

УДК 621.438

А.К. Чердниченко, М.Р. Ткач

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина

К ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Приведены результаты исследования характеристик газотурбинной установки, оснащенной теплообменником – регенератором с промежуточным жидкометаллическим теплоносителем. Предложено выбирать относительный температурный напор из диапазона $0,35...0,5$ для обеспечения заданных постоянных значений коэффициентов восстановления полного давления в теплообменниках при условии минимизации габаритов теплообменников. Показано, что варьирование относительного температурного напора в этом диапазоне позволяет изменять отношение площадей теплообменников в диапазоне $1,0...3,0$ при практически постоянной суммарной площади.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, регенерация тепла, промежуточный теплоноситель, теплообменник, коэффициент теплопередачи, температурный напор.

Постановка проблемы

Акценты нефтегазодобычи неуклонно смещаются в сторону запасов, скрытых толщей Мирового океана. Большие потребности в электрической и тепловой энергии процесса добычи углеводородов обуславливают применение газотурбинных установок на объектах океанотехники в качестве основного источника энергии. Несмотря на полувековой опыт успешной эксплуатации газотурбинных установок в военно-морских флотах ведущих стран, использование газотурбинных двигателей в коммерческом транспортном судостроении и при строительстве объектов океанотехники оправдано далеко не во всех случаях. Основными сдерживающими факторами являются высокие расходы на топливо, связанные с повышенными требованиями к его качеству и сравнительно высокий удельный расход топлива. Повышение эффективности ГТД за счет роста температуры газа перед турбиной исчерпало свой потенциал. Резервы повышения КПД узлов ГТД также практически исчерпаны [1]. В этих условиях, реализация требования проектирования современных газотурбинных энергетических установок – высокие показатели топливной эффективности обеспечивается за счет усложнения циклов ГТУ (бинарные, контактные, когенерационные технологии и т.д.) [2].

Анализ исследований и публикаций

В практике проектирования ГТД сложных циклов наибольшее распространение получили регенеративные схемы. Регенерация тепла отходящих газов путем введения в схему теплообменника-регенератора позволяет при умеренных

температурах газа перед турбиной $T_3 = 1300...1400\text{K}$ и степени повышения давления $\pi_k = 6...10$ обеспечить значение КПД ГТД не менее $40...41\%$ [3], а при более высоких значениях T_3 и до 45% .

Традиционная реализация регенеративной схемы ГТД приводит к нарушению прямоточности газовоздушного тракта, появлению неравномерностей потоков рабочих сред, вызывающих рост потерь полного давления и утечек рабочих сред. Достижение высоких значений степеней регенерации связано со снижением температурных напоров в теплообменнике и приводит к существенному увеличению площади теплопередающей поверхности. Применение компактных регенераторов пластинчатого типа сдерживается сложностями решения вопросов прочности вследствие больших температурных напряжений. Непрерывное повышение массы установки WR21 свидетельствует в пользу этого. Теплообменники трубчатого типа свободны от этих проблем, но характеризуются недостаточной компактностью [4]. Реализация поперечного обтекания и эффективного оребрения поверхностей в них затруднена.

Применение регенератора ГТД с промежуточным теплоносителем (ПТН) – комплекса из двух теплообменников трубчатого типа (с возможностью оребрения), передача энергии между которыми осуществляется ПТН, позволяет минимизировать габариты теплообменников, снизить потери полного давления, но усложняет схему [5, 6]. Перенос тепла может осуществляться промежуточным «тяжелым» жидкометаллическим теплоносителем [7,8]. Высокая молекулярная теплопроводность жидкометаллических теплоноси-

телей Pb-Bi, Pb [9] позволяет за счет небольшого объема теплоносителя обеспечить малую величину проходных сечений каналов. Технологии использования «тяжелого» жидкометаллического теплоносителя успешно отработаны на опытных и серийных транспортных реакторных установках, решены вопросы обеспечения чистоты теплоносителя и поверхностей циркуляционного контура, а также предотвращения коррозии и эрозии материалов [10].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Известны рекомендации по выбору параметров регенератора ГТД с промежуточным теплоносителем. Так, для определения оптимальных условий работы теплообменников с ПТН предложено следующее соотношение площадей поверхностей теплообмена [6]

$$\frac{0,75}{k_{t1}/k_{t2}} < \frac{F_1}{F_2} < \frac{2,00}{k_{t1}/k_{t2}},$$

где F_1 , F_2 и k_{t1} и k_{t2} – площади поверхностей и коэффициенты теплопередачи по «холодной» и «горячей» сторонам.

При допущении о постоянстве коэффициентов теплопередачи в теплообменном аппарате регенеративного ГТД с ПТН, составленного из двух теплообменников с площадями поверхностей F_1 и F_2 рекомендовано следующее соотношение их площадей [11]

$$\frac{F_1}{F_2} = \sqrt{\frac{k_{t2}}{k_{t1}}}.$$

В реальных условиях проектирования регенеративного ГТД с заданной величиной эффективности данные подходы могут быть не всегда корректными, поскольку не учитывают взаимосвязь гидравлических потерь в теплообменниках и эффективности ГТД.

Цель работы

Целью исследования является выявление влияния параметров промежуточного теплоносителя на габариты регенеративного ГТД заданной эффективности.

Изложение основного материала

На рис. 1 приведена расчетная схема теплообменного аппарата регенеративной ГТУ с переносом тепла промежуточным теплоносителем (ПТН) между теплообменником газотурбинного двигателя (ТГО) и теплообменником компрессора (ТКО).

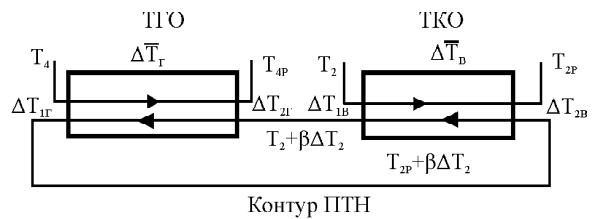
Для оценки влияния параметров ПТН на массогабаритные показатели регенератора проанализи-

зировано влияние относительного температурного напора – β . Параметр β может быть определен из соотношения

$$\Delta \bar{T}_B = \frac{\beta \cdot \Delta \bar{T}_G}{(1 - \beta)},$$

где $\Delta \bar{T}_G = \frac{\Delta T_{1G} - \Delta T_{2G}}{\ln \frac{\Delta T_{1G}}{\Delta T_{2G}}}$ и $\Delta \bar{T}_B = \frac{\Delta T_{1B} - \Delta T_{2B}}{\ln \frac{\Delta T_{1B}}{\Delta T_{2B}}}$ –

среднелогарифмические температурные напоры по газовой и воздушной стороне соответственно (рис. 2).



Температура ПТН в ТГО	
на входе	на выходе
$T_2 + (T_{4p} - T_2) \cdot \beta$	$T_{2p} + (T_4 - T_{2p}) \cdot \beta$
Температура ПТН в ТКО	
на входе	на выходе
$T_{2p} + (T_4 - T_{2p}) \cdot \beta$	$T_2 + (T_{4p} - T_2) \cdot \beta$

Рис. 1. Расчетная схема регенератора ГТД с ПТН

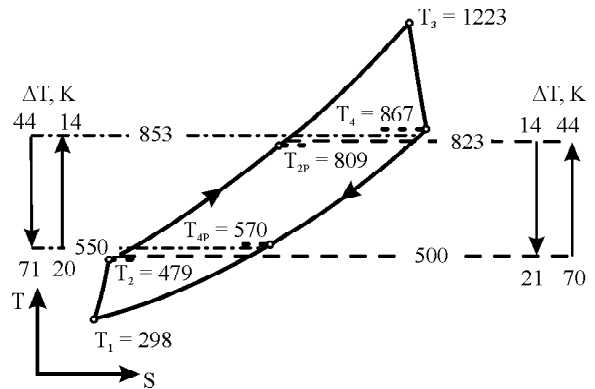


Рис. 2. Графическое представление относительного температурного напора ПТН в T-S координатах (для параметров ГТД, указанных в табл. 1)

Из уравнения теплового баланса в теплообменнике

$$Q_G = Q_B k_G \cdot F_G \cdot \Delta \bar{T}_G = k_B \cdot F_B \cdot \Delta \bar{T}_B.$$

Предположив, что k_B и k_G линейные функции вида $k_G = k_1 - a_1 \cdot \beta$; $k_B = k_2 + a_2 \cdot \beta$, исследуем функцию

$$f(k_1, a_1, k_2, a_2, \beta) = \left(\frac{1}{\beta(k_2 + a_2\beta)} + \frac{1}{(1-\beta) \cdot (k_1 - a_1\beta)} \right).$$

Таблица 1
Характеристики регенеративного ГТД с ПТН

Параметры цикла	Значение
степень регенерации, R	0,85
число компрессоров, n_k	1
число турбин, n_t	2
температура газов перед ТВД, T_3	1223 К
степень повышения давления в цикле, π_k	4,8...5,0
расход воздуха через компрессор ГТД, G_k	~ 80 кг/с
мощность ГТД, Ne	~ 16000 кВт
эффективный КПД	~ 0,4

В случае постоянства коэффициентов теплопередачи введем комплексы

$$A = \frac{Q_{\Gamma}}{(\Delta T_4 - \Delta T_2) \cdot k_B} \cdot \ln \left(\frac{\Delta T_4}{\Delta T_2} \right),$$

$$\bar{k} = \frac{k_B}{(\Delta T_4 - \Delta T_2) \cdot k_{\Gamma}}$$

и исследуем влияние относительного температурного напора β на величину суммарной площади теплообменников

$$F = F_{\Gamma} + F_B = A \cdot \left(\frac{\bar{k}}{(1-\beta)} + \frac{1}{\beta} \right).$$

В диапазоне $0 < \beta < 1$ минимум функции F определяется аналитическими зависимостями

$$\left(\frac{-\sqrt{\bar{k}-1}}{\bar{k}-1} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{\bar{k}+1}}. \text{ Это соответствует известным услови-}$$

ям минимума суммарной площади теплообменника в [11].

Как следует из полученных зависимостей, изменение необходимости достижения постоянной эффективности ГТД (что соответствует постоянному гидравлическому сопротивлению теплообменников) приводит к увеличению суммарной площади теплообменников при значениях относительного температурного напора β , отличных от оптимального (рис. 3).

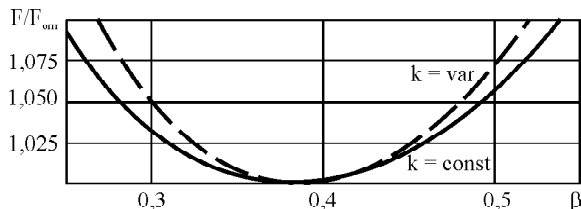


Рис. 3. Зависимость относительной площади теплообменного аппарата от относительного температурного напора ПТН

С целью проверки допустимости приведенных предположений выполнено математическое моделирование процессов в регенеративной ГТУ (рис. 4) с двухсекционным ТГО, размещенным на выхлопе ГТД и двухсекционным ТКО с переносом тепла жидкометаллическим теплоносителем, параметры которого приведены в табл. 1. Прокатка промежуточного теплоносителя осуществляется последовательно через каждый теплообменник циркуляционным насосом. В качестве базового двигателя принимался ГТД четвертого поколения разработки НПКГ «Зоря-Машпроект» [12].

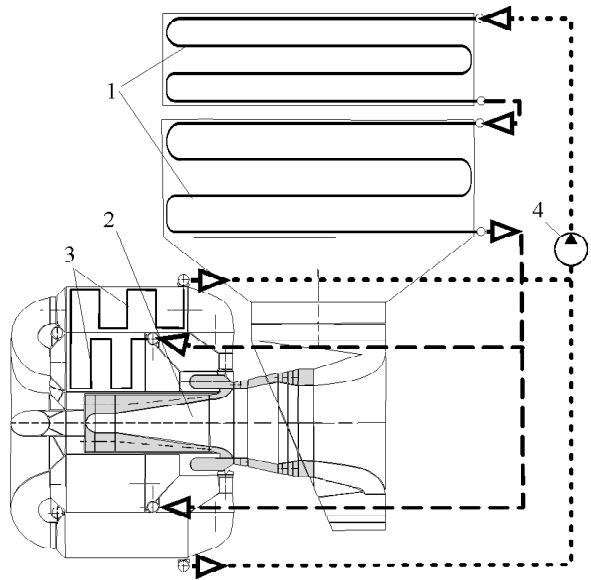


Рис. 4. Конструктивная схема и характеристики регенеративного ГТД мощностью 16 МВт с жидкометаллическим промежуточным теплоносителем:
1 — секции теплообменника газотвода; 2 — ГТД;
3 — секции теплообменника компрессора;
4 — циркуляционный насос ПТН

Обеспечение заданных постоянных значений коэффициентов восстановления полного давления в теплообменниках газотвода и компрессора ($v_{\Gamma} = 0,975$; $v_B = 0,970$) потребовало изменения величины скорости в расчетных сечениях ТГО и ТКО. Это привело к изменению значений коэффициентов теплопередачи при изменении относительного температурного напора. Влияние относительного температурного напора на коэффициенты теплопередачи в верхней и нижней секции теплообменников газотвода и компрессора показаны на рис. 5. В воздушной и газовой секции теплообменника наблюдается устойчивое турбулентное течение потока ($Re \geq 10^4$).

Влияние относительного температурного напора в диапазоне 0,25...0,8 на площади теплопередающих поверхностей ТГО и ТКО показано на рис. 6.

Полученные результаты с достаточной для инженерной практики точностью совпадают с рекомендациями [6,11]. Следует учесть, что в соответствии с рекомендациями [11] суммарная площадь теплообменника может быть уменьшена еще на ~30%, но это приведет к изменениям значений коэффициентов восстановления полного давления v в теплообменниках газоотвода и компрессора. В итоге эффективный КПД газотурбинной установки η в диапазоне значений β 0,2...0,5 уменьшится на 1...1,5 % (рис. 7).

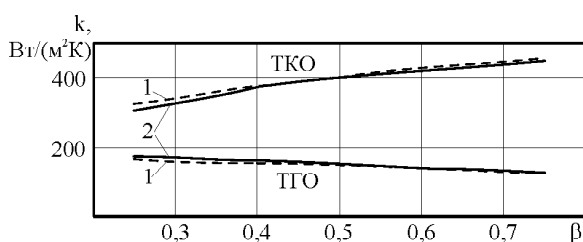


Рис. 5. Зависимость коэффициентов теплопередачи секций ТГО и ТКО от β :
1, 2 – верхняя и нижняя секция соответственно

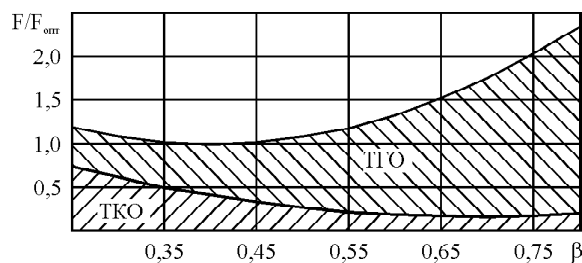


Рис. 6. Зависимость относительных площадей теплообменников ТГО и ТКО от относительного температурного напора ПТН

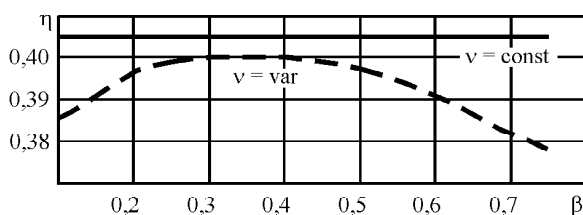


Рис. 7. Влияние КПД в ТГО и ТКО на энергетическую эффективность регенеративной ГТУ

Выводы

1. Перенос тепла в регенеративной ГТУ жидкометаллическим промежуточным теплоносителем позволяет применять надежные и высокоресурсные теплообменники трубчатого типа.
2. Для обеспечения заданных постоянных значений коэффициентов восстановления полного давления в теплообменниках газоотвода и компрессора при условии минимизации габаритов теп-

лообменников относительный температурный напор выбирается из диапазона 0,35...0,5.

3. Показано, что варьирование относительным температурным напором в диапазоне 0,35...0,5 позволяет при практически постоянной суммарной площади изменять отношение площадей теплообменников в диапазоне 1,0...3,0.

4. Проектирование регенеративного ГТД с промежуточным теплоносителем в условиях постоянного коэффициента теплоотдачи приводит к снижению КПД ГТД до 2% в зависимости от величины относительного температурного напора.

Перечень ссылок

1. Исаков Б.В. Состояние и перспективы развития корабельной газотурбинной энергетики / Б.В.Исаков, В.Н. Чобенко, Р.В. Палиенко // Механика, энергетика, экология. Вестник СевНТУ. Вып. 87 – Севастополь. – 2008. – С. 56-61.
2. Korobitsyn M.A. New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles / M.A. Korobitsyn. – Printed by Febodruk BV, Enschede, 1998. 155 p.
3. В.В. Романов. Особенности создания газотурбинной установки регенеративного цикла для ГПА / Романов В.В., Спицын В.Е., Боцула А.Е., Мовчан С.Н., Чобенко В.Н. // Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2009. – 4 (40). – С.1619.
4. Кузнецов В.В. Проектирование теплообменных аппаратов для ГТУ сложных циклов / В.В. Кузнецов, Д.Н. Соломонюк // Вестник Национального технического университета «ХПИ» Харьков. 2008. №35 С.78 – 88.
5. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД / А.М. Тихонов – М.: Машиностроение, 1977. – 108 с.
6. Кейс В.М. Компактные теплообменники: [пер. с англ.] / В.М. Кейс, А.Л. Лондон / – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 158 с.
7. Patent 5287695 United States, F02B/43 Power plant system. / Karl-Uwe Schneider, RWE Energie Aktiengesellschaft.appl. № 979521; Nov 23, 1992; data of patent Feb 22, 1994.
8. Пат 93458 Україна, МПК 6 F02C 6/20 Газотурбінна установка / Б.Г. Тимошевський, М.Р. Ткач, О.К. Чередніченко; заявник та власник патенту Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. – № а200912664; заявл. 07.12.2009; опубл. 10.02.2011, бюл. № 3.
9. Безносков А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков М.: Издат, 2007. – 434 с.
10. Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Иванов К.Д. Технология свинцово-висмутного теплоносителя

ля на ЯЭУ первого и второго поколения. Доклад на конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», Обнинск, 2003г.

11. Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок / Н.Д. Грязнов,

В.М.Епифанов, В. Л. Иванов, Э. А. Манушин. – М. : Машиностроение, 1985. – 360 с.

12. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции – Николаев: НПКГ «Зоря» – «Машпроект», 2004 – 20 с.

Поступила в редакцию 01.06.2011

О.К. Чередніченко, М.Р. Ткач. До виборів параметрів проміжного теплоносія регенеративного газотурбінного двигуна

Наведені результати дослідження характеристик газотурбінної установки, яка обладнана теплообмінником-регенератором з проміжним рідкометалевим теплоносієм. Запропоновано вибирати відносний температурний напір з діапазону 0,35...0,5 для забезпечення заданих сталих значень коефіцієнтів відновлення повного тиску в теплообмінниках за умови мінімізації габаритів теплообмінників. Доведено те, що варіювання відносного температурного напору в цьому діапазоні дозволяє змінювати співвідношення площ теплообмінників в діапазоні 1,0 ... 3,0 при практично постійній сумарній площі.

Ключові слова: газотурбінний двигун, регенерація тепла, проміжний теплоносій, теплообмінник, коефіцієнт теплопередачі, температурний напір.

A.K.Cherednichenko, M.R.Tkach. To the choice of the parameters of intermediate heat – carrier of regenerative gas turbine engine

Shown the results of the research of the descriptions of the gas-turbine unit, equipped by heat-exchanger regenerator with intermediate liquid-metal heat – carrier. It is suggested to choose relative temperature pressure from a range of 0,35...0,5 for providing of set permanent values of coefficients of renewal of complete pressure in heat-exchangers on condition of minimization of sizes of heat-exchangers. It is shown that varying of relative temperature pressure in this range allows to change the relation of areas of heat-exchangers in a range 1,0.3,0 at a practically permanent total area.

Key words: gas turbine engine, regeneration of heat, intermediate heat – carrier, heat-exchanger, coefficient of heat transfer, temperature pressure.