

10. Kizuka N., et al., "Test Results of Closed Circuit Cooled Blades for 1700°C Hydrogen –Fueled Combustion Gas Turbines" IGTC 99 Kobe TS-10 pp 343-350.
11. Glezer B. et al., "A Novel Technique for the Internal Blade Cooling" ASME Paper № 96- GT-181.
12. Халатов А.А., Борисов И.И., Шевцов С.В, «Тепломассобмен и теплогидравлическая эффективность вихревых и закрученных потоков».- Киев, - 2005. - 500с.
13. Glezer B. et al., "Heat Transfer in a Rotating Radial Channel with Swirling Internal Flow" ASME Paper № 98- GT-214.

*Визначено вплив конструктивного виконання газотурбінного двигуна і системи охолодження на показники енергозбереження контактної газопаротурбінної установки в умовах морського базування і експлуатації*

*Ключові слова: показники, енергозбереження, контактна газопаротурбінна установка*

---

*Определено влияние конструктивно-го исполнения газотурбинного двигателя и системы охлаждения на показатели энергосбережения контактной газопаротурбинной установки в условиях морского базирования и эксплуатации*

*Ключевые слова: показатели, энергосбережение, контактная газопаротурбинная установка*

---

*Effect of design of gas-turbine engine and cooling system on energy saving indices of contact gas-steam turbine plant in conditions of marine referencing and maintenance is defined*

*Key words: indices, energy saving, a contact gas-steam turbine plant*

УДК 621.431.74:621.438

# КОМПЛЕКСНОЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОНТАКТНЫХ ГАЗОПАРОВЫХ ТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НА МОРСКИХ ОБЪЕКТАХ

**С.А. Кузнецова**

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник\*

**С.Н. Мовчан**

Начальник отдела\*\*

Контактный тел.: 8 (0512)49-74-36

**В.Н. Чобенко**

Начальник отдела ЦНИОКР\*\*

Контактный тел.: 8 (0512)49-74-19

\*\*ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»

Октябрьский проспект, 42а, г. Николаев, Украина, 54018

E-mail – spe@mashproekt.nikolaev.ua

**А.П. Шевцов**

Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник\*

\*ОАО «НЭТ»

а/я 17, г. Николаев, Украина, 54030

Контактный тел.: 8 (0512) 35-32-98

E-mail – aootnet@ukr.net

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

Ограниченность ресурсов жидких и газообразных топлив на материковой части Украины вызывает необ-

ходимость увеличения объемов добычи, переработки и транспортирования этих энергоносителей на континентальном шельфе Черного и Азовского морей. Проблемы энергосбережения и экологии при добыче и транспортировке газа и нефти в морских условиях требуют

создания морских объектов с высокоэффективными, компактными, маневренными и безопасными энергетическими установками высокой агрегатной мощности.

Наиболее полно этим требованиям могут удовлетворить контактные газопаровые турбинные установка (КГПТУ) с подачей пара непосредственно в камеру сгорания газотурбинного двигателя (ГТД). Такие установки объединяют положительные свойства паротурбинной установки (ПТУ) (низкие энергетические затраты на сжатие и высокая энергоемкость рабочего тела) и газотурбинной установки (ГТУ) (высокая температура рабочего тела на входе в турбину и компактность).

В настоящее время КГПТУ находят применение в промышленности и энергетике. Опыт эксплуатации КГПТУ в составе газоперекачивающей установки ГПУ-16К на ГКС «Ставищенская» и КГПТУ-25, как энергетической установки мощностью 25 МВт, позволяет рассматривать их как перспективные для применения в составе энергетических установок на морских платформах и плавучих электростанциях.

Поэтому создание КГПТУ для эксплуатации на морских объектах и судах является актуальной и важной научно-технической проблемой.

---

#### Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы

---

К настоящему времени опубликованные работы [1, 2, 3, 4, 5] освещают результаты эксплуатации и дальнейшего совершенствования КГПТУ наземного базирования. Исследования КГПТУ, для морских объектов и судов, малочисленны [6, 7, 8, 9] и их результаты относятся к исследованию обобщенных тепловых схем судовых энергетических установок.

Результаты [8] характеризуют общие подходы и рекомендации по созданию КГПТУ на базе ГТД различных кинематических схем, характеристики КГПТУ в широком диапазоне изменения рабочих режимов и внешних условий с учетом совместной работы ГТД и котла-утилизатора (КУ) при подаче пара в камеру сгорания газотурбинного двигателя.

---

#### Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья

---

В проведенных исследованиях отсутствует решение проблемы комплексного энерго- и ресурсосбережения при использовании контактных газопаровых турбинных установок в составе энергетических установок на морских транспортирующих основаниях, плавучих электростанциях и судах.

---

#### Цель и задачи исследования

---

Целью исследования является обоснование целесообразности применения КГПТУ в составе энергетических установок морских транспортирующих оснований, плавучих электростанций и судов при комплексном обеспечении механической работой, электрической энергией и теплотой в виде насыщенного пара и горячей воды технологических и судовых нужд.

Достижение указанной цели сводится к решению следующих задач:

- определению влияния конструктивного исполнения КГПТУ в условиях морского базирования на их технико-экономические показатели;
- определению влияния конструктивного исполнения элементов охлаждающе-дегазирующей системы КГПТУ в условиях морского базирования на показатели энергосбережения при эксплуатации;
- определению показателей энергосбережения при использовании дополнительно сгенерированной воды для хозяйственно-бытовых нужд;
- определению массогабаритных показателей КГПТУ и их компоновок в составе энергетических установок морских объектов.

---

#### Изложение основного материала исследований с полным обоснованием полученных научных результатов

---

*Определение влияния конструктивного исполнения КГПТУ в условиях морского базирования на их технико-экономические показатели.*

Главная энергетическая установка морского транспортирующего основания обеспечивает транспортировку жидкого или газообразного энергоносителя с моря на континент.

Нагнетатели газа и нефти могут иметь механический или электрический привод в зависимости от конструкции и технических параметров. Поэтому возможны следующие варианты конструктивного исполнения КГПТУ как привода:

- ГТД одновальной кинематической схемы с заблокированной силовой турбиной;
- ГТД двухвальной кинематической схемы со свободной силовой турбиной;
- ГТД трехвальной кинематической схемы со свободной силовой турбиной.

Сравнение показателей КГПТУ, созданных на базе ГТД различных кинематических схем, свидетельствует о том, что при одинаковой мощности базовых ГТД, они отличаются.

КГПТУ на базе одновального заблокированного ГТД имеет наибольшую мощность, а КГПТУ на базе трехвального ГТД со свободной турбиной – наивысший КПД.

Различие в показателях КГПТУ вызвано отличием аналогичных показателей базовых ГТД и различием их кинематических схем. Для определения влияния кинематической схемы ГТД на параметры КГПТУ сравнение характеристик КГПТУ выполнено в относительных параметрах.

На рис.1 представлена зависимость относительно КПД КГПТУ от относительной мощности. Относительные значения КПД и мощности определены по следующим зависимостям:

$$\bar{\eta} = \frac{\eta_{\text{КГПТУ}}}{\eta_{\text{БАЗ ГТД}}}; \quad \bar{N} = \frac{N_{\text{КГПТУ}}}{N_{\text{БАЗ ГТД}}},$$

где  $\eta_{\text{КГПТУ}}$ ,  $N_{\text{КГПТУ}}$  – соответственно КПД и мощность КГПТУ;  $\eta_{\text{БАЗ}}$ ,  $N_{\text{БАЗ}}$  – соответственно КПД и мощность базового ГТД.

КГПТУ на базе одновального блокированного ГТД имеет бóльшую мощность как при работе с подачей пара, так и без подачи пара в КС. Это объясняется применением в рассматриваемом случае турбины базового ГТД без изменения ее пропускной способности. С другой стороны применение турбины базового ГТД приводит к некоторому снижению ее КПД при работе с большими количествами пара и смещению точки на характеристике компрессора в зону меньших значений КПД, что ведет к уменьшению КПД КГПТУ.

Вследствие этого в диапазоне режимов относительной мощности  $1,15 \leq \bar{N} \leq 1,48$  КПД КГПТУ остается практи-

чески постоянным и не увеличивается с увеличением режима работы.

КГПТУ на базе двухвального и трехвального ГТД со свободными турбинами близки по мощности и экономичности. При работе без подачи пара в КС мощность КГПТУ на базе двухвального ГТД со свободной турбиной несколько выше, чем у КГПТУ на базе трехвального ГТД со свободной турбиной. Это объясняется увеличением пропускной способности турбины высокого давления трехвального ГТД со свободной турбиной для работы с подачей пара в КС и, как следствие, более низкой температурой газа на входе в турбину высокого давления.

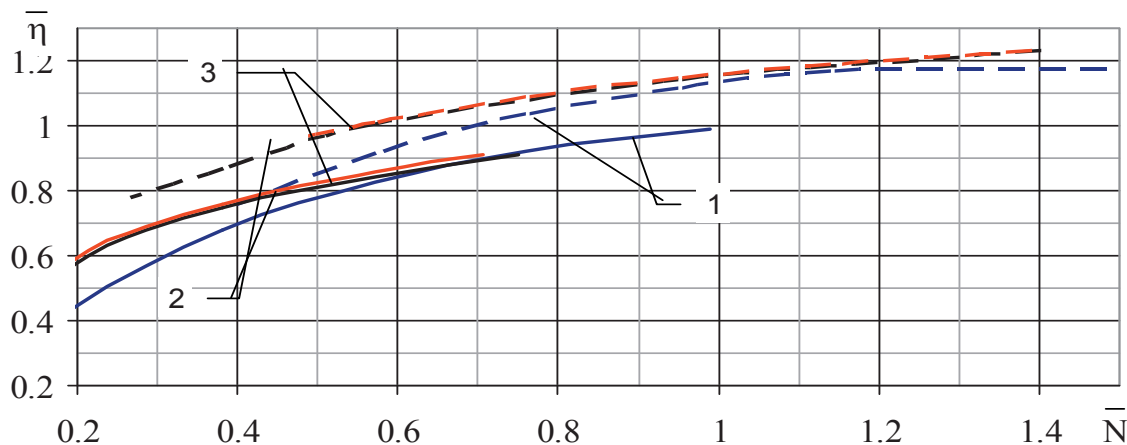


Рис. 1. Зависимость относительного КПД ( $\bar{\eta}$ ) КГПТУ от относительной мощности ( $\bar{N}$ ) при работе с подачей и без подачи пара в КС: - - - с подачей пара в КС; — — — без подачи пара в КС; 1 — одновальный блокированный ГТД; 2 — двухвальный ГТД со свободной турбиной; 3 — трехвальный ГТД со свободной турбиной

Сравнение экономичности КГПТУ, созданных на базе ГТД различных схем, показывает, что на промежуточных режимах работы КГПТУ на базе ГТД со свободной турбиной, как и ГТД простого цикла, имеют более высокую экономичность по сравнению с КГПТУ на базе блокированного ГТД.

Сравнение экономичности КГПТУ и ГТД простого цикла одинаковой кинематической схемы по-

казывает, что относительная экономичность КГПТУ при работе с подачей пара в КС на промежуточных режимах работы несколько выше, чем у ГТД простого цикла (рис.2).

Сравнительная оценка экономичности КГПТУ и ГТД простого цикла равной мощности показывает, что КПД КГПТУ выше КПД ГТД простого цикла во всем диапазоне рабочих режимов от холостого хода до

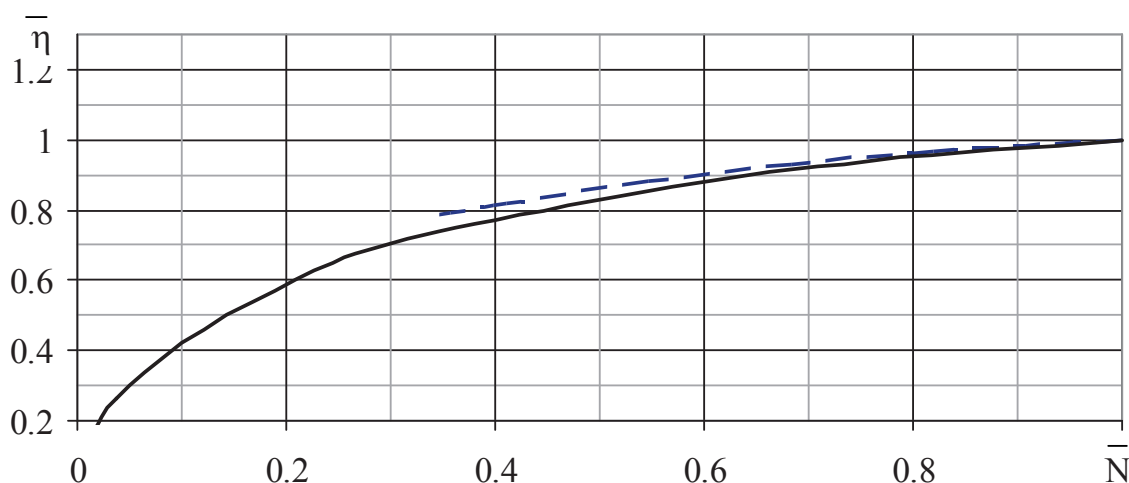


Рис. 2. Зависимость относительного КПД ( $\bar{\eta}$ ) КГПТУ при работе с подачей пара в КС и ГТД простого цикла от относительной мощности ( $\bar{N}$ ): - - - КГПТУ с подачей пара в КС; — — — ГТД простого цикла

номинального, как при работе КГПТУ с подачей пара, так и без подачи пара в КС. На рис. 3 представлена зависимость относительного КПД КГПТУ и ГТД простого цикла от относительной мощности.

Как видно из рисунка, КПД КГПТУ превышает КПД ГТД ПЦ более, чем на 20% относительных на режимах работы КГПТУ с подачей пара в КС и до 10% относительных на режимах работы КГПТУ без подачи пара в КС.

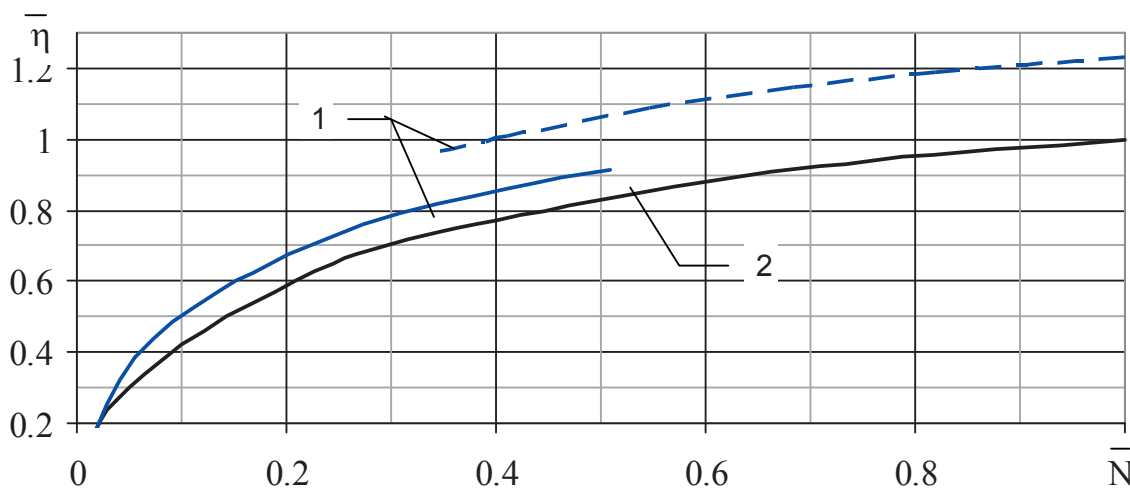


Рис. 3. Зависимость относительного КПД ( $\bar{\eta}$ ) КГПТУ и ГТД простого цикла от относительной мощности ( $\bar{N}$ ): 1 – КГПТУ; 2 – ГТД простого цикла; ---- КГПТУ с подачей пара в КС; ---- - без подачи пара в КС

*Определение влияния конструктивного исполнения элементов охлаждающе-дегазирующей системы КГПТУ в условиях морского базирования на энергосбережение при эксплуатации.*

Дополнительное повышение эффективности энергосбережения в КГПТУ возможно за счет снижения потребления электрической энергии элементами охлаждающе-дегазирующей системы контактного конденсатора: циркуляционными насосами и насосами водо-водяных охладителей. Снижение потребляемой электрической энергии осуществляется, во-первых, за счет снижения расхода воды на контактный конденсатор и более низких температур циркуляционной воды, и, во-вторых, более высокой эффективности теплопередачи в водо-водяных охладителях.

Снижение потребления электрической энергии  $\Delta N_{эл}$  циркуляционными насосами охлаждающе-дегазирующей системы контактного конденсатора от температуры наружного воздуха приведено на рис.4. Температуры воды Черного моря соответствующие температурам наружного воздуха определялись как среднемесячные значения в течении года. Определение снижения потребления энергии производилось с учетом компенсации потерь при продувках утилизационного котла и производства необходимого количества опресненной воды для бытовых нужд. Снижение потребления электрической энергии определялось, как разность мощностей циркуляционных насосов КГПТУ при работе в континентальных и морских условиях.

Представленные результаты показывают, что применение КГПТУ в морских условиях позволит за 6000

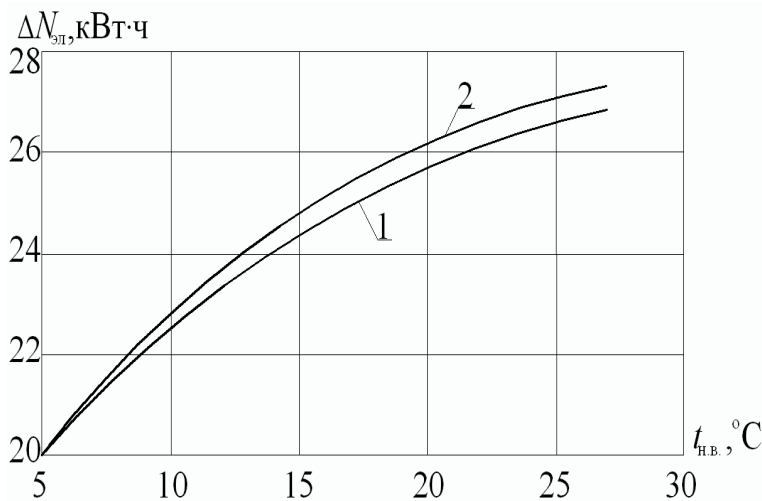


Рис.4. Зависимость снижения потребления электроэнергии циркуляционными насосами от температуры наружного воздуха для водо-водяных охладителей: 1 – с гладкотрубной поверхностью, 2 – с профилированной поверхностью

часов работы сократить расход электроэнергии на 120000 ...170000 кВт·ч.

Снижение энергопотребления в водо-водяных охладителях возможно за счет интенсификации процессов теплопередачи при применении профилированных поверхностей.

Для оценки экономии потребления электрической энергии при применении профилированных поверхностей проведено моделирование течения в водо-водяном охладителе судовом кожухотрубчатом с прямыми трубами типа ОКН 220-1050-2 с количеством ходов охлаждающей воды 2 и охлаждаемой воды 8 [10].

Исходя из результатов моделирования следует, что снижение потребления электрической энергии насосами водо-водяных охладителей составляет 60000...90000 кВт·ч в год.

Тогда, суммарное снижение потребления электрической энергии циркуляционными насосами и насосами водо-водяных охладителей достигает 180000...260000 кВт·ч в год.

*Определение показателей энергосбережения при использовании дополнительно сгенерированной воды для хозяйственно-бытовых нужд.*

КГПТУ генерируют воду, которая может быть использована для хозяйственно-бытовых нужд на морском объекте. Это позволяет дополнительно сократить затраты электрической энергии на работу опреснительных установок.

Исходя из времени работы установки в течение года (6000 часов), состава команды морского объекта (60 или 80 человек) и норм потребления опресненной воды (4...8 кг/ч на одного человека) ее количество составляет соответственно 1440...2880 и 1920...3840 т в год. Для получения такого количества опресненной воды в утилизационных опреснительных установках типа Д-4У затрачивается 1800...5600 кВт·ч в год. По этому, отбор указанного выше объема опресненной воды из охлаждающе-дегазирующей системы контактного конденсатора КГПТУ дополнительно к 180000...260000 кВт·ч в год экономит 1800...5600 кВт·ч в год, т.е. всего 181800...265600 кВт·ч в год.

*Определение массогабаритных показателей КГПТУ и их компоновок в составе энергетических установок морских объектов.*

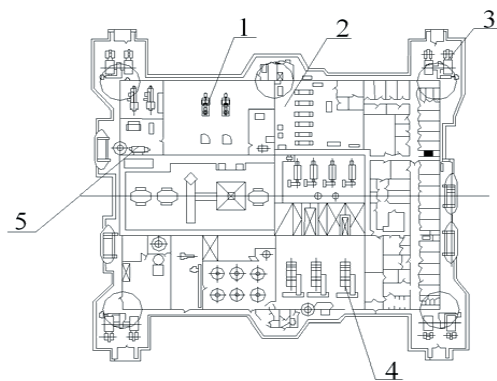


Рис. 5. Общее расположение оборудования на морском объекте:

1-КГПТУ, 2 —электротехнический отсек, 3 —якорные лебедки, 4- буровые насосы, 5-котельное оборудование

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

1. Результаты исследования основных характеристик КГПТУ при использовании ее в качестве энергетической установки морского объекта подтверждают, что мощность КГПТУ при работе с подачей пара в КС на 40÷50% больше мощности базового ГТД, а КПД КГПТУ превышает КПД базового ГТД на 17÷23%. При работе без подачи пара в камеру сгорания КГПТУ с измененными турбинами имеет мощность на 25÷30% меньше мощности базового ГТД.

2. КПД КГПТУ превышает КПД ГТД простого цикла равной мощности во всем диапазоне рабочих режимов от холостого хода до номинального. При работе с подачей пара в камеру сгорания превышение составляет более 20% (отн.), при работе без подачи пара в КС – до 10% (отн.).

3. Суммарная экономия потребления электрической энергии при эксплуатации КГПТУ в морских условиях достигает 181800...265600 кВт·ч в год при этом циркуляционными насосами и насосами водо-водяных охладителей-180000...260000 кВт·ч в год и при обеспечения опресненной водой бытовых нужд команд - 1800...5600 кВт·ч в год.

#### Литература

1. Коломеев В.М., Ксендзюк М.В., Романов В.В., Мовчан С.М., Шевцов А.П., Кузнецова С.А., Дикий М.О. ГПУ-16К : Дослідно-промислова експлуатація, міжвідомчі приймальні випробування, перспективи використання // Нафтова і газова промисловість, Науково-виробничий журнал. – Київ. – 2006, – №4, С. 38-40.
2. Избаш В.И., Кучерук Н.В., Мовчан С.Н., Филоненко А.А., Шевцов А.П., Кузнецова С.А. Опыт эксплуатации и пути совершенствования газоперекачивающей установки ГПУ-16К и ее составных частей // Промышленная теплотехника, ИТТФ НАН Украины. – 2007. – Т. 29, № 7. – С. 120-124.
3. Кучеренко О.С., Мовчан С.Н., Романов В.В., Чобенко В.Н., Кузнецова С.А., Шевцов А.П. Контактные газопаротурбинные установки «Водолей» – состояние и перспективы.- Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.-Вип.2.-Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. - С. 197-209.
4. Чобенко В.Н. Расчетно-экспериментальное исследование характеристик контактных газопаротурбинных установок «Водолей» // Сборник научных трудов Николаевского университета кораблестроения. –2004 г. –№5, - С. 69-78.
5. S.N. Movchan, V.V. Rovnov, V.N. Chobenko, A.P. Shevtsov. Contact steam-and-gas turbine units of the «AQUARIUS» type. The present status & future prospects Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: GT 2009-60339.
- Ю. Бондин, С. Мовчан, С. Чернов, А. Шевцов Совершенствование корабельных энергетических установок // Военный парад. – Москва. - 2005. - №2 (68). - С.54-56.
7. Кузнецова С.А., Кузнецов В.В. Энергосбережения при експлуатації ГПА на морських об'єктах видобутку та транспортування природного газу // Енергетика: економіка, технології, екологія, Науковий журнал. НТУУ „Київський політехнічний інститут”. – Київ. - 2008.– №2. - С. 39-43.
8. Чобенко В.Н. Особенности создания КГПТУ на базе серийного ГТД // Техногенна безпека. Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили – Миколаїв. - 2005. –№61.– С. 193-197.
9. Исаков Б.В., Чобенко В.Н., Палиенко Р.В. Состояние и перспективы развития корабельной газотурбинной энергетики // Механика, энергетика, экология. Вестник СевНТУ. Вып. 87 – Севастополь. - 2008. – С. 56-61.
10. ОСТ 5.4254-86. Охладители масла и воды судовые кожухотрубчатые с прямыми трубами.–71 с.