

УДК 629.122:621.352

В.М. ГОРБОВ; М.А. КАРПОВ

Национальный университет кораблестроения имени адм. Макарова, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведена принципиальная схема установки, использующей высокотемпературные топливные элементы, для генерации электрической энергии в судовых условиях, а также метод утилизации вторичных энергетических потоков посредством использования газотурбинной установки для выработки дополнительной электроэнергии. Предложена методика определения коэффициента полезного действия судовой электрохимической электростанции при использовании утилизационной газотурбинной установки. Проведен расчет коэффициента полезного действия гибридной судовой электростанции с утилизационным котлом.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, судовая электростанция, электрохимическая энергоустановка, электрохимический генератор, топливный элемент.

Введение

Постановка проблемы. Индустриальное развитие и рост всех сфер человеческой деятельности за последние 100 лет нанесли необратимый урон биосфере планеты. Значительную роль в прогрессирующем процессе загрязнения окружающей среды играет судовая энергетика. По отдельным оценкам эмиссия с морских судов составляет около 14 % от всей эмиссии от ископаемых топлив [1]. С целью уменьшения влияния энергетических установок на атмосферу был принят ряд международных и региональных законодательных актов и нормативов, ограничивающих вредные выбросы с судов [2-5]. С 2012 г. согласно Приложению VI Конвенции МАРПОЛ 73/78 запрещается использование топлива с содержанием серы больше 3,5 %, с дальнейшим снижением этой величины до 0,5 % к 2020 году [2, 5]. Установлено ограничение содержания серы в топливе на уровне 1,5 % в Районах Контроля Выбросов SO_x (SECA) [6]. С 2010 г. содержание серы во всех сортах топлива на судах у причалов ЕС и во внутренних водах ограничено на уровне 0,1 % согласно Директиве Европейского парламента 2005/33/ЕС [7]. Приняты ограничения состава серы не более 0,2 % в легких топливах и не более 1 % в тяжелых топливах для судов, находящихся в прибрежных зонах Греции и Испании [8]. ИМО в рамках Киотского протокола в 2012 году планирует введение ограничений на судовые выбросы парниковых газов (прежде всего CO₂) [9].

Использование электрохимических генераторов (ЭХГ) в судовой энергетике позволяет значи-

тельно снизить степень воздействия энергетических установок на окружающую среду, а также повысить эффективность энергетического комплекса судна в целом. К сожалению, информации по оптимизации и рационализации процесса внедрения данной технологии в состав судовой энергетической установки (СЭУ) недостаточно. Оценка эффективности судовых энергетических блоков с электрохимическими генераторами на основе топливных элементов (ТЭ) является важной задачей и необходимым этапом для проведения исследований эффективности таких систем.

Анализ последних исследований и публикаций. Со середины 70-х годов прошлого века проводились попытки внедрения ЭХГ в состав СЭУ подводных лодок. Сначала основные разработки проводились по использованию ЭХГ на основе щелочных ТЭ, но уже к концу 90-х годов появились примеры применения и других типов ТЭ. Фирмой Siemens в 1990-х годах была успешно завершена разработка ЭХЭУ для подводной лодки U-1 на базе ЭХГ с твердополимерными ТЭ (ТПТЭ). Учитывая положительные результаты натурных испытаний подводной лодки U-1 с такой энергоустановкой, в ФРГ фирмы HDW и Thyssen выполнили проектирование и строительство новых лодок проекта 212. В настоящее время в составе ВМС Германии находятся четыре подводные лодки проекта 212 с комбинированной энергоустановкой, включающей энергоустановку с ЭХГ [10].

Компания ATG в 2008 г. спустило на воду первое пассажирское судно с энергетической установкой на топливных элементах для коммерческих операций – прогулочный катер «Alsterwasser». Энерге-

тическая установка судна представляет собой два блока ЭХГ по 50 кВт каждый на основе твердополимерных ТЭ, которые работают на водороде, хранимом на борту.

В конце 2009 г. в рамках проекта FellowSHIP спущено на воду для тестовых испытаний судно снабжения нефтяных платформ «Viking Lady». В проекте FellowSHIP участвуют компании Wärtsilä, Eidesvik, Det Norske Veritas и MTU Onsite Energy GmbH. ЭХЭУ на основе расплавно-карбонатных ТЭ (РКТЭ) мощностью 320 кВт используется на судне «Viking Lady» в качестве вспомогательного источника энергии. Топливом служит природный газ (ПГ), который также является одним видом топлива два двутопливной системы основной энергетической установки. В марте 2012 г. было проведено усовершенствование ЭХЭУ: в её состав введен блок с аккумуляторными батареями, что позволило создать гибридную энергоустановку с ЭХГ (по общепринятой европейской классификации).

В 2009 году было модернизировано судно для перевозки автомобилей «Undine». В состав вспомогательной электростанции внедрен ЭХГ на основе твердооксидных ТЭ (ТОТЭ) мощностью 20 кВт.

В то же время на судах, которые имеют в составе СЭУ ЭХГ на основе ТЭ, не представлено энергоустановки с утилизацией теплоты с помощью газотурбинной установки (ГТУ) для выработки дополнительной электрической энергии, что является перспективным направлением в стационарной энергетике.

Цель статьи. Определение составляющих коэффициента полезного действия (КПД) для комплексной оценки эффективности судовой электростанции с электрохимическим генератором на основе высокотемпературных ТЭ.

Изложение основного материала

ТЭ – одна из разновидностей электрохимических элементов, существенным преимуществом которой является то, что в отличие от гальванических элементов и аккумуляторов, топливо и окислитель подаются в ТЭ в момент его работы и не входят в состав электродов. Таким образом, схема обеспечения реагентами ТЭ подобна схемам топливоснабжения тепловых машин, однако в них достигается более высокий КПД за счет прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую энергию.

ТЭ вырабатывают постоянный электрический ток. Напряжение ТЭ обычно не превышает 1 В, а токи, отбираемые от одного элемента, относительно невелики. Для увеличения напряжения, тока и элек-

трической мощности отдельные ТЭ соединяют между собой в батареи ТЭ.

Для постоянного получения электроэнергии необходимо непрерывно подводить в батарею ТЭ топливо и окислитель, отводить из батареи продукты реакции и теплоту. Поэтому реальная выработка электрической энергии и теплоты осуществляется в электрохимических генераторах и энергоустановках. Простейшая схема ТЭ приведена на рис. 1. Элемент состоит из двух электродов с электродными камерами и ионного проводника (электролита) между ними. На одном из электродов (аноде) происходит реакция электроокисления топлива, на втором (катоде) – электрохимическое восстановление окислителя. В электролите происходит движение положительно или отрицательно заряженных частиц (ионов). Ионный проводник также служит для разделения окислителя и восстановителя. При работе ТЭ анод и катод замыкаются проводником первого рода, по которому электроны двигаются от анода к катоду, совершая на своем пути работу.

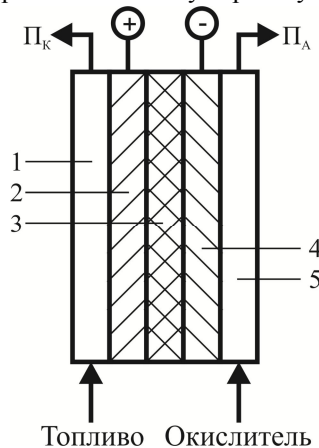


Рис. 1. Принципиальная схема ТЭ:

1 – анодная камера; 2 – анод; 3 – электролит; 4 – катод; 5 – катодная камера; П_к, П_а – продукты реакции с катодной и анодной камеры

ЭХГ – это энергоустановка, состоящая из батареи топливных элементов, систем хранения и подачи топлива и окислителя, отвода продуктов реакции и теплоты. Упрощенная схема ЭХГ приведена на рис. 2.

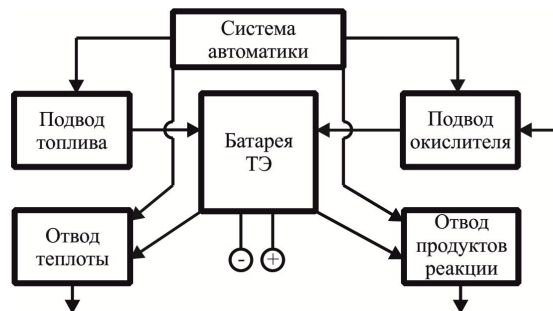


Рис. 2. Структурная схема ЭХГ

Электрохимическая энергоустановка (ЭХЭУ) – это установка, предназначенная для выработки электрической энергии и теплоты, включающая в себя ЭХГ, устройства для преобразования напряжения и тока (например, инвертор) и систему утилизации теплоты, генерируемой в ТЭ, например, для теплоснабжения (низкопотенциальная теплота) или получения электрической энергии (высокопотенциальная теплота) в паровой или газовой турбине (в конечном цикле). Упрощенная схема ЭХЭУ показана на рис. 3.

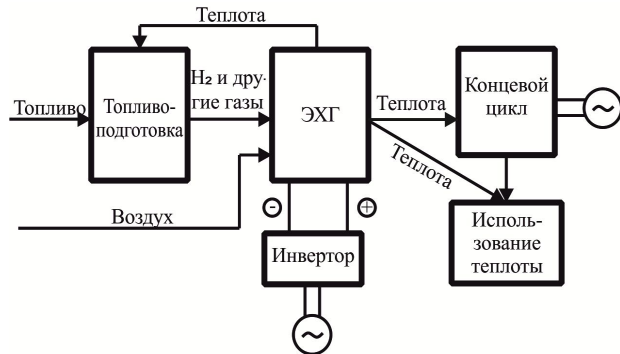


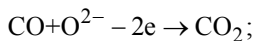
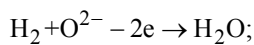
Рис. 3. Структурная схема ЭХЭУ

Классификация ЭХЭУ проводится по различным признакам: по виду ТЭ, виду топлива и окислителя, назначению и структуре. По виду ТЭ ЭХЭУ подразделяются на шесть типов: ЭХЭУ на основе щелочных ТЭ (ЩТЭ), ТЭ с фосфорнокислым электролитом (ФКТЭ), ТПТЭ, метанольных ТЭ (МТЭ), РКТЭ и ТОТЭ. Исследование и разработка ЭХЭУ на основе ТЭ за последние 10 лет позволили улучшить массогабаритные показатели в 2...3 раза, ресурс ТЭ в 3...5 раз, а содержание платины, выступающей катализатором реакций, уменьшить в 10 раз [10].

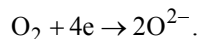
Наибольший интерес для использования в составе СЭУ представляют ЭХГ на основе высокотемпературных ТЭ – РКТЭ и ТОТЭ. В таких установках возможна утилизация высокопотенциальной теплоты, которой обладают продукты реакции ЭХЭУ в процессе генерации электрической энергии. В данной работе рассмотрена судовая ЭХЭУ на основе ТОТЭ, работающая на ПГ, в которой теплота продуктов реакции используется в газотурбинной установке.

Топливом для работы ЭХЭУ служит синтез-газ, полученный в результате конверсии ПГ в пароводяном риформере. Токообразующие реакции можно представить следующими уравнениями:

на аноде:



на катоде:



Напряжение ТЭ определяется по формуле:

$$U = E_0 - IR - \Delta E_k - \Delta E_a,$$

где E_0 – ЭДС ТЭ; I – сила тока; R – сопротивление; ΔE_k и ΔE_a – поляризации катода и анода.

Рабочая температура ТОТЭ составляет около 1273 К, что способствует протеканию процессов на электродах с большой скоростью при незначительных поляризациях, поэтому характер вольт-амперной кривой близок к линейному.

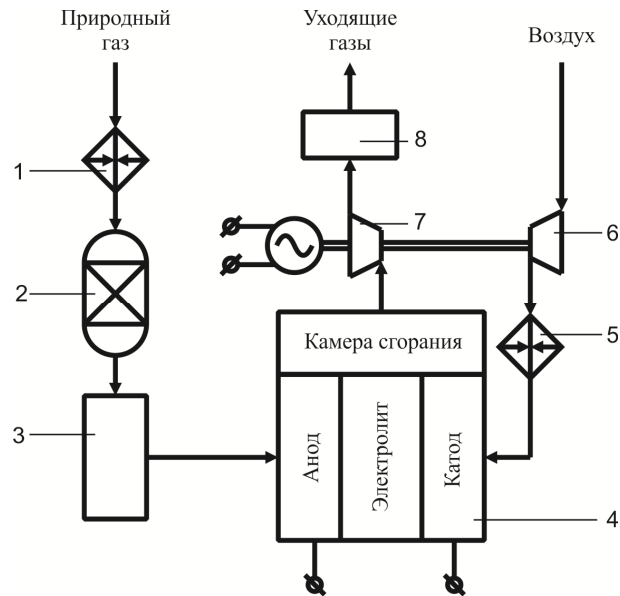


Рис. 4. Принципиальная схема судовой ЭХЭУ на основе ТОТЭ

Основные элементы судовой ЭХЭУ на основе ТОТЭ и их взаимосвязи приведены на рис. 4. Процесс топливоподготовки осуществляется следующим образом. ПГ в подогревателе 1 доводится до рабочей температуры и подается в адсорбционный десульфуризатор 2, где газ проходит через сорбционные пластины и подвергается очистке от серосодержащих соединений. Процесс конверсии происходит в риформере 3 откуда полученный синтез-газ подается в анодное пространство ЭХГ 4. Доведенный до рабочих параметров воздух, проходя через компрессор 6 и подогреватель 5, подается в катодное пространство. Анодное и катодное пространство герметично изолированы друг от друга электролитом, которым обычно является керамика на основе диоксида циркония, например $(ZrO_2)_{0,92}(Y_2O_3)_{0,08}$ [11].

Отходящие из анодной камеры газы, содержащие (по объему) от 10 до 25% горючих компонентов (H_2 , CO , CH_4), водяной пар, диоксид углерода и азот, направляются в каталитическую камеру сгорания. Для дожигания не вступивших в реакцию в ЭХГ газов используется обедненный кислородом воздух (не менее 15 % кислорода по объему) из ка-

тодной камеры ТЭ. Полученные в результате сгорания газы направляются на турбину, которая одновременно является приводом воздушного компрессора и генератора для дополнительной выработки электроэнергии.

С целью реализации глубокой утилизации вторичных энергоресурсов в такой установке возможно применение утилизационного котла 8 (УК), обеспечивающего выработку тепловой энергии для собственных нужд судна.

Главными составляющими электрического КПД такой установки является эффективность работы ЭХГ и утилизации теплоты в ГТУ.

КПД ЭХГ определяется по формуле:

$$\eta_{\text{ЭХГ}} = \eta_{\text{T}} \cdot \eta_{\text{U}} \cdot \eta_{\text{Ф}} \cdot \eta_{\text{C}},$$

где η_{T} – термодинамический КПД; η_{U} – КПД по напряжению (U/E_0); $\eta_{\text{Ф}}$ – степень использования топлива в ЭХГ (фарадеевский КПД); η_{C} – КПД, учитывающий потребление электроэнергии на собственные нужды ЭХЭУ (устройства преобразования тока, системы автоматики и управления и т.п.).

Термодинамический КПД:

$$\eta_{\text{T}} = \Delta G / \Delta H,$$

где ΔG и ΔH – изменения энергии Гиббса и энтальпии реакции окисления (низшая теплота сгорания) для метана, подаваемого в ЭХГ.

Термодинамический КПД близок к единице, поэтому далее не учитывается.

Теплотворная способность уходящих газов ЭХГ, поступающих в ГТУ после дожига:

$$\Delta H_{\text{ГТУ}} = \Delta H(1 - \eta_{\text{U}}\eta_{\text{Ф}}).$$

Таким образом, КПД по производству электроэнергии судовой ЭХЭУ можно рассчитать по формуле:

$$\eta_{\text{ЭХЭУ}} = \eta_{\text{U}} \cdot \eta_{\text{Ф}} \cdot \eta_{\text{C}} + (1 - \eta_{\text{U}} \cdot \eta_{\text{Ф}}) \eta_{\text{ГТУ}},$$

где $\eta_{\text{ГТУ}}$ – КПД ГТУ, который учитывает эффективность потребления энергии в тепловой схеме ГТУ.

Все устройства, входящие в ЭХЭУ (кроме ЭХГ), применяются в различных схемах ГТУ и используются для улучшения их энергетических или экологических характеристик. Применение ЭХГ в тепловой схеме приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и дополнительному съёму теплоты через стенки теплоизоляции, что надо учитывать при оценке эффективности утилизации теплоты ЭХГ и значения $\eta_{\text{ГТУ}}$ ЭХЭУ. КПД ГТУ зависит и от других факторов (давления и температуры газа на входе в газовую турбину, типа тепловой схемы ГТУ и др.), поэтому его значение изменяется в широком диапазоне.

Последнее уравнение можно представить в следующем виде:

$$\eta_{\text{ЭХЭУ}} = \eta_{\text{ГТУ}} + U\eta_{\text{Ф}}(\eta_{\text{C}} - \eta_{\text{ГТУ}})/E_0.$$

Так как выработка электроэнергии газотурбинной установки производится за счет теплоты от ЭХГ и в результате сжигания топлива, поступающего в каталитическую камеру сгорания ГТУ, эффективный КПД утилизации теплоты для выработки электроэнергии в ГТУ составит:

$$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{УТ}} = \eta_{\text{ГТУ}}(1 - \eta_{\text{U}}\eta_{\text{Ф}}).$$

Отношение электрических мощностей ГТУ и ЭХГ будет равно отношению их КПД. В итоге получим:

$$k = \frac{P_{\text{ГТУ}}}{P_{\text{ЭХГ}}} = \frac{\eta_{\text{ГТУ}}(1 - \eta_{\text{U}}\eta_{\text{Ф}})}{\eta_{\text{U}} \cdot \eta_{\text{Ф}} \cdot \eta_{\text{C}}} = \eta_{\text{ГТУ}} \left[\left(\frac{E_0}{U\eta_{\text{Ф}}} - 1 \right) / \eta_{\text{C}} \right].$$

Общая мощность электростанции P равна сумме мощностей батарей ТЭ и ГТУ. Соответственно мощности ЭХГ и ГТУ будут равны:

$$P_{\text{ЭХГ}} = P / (1 + k);$$

$$P_{\text{ГТУ}} = Pk / (1 + k).$$

При утилизации тепловой энергии уходящих газов с помощью утилизационного котла возможно использование ЭХЭУ в качестве когенерационной установки. Определение теплового КПД такой установки зависит от ряда факторов: режима работы ЭХЭУ; температуры выходящих из ГТУ газов и др.

Количество теплоты подводимой к УК можно определить по формуле:

$$Q^{\text{УК}} = G_{\text{Г}} \cdot c_{\text{рГ}} \cdot (T_{\text{Г}} - T_{\text{УХ}}),$$

где $G_{\text{Г}}$ – количество отработанных газов в турбине; $c_{\text{рГ}}$ – средняя массовая теплоемкость уходящих газов; $T_{\text{Г}}$ – температура газов на входе в УК; $T_{\text{УХ}}$ – температура уходящих газов из УК ЭХЭУ.

Определим коэффициент полезного действия судовой электростанции с ЭХГ для ТОТЭ со следующими техническими характеристиками:

- рабочая температура: 900...1000 °С;
- топливо: синтез-газ – $\text{H}_2 + \text{CO}$;
- окислитель: воздух;
- плотность тока: 150...1500 мА/см²;
- напряжение ТЭ: 0,6...0,8 В;
- мощность ЭХЭУ: 250 кВт.

В результате проведенных расчетов эффективности судовой электрохимической электростанции КПД ЭХГ на основе ТОТЭ составил 54%, а при использовании газотурбинной установки для дополнительной выработки электрической энергии – 86%. Применением теплового утилизационного контура возможна генерация дополнительной тепловой энергии в размере 28 кВт. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования ЭХГ на основе ТЭ в составе СЭУ с целью повышения эффективности и снижения воздействия на окружающую среду.

Выводы

Внедрение ЭХГ на основе ТЭ в состав СЭУ позволяет значительно снизить эмиссию с судов и повысить эффективность энергоустановки. Предложена методика определения коэффициента полезного действия судовой электрохимической электростанции при использовании утилизационной газотурбинной установки для выработки дополнительной электрической энергии. Предложенные методы расчета КПД электрохимической энергоустановки применимы для любого типа высокотемпературных ТЭ. Результаты, полученные при расчетах могут быть использованы при проектировании электрохимической энергоустановки.

Литература

1. Фиделис, В. Судовые двигатели и экология [Текст] / В. Фиделис // Судостроение. – 2001. – № 5. – С. 29.
2. Горбов, В.М. Енциклопедія суднової енергетики [Текст]: підручник / В.М. Горбов. – Миколаїв:

НУК, 2010. – 624 с. – ISBN 978-966-321-158-9.

3. *Beyond the mist lies clarity* [Text] // *The Naval Architect*. – 2008. – September. – P. 34-36.
4. *Controlling emissions in two-stroke marine diesel* [Text] // *MER*. – 2008. – November. – P. 16-21.
5. *IMO adopts revised emission regulations* [Text] // *MER*. – 2008. – November. – P. 6.
6. *SECAs not lowering marine fuel sulphur content* [Text] // *MER*. – February. – 2008. – P. 19.
7. Возницкий, В.В. Практика использования морских топлив на судах [Текст] / В.В. Возницкий. – С.Пб.: Библиотека судового механика, 2006. – 124 с.
8. Trozzi, C. *Methodologies for estimating future air pollutant emissions from ships: technical report* [Text] / C. Trozzi, R. Vaccaro. – Contract N° ST-96-SC.204. – Rome, 1998. – 32 p.
9. *Towards a reality-based CO2 index* [Text] // *The Naval Architect*. – 2008. – June. – P. 38.
10. Коровин, Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки : научное издание [Текст] / Н.В. Коровин. – М.: МЭИ, 2005. – 208 с.
11. Mench, M. *Fuel Cell Engines* [Text] / M. Mench. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. – 515 p.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Щедролюсов, Херсонский филиал Национального университета кораблестроения, Херсон.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ КОРИСНОЇ ДІЇ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ЕЛЕКТРОХІМІЧНИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ОСНОВІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В.М. Горбов, М.О. Карпов

Приведена принципова схема установки, що використовує високотемпературні паливні елементи, для генерації електричної енергії в суднових умовах, а також метод утилізації вторинних енергетичних потоків за рахунок використання газотурбінної установки для виробництва додаткової електроенергії. Запропонована методика визначення коефіцієнта корисної дії суднової електрохімічної електростанції при використанні утилізаційної газотурбінної установки. Проведений розрахунок коефіцієнта корисної дії гібридної суднової електростанції з утилізаційним котлом.

Ключові слова: коефіцієнт корисної дії, суднова електростанція, електрохімічна энергоустановка, електрохімічний генератор, паливний елемент.

THE EVALUATION OF HIGH TEMPERATURE FUEL CELL SHIP ELECTRIC POWER PLANT EFFICIENCY

V.M. Gorbov, M.A. Karpov

The concept of the high temperature fuel cell power plant for production electricity with the ship requirements and the method of the waste energy utilization by using gas-turbine unit for production additional electricity is described. The methods of the estimating of fuel cell ship electric power plant efficiency with using waste gas turbine unit were proposed. The calculation of the hybrid ship electric power plant with the waste-heat boiler efficiency is calculated.

Key words: efficiency, ship electric power plant, fuel cell power plant, fuel cell system, fuel cell.

Горбов Виктор Михайлович – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: viktor.gorbov@nuos.edu.ua.

Карпов Максим Александрович – аспирант Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: karpoff@i.ua.