

## Газотурбинные двигатели сложного цикла для установок транспортировки нефти и газа

**Матвеев В.Т., Очеретяный В.А., Андриец А.Г.**

*Севастопольский национальный технический университет*

Представлены результаты исследований и разработок когенерационных газотурбинных двигателей (ГТД) с турбокомпрессорным утилизатором (ТКУ) и регенерацией теплоты. Показано, что ГТД с ТКУ и регенерацией теплоты более экономичны, чем ГТД простого цикла и могут быть применены в газоперекачивающих агрегатах и судовом пропульсивном комплексе. Совершенствование тепловых и конструктивных схем, изменение рабочего процесса ГТД позволяет создать когенерационные установки с управляемыми потоками энергии.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, газогенератор, промежуточное охлаждение воздуха, турбина перерасширения, регенерация теплоты.

Наведено результати досліджень та розробок когенераційних газотурбінних двигунів (ГТД) з турбокомпресорним утилізатором (ТКУ) та регенерацією теплоти. Показано, що ГТД з ТКУ та регенерацією теплоти більш економічні, ніж ГТД простого циклу, та можуть бути використані у газоперекачуючих агрегатах та судовому пропульсивному комплексі. Удосконалення теплових та конструктивних схем, зміни робочого процесу ГТД дозволяють розробити когенераційні установки з керованими потоками енергії.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, газогенератор, проміжне охолодження повітря, турбіна перерозширення, регенерація теплоти.

Газотурбинные двигатели (ГТД) нашли широкое применение в составе газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов, а также в составе судовых пропульсивных комплексов.

Газотурбинный парк газотранспортных систем требует систематического обновления вследствие физического и морального старения ГПА. Задача в основном решается за счет ГТД простого цикла, созданных на базе корабельных и авиационных двигателей, что обеспечивает поддержание необходимых объемов транспорта газа. Однако, с увеличением цен на природный газ обостряется проблема снижения затрат на транспортировку газа, что требует разработки нового высокоэкономичного оборудования.

В Украине введен в эксплуатацию морской нефтеперевалочный комплекс «Південний», который позволит функционировать Евро-Азиатскому нефтетранспортному коридору (ЕАНТК). Функционирование ЕАНТК предусматривает доставку нефти в порт «Южный» морским путем, то есть необходимость наличия нефтеналивных судов. Эту морскую транспортную операцию Украина может осуществить самостоятельно, если будет создан танкерный флот.

Судостроительная отрасль Украины способна создать такой флот, но комплектацию

оборудования судового пропульсивного (СПК) танкера вынуждена производить в основном за счет экспортных поставок. Традиционно применяемые в качестве главных двигателей мало- и среднеоборотные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) в стране не производятся. При этом Украина располагает мощным промышленным потенциалом энергетического машиностроения, в частности, газотурбостроения.

Осуществить решение поставленных задач позволяет ГТД сложного цикла совместно с глубокой утилизацией теплоты выхлопных газов [1]. Высокую энергетическую эффективность ГТД достигает за счет применения силовой турбины перерасширения (СТП) в сочетании с регенерацией (Р) теплоты.

### Приводной ГТД сложного цикла для ГПА

На рис.1 изображена схема ГТД с СТП и Р теплоты. Силовая турбина сблокирована с турбиной перерасширения (ТП), в которой газ, расширяясь до давления ниже атмосферного, производит дополнительную работу, охлаждается сначала в регенераторе, затем в охладителе газа и дожимающим компрессором выбрасывается в атмосферу.

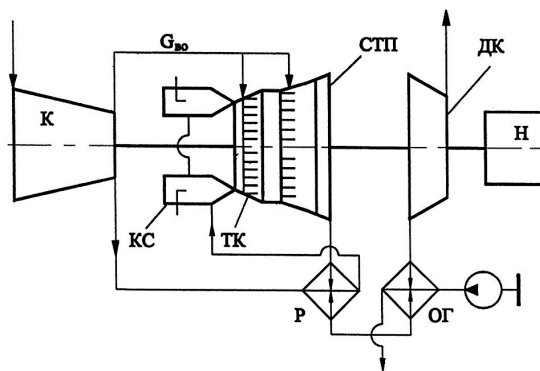


Рис.1. Схема ГТД с СТП и регенерацией теплоты: К — компрессор; КС — камера сгорания; ТК — турбина компрессора; Р — регенератор; ОГ — охладитель газа; Н — нагрузка; ДК — дожимающий компрессор; СТП — силовая турбина перерасширения.

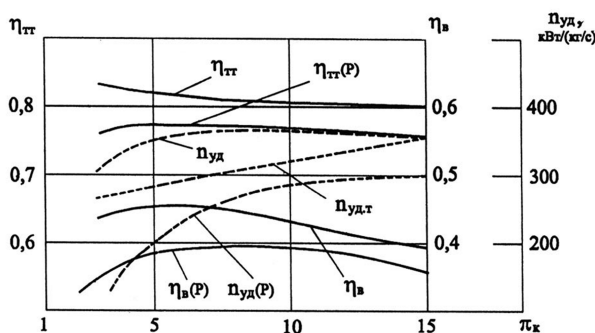


Рис.2. Зависимости КПД теплотехнического  $\eta_{ТТ}$  и внутреннего  $\eta_{в}$  соответственно удельных мощностей  $\eta_{уд,Т}$  и  $\eta_{уд,в}$  для ГТД с СТП и Р от изменения  $\pi_{к}$  при  $\sigma = 0,80$ ,  $\pi_{ДК} = 2,25$  и  $T_3 = 1473$  К.

На рис.2 представлены характеристики цикла ГТД с СТП и Р теплоты, приведенные в зависимости от степени повышения давления в компрессоре  $\pi_{к}$  двигателя при степени регенерации  $\sigma = 0,8$  и начальной температуре газа  $T_3 = 1473$  К. Степень повышения давления  $\pi_{ДК}$  принята равной 2,25 как наиболее оптимальная для приведенных параметров цикла [1]. На этом же рисунке для сравнения приведены зависимости характеристик цикла для ГТД простого цикла с регенерацией теплоты.

При степени повышения давления  $\pi_{к} = 4-6$  внутренний КПД ГТД с СТП и Р достигает значений  $\eta_{в} = 44-46$  %. Оптимальное значение  $\pi_{к} = 5$  позволяет применить однокаскадный компрессор, унифицированный с компрессором низкого давления корабельного ГТД.

Удельная мощность  $\eta_{уд}$  ГТД с СТП и Р при оптималь-

ных значениях  $\pi_{к}$  в 1,5–1,75 раз больше, чем в ГТД с Р, что положительно влияет на массогабаритные характеристики ГТД, включающие в себя теплообменные аппараты.

Научные и прикладные разработки, выполненные в Севастопольском национальном техническом университете (СевНТУ) по новому направлению газотурбинной техники, позволили ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект» (г. Николаев) и СевНТУ разработать проект (техпредложение) на создание ГТД мощностью 10 МВт с силовой турбиной перерасширения и регенерацией теплоты для газоперекачивающего агрегата, эффективный КПД которого составил 43,2 % [2].

ГТД с СТП и регенерацией теплоты мощностью 10 МВт условно разделяется на газогенератор, силовой турбокомпрессорный агрегат (силовая турбина заблокирована с ТП) и блок теплообменников (регенератор и газоохладитель). На рис.3 показана кольцевая компоновка ГТД с СТП и Р, которая оказалась универсальной для применения в составе газоперекачивающего агрегата и судового пропульсивного комплекса нефтеналивных судов.

### Когенерационный ГТД сложного цикла для СПК

На рис.1 турбина перерасширения совместно с дожимающим компрессором и теплообменниками между ними образуют газотурбокомпрессорный утилизатор (ТКУ).

ГТД с ТКУ и Р образует установку когенерационного типа, так как способен генерировать тепловую энергию, по мощности сопоставимую с эффективной мощностью двигателя. Для оценки характеристик ГТУ, имеющих в своем составе устройство для генерации тепловой энергии, применяют удельный показатель — теплотехнический (общий) КПД ( $\eta_{ТТ}$ ), кото-

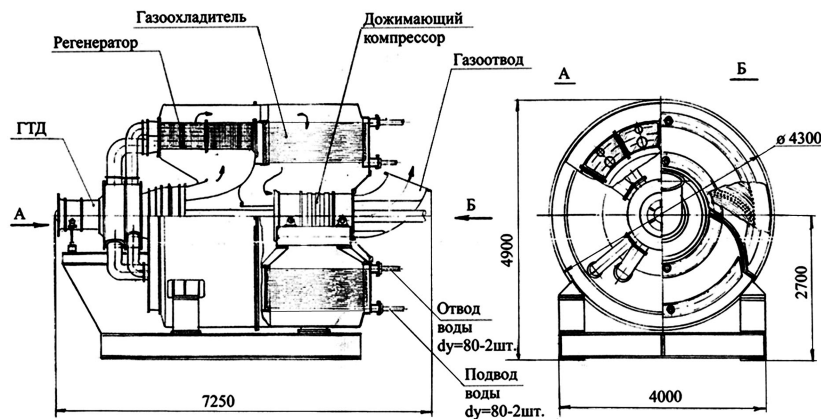


Рис.3. Когенерационный ГТД с ТКУ и регенерацией теплоты мощностью 10 МВт.

рый показывает степень полезного использования располагаемой теплоты топлива, израсходованной на выработку механической и тепловой энергии.

На рис.2 также изображены зависимости теплотехнического КПД и удельной теплотехнической мощности  $\eta_{уд.т}$  от  $\pi_k$  при  $\sigma = 0,8$ . При оптимальных значениях  $\pi_k$  в ГТД с ТКУ и Р теплотехнический КПД более 80 %, что обеспечивает высокую энергоэффективность установки.

Применение ГТД с ТКУ и Р в судовом пропульсивном комплексе рассмотрено в проекте судовой энергетической установки (СЭУ) нефтеналивного судна [3]. В проекте выполнена модернизация СЭУ с целью применения ГТД с ТКУ и Р в качестве главного двигателя на танкере проекта 17012 разработки ЦКБ «Черноморсудопроект» (г. Николаев), строящегося на Черноморском судостроительном заводе.

На танкере заменен главный двигатель

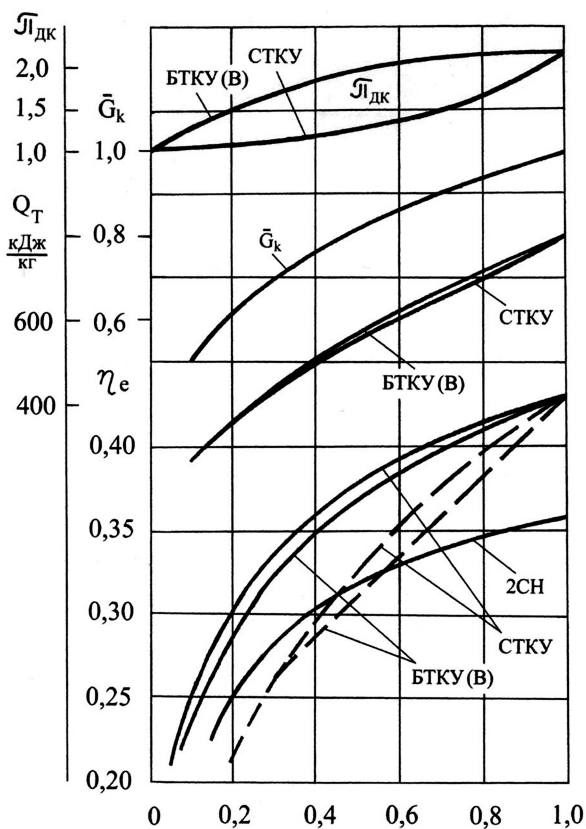


Рис.5. Характеристики цикла ГТД с ТКУ и Р на частичных нагрузках при  $T_3 = 1473$  К,  $\pi_k = 7$  и  $\pi_{дк} = 2,25$  (нагрузка винтовая): СТКУ – схема 1СН/Р со свободным ТКУ; БТКУ – схема 1СН/Р с заблокированным ТКУ.

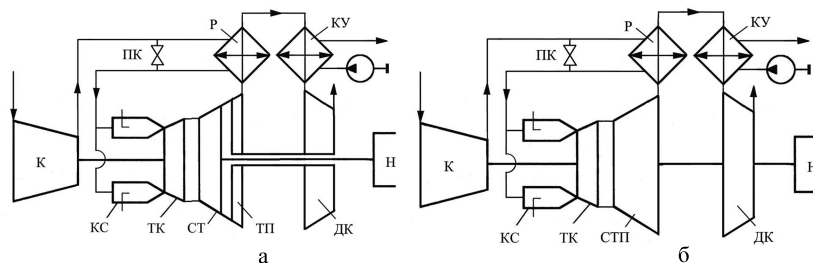


Рис.4. Когенерационный ГТД с ТКУ и регенерацией теплоты: а – схема со свободным ТКУ (схема 1СН/Р + СТКУ); б – схема с заблокированным ТКУ (схема 1СН/Р + БТКУ).

мощностью 10,4 МВт марки 6ДКРН 60/229-16 Брянского машиностроительного завода (Россия) на ГТД с ТКУ и Р мощностью 10 МВт, который вырабатывает теплоту (мощность 9,2 МВт), что позволило обойтись без вспомогательного котла КАВ 16/7 паропроизводительностью 16 т/ч.

Согласно технико-экономическому обоснованию, для газотурбинного варианта СЭУ общий экономический эффект составит 2,74 млн долл. за 7 лет эксплуатации судна.

Главный двигатель в СПК является всережимным, поэтому желательно обеспечить высокую энергетическую эффективность его на переменных режимах работы, а также гибкую стабильную поставку тепловой энергии для подогрева нефти в танках при изменении скорости хода судна.

Гибким когенерационным технологиям может удовлетворить ГТД с ТКУ и Р теплоты, теплотехнические характеристики которого при переменном режиме зависят от конструктивной схемы ГТД.

На рис.4,а приведена схема когенерационного ГТД со свободным ТКУ (СТКУ) и регенерацией теплоты, где силовая турбина с турбиной перерасширения механически не связана. Возможно применение ГТД с заблокированным ТКУ (БТКУ) и регенерацией теплоты (рис.4,б), где силовая турбина механически связана с ТКУ.

Расчеты характеристик когенерационных ГТД с СТКУ и БТКУ и регенерацией теплоты проводились при оптимальных степенях повышения давления в двигателе и в дожимающем компрессоре для схемы с регенерацией теплоты. В схемах ГТД с БТКУ и Р вал силового турбокомпрессорного агрегата воспринимает винтовую нагрузку.

На рис.5 и 6 показаны зависимости характеристик ГТД с ТКУ и Р (схемы 1СН/Р + СТКУ и 1СН/Р + БТКУ) от относительной эффективной мощности  $\bar{N}_e$ . Для сравнения приведены характеристики на частичных на-

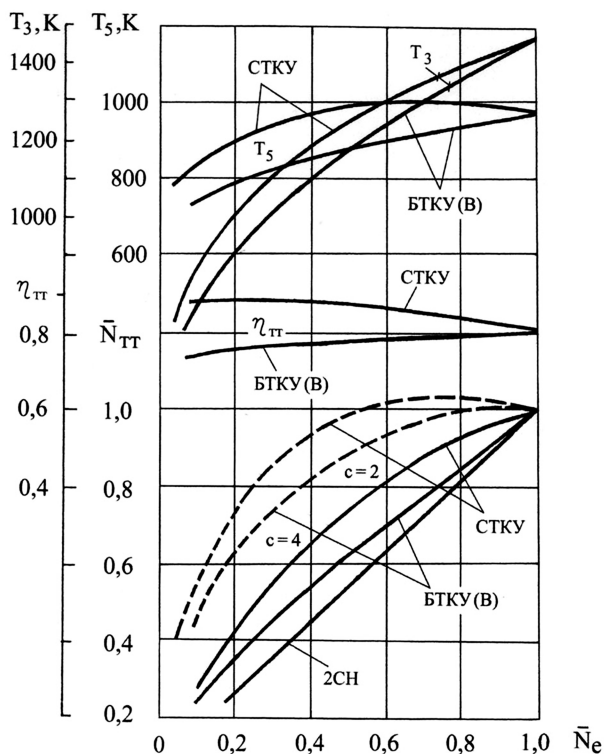


Рис.6. Теплотехнические характеристики ГТД с ТКУ и Р на частичных нагрузках при  $T_3 = 1473$  К,  $\pi_c = 7$  и  $\pi_{dk} = 2,25$  (нагрузка винтовая): СТКУ – схема 1СН/Р со свободным ТКУ; БТКУ – схема 1СН/Р с заблокированным ТКУ.

грузках ГТД традиционной схемы 2СН – ГТД простого цикла.

При всех значениях относительной мощности  $\bar{N}_e$  эффективный КПД ГТД с ТКУ и Р существенно выше, чем в ГТД простого цикла (схема 2СН). Здесь наблюдается суммарный эффект повышения эффективного КПД за счет регенерации теплоты и применения турбины перерасширения.

В ГТД с СТКУ и Р эффективный КПД несколько выше, чем в ГТД с БТКУ и Р. На переменном режиме необходимо отметить высокий теплотехнический (общий) КПД ГТД с СТКУ и Р, который с уменьшением мощности ГТД даже увеличивается.

При частичном нагружении в ГТД с БТКУ и Р тепловая мощность установки уменьшается практически пропорционально  $\bar{N}_e$  так же, как в ГТД простого цикла (схема 2СН). Более стабильно генерируется тепловая энергия в ГТД с СТКУ и Р: при относительной мощности  $\bar{N}_e = 0,5$  тепловая мощность  $\bar{N}_{TT} = 0,70$ .

Изменять тепловую мощность когенерационного ГТД с ТКУ и Р можно посредством перепуска циклового воздуха мимо регенератора.

Такой способ позволяет перераспределить тепловой поток за турбиной перерасширения между регенератором и охладителем газа – теплогенератором (см. рис.5 и 6).

Относительный расход воздуха через регенератор определяется по формуле:

$$\bar{G}_{bp} = (1 - \bar{G}_{bo}) \bar{G}_k^C, \quad (1)$$

где  $\bar{G}_{bo}$  – относительный расход воздуха, отбираемый на охлаждение турбин;  $\bar{G}_k$  – относительный расход воздуха через компрессор двигателя.

При  $C = 0$  в формуле (1) перепуск воздуха мимо регенератора отсутствует. Для увеличения тепловой мощности ГТУ на частичной нагрузке через клапан КП (см. рис.4, а, б) производится перепуск части воздуха мимо регенератора.

При  $C = 2$  в формуле (1) посредством перепуска воздуха мимо регенератора можно обеспечить постоянную тепловую мощность  $\bar{N}_{TT}$  на режиме  $\bar{N}_e = 1,0-0,5$  в ГТД с СТКУ и Р (верхняя пунктирная линия на рис.6). Перекрыв перепуск воздуха, двигатель возвращается к начальной характеристике ГТД с СТКУ и Р.

Применение предложенного метода изменения характеристик в ГТД с ТКУ и Р позволяет в широком диапазоне изменять тепловую мощность энергоустановки при переменном режиме.

### Выводы

ГТД с использованием турбокомпрессорных утилизаторов и регенерацией теплоты более экономичны, чем ГТД простого цикла, и могут быть применены в газоперекачивающих агрегатах и судовом пропульсивном комплексе.

Совершенствование тепловых и конструктивных схем, изменение рабочего процесса ГТД позволяет создать когенерационные установки с управляемыми потоками энергии.

### Список литературы

1. Матвеев В.Т., Трошин В.П., Филоненко А.А., Кучеренко О.С. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 4–5. – С. 81–85.
2. Матвеев В.Т. Приводные ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты // Газотурбин. технологии. – 2005. – № 6. – С. 42–44.
3. 17012.ГТД-001. Судовая энергетическая установка танкера на базе ГТД с турбокомпрессорным утилизатором. Расчетно-пояснительная записка. – Николаев : ЦКБ «Черноморсудпроект», 1999. – 27 с.

Поступила в редакцию 18.10.08

## Complex Cycle Gas Turbine Engines for Oil and Gas Transport Installation

*Matveyenko V.T., Ocheretyanyu V.A., Andriyets A.G.*

*Sevastopol National Technical University*

The results of cogeneration gas turbine engines (GTE) with turbocompressor utilizer (TCU) and heat regeneration investigation and development are resulted. It is displayed that GTE with TCU and heat regeneration are more economically efficient in comparison with simple cycle GTE. The GTE with TCU can be applied for gas pumping units. Thermal and structural schemes enhancement, GTE working processes change allows to design GTE units with controlled energy flow.

**Key words:** gas turbine engine, gas generator, intermediate air refrigeration, turbine over-expansion, heat regeneration.

Received October 18, 2008

### Уважаемы авторы!

Журнал «Энерготехнологии и ресурсосбережение» прошел экспертизу у ведущих специалистов ВИНТИ, и был признан соответствующим тематическому содержанию Реферативного журнала (РЖ) и баз данных (БД) ВИНТИ. Журнал начал реферироваться, и информация из него размещается в соответствующих сериях информационных продуктов. О журнале и работах авторов узнает широкий круг пользователей баз данных ВИНТИ, в том числе зарубежные коллеги.

ВИНТИ издает 260 серий РЖ и генерирует 26 тематических БД, доступных через ИНТЕРНЕТ, в которых размещаются рефераты на статьи из журналов по основным разделам в том числе и технических наук. Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ РАН (Москва, Россия) — издания с мировой известностью.

**Abstracts Journal, Series: Theoretical Bases of Heat Technology. Industrial Heat Technology, 2009, № 03**

*Abstract 09.03-22III.66*

ЭиР, 2008. — № 5

Комплексный подход к оценке эффективности систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок / Фиалко Н.М., Шеренковский Ю.В., Степанова А.И., Голубинский П.К., Навродская Р.А., Новаковский М.А. — С. 22–28

**Abstracts Journal, Series: Oil and Gas Deposits Exploitation, 2009, № 04**

*Abstract 09.04-10Г.211*

ЭиР, 2008. — № 5

Подсистема выбора кожухотрубчатых теплообменников для установок промышленной подготовки природного газа. 1. Теплопередача многокомпонентных одно- и двухфазных смесей / Калашников О.В., Будняк С.В. — С. 69–71

**Abstracts Journal, Series: Boiler Installations and Water Conditioning, 2009, № 05**

*Abstract 09.05-22P.1*

ЭиР, 2008. — № 4

Влияние режимных параметров газификации в CO<sub>2</sub> на структуру коксов энергетических углей Украины / Гапонич Л.С., Монастырева Т.Н., Хандрос Т.Н. — С. 4–10

**Abstracts Journal, Series: General Questions of Chemical Technology, 2009, № 07**

*Abstract 09.07-19И.177*

ЭиР, 2008. — № 5

Очистка фенолсодержащих вод окислением на суспензии MnO<sub>2</sub> / Хохотва А.П., Мельникова Н.В. — С. 59–61

**Abstracts Journal, Series: Inorganic Compounds and Products Technology. Fertilizer Manufacture, 2009, № 07**

*Abstract 09.07-19Л.59*

ЭиР, 2008. — № 5

Замкнутая система очистки газа с обогащающим элементом / Бутенко А. Г., Силин А. В. — С. 61–64

**Abstracts Journal, Series: Inorganic Compounds and Products Technology. Fertilizer Manufacture, 2009, № 08**

*Abstract 09.08-19Л.29*

ЭиР, 2008. — № 5

Извлечение германия из промышленных отходов с применением гидроталлургических и микробиологических методов / Блайда И.А., Слюсаренко Л.И., Васильева Т.В., Васильева Н.Ю., Джамбек О.И., Джамбек А.А., Иваница В.А. — С. 50–54

*Abstract 09.08-19Л.3*

ЭиР, 2008. — № 5

Эмиссия NO<sub>x</sub> в атмосферу и уменьшение выбросов оксида азота (I) в азотнокислотных установках / Близинок О.Н., Савенков А.С., Рагушная Л.Н. — С. 65–68

*Abstract 09.08-19Л.86*

ЭиР, 2008. — № 5

Каталитический нейтрализатор с металловолоконистым катализатором для очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания / Соловьев Г.И., Климаш А.А., Гончаров В.В. — С. 44–49