

УДК 629.12.03
Ч-46

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ

А. К. Чередниченко, доц., канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Рассмотрены схемы современных мобильных энергетических комплексов на примере судов с электродвижением. Проанализированы условия применения в составе таких комплексов газотурбинных установок с совместной термодинамической и термохимической регенерацией.

Ключевые слова: энергетический комплекс, газотурбинная установка, регенерация тепла, конверсия топлива.

Анотация. Розглянуто схеми сучасних мобільних енергетичних комплексів на прикладі суден з електрорухом. Проаналізовані умови використання в складі таких комплексів газотурбінних установок з загальною термодинамічною та термохімічною регенерацією.

Ключові слова: енергетичний комплекс, газотурбінна установка, регенерація тепла, конверсія палива.

Abstract. Scheme for modern ship power gas turbine plants is considered. The feasibility of applying to such ships gas turbines plants together with thermodynamic and thermochemical regeneration.

Keywords: energetic system, gas-turbines, heat regeneration, fuel conversion.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современные тенденции развития энергетических комплексов ряда мобильных объектов, в том числе энергетических установок высокотехнологичных судов, связаны с реализацией схемы единой электроэнергетической установки, что позволяет обеспечить выработку электроэнергии для пропульсивного или технологического комплекса и общесудовых потребителей в одних агрегатах. Анализ состава энергетических установок специализированных судов FPSO, плавучих электростанций, морских буровых платформ показывает, что более 50 % таких комплексов созданы на базе газотурбинных установок (ГТУ). Достаточно широкое распространение ГТУ получили и на пассажирских судах.

На 1 июля 2009 года количество пассажирских судов (включая круизные лайнеры и паромы) составляло более 6800 единиц (рис. 1 [5]).

Портфель заказов с 2008 по 2012 год включает в себя 40 круизных лайнеров водоизмещением свыше 65 тыс. т. Мощность ЭУ таких судов может превышать 100 МВт. В настоящее время в составе энергетических установок семнадцати круизных лайнеров 26 ГТД.

Для новых судов характерен рост водоизмещения и скорости хода и, как следствие, мощности энергетической установки (ЭУ). Выбор типа и состава ЭУ представляет собой сложную задачу. Энергетическая установка должна обеспечивать необходимые показатели надежности и живучести при

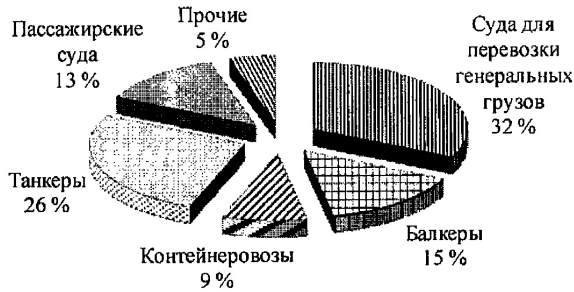


Рис. 1. Состав мирового флота* на 1.09.2009

*В состав мирового флота входит свыше 50 тысяч судов.

высокой энергоэффективности и умеренных массогабаритах. Обязательным является выполнение требований Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78, которое предусматривает контроль удельной эмиссии оксидов азота NO_x и содержания оксидов серы (SO_2 и SO_3) в отходящих газах судовых тепловых двигателей и котлов. В зонах прибрежного мореплавания, заливах, внутренних морях эти требования контролируются очень жестко, в таких зонах действуют и региональные нормы борьбы с загрязнением атмосферы.

Для круизного лайнера водоизмещением в 80 тыс. т потребности пропульсивного комплекса составляют около 40 МВт на полном ходу, при стоянке с пассажирами на

борту требуется 7...9 МВт электроэнергии. Потребности в паре — до 30 т/ч (без учета работы опреснительных установок) [4]. Большие потребности в электроэнергии для общесудовых нужд, а также необходимость резервирования мощности для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации судна приводят к значительной избыточности суммарной мощности установки по отношению к пропульсивной мощности.

Как следует из приведенных данных, суммарная мощность приводных двигателей единой электроэнергетической установки круизного лайнера на 30 % (и более) превышает мощность гребных электродвигателей (рис. 2).

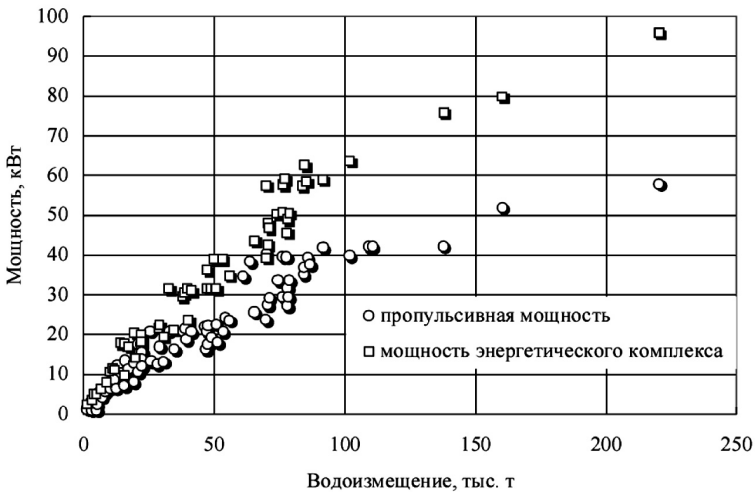


Рис. 2. Распределение мощности энергетических комплексов круизных лайнеров*

*По материалам Marine Propulsion Conference — Amsterdam, 2000, с добавлением современных данных.

Анализ критериев выбора типа и состава судовой энергетической установки круизного лайнера позволяет определить их приоритетность [2]. К приоритетам первого уровня относятся критерии обеспечения эксплуатационной работоспособности ЭУ в условиях воздействия внешних и внутренних источников (показатели надежности и живучести). Приоритеты второго уровня – это показатели экономической эффективности ЭУ, экологические и виброакустические. В зависимости от особенностей проектируемого судна предпочтение может быть отдано тому или иному типу установки. Актуально рассмотрение новых схемных решений, применительно к ЭУ круизных лайнеров.

ЦЕЛЮЮ РАБОТЫ является анализ условий применения газотурбинных установок с совместной термодинамической и термохимической регенерацией тепла отходящих газов в составе энергетических комплексов.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

На круизных лайнерах современной постройки получили применение следующие типы ЭУ.

Дизель-электрическая установка. В состав установки входят 4–8 дизель-генераторов (ДГ). Основные потребители электроэнергии – 2–4 гребных электродвигателя мощностью до 25 МВт, 3–6 подруливающих устройств (1...3 МВт), общесудовые потребители. Для выработки тепловой энергии используются вспомогательные и утилизационные парогенераторы, вырабатывающие насыщенный пар давлением 0,7...0,9 МПа.

Анализ показывает, что во всем диапазоне скоростей эксплуатации лайнера наилучшие показатели по удельному расходу топлива у дизель-электрических установок, работающих на тяжелом топливе. Такие установки имеют наихудшие массогабаритные показатели (помещения, в которых размещено оборудование такой установки, могут занимать до 18 % общего объема судна) [6].

Комбинированная дизель-газотурбоэлектрическая установка CODLAG (COmbined Diesel-eLectric And Gas). В состав энергетического комплекса входят 2–5 ДГ и 1–2 ГТГ. Установки могут быть как с форсажными (бустерными), так и с маршевыми (основными) ГТГ*.

Применение комбинированных установок CODLAG целесообразно при скорости перехода судна 23...25 уз, а в остальных режимах эксплуатации – 17...18 уз.

Для выполнения требований Конвенции МАРПОЛ 73/78 в установках с дизельными двигателями используются различные технологии очистки газов, такие, как EGR (рециркуляция выпускных газов), FWE (применение водотопливных эмульсий), DWI (прямой впрыск воды в камеру сгорания), HAM (увлажнение наддувочного воздуха), SCR (применение селективной каталитической очистки). Это приводит к усложнению цикла, удорожанию установки, увеличению габаритов, уменьшению потенциала утилизируемых выпускных газов.

Комбинированная газопаротурбинная установка с электродвижением COGES (COmbined Gas turbine and steam turbine integrated Electric drive System). Энергетические комплексы такой схемы реализованы на восьми круизных лайнерах и состоят из двух ГТД с теплоутилизирующими контурами, утилизационного паротурбогенератора и стояночного ДГ.

Машинное отделение установки COGES занимает около 7 % общего объема, но такая установка имеет самый высокий удельный расход топлива.

Схема COGEN предусматривает использование главных ГТГ для пропульсивного комплекса и выработки электроэнергии для общесудовых нужд, теплоутилизирующих контуров ГТД для выработки тепловой энергии (в виде насыщенного пара) на ходовых режимах. В состав энергокомплекса входит стояночный ДГ.

Применение главных газотурбинных двигателей в составе установок CODLAG,

*Не реализована на существующих и вновь строящихся круизных лайнерах.

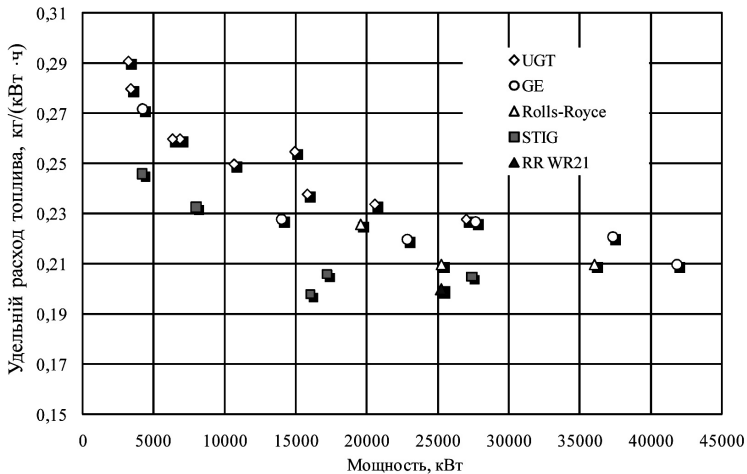


Рис. 3. Зависимость удельного расхода топлива от мощности для современных ГТД морского исполнения

COGES, COGEN позволяет повысить показатели надежности и живучести энергетической установки круизного лайнера. Газотурбинный двигатель обеспечивает высокую готовность к пуску и приему нагрузки (120...180 с), возможность длительной устойчивой работы на режиме 100 % нагрузки, возможность агрегатной замены главного двигателя. Эмиссия ГТУ по оксидам азота составляет обычно треть от выбросов ДВС, а по CO не более 15 %. При этом малые массогабариты ГТД позволяют равномерно распределять массу оборудования на верхних палубах и активно применять нагрузочное резервирование, которое предполагает использование избыточных производственных возможностей объектов по выполнению функций в условиях перегрузок при отказе других объектов.

Наибольшее распространение получили ГТД LM 2500 и LM 2500+ фирмы «GE Marine». В связи с ростом мощности ЭУ круизных лайнеров эта фирма разработала модель LM2500+G4 мощностью 35 МВт. Отечественное предприятие НПКГ «Зоря»–«Машпроект» серийно выпускает газотурбинные двигатели морского применения (UGT) в диапазоне мощностей от 2,5 до 27

МВт. Типоразмерный ряд двигателей фирмы «Rolls-Royce» включает в себя наряду с аналогичной по мощности LM2500+G4 модель MT30 и ГТД сложного цикла (с промежуточным охлаждением и регенерацией) WR21*. Другим вариантом повышения тепловой эффективности является применение цикла STIG (Steam Injection Gas turbine) с подачей пара непосредственно в камеру сгорания ГТД (рис. 3).

Для цикла STIG характерна полная потеря цикловой воды. В газопаротурбинных установках типа «Водолей» («Зоря»–«Машпроект») предусмотрен возврат воды в цикл (при температуре охлаждающей воды выше 20...22 °C потребуются дополнительная подпитка цикла водой в объеме 5...7 % от паропроизводительности котла-утилизатора) [1]. Массогабариты установки, по сравнению с установкой простого цикла, значительно возрастают.

Применение в составе установок COD-LAG и COGEN газотурбинных двигателей сложного цикла позволяет достичь уменьшения расхода топлива на 15...20 %.

Одним из путей повышения эффективности тепловых двигателей является термохимическая регенерация тепла, которая пред-

*С 1997 г. единственный проект, предусматривающий применение WR21, — эсминцы «Туре 45» (серия из 6 ед.) Королевского Флота Великобритании.

усматривает утилизацию тепла отходящих газов ГТД в процессе конверсии топлива в смесь газов с более высокой теплотворной способностью [3]. В качестве топлива в таких установках могут использоваться как традиционные углеводородные, так и альтернативные (отходы термопластических полимеров, этанол, метанол, диметилвый эфир и др.).

Разработана схема газотурбинной установки с термохимической регенерацией теплоты совместно с термодинамической рекуперацией [4]. Возможны два варианта осуществления такой схемы — установленные последовательно за газотурбинным двигателем (ГТД) регенератор (Р) и термохимический реактор (ТХР) и схема ГТД–ТХР–Р (рис. 4).

Для оценки характеристик такой установки наряду со степенью регенерации вводится понятие коэффициента увеличения теплоты сгорания топлива

$$\bar{H}_U = \frac{H_U^k - H_U^b}{H_U^b},$$

где H_U^b и H_U^k — низшие располагаемые теплотворные способности базового и конвертированного топлива соответственно.

Анализ эффективности ГТУ с совместной термодинамической и термохимической регенерацией, выполненной по схеме ГТД–Р–ТХР применительно к базовому ГТД мощностью 16 МВт отечественного производства (степень регенерации 0,85,

коэффициент увеличения теплоты сгорания топлива 0,2), показывает, что удельный расход топлива в такой установке может быть уменьшен на 25...30 % по сравнению с ГТД сложного цикла, с термодинамической рекуперацией тепла. Но при температуре за камерой сгорания $T_3 = 1300$ и 1500 К допустимая температура реакции конверсии топлива не превысит $T_p = 530$ и 580 К соответственно. Такие значения температур существенно ограничивают выбор топлива, которое может быть использовано в рассматриваемой установке.

Для схемы ГТД–ТХР–Р допустимая температура реакции конверсии топлива существенно выше и составляет около 850 К при $T_3 = 1300$ К, увеличиваясь до $980...1000$ К при $T_3 = 1500$ К. При этом удельный расход топлива для такой установки выше, чем для схемы ГТД–Р–ТХР, на 10...12 %.

Применение совместной термодинамической и термохимической регенерации снижает возможности дальнейшей утилизации тепла отходящих газов по сравнению с ГТД простого цикла.

Газотурбинные установки такого типа могут использоваться в составе энергетических установок CODLAG и COGEN, применение их в составе установок COGES проблематично из-за низкого потенциала отходящих газов T_4 (рис. 5).

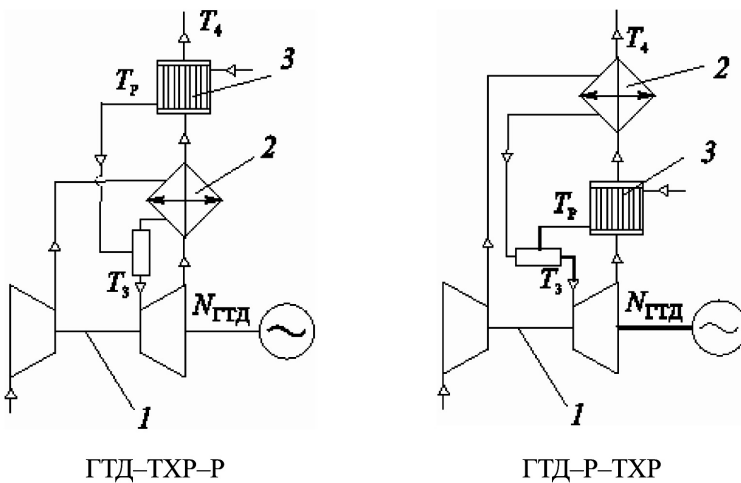


Рис. 4. Схема газотурбинной установки с комплексной регенерацией теплоты: 1 — газотурбинный двигатель; 2 — регенератор; 3 — термохимический реактор

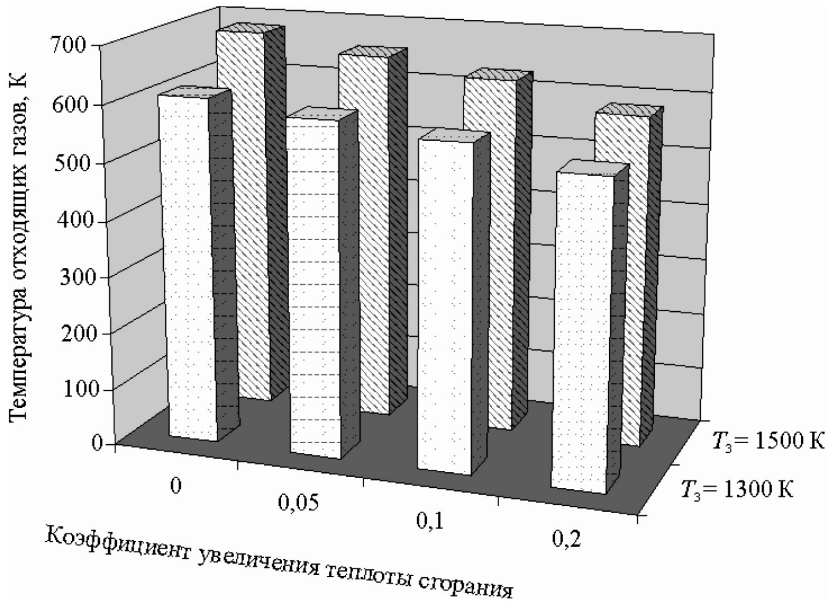


Рис. 5. Зависимость температуры отходящих газов ГТУ от коэффициента увеличения теплоты сгорания для схемы ГТД–Р–ТХ

ВЫВОДЫ

1. Применение в составе мобильных энергетических комплексов газотурбинных установок с совместной термодинамической и термохимической регенерацией теплоты позволяет существенно (на 20...30 %) сни-

зить удельный расход топлива. 2. Реализация этого потенциала совершенствования энергетических установок требует выявления закономерностей процессов термохимической регенерации тепла применительно к газотурбинным установкам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Исаков Б.В., Чобенко В.Н., Палиенко Р.В.* Состояние и перспективы развития корабельной газотурбинной энергетики // *Вісник СевДТУ. Механіка, енергетика, екологія: Зб. наук. праць.* — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2008. — Вип. 87. — С. 56–61.
- [2] *Горбов В.М., Чердниченко А.К.* Анализ структурных схем энергетических установок круизных лайнеров // *Вісник СевДТУ. Механіка, енергетика, екологія: Зб. наук. праць.* — Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009. — Вип. 97. — С. 38–42.
- [3] *Носач В.Г.* Энергия топлива / Отв. ред. А.Е. Еринов. — К.: Наук. думка, 1989. — 148 с.
- [4] *Ткач М.Р., Чердниченко А.К.* Эффективность газотурбинной установки с термодинамической и термохимической регенерацией теплоты отходящих газов // *Авиационно-космическая техника и технология.* — 2009. — № 7 (64). — С. 19–22.
- [5] Combined diesel and gas turbine: the alternative power plant option // *The future of ship design. Part 2 / Published for Deltamarin Ltd by The Royal Institute of Naval Architects.* — June 2001. — P. 11–19.
- [6] *Kenneth Jofs.* Gas Turbine Technology for Advanced Cruise Ships // *Business briefing: Global cruise.* — 2004. — P. 35–38.