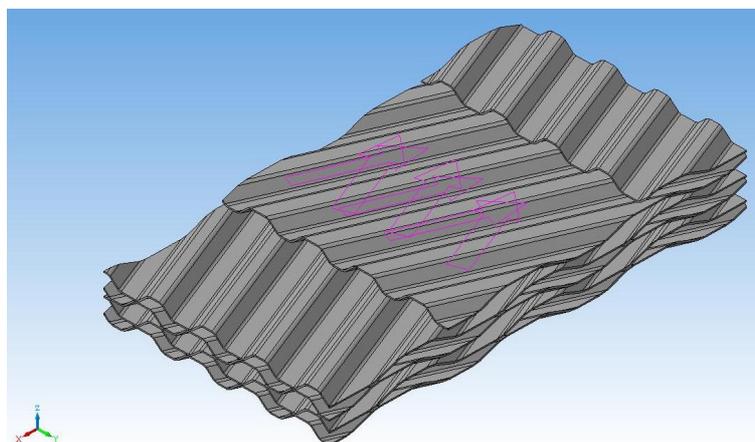


Рис. 13. Структура теплопередающей поверхности типа Френкеля

Заслуживает внимания конструкция поверхностей теплообмена рекуператоров малоразмерных ГТД фирмы Capstone, представляющая собой пластины с выштампованным змеевидным гофрированием.



Рис. 14. Конструкция рекуператора ГТУ Capstone C-30, C-60, C-65, C-200

Также как и для трубчатых рекуператоров в пластинчатых возможно применение пристенных интенсификаторов теплообмена, применение которых особенно актуально на плоских теплопередающих поверхностях, например турболизаторов штырькового или луночного типа, подробно описанных в патенте

EP 1580497 B1 [20], а также перфорации гофрированных элементов пакета теплопередающих пластин, как описано в патенте EP 1394389 A1 [21].

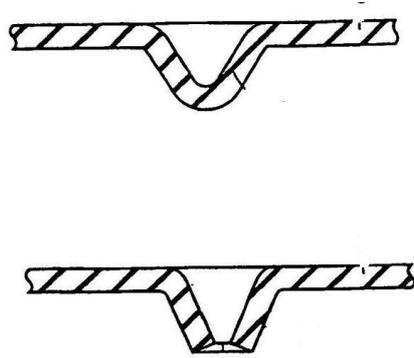


Рис. 15. Конструкция луночно-штырьковых турболизаторов на теплопередающих поверхностях (герметичных) и дистанционных гофрированных листах (негерметичных) пластинчатых теплообменников

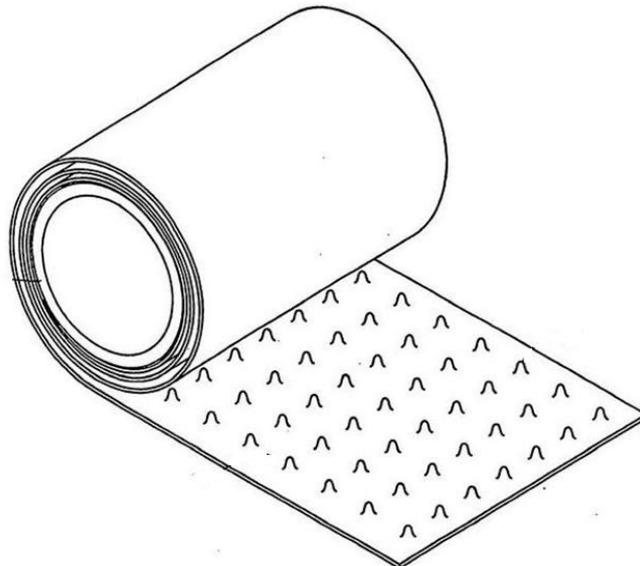


Рис. 16. Вид заготовки для изготовления теплопередающих поверхностей пластинчатого рекуператора с луночно-штырьковыми турболизаторами

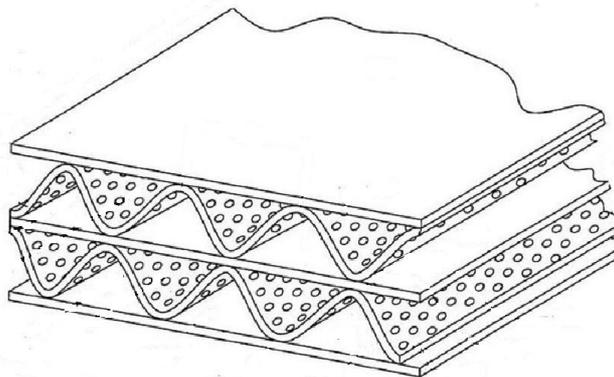


Рис. 18. Конструкция пластинчатого рекуператора с перфорацией гофрированных дистанционных листов пакета теплопередающих пластин, обеспечивающих повышенную турбулентность потоков теплоносителей

Для обеспечения требуемой жесткости теплообменной матрицы пластинчатого рекуператора целесообразно применение подкрепления теплопередающих пластин жестких прямоугольных проставок формирующих частично симметричные тракты для течения теплоносителей, патент RU 109839 U1 [14]. Данное разделение тесно связано с предыдущим, т.к. многие интенсификаторы теплообмена являются неотъемлемой частью поверхности теплообмена.

7. По типу применяемых компенсаторов линейного расширения.

В конструкции встроенных в проточную часть ГТУ пластинчатых рекуператоров могут быть использованы эффективные способы компенсации температурных расширений, аналогичные конструкции представленной в патенте RU 44807 U1 [15].

8. По типу применяемых компенсаторов избыточного давления.

Данное конструктивное отличие может быть применимо не только к пластинчатым, но и к трубчатым теплообменникам (спиральная обмотка теплопередающих трубок проволокой, передающей усилие от избыточного давления в трубке к соседним трубкам и (или) корпусу теплообменника (для трубчатых рекуператоров, а также, выполняющая функции турбулизатора потока теплоносителя в тракте низкого давления). Для обеспечения требуемой жесткости теплообменной матрицы пластинчатого рекуператора целесообразно применение подкрепления теплопередающих пластин жестких прямоугольных проставок, прямоугольных в плане, формирующих частично симметричные тракты для течения теплоносителей, патент RU 109839 U1 [21].

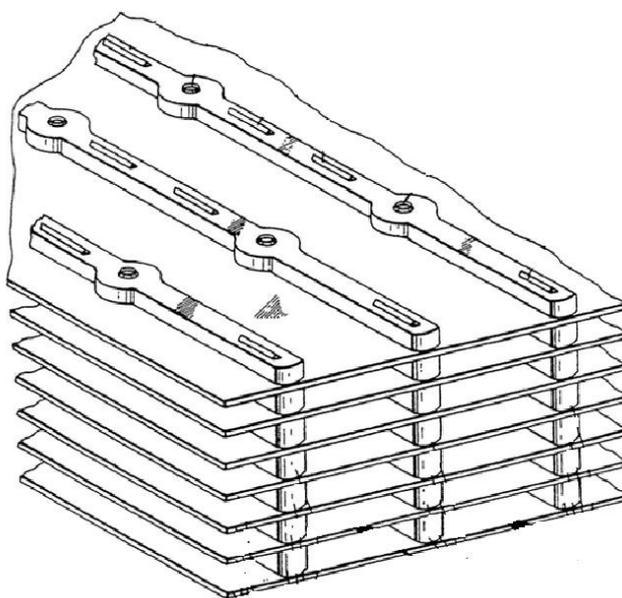


Рис. 20. Конструкция пакета теплопередающих пластин в каналами для теплоносителей сформированными между жесткими проставками

В конструкции встроенных в проточную часть ГТУ пластинчатых рекуператоров могут быть использованы эффективные способы обеспечения жесткости пакета теплопередающих пластин, которые отработаны в конструкциях

вращающихся теплообменников регенеративного типа, где матрица теплообменника находится под действием существенных инерционных нагрузок, к примеру, патент EP 0190443 B1 [22], где пакет тонкостенных теплопередающих пластин заключен в жесткую сварную силовую клетку. Данная конструкция позволяет применять тонкостенные пакеты теплопередающих пластин на энергоустановках с более высокими степенями повышения давления воздуха в компрессоре.

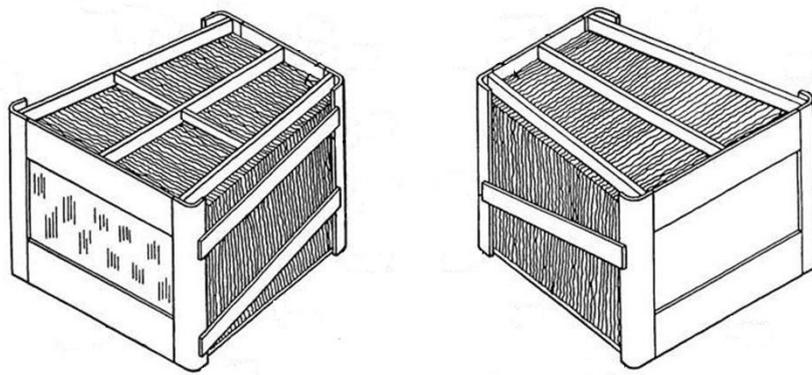


Рис. 21. Конструкция пакета теплопередающих пластин жесткость которого повышена внешним силовым каркасом

Также одним из технологичных способов увеличения жесткости пакета теплопередающих пластин может быть применение разборного каркаса жесткости на стяжных элементах, подобного описанному в патенте EP 0536967 A2 [23].

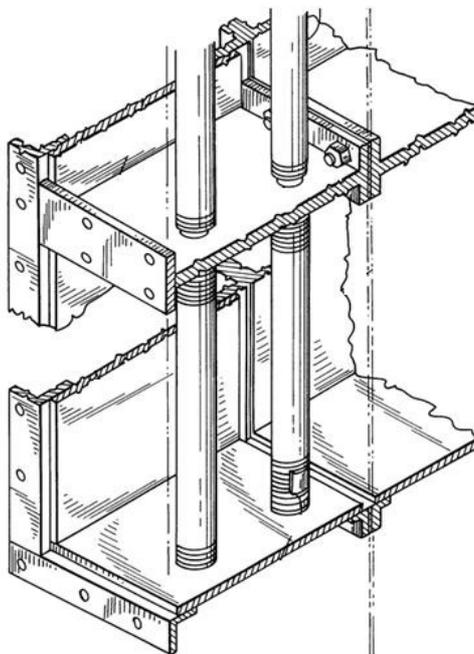


Рис. 22. Конструкция корпуса рекуператора с жесткими стяжками, проходящими через сквозные технологические отверстия в пакетах теплопередающих пластин

С точки зрения снижения гидравлического сопротивления газового тракта и воздушных трактов пластинчатого рекуператора в связи с значительным отличием температур, а соответственно, и плотностей теплоносителей целесообразно, с целью повышения эффективности теплообмена конструктивно обеспечить различные площади проходных сечений каналов соответствующих трактов рекуператора, к примеру, как это описано в патентах EP 1910766 B1 [24], EP 0929781 B1 [25], EP 0956490 B1 [26] и RU 119085 U1 [16].

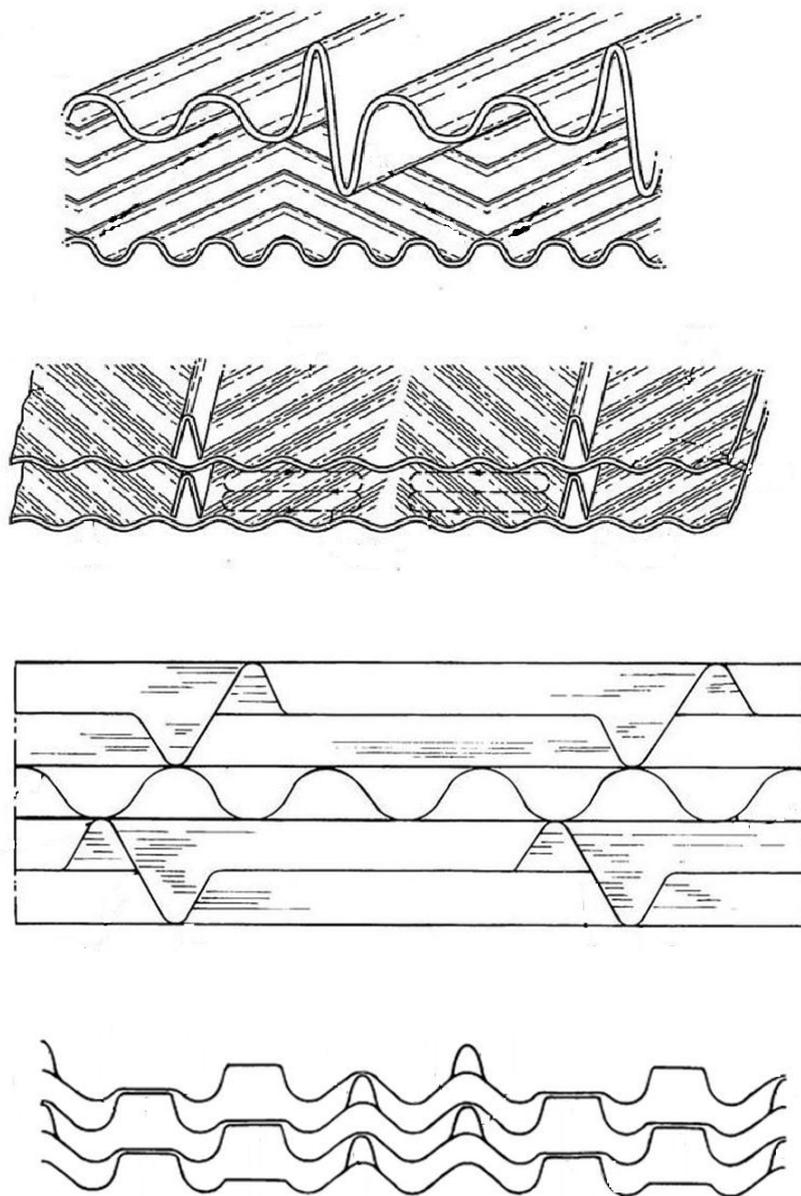


Рис. 23. Варианты конструкций пакетов теплопередающих пластин рекуператоров с различными площадями проходных сечений трактов низкого и высокого давления

9. По типу организации подвода теплоносителей.

а. с «одноканальным» подводом теплоносителей.

Такой типаж конструкции характерен для выносных моноблочных рекуператоров малоразмерных ЭУ, а также для рекуператоров авиационных двигателей встроенных в проточную часть.

б. с подводом теплоносителей по отдельным трубам (многоканальным)

в. комбинированное с «пропускной» частью в виде отдельных труб и ресиверами (газосборниками) для подвода-отвода теплоносителей из многочисленных отдельных каналов соответствующих трактов.

10. По типу исполнения в виде одного (единого) теплопередающего блока или секционные, в виде нескольких однотипных теплопередающих блоков с отдельной подачей теплоносителей в каждый теплопередающий блок (секцию). Следует отметить, что секционная конструкция рекуператора более выгодна с точки зрения надежности, но проигрывает с позиций минимизации массы и габаритов теплообменника, что в свою очередь ограничивает сферу применения многосекционных рекуператоров в основном стационарными и транспортными ГТУ.

11. Разделение конструкций рекуператоров по специфическим особенностям эксплуатации на конкретной энергоустановке.

Так как существенную проблему при эксплуатации энергоустановок с рекуператорами представляет деградация характеристик теплообменников в связи с загрязнением рабочих поверхностей теплообмена, то для практического применения представляет интерес конструкция теплообменника с улавливателями твердых частиц (сажи) описанного в патенте ЕР 0018745 В1 [27], которая упрощает чистку

рекуператора, что, соответственно, уменьшает затраты на обслуживание энергоустановки.

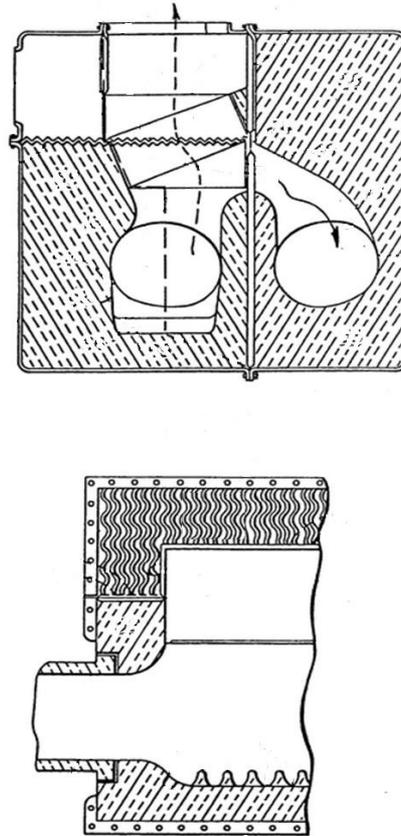


Рис. 24. Конструкция матрицы пластинчатого рекуператора с полостью для улавливания сажи из газового тракта

Другой системной проблемой рекуператоров является обеспечение герметичности воздушного тракта. Рекуператор, как и любой теплообменник состоит из множества однотипных элементов (как то теплопередающие трубки трубчатых рекуператоров или теплопередающие пластины пластинчатых рекуператоров), обеспечение герметичности соединений которых с другими элементами конструкции теплообменника (силовыми элементами, корпусными деталями, элементами конструкции каналов подвода и отвода теплоносителей) представляет собой определенную сложность по причине того, что работы всем

этим элементам приходится работать в условиях повышенных температур и достаточно больших перепадов давления теплоносителей. В связи с этой проблемой до сегодняшнего дня не решена в полной мере задача обеспечения надежности работы рекуператоров (в особенности, высокоэффективных пластинчатых теплообменников предназначенных для перспективных авиационных ГТД). В связи с тем, что не удается обеспечить полную герметичность воздушного тракта рекуператора, возникают утечки сжатого в компрессоре воздуха в газовый тракт двигателя – это является прямой потерей рабочего тела, а, соответственно, снижением КПД двигателя в целом. Двухшовная конструкция соединения теплопередающих пластин, в значительной мере решающая подобную проблему подробно описывается в патенте RU 125321 U1 [17].

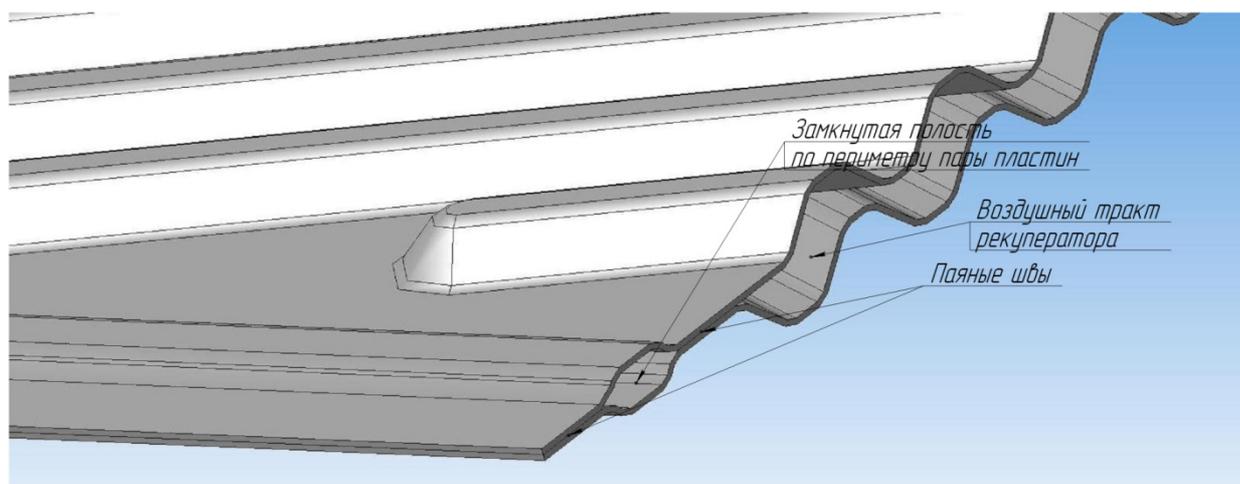


Рис. 25. Двухшовная конструкция соединения теплопередающих пластин

Выводы

В результате исследований и анализа конструктивных особенностей высокоэффективных рекуператоров различных типов и назначения можно

сформулировать следующие требования к рекуператорам современных и перспективных ГТД:

- Высокий уровень эффективности, под которой подразумевается: оптимальная величина σ_p , при минимальных габаритах, массе и гидравлических потерях, максимальное значение коэффициента компактности.

- Высокий уровень надежности и ресурса при минимальном ухудшении всех основных технических характеристик в процессе эксплуатации.

- Низкая стоимость производства, эксплуатации и ремонта.

Заключение

- В настоящее время задача обеспечения высокой степени рекуперации и надежности работы пластинчатого рекуператора в отечественных авиационных и транспортных ГТД актуальна, но она не решена, в связи со сложностью конструкторского и технологического обеспечения комплекса противоречивых требований предъявляемых к рекуператору.

- Результатом проделанных работ являются представленные в статье технические решения, направленные на совершенствование различных элементов конструкции рекуператоров.

- Рассмотренные элементы конструкции могут быть практически применены в различных комбинациях для любых рекуператорах перспективных двигателей.

Библиографический список

1. В.А Щварц «Конструкции газотурбинных установок» изд. «Машиностроение», Москва, 1970 г., 436 стр.
2. В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов «Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок» изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2004 г., 592 стр.
3. Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп, А.С. Мякочин «Эффективные поверхности теплообмена» изд. «Энергоатомиздат», Москва, 1998 г., 408 стр.
4. Справочник под ред. И.Г. Шустова «Авиационные двигатели», изд. ООО ИД «Аэросфера», Москва, 2007 г., 344 стр.
5. Ю.Н. Нечаев, Р.М. Федотов «Теория авиационных газотурбинных двигателей», ч.2, изд. Машиностроение, Москва 1978 г., 336 стр.
6. Б.П. Васильев, В.А. Коваль, В.В. Канаков, Г.В. Павленко, В.В. Романов «Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок», изд. Контраст, Харьков, 2005 г., 376 стр.
7. А.Н. Козаченко «Эксплуатация компрессорных станция магистральных газопроводов», изд. Нефть и газ, Москва, 1999 г., 463 стр.
8. Купер Д., Маккалум Д., Патент RU 2384803 C2, 20.03.2010
9. Худяков А. И., Патент RU 2395775 C1, 27.07.2010
10. Худяков А. И., Патент RU 2364812 C1, 20.08.2009
11. Григорьев А. А., Марков Ю. С., Лепешкин А. Р., Григорьев С. Н., Патент RU 2350874 C1, 20.07.2007
12. Худяков А. И., Патент RU 2347996 C1, 03.09.2007
13. Кирсанов Ю. А., Галиков Б. Ш., Патент RU 2342616 C1, 27.12.2008
14. Гуров К. О., Патент RU 109839 U1, 27.10.2011
15. Лебедев Ю.Н., Марголин Г.А., Чекменев В.Г., Данилов Ю. Б., Дроздов В. В., Патент RU 44807 U1, 27.03.2005
16. Алфимов А. В., Ломазов В. С., Дробыш М. В., Патент RU 119085 U1, 10.08.2012
17. Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А., Патент RU 125321 U1, 27.02.2013

18. Zdravko M., Патент EP 2428731 A2, 14.03.2012
19. Joachim A. Dr. Wüning, Joachim G. Dr. Wüning, Патенти EP 1995516 B1, 02.06.2010
20. Hiroyuki K., Yoshiaki O., Патент EP 1580497 B1, 30.04.2008
21. Michael John Bowman, Nirm Velumylum Nirmalan, Патент EP 1394389 A1, 03.03.2004
22. Kenneth Orren Bellows, Патент EP 0190443 B1, 12.07.1988
23. Francis D. Fitzgerald, Патент EP 0536967 A2, 14.04.1993
24. Jim Cooper, Donald McCallum, Патент EP 1910766 B1, 07.01.2009
25. William Francis Harder, Robin Barry Rhodes, Патент EP 0929781 B1, 31.05.2000
26. Bernd Bolle, Franz-Josef Hagemann, Bernd Hewing, Lothar STÜFCHEN, EP 0956490 B1, 31.01.2001.
27. Paul J. Staebler, Патент EP 0018745 B1, 08.12.1982.
28. Karl Fleer, Ahmed Hammoud , Патент WO 2001063175 A2, 30.08.2001.
29. Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А., тезисы доклада «Классификация и анализ особенностей конструкции рекуператоров авиационных и наземных ГТД», Труды 11-й международной конференции "Авиация и космонавтика - 2012", Москва, МАИ, 2012 г., стр. 121-122.
30. Ардатов К.В., Нестеренко В.Г., Равикович Ю.А., тезисы доклада «Повышение эффективности и надежности работы пластинчатых рекуператоров наземных ГТУ», Труды «59-й Научно-техническая сессии по проблемам газовых турбин», Санкт-Петербург, «РЭП Холдинг», 2012 г., стр. 78-79.