

## **РЕГЕНЕРАТОРЫ ПРОЕКТА ЦНИОКР «МАШПРОЕКТ» ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ И СУДОВЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

*В работе приведены данные по трубчатым и пластинчатым регенераторам проекта ЦНИОКР «Машпроект» для ГТД мощностью 1-16 МВт. Проведен сравнительный анализ трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей на базе данных регенераторов. Указаны дальнейшие перспективы и направления развития регенераторов ГТУ для энергетики Украины.*

**Ключевые слова:** теплообменник, регенератор, топливная экономичность, газотурбинная техника.

*У роботі приведені дані щодо трубчастих і пластинчатих регенераторів проекту ЦНИОКР «Машпроект» для ГТД потужністю 1-16 МВт. Проведений порівняльний аналіз трубчастих і пластинчатих теплообмінних поверхонь на базі даних регенераторів. Вказані подальші перспективи і напрями розвитку регенераторів ГТУ для енергетики України.*

**Ключові слова:** теплообмінник, регенератор, паливна економічність, газотурбінна техніка.

*In work information is resulted on the tubular and plates regenerators of project TSNIOKR «Mashproekt» for GTD by capacity 1-16 Mwt. The comparative analysis of tubular and plates heat-exchangers surfaces is conducted on a base information of regenerators. Further prospects and directions of development of regenerators of GTU are indicated for energetics of Ukraine.*

**Keywords:** heatexchanger, regenerator, fuel economy, gas-turbine technique.

### **Постановка проблемы и ее связь с важными научными и практическими заданиями.**

Одной из наиболее актуальных проблем современности является разработка новых и модернизация существующих энергетических установок с целью повышения их топливной экономичности. В связи с этим в энергетике все большее применение находят газотурбинные установки сложных циклов, в том числе с регенерацией теплоты уходящих газов, а также с регенерацией и промежуточным охлаждением воздуха. Применение этих циклов позволяет при современном уровне развития газотурбинной техники повысить КПД установки до 40-45 % [1-3]. Так, например, КПД газотурбинных двигателей мощностью 1-3 МВт при степени регенерации теплоты в теплообменнике равной 0,8-0,84 может быть повышен с 28 % до 40-42 % (т. е. в 1,4-1,5 раза).

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы.** Разработки ГТУ открытого цикла с регенерацией теплоты для диапазона мощностей 100...20000 кВт были начаты еще в середине XX века. В конце 80-х годов ведущие газотурбинные фирмы вновь активно заинтересовались данным вопросом, что привело к созданию ряда принципиально новых ГТУ [3-5].

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья.** Несмотря на большое количество работ, посвященных выбору типа поверхности теплообмена, вопрос о целесообразности применения пластинчатой или трубчатой поверхности в регенераторах ГТУ до сих пор не решен.

**Цель и задачи исследования.** За 18 лет работы над созданием регенеративного двигателя ЦНИОКР «Машпроект» накопил значительный опыт в разработке трубчатых и пластинчатых регенераторов, который в краткой форме излагается в данной статье. Проведен анализ полученных теплообменников, выделены их положительные и отрицательные стороны с целью определения целесообразности применения трубчатых и пластинчатых теплообменных поверхностей и определения перспектив дальнейшего развития регенераторов ГТУ.

#### **Изложение основного материала исследований**

В стационарной энергетике в эксплуатации находятся как трубчатые, так и пластинчатые регенераторы. Трубчатые регенераторы считаются более долговечными и надежными в эксплуатации, но для судостроения более предпочтительными являются пластинчатые регенераторы, как обладающие меньшей массой и габаритами.

Регенераторы трубчатой конструкции имеют большую массу и габариты, чем пластинчатые. Однако они менее чувствительны к термическим нагрузкам, возникающим при пуске, останове и переходных режимах работы ГТУ, а также способны обеспечить надежную работу при высоких температурах и давлениях рабочих сред.

В процессе эксплуатации трубчатых регенераторов негерметичность (утечка циклового воздуха) может появиться только в соединении трубка – трубная доска, однако этот дефект легко устраним развальцовкой или подваркой трубки (в зависимости от способа ее заделки).

Наиболее известны конструкции гладкотрубных регенераторов фирм «GEA» (Размер труб: диаметр 2542 мм, длина 6500 мм) и «Броун-Бовери» [6].

Производство пластинчатых регенераторов развивалось по двум направлениям: создание сварных конструкций из штампованных пластин с разнообразными профилями гофрирования и создание паяных конструкций из пластин с оребрением.

Создание паяных конструкций регенераторов (вакуумная пайка со сжатием) требует очень больших финансовых вложений при освоении производства. Сварные регенераторы из штампованных пластин в изготовлении проще. Их производство может быть освоено без дополнительных финансовых вложений любой фирмой, занимающейся производством пластинчатых теплообменников с размерами пластин до 1,5 м<sup>2</sup>.

Примером исполнения такого регенератора для ГТД мощностью 10 МВт является конструкция «Невского завода» [6; 7]. Для этой конструкции характерна модульность (6 штук). Модуль набирается из прямоугольных пластин с размерами 1364Ч676 мм и не имеет коллекторов. Корпус регенератора имеет довольно сложную конструкцию, он обеспечивает силовую замкнутость модулей и соответствующее распределение воздуха по ним. Двигатели с регенераторами используются в качестве привода нагнетателей на компрессорных станциях. Регенератор при расходе воздуха 85 кг/с обеспечивает степень регенерации 0,7 при суммарных потерях давления около 5 %.

Большой опыт применения пластинчатых регенераторов имеет американская фирма «Дженерал Электрик». Ими оснащены около 20 ГТУ типа M7001B.

При эксплуатации ГТУ в циклическом режиме в пластинчатых регенераторах часто наблюдались трещины со стороны воздуха. Они вызваны термическими напряжениями в местах соединения пластин, температуры которых быстро следуют за изменениями температуры газов, с элементами корпуса, которые прогреваются значительно медленнее. Для

увеличения термоэластичности проектантам часто приходилось существенно менять конструкцию (форму) пакета и его элементов, а также снижать толщину корпуса и коллекторов.

Опыт эксплуатации пластинчатых регенераторов показывает их низкую ремонтпригодность (как на объекте, так и в заводских условиях). После заварки трещин в пластинчатых регенераторах эффект от ремонта сохраняется не более, чем на 1000-1500 часов, но даже на этот период полностью устранить утечки не удается.

В качестве примеров современных регенеративных ГТД, предназначенных для использования в составе морских и наземных установок, можно привести:

- Mercury 50 [5]. Двигатель развивает мощность 4,2 МВт при начальной температуре газа, равной 1160 °С. В конце 1998 г. двигатель прошел испытания, и в середине 1999 г. первый двигатель этого типа поступил в эксплуатацию. Известно, что ГТД Mercury-50 проектировался на КПД 40-42 %, но реальный полученный КПД – 38,5 %. Это свидетельствует о том, что достигнутая степень регенерации находится на уровне 0,78-0,81 %. Регенератор состоит из штампованных пластин, которые свариваются между собой и образуют каналы для прохода воздуха и газа;
- WR-21 (с промежуточным охлаждением и регенерацией) [4]. Мощность двигателя составляет 21,5 МВт, удельный расход топлива около 200 г/(кВт\*ч) (КПД 42,5 %) Благодаря применению теплообменников двигатель обладает плавной кривой удельного расхода топлива в большом диапазоне мощностей и высокой экономичностью на частичных режимах. Пластинчатый регенератор изготавливается пайкой;
- «Надежда» (с регенерацией и промежуточным охлаждением) [3]. Мощность двигателя 16,3 МВт, КПД 43 %. Регенератор и промежуточный охладитель имеют трубчатую поверхность нагрева.

Также ряд фирм взялись за разработку новых регенераторов для модернизации ГТД ГТК-10-4. Необходимо отметить, что все вновь разрабатываемые регенераторы имеют трубчатую конструкцию [8].

Работы по созданию регенеративного ГТД ведутся в ЦНИОКР «Машпроект» с 1990 года. Первоначально разработки велись над созданием ГТУ мощностью 2,5-3 МВт для привода электрогенераторов, который можно было бы использовать как в стационарной энергетике, так и на флоте. В таблице 1 приведены параметры ГТД мощностью 2,5 МВт для простого и регенеративного циклов. Видно, что применение регенерации приведет к росту КПД до 35 % (степень регенерации 0,8) – 36 % (степень регенерации 0,84). При улучшении параметров проточной части и степени регенерации до 0,855 КПД может достичь 37,8 %, что почти на 10 % выше, чем в простом цикле.

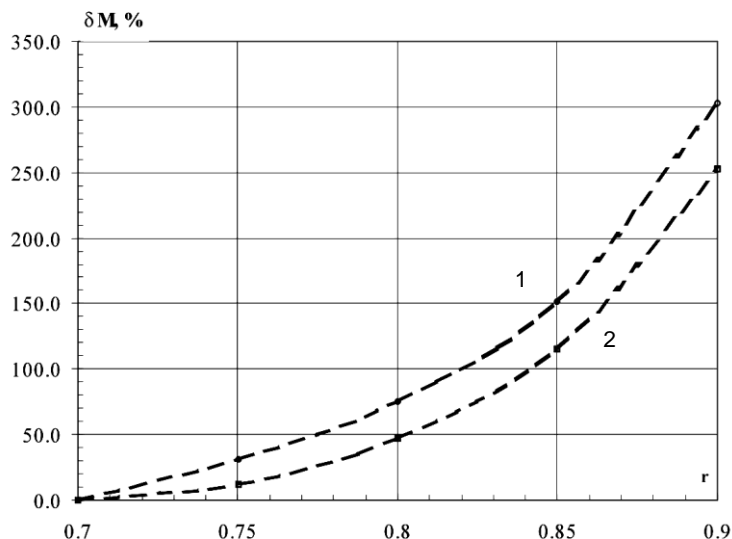
Таблица 1

**Параметры ГТД малой мощности проекта ЦНИОКР «Машпроект» простого цикла и с регенерацией теплоты**

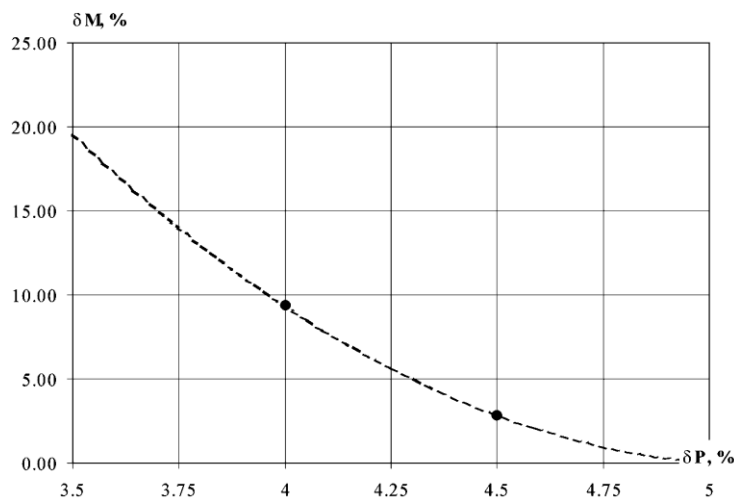
Величина	ГТД без регенерации	ГТД с регенерацией		
		3000	3000	3160
Мощность, кВт	2850	3000	3000	3160
КПД, %	28,5	35,1	35,9	37,8
Степень регенерации	–	0,80	0,84	0,855
Относ. суммарные потери давления в регенераторе, %	–	4	4	4,45

Проведенные расчеты показали, что в настоящее время повышать степень регенерации выше 0,8-0,85 не является целесообразным в связи с резким возрастанием массы теплообменника (рис. 1). Одновременно с увеличением КПД из-за потерь давления в

регенераторе и трубах подвода и отвода уменьшается мощность установки. Попытка снизить потери давления в теплообменнике (при постоянной степени регенерации) также приводит к росту его массы и габаритов (рис. 2). С учетом этого, при проектировании регенератора всегда следует искать компромиссное решение, при котором учитывается как массогабаритные показатели, так и стоимость изготовления, долговечность и неизменность эксплуатационных характеристик установки в целом.



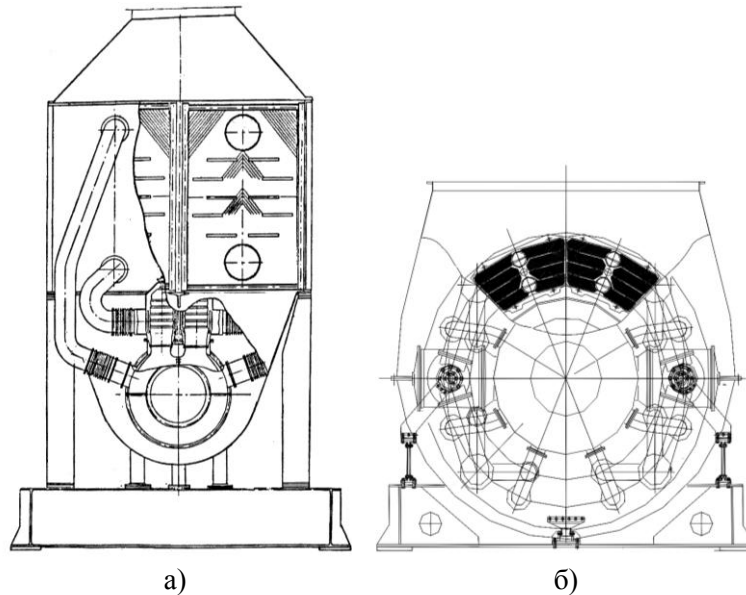
**Рис. 1. Изменение массы регенератора ( $\delta M$ ) при увеличении степени регенерации ( $r$ ) от 0,7 до 0,9: 1 и 2 – разные варианты компоновки регенератора**



**Рис. 2. Изменение массы регенератора ( $\delta M$ ) при уменьшении суммарных потерь давления ( $\delta P$ , %), степень регенерации 0,84**

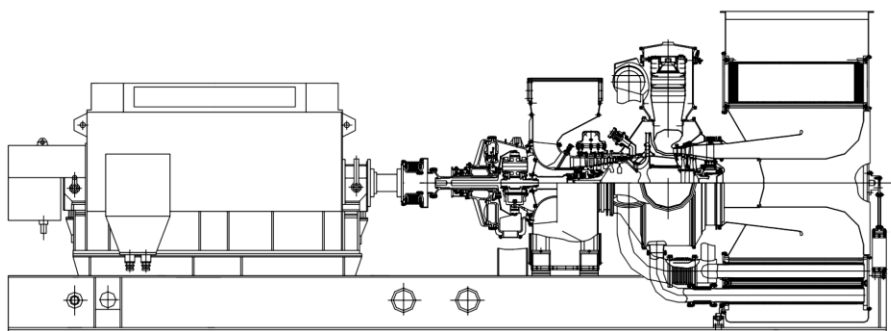
Изначально для получения хороших массогабаритных показателей и высокой степени регенерации было принято решение о создании регенератора пластинчатого типа, работающего по противоточной схеме (рис. 3, а). Регенератор имел прямоугольную форму и состоял из восьми одинаковых пакетов. Пакеты объединялись в два одинаковых блока, каждый из которых представлял собой практически законченную часть регенератора. Для экспериментальных исследований на заводе «Павлоградхиммаш» был изготовлен один пакет. Испытания прямоугольного пакета проводились НИО в 1998-1999 годах.

В процессе испытаний на первой и последней секциях (состоящих из двух сваренных между собой пластин) образовались трещины в районе сварных швов. Дефектные секции были исключены из воздушного тракта, но оставлены в пакете в качестве вытеснителей для организации газового потока. В таком виде пакет используется на стенде научно-исследовательского отделения комплекса с марта 2002 года и до настоящего времени (при пониженном давлении воздуха).



**Рис. 3. Компоновка прямоугольного (а) и кольцевого (б) пластинчатых регенераторов для установки UGT2500**

По результатам рассмотрения полученных экспериментальных данных в 2000 году было принято решение Генерального конструктора о создании пластинчатого кольцевого регенератора (рис. 3, б). Выполненный по данной схеме регенератор отличался большей компактностью, его можно было расположить на одной раме с ГТД и генератором (рис. 4). К недостатку кольцевого регенератора можно отнести сложность обвязки воздушными трубами: на каждом прямолинейном участке должен быть установлен компенсатор.



**Рис. 4. Компоновка установки UGT2500 с регенерацией теплоты (кольцевой пластинчатый регенератор)**

По результатам испытания пакета [9], было достигнуто: суммарные относительные потери давления составили примерно 3,5 % (по проекту 4,1 %), а степень регенерации 0,8 (по проекту 0,84). К сожалению, достигнуть проектной степени регенерации в модели кольцевого регенератора (0,84) не удалось. Есть пути улучшения эффективности кольцевого регенератора,

но все они связаны с увеличением размеров пластин (увеличением количества пластин практически ничего не выигрывается).

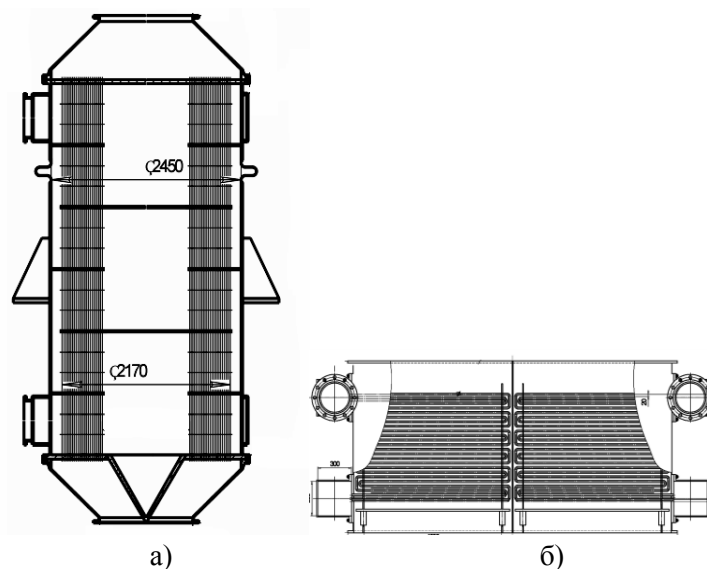
Регенератор прошел испытания термодинамическими нагрузками: после выполнения 435 термоциклов утечки циклового воздуха достигли примерно 2 % и далее увеличились до 3 % (484 термоцикла) и после этого стабилизировались. После 535 термоциклов регенератор был демонтирован, продефектирован и отремонтирован. На второй пластине первой секции были обнаружены трещины в районе входного и выходного воздушных патрубков. После ремонта пакет прошел 5000 пневмоциклов «на холодную» без потери герметичности.

Последующим шагом исследований было принято решение рассмотреть проект регенератора трубчатой конструкции в качестве альтернативы пластинчатому регенератору.

Поскольку степень регенерации теплоты большинства современных регенераторов ГТУ не превышает 0,8, при анализе конструкций гладкотрубных регенераторов рассматривались два варианта: со степенью регенерации 0,84 (как в исходном пластинчатом теплообменнике) и со степенью регенерации 0,8.

На рис. 5, а представлена конструкция цилиндрического трубчатого регенератора. Трубный пучок данного регенератора состоит из круглых трубных досок и труб, которые концами закреплены в трубных досках. Пакет помещается в цилиндрический корпус и закрывается с торцов крышками с патрубками для подвода и отвода выхлопных газов ГТД. Выхлопные газы входят в регенератор снизу и движутся внутри труб. Воздух обтекает трубы снаружи и совершает внутри теплообменника 6 ходов. Общая схема движения теплоносителей: многократный перекрестный ток с общим противотоком. Для организации движения воздуха внутри пакета размещаются круглые перегородки. Для степени регенерации 0,84 общая площадь поверхности теплообмена равна 1380 м<sup>2</sup>. Масса трубного пучка составляет 11 т. При снижении степени регенерации до 0,8 масса трубного пучка снизится до 7,8 т.

На рис. 5, б показана конструкция регенератора «котельного» типа. Поверхность теплообмена этого регенератора набрана из плоских змеевиков. Змеевики скомпонованы в прямоугольном коробе, который является естественной частью газоотвода. Газ обтекает трубки снаружи, воздух течет внутри трубок и подводится (отводится) по прямоугольным коллекторам, переменного сечения. Схема движения теплоносителей – многократный перекрестный ток с общим противотоком. Такая конструкция позволяет освоить производство регенераторов без значительных предварительных затрат, связанных с технологической подготовкой.



**Рис. 5. Трубчатые регенераторы для UGT 2500:**  
а – цилиндрический; б – из плоских змеевиков  
(подводящий и отводящий участки газотока не показаны)

Данный регенератор состоит из двух одинаковых частей, работающих параллельно и собираемых при монтаже. Трубные пакеты набраны из труб диаметром 18 мм и толщиной стенки 1 мм, расположенных в шахматном порядке. Воздух совершает 12 ходов, газ – 1 ход. Масса теплообменной поверхности 7,9 т.

В таблице 2 представлены основные характеристики пластинчатых и гладкотрубных регенераторов для UGT 2500. Видно, что регенератор из плоских змеевиков получается легче гладкотрубного кольцевого регенератора, но последний имеет меньшую площадь поперечного сечения, что может быть важным при размещении установок в стесненных условиях. Также обращает на себя внимание то, что при рациональном проектировании гладкотрубной поверхности ее масса не намного превышает массу пластинчатого регенератора, а с учетом более высокой надежности трубной поверхности теплообмена, это делает ее более предпочтительной для изготовления регенератора.

Таблица 2

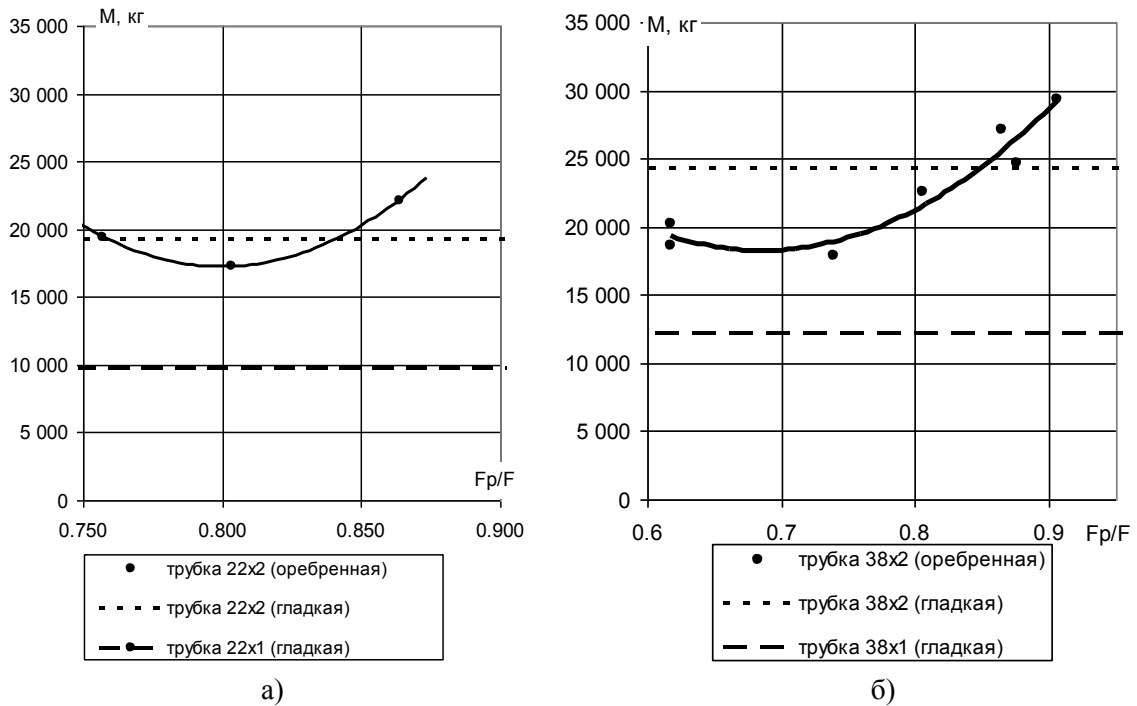
Регенераторы для UGT 2500

Величина	Пластинчатый		Трубчатый			
	прямоугольный	кольцевой	цилиндрический		из плоских змеевиков	
Степень регенерации	0,8	0,8	0,8	0,84	0,8	0,84
Суммарные относительные потери давления, %	4,22	3,77	4	4	4	4
Габаритные размеры пакета, м	2,842,141,5 (ЛЧВЧН)	2,341,4 (ØЧЛ)	2,443,5 (ØЧН)	2,544,5 (ØЧН)	2,543,340,8 (ЛЧВЧН)	2,743,640,94 (ЛЧВЧН)
Масса поверхности теплообмена пакета, т	7,8	4,8	7,8	11	5,6	7,9

При проектировании регенератора для модернизации ГТГ-1500 (ОАО «Пролетарский завод») рассматривалась только змеевиковая конструкция как наиболее технологичная и освоенная производством. Был разработан гладкотрубный регенератор и трубок 12×1 мм, состоящий из двух одинаковых секций. Газ обтекал трубки снаружи, а воздух тек внутри и совершал 12 ходов.

Был также выполнен проект змеевикового двухсекционного регенератора из оребренных труб (диаметр трубок составлял 22x2 мм). Однако данный вариант при практически равных степени регенерации и потерях давления оказался тяжелее гладкотрубного почти в два раза .

Выполненный анализ оребренных поверхностей показал, что за счет изменения шага и высоты ребер в регенераторах ГТУ возможно добиться существенного снижения массы, как это показано на рис. 6 (за величину, характеризующую оребрение, принято отношение поверхности ребер и полной поверхности теплообмена пакета). При прочих равных условиях оребренный регенератор будет легче гладкотрубного, выполненного на базе трубок того же размера. Однако невысокое давление воздуха внутри труб регенератора позволяет выполнить гладкотрубный вариант из труб толщиной 1 мм, в то время как по технологическим соображениям толщина стенки оребренной трубы не может быть меньше 2 мм.

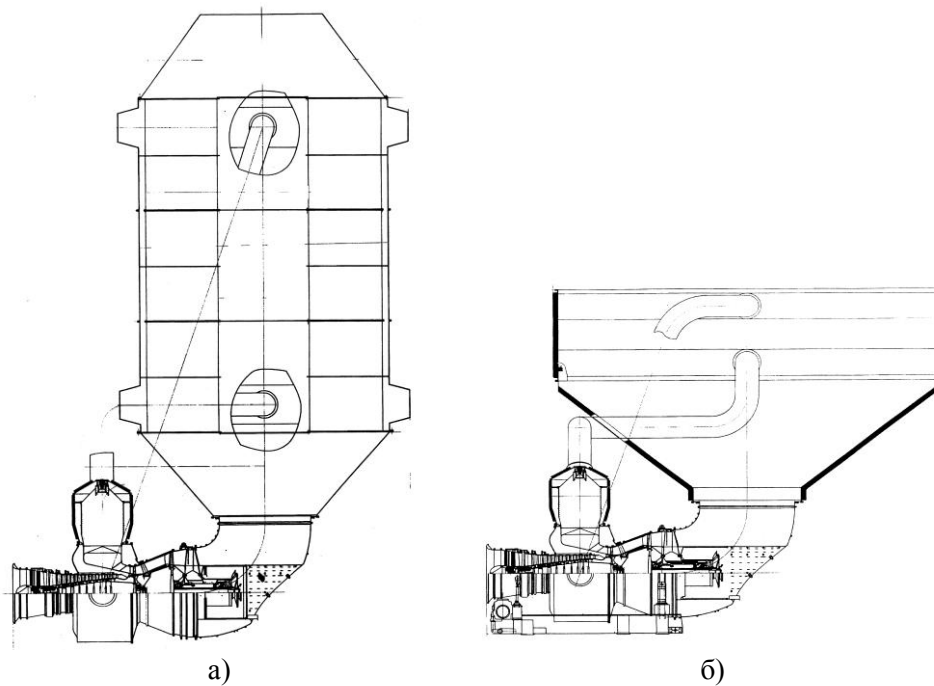


**Рис. 6. Сравнение регенераторов из гладких и оребренных труб:  
а – диаметр трубки 22 мм; б – диаметр трубки 38 мм**

В настоящее время в ЦНИОКР «Машпроект» ведутся работы по созданию регенеративного ГТД мощностью 16 МВт для привода нагнетателя природного газа.

В предварительной проработке проекта были рассмотрены два варианта гладкотрубного регенератора

- цилиндрического (рис. 7, а);
- из плоских змеевиков (рис. 7, б).



**Рис. 7. Компоновка цилиндрического (а) и змеевикового (б) гладкотрубных регенераторов с ГТД мощностью 16 МВт**



После анализа полученных результатов было решено в дальнейшем проектировании использовать регенератор из плоских змеевиков. После выполнения ряда оптимизационных теплогидравлических расчетов и конструкторских проработок получена конструкция, основные параметры которой представлены в таблице 3. Теплообменная поверхность регенератора собирается плоских трубчатых элементов, состоящих из 10 змеевиков, концы которых крепятся в трубных досках раздающего и собирающего воздушных коллекторов. Жесткость сборке придает система дистанционирующих колец. В настоящее время работы по оптимизации параметров двигателя, конструкции регенератора и компоновки установки продолжаются.

Таблица 3

**Параметры регенеративного ГТД мощностью 16 МВт  
для газоперекачивающего агрегата**

Величина	Значение
Мощность на выходном валу ГТД, МВт	16
КПД ГТД, %	40,8
Расход воздуха на входе ГТД, кг/с	78,7
Степень повышения давления в компрессоре	5
Степень регенерации	0,85
Температура газа на входе в турбину, °С	950
Температура газа на выходе из турбины, °С	582
Температура газа на выходе из регенератора, °С	290
Суммарные относительные потери давления в регенераторе, %	4
Габаритные размеры (ЛЧВЧН), м	8,6 Ч 6,5 Ч 2,1
Масса поверхности теплообмена, т	51
Масса всего теплообменника, т	88

**Выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления**

1. При проектировании регенератора всегда следует искать компромиссное решение, при котором учитывается как массогабаритные показатели, так и стоимость изготовления, долговечность и неизменность эксплуатационных характеристик установки в целом.

2. В настоящее время наиболее вероятным является создание регенератора с трубчатой поверхностью теплообмена (из плоских змеевиков) как более надежной, чем пластинчатая, и наиболее освоенной производством.

3. При рациональном проектировании трубной поверхности и использовании современных методов расчета и проектирования ее масса не намного превышает массу поверхности пластинчатого регенератора, а с учетом более высокой надежности трубной поверхности теплообмена это делает ее более предпочтительной для изготовления регенератора.

4. Наиболее перспективным направлением дальнейшего развития регенераторов ГТУ будет совершенствование трубчатых поверхностей и внедрение новых поверхностей с различными способами интенсификации теплообмена. При этом стоит отметить, что использование в регенераторах ГТУ оребренных труб, по-видимому, не является целесообразным.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Colin F. McDonald. The increasing role of heat exchangers in gas turbine plant // ASME paper. – 1989. – № 89.
2. Романов В.И., Жирицкий О.Г., Берестнев Б.С. Сенкевич М.В. Рекуперативный газотурбинный двигатель нового поколения // Известия Академии инженерных наук Украины. Выпуск 1/1999. – С. 121-125.
3. Огнев В.В., Зуев А.В., Бухарин Н.Н. Газоперекачивающий агрегат «Надежда» // Турбины и компрессоры. – № 1-2. – 2004. – С. 5-9.
4. Carl L. Weiler. WR-21 Design and Maintenance // ASME paper. – 1996. – № 96.

5. David Teraji. Mercury™ 50 Field Evaluation and Product Introduction // Paper No: 05-IAGT-1.1 INDUSTRIAL APPLICATION OF GAS TURBINES COMMITTEE – 2005 – 10 с.
6. Стационарные газотурбинные установки / Л.В. Арсеньев, В.Г. Тырышкин, И.А. Богов и др.; под ред. Л.В. Арсеньева и В.Г. Тырышкина. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 543 с.
7. Теплообменные аппараты из профильных листов / В.М. Антуфьев, Е.К. Гусев, В.В. Ивахненко, Е.Ф. Кузнецов, Ю.А. Ламм, – Л.: Энергия, 1972. – 127 с.
8. Виноградов В.В., А.Н. Торбег, В.Б. Сударев, Е.П. Шевченко. Опыт внедрения трубчатых регенераторов на КС // Газовая промышленность – 2002 – № 11 – С. 69-71.
9. Зайцев В.А., Соломонюк Д.Н., Ушаков В.Ю. Экспериментальное исследование характеристик модели пластинчатого регенератора // Судовое и энергетическое газотурбостроение: Научно-технический сборник. Том 1. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», НО ИАУ, 2004. – С. 298-203.

Рецензенти: д.т.н., професор Борисенко В.Д.,  
к.т.н., доцент Ризун И.Р.

© Мовчан С.Н., Бочкарев Ю.В.,  
Соломонюк Д.Н., 2009

*Стаття надійшла до редколегії 18.05.09*