

МОБИЛЬНЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Oleksandr Cherednichenko

National University of Shipbuilding, Ukraine

Mira av. 48, ap. 135, Mykolayiv 54056, Ukraine
e-mail: oleksandr.cherednichenko@nuos.edu.ua

Аннотация. В работе рассмотрены газотурбинные установки сложных циклов без пароводяных утилизационных контуров. Показано, что применение теплообменных аппаратов с промежуточным теплоносителем в составе газотурбинных установок сложных циклов обеспечивает существенное уменьшение габаритов мобильных энергетических комплексов.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, регенерация тепла, промежуточный теплоноситель, теплообменник.

ВСТУПЛЕНИЕ

К современным энергетическим установкам различного назначения предъявляются жесткие требования по энергетической эффективности и минимизации экологического воздействия на окружающую среду.

Газотурбинные технологии позволяют создать мобильный энергокомплекс для выработки всех необходимых видов энергии. Использование газотурбинных установок (ГТУ), работающей как на традиционных, так и на альтернативных топливах (отходы термопластических полимеров, этанола, метанола, диметилового эфира и др.) позволяет обеспечить допустимые экологические показатели [Ткач М.Р., 2004; Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р., 2011]. Применение в качестве топлива биогаза, получаемого из возобновляемого сырья путем переработки методами ферментации бытовых отходов, отходов птице- и животноводства, сточных вод позволяет существенно снизить применение ископаемых органических топлив и выбросы углекислого газа [Моисеев И.М., Платэ Н.Э., Варфоломеев С.Д., 2006; Яновский Л.С. и др., 2009].

Применение газотурбинных двигателей (ГТД) сдерживается сравнительно высоким удельным расходом топлива [Когоритсын М.А., 1998; Горбов В.М., Чередниченко А.К., 2008]. Такие резервы повышения эффективности ГТД как увеличение температуры газа перед турбиной и уменьшение потерь в узлах установки практически исчерпали свой потенциал. Достичь соответствующих современным требованиям показателей топливной эффективности возможно за счет усложнения газотурбинных циклов, путем применения бинарных, контактных, когенерационных технологий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Для приводных газотурбинных двигателей энергокомплексов мобильных объектов предъявляются более жесткие требования к показателям надежности, массам и габаритам установки, чем для двигателей стационарных энергетических установок. Это влечет за собой ограничение по температуре газа перед турбиной и, соответственно, снижение КПД двигателя.

Повышение топливной эффективности газотурбинных энергокомплексов может быть достигнуто путем утилизации теплоты отработавших газов. Бинарные и контактные газотурбинные установки хорошо зарекомендовали себя в стационарной энергетике, но требуют дополнительного оборудования для подготовки и обслуживания пароводяного контура. Для цикла STIG (Steam Injection Gas turbine) с подачей пара непосредственно в камеру сгорания ГТД характерна полная потеря цикловой воды. В газопаротурбинных установках типа "Водолей", разработки "Зоря"–"Машпроект", предусмотрен возврат воды в цикл (при температуре охлаждающей воды выше 20...22°C потребуется дополнительная подпитка цикла водой в объеме 5...7% от паропроизводительности котла-утилизатора) [Исаков Б.В., Чобенко В.Н., Палиенко Р.В., 2008]. Масса и габариты установки "Водолей", по сравнению с установкой простого цикла, значительно возрастают. Это сдерживает возможности применения таких установок на мобильных объектах.

В практике проектирования газотурбинных установок сложных циклов широкое распространение получили регенеративные схемы [Horlock H.J., 2003; Коваль В.А., Тарелин А.А., 2008].

Регенеративный ГТД при умеренных температурах газа перед турбиной $T_3 = 1300...1400$ К и степени повышения давления $\pi_k = 6...10$ может обеспечивать КПД не менее 40...41%, а при более высоких значениях T_3 и до 45% [Романов В.В. и др, 2009].

Традиционная конструктивная компоновка регенеративного ГТД предусматривает введения в схему теплообменника-регенератора «котельного» типа, размещенного в выхлопном тракте. Применение такого регенератора влечет за собой усложнение конфигурации газозвдушного тракта и нарушение равномерности потока, вызывающие значительный рост потерь полного давления и тепла, утечки рабочих сред. Сложность решения вопросов прочности вследствие больших температурных напряжений сдерживает применение компактных регенераторов пластинчатого типа. Для теплообменников трубчатого типа проблемы прочности не стоят так остро, но они не обладают достаточной компактностью. Реализация поперечного обтекания и эффективного обребрения поверхностей в них затруднена.

Одним из путей минимизации габаритов теплообменников и снижения потерь полного давления может быть применение регенератора ГТД с промежуточным теплоносителем (ПТН) – комплекса из двух теплообменников трубчатого типа (рис. 1), передача энергии между которыми осуществляется ПТН [Грязнов Н. Д. и др, 1985].

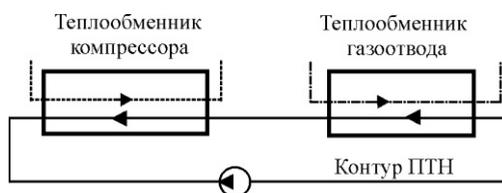


Рис. 1. Схема теплообменного аппарата регенеративной ГТУ с переносом тепла промежуточным теплоносителем между теплообменником газоотвода и теплообменником компрессора

Fig. 1. Scheme of the regenerative heat exchanger gas turbine with heat transfer between the intermediate heat carrier preheater flue gas heat exchanger and compressor

Перенос тепла может осуществляться промежуточным "тяжелым" жидкометаллическим теплоносителем. Усложнение схемы и использование такого теплоносителя представляет определенную проблему, но позволяет уменьшить габариты теплообменных поверхностей за счет существенного улучшения процессов теплопередачи и снизить потери в газозвдушном

тракте. Высокий коэффициент теплопроводности теплоносителей класса Pb-Bi, Pb и др. позволяет обеспечить достаточно малую величину площади проходных сечений каналов. Технологии использования "тяжелого" жидкометаллического теплоносителя, решение проблем сохранения чистоты теплоносителя, предотвращения коррозии и эрозии материалов поверхностей теплообменных аппаратов успешно отработаны на опытных, а затем и серийных транспортных реакторных установках в 60-90 г. прошлого века [Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Иванов К.Д., 2003; Безносов А.В. Драгунов Ю.Г., Рачков В.И., 2007].

Конструктивно регенеративная газотурбинная установка может быть выполнена с теплообменником газоотвода (ТГО), размещенным на выхлопе ГТД и теплообменником компрессора (ТКО) с переносом тепла промежуточным "тяжелым" жидкометаллическим теплоносителем (рис.3).

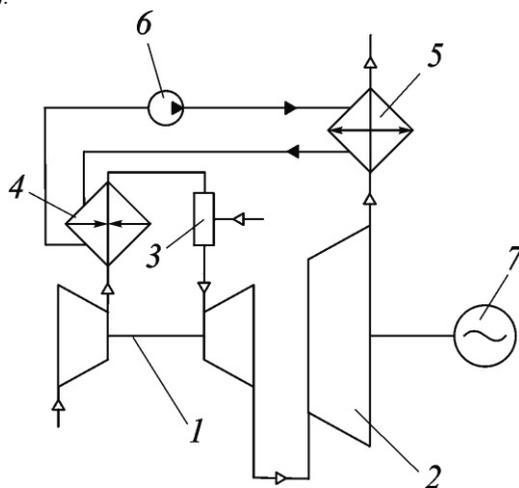


Рис. 2. Схема регенеративной ГТУ с ПТН:

1 – турбокомпрессорный блок; 2 – силовая турбина; 3 – камера сгорания; 4 – ТКО; 5 – ТГО; 6 – циркуляционный насос ПТН; 7 – генератор

Fig. 2. The scheme of regenerative gas turbine with a CVC:

1 - turbocompressor unit, 2 - power turbine, 3 - combustion chamber, 4 - TCO, 5 - TGO, 6 - pump FLA 7 – Generator

Прокачка промежуточного теплоносителя осуществляется последовательно через каждый теплообменник отдельными циркуляционными насосами. Разработана модульная схема регенератора с вертикальным исполнением двухсекционного теплообменника газоотвода и двухсекционной конструкцией теплообменника компрессора с размещением ТКО "вокруг ГТД" [Чердниченко А.К., Ткач М.Р., 2011].

Для мобильных объектов энергоснабжения целесообразно блочно-модульное исполнение энергокомплекса. В этом случае оценка габаритных показателей установки возможна по критерию энергонасыщенности модуля по объему [Ткач М.Р., Чердниченко А.К., Ващиленко Н.В., 2010]. Данный критерий представляет собой отношение мощности на выходном валу двигателя к объему энергомодуля, k_v (кВт/м³). Согласно проведенным конструктивным проработкам для регенеративного ГТД с промежуточным теплоносителем (степень регенерации 0,85, мощность 16 МВт) энергонасыщенность сопоставима с характеристиками среднеоборотных дизельных двигателей такой же мощности (например, для двигателей 8L64 и 16V46 фирмы Wärtsilä).

Таблица 1. Энергонасыщенность энергомодуля по объему для разных типов установок

Table 1. Power-volume characteristics of mobile power plants'

Тип энергоустановки	Энергонасыщенность модуля по объему, $k_V, кВт/м^3$.
Транспортный ГТД простого цикла	300
Регенеративная ГТУ с регенератором «котельного» типа	5
Регенеративная ГТУ с жидкометаллическим промежуточным теплоносителем	45
Энергоустановка на базе среднеоборотного ДВС	49

Одним из путей повышения эффективности ГТУ сложного цикла может быть термохимическая регенерация тепла отходящих газов ГТД путем конверсии топлива в смесь газов с более высокой теплотворной способностью [Носач В.Г., 1989; Kesser K.F., Hoffman M.A., Vaughn J.W., 1994]. Принципиально возможна совместная термодинамическая и термохимическая регенерация тепла [Ткач М.Р., Чередниченко А.К., 2009; Чередниченко А.К., 2010]. Для таких установок схема с промежуточным теплоносителем дает возможность разместить термохимический реактор вне газоразводного тракта ГТД.

Одним из современных направлений повышения эффективности газотурбинных энергетических комплексов различного назначения является применение воздушной теплоутилизующей турбинной установки (ВТТУ) [Кучеренко О.С и др., 2008]. Несмотря на меньший КПД такой утилизации в сравнении с паро- и водяными теплоутилизующими комплексами, схемы с ВТТУ позволяют снизить интенсивность тепловых выбросов – до 2,1...1,6 % при температуре выбросов 490...505 К, интенсивность вредных выбросов – на 10...13 % [Шевцов А.П., 2008]. Резервом повышения эффективности установки может быть снижение потерь полного давления в нагревателе-утилизаторе, что достигается применением теплообменника с контуром промежуточного теплоносителя (рис. 3).

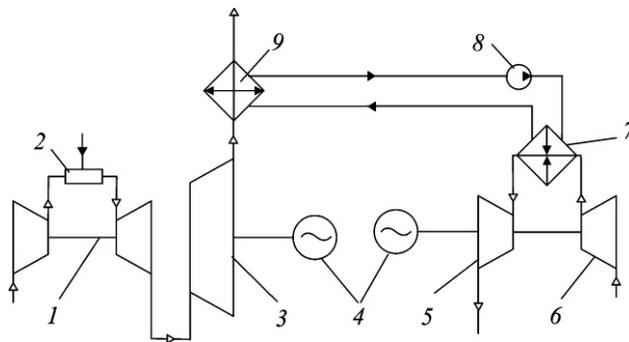


Рис. 3. Схема ГТУ с ВТТУ и нагревателем-утилизатором с ПТН:

1 – турбокомпрессорный блок; 2 – камера сгорания; 3 – силовая турбина; 4 – генератор; 5 – турбина ВТТУ; 6 – компрессор ВТТУ; 7 – нагреватель воздуха; 8 – циркуляционный насос ПТН; 9 – теплообменник газоотвода

Fig. 3. The scheme of GTP VTTU and waste-heat from the heater FLA:

1 - turbocompressor unit 2 - combustion chamber, 3 - power turbine, 4 - generator 5 - VTTU turbine, 6 - Compressor VTTU 7 - air heater, 8 - FLA pump, 9 - heat exchanger flue gas

Применение жидкометаллического промежуточного теплоносителя позволяет реализовать модульную схему нагревателя-утилизатора и обеспечить компоновку воздушной теплоутилизующей турбинной установки по прямоточной схеме.

ВЫВОДЫ

Применение в газотурбинных установках сложных циклов с термодинамической и термохимической регенерацией тепла, а также с воздушным теплоутилизующим турбинным контуром жидкометаллического промежуточного теплоносителя позволяет применять надежные и высококурсовые теплообменники трубчатого типа. При этом существенно уменьшаются габариты мобильного энергокомплекса.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ткач М.Р. 2004: Моделирование влияния условий эксплуатации на эффективность газотурбинных энергетических установок специализированных судов, Вестник двигателестроения, № 2, С. 13–17.
2. Тимошевский Б.Г., Ткач М.Р. 2011: Моторные топлива из полимерного сырья: производство и применение, К., С. 290.
3. Моисеев И.М., Платэ Н.Э., Варфоломеев С.Д. 2006: Альтернативные источники органических топлив, Вестник РАН, № 5, С. 427-437.
4. Яновский Л.С и др. 2009: Гибридные газотурбинные установки на топливах биологического происхождения, Восточно-европейский журнал передовых технологий, № 4 (40), С. 40-47.
5. Korobitsyn M.A. 1998: New and Advanced Energy Conversion Technologies. Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles, Printed by Febodruk BV, Enschede, 155 p.
6. Горбов В.М., А.К. Чередниченко А.К. 2008: Анализ и перспективы использования отечественных газотурбинных двигателей в судовой энергетике. Авиационно-космическая техника и технология, № 7(54), с. 103-107
7. Исаков Б.В., Чобенко В.Н., Палиенко Р.В. 2008: Состояние и перспективы развития корабельной газотурбинной энергетики, Вісник СевДТУ, Збірник наукових праць, Вип. 87, С. 56–61.
8. Horlock H.J. Advanced gas turbine cycles 2003: Elsevier Inc., 203 p.
9. Коваль В.А., Тарелин А.А. 2008: О выборе термодинамической схемы газотурбинной установки промышленного назначения, Вестник Национального технического университета «ХПИ», Харьков, 2008, №35, С.72 - 77.
10. Н. Д. Грязнов и др. 1985: Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок, М.: Машиностроение, С.360.
11. Романов В.В. и др. 2009: Особенности создания газотурбинной установки регенеративного цикла для ГПА, Восточно-европейский журнал передовых технологий, № 4 (40), С. 16-19.
12. Безносков А.В., Драгунов Ю.Г., Рачков В.И. 2007: Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике, М.: ИздАт, С. 434.
13. Орлов Ю.И., Мартынов П.Н., Иванов К.Д. 2003: Технология свинцово-висмутového теплоносителя на ЯЭУ первого и второго поколения. Доклад на конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», Обнинск.
14. Чередниченко А.К., Ткач М.Р. 2011: К выбору параметров промежуточного теплоносителя регенеративного газотурбинного цикла, Вестник двигателестроения, № 2, С. 101–105.
15. Ткач М.Р., Чередниченко А.К., Ващенко Н.В. 2010: Повышение эффективности мобильных газотурбинных установок сложных циклов применением промежуточного теплоносителя. Авиационно-космическая техника и технология, № 7 (74), С. 41–44.
16. Носач В.Г. 1989: Энергия топлива, К.: Наук. думка, С 148.

17. Kesser K.F., Hoffman M.A., Baughn J.W., 1994: Analysis of a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine Power Plant, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 116, pp. 277–284.
18. Ткач М.Р., Чередниченко А.К. 2009: Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 7 (64), С. 19–22.
19. Чередниченко А.К. 2010. Об эффективности термохимической регенерации тепла в газотурбинных установках мобильных энергокомплексов, *Электронне видання, Вісник НУК*, № 1, С. 109–113.
20. Кучеренко О.С и др. 2008: Перспективы создания и применения воздушных турбинных теплоутилизирующих установок, *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*, Харьков, №35, С.89 – 96.
21. Шевцов А.П. 2008: Энергосбережение и экологическая безопасность газотурбинных двигателей с воздушными турбинными теплоутилизирующими установками, *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*, № 6, С.104 – 110.

MOBIL GAS TURBINE POWER PLANT WITH INTERMEDIATE HEAT CARRIER

Summary. The complex gas turbine power plants without water-steam recycling have been considered. It has been proved that the use of the heat-exchanger with intermediate coolant in the complex circle gas turbine provides a significant reduction of mobile power plants' mass-volume characteristics.

Key words: gas turbine engine, regeneration of heat, intermediate heat carrier, heat-exchanger.

Reviewer: Boris Timoshevskiy, Prof. Sc. D. Eng.