

**В. М. ГОРБОВ, В. С. МИТЕНКОВА, М. А. КАРПОВ, О. П. ФЕДОРОВА**

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ**

**АННОТАЦИЯ** Проведен анализ и выполнена оценка эффективности утилизации вторичных энергоресурсов в судовых электрохимических энергетических установках на базе твердотопливных топливных элементов. Получены значения потенциально возможного количества энергетических ресурсов для обеспечения общесудовых потребностей, которые можно получить путем утилизации пара или горячей воды на выходе из топливных элементов. Представлены рекомендации по целесообразности использования различных утилизационных схем в судовых электрохимических установках.

**Ключевые слова:** твердотопливные топливные элементы, электрохимический генератор, электрохимическая энергетическая установка, вторичные энергоресурсы, утилизационная паровая турбина, судовая опреснительная установка, система хозяйственно-бытового водоснабжения, система водяного отопления, теплогенератор, обработка балластных вод.

**V. M. GORBOV, V. S. MITIENKOVA, M. A. KARPOV, O. P. FEDOROVA**

## **ESTIMATION OF WASTE ENERGY UTILIZATION EFFICIENCY IN ELECTROCHEMICAL POWER PLANTS OF TRANSPORT VESSELS**

**ABSTRACT** Analysis of waste energy utilization efficiency in electrochemical power plants based on proton exchange membrane fuel cells for transport vessels is done in this article. Quantitative estimation of waste heat energy flow in electrochemical power plants from 100 kW to 2000 kW operated on pure hydrogen is the main aim of research. Usage of hot water or saturated (or slightly superheated) steam at outlet from fuel cell as heating agent is considered. Total fuel mass and capacity for one-way trip are estimated for electrochemical power plants operated on pure hydrogen, methanol and liquefied natural gas. Potentially-enable quantity of power resources obtained through utilization of heat power and slightly superheated steam is come out. Analysis of these indexes makes possible justification of rational engineering choices at ships' conceptual design and elaborates recommendations of keeping options for different variants of waste energy utilization in electrochemical power plants based on low-temperature fuel cells.

**Key words:** proton exchange membrane fuel cells, electrochemical generator, electrochemical power plant, waste energy, waste treatment steam turbine, ship desalination plant, domestic water supply system, water heating system, heat generator, ballast water treatment.

### **Введение**

Электрохимические энергоустановки (ЭХЭУ) на базе топливных элементов (ТЭ) на сегодняшний день применяются не только для стационарных электростанций, но и на транспорте, в том числе и для различных типов судов в качестве основных или вспомогательных источников энергии вместо традиционных дизельных двигателей.

Судовые энергетические установки (СЭУ) на базе топливных элементов для военных кораблей и гражданских судов разрабатываются и производятся в США и ряде европейских стран. Для внедрения водородных топливных элементов на морском транспорте в Европе создан консорциум *FellowSHIP (Fuel Cells for Low Emissions Ships)*. В консорциум *FellowSHIP* входят классификационное общество *Det Norske Veritas (DNV)*, компании *Eidsvik Offshore*, *MTU CFC Solutions*, *Vik-Sandvik* и *Wärtsilä Automation Norway*. Топливные элементы в составе энергетических установок применяются на подводных лодках, рыболовецких судах, паромов, пассажирских судах внутреннего района плавания, судах обслуживания и др. [1–3].

Основными преимуществами применения ТЭ на судах по сравнению с дизельными двигателями являются:

экологичность, высокий КПД, компактные размеры и более низкий уровень шума.

К проблемам применения ТЭ можно отнести: медленно растущую инфраструктуру, связанную с бункеровкой водорода в портах; сложность хранения данного топлива в судовых условиях и его более высокую стоимость по сравнению с нефтяными топливами; наличие значительного количества тепловыделений при работе электрохимической установки. Решение последней проблемы требует использования утилизационного оборудования, что, с одной стороны, усложняет состав установки и увеличивает ее стоимость, с другой стороны, позволяет повысить коэффициент использования теплоты СЭУ и получить дополнительную экономию топлива.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Современные технологии позволяют создавать на базе ТЭ достаточно мощные энергоустановки. Самая большая в мире на сегодняшний день ЭХЭУ введена в эксплуатацию в *Hwasung City* (Южная Корея). Установка, работающая на водороде, общей мощностью в 59 МВт состоит из 21

электрохимического генератора по 2,8 МВт каждый [4].

В отличие от энергетических установок на базе тепловых двигателей внутреннего и внешнего сгорания «выхлопом» ТЭ являются не уходящие газы, а  $H_2O$  (в жидком или газообразном виде) или парогазовая смесь (чаще всего  $H_2O$  и  $CO_2$ ). В зависимости от типа топливных элементов температура «выхлопа» может составлять от 40 °С до 1100 °С [5]. Количество продуктов реакции в ТЭ прямо пропорционально выходной электрической мощности, при достаточном количестве «выхлопа» его целесообразно будет утилизировать.

Перегретый пар в смеси с углекислым газом на выходе из ТЭ можно использовать для нужд самой установки для протекания процесса паровой конверсии углеводородных топлив, которые являются источником синтез-газа. Перед подачей в паровой риформинг парогазовая смесь подается в камеру дожигания. Подобная схема утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) представлена в работе [6]. Оценка теплового баланса ЭХЭУ на базе твердодополномерных ТЭ с учетом влияний входных параметров на температуру продуктов реакции приведена в работе [7–8].

Ряд работ посвящен исследованию эффективности создания когенерационных установок на базе ЭХЭУ, включающих в свой состав каталитическую камеру сгорания для дожигания горючих компонентов парогазовой смеси с последующей подачей их в приводную газовую турбину. Для глубокой утилизации теплоты в подобных схемах дополнительно предусматриваются утилизационные котлы или регенеративные теплообменные аппараты (ТОА) [8–10].

Особенностью утилизационных схем в судовых условиях является то, что в качестве вторичных энергоресурсов для технических и хозяйственно-бытовых нужд нашли применение насыщенный (или слабо перегретый) пар и горячая вода, при этом отсутствует потребность в перегретом паре (кроме паротурбоходов, доля которых в современном мировом флоте незначительна) [10].

Следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют комплексные исследования, посвященные оценке целесообразности и эффективности применения утилизационных схем, традиционных для судовых энергетических установок с тепловыми двигателями, в составе ЭХЭУ, что обуславливает **актуальность** данной работы.

### Цель работы

Оценка эффективности использования вторичных энергоресурсов ЭХЭУ для различных вариантов утилизационных схем с учётом специфики судовых потребностей.

### Изложение основного материала

Топливные элементы – разновидность электрохимических элементов, существенным преимуществом которых 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. Схема обеспечения реагентами ТЭ похожа на схемы топливоснабжения тепловых двигателей, но при этом достигается более высокий КПД за счет прямого преобразования химической энергии топлива в электрическую [11].

Основными продуктами реакции ЭХЭУ на основе топливных элементов в зависимости от рабочей температуры являются горячая вода, водяной пар (насыщенный или перегретый), парогазовая смесь. Наряду с этим, из топливных элементов отводятся непрореагировавшие синтез-газ, водород, воздух или кислород (если окислитель подается в чистом виде), температура которых также зависит от типа топливных элементов. Образовавшиеся энергетические потоки можно использовать для технологических нужд самой электрохимической энергоустановки или утилизировать (полностью или частично).

Если ЭХЭУ установка работает на чистом водороде, «выхлоп» будет состоять только из  $H_2O$ , при подаче синтез-газа – из  $H_2O$  и  $CO_2$ . Второй вариант характерен для использования в качестве источника водорода углеводородных топлив, для судовых условий это – метанол, природный газ или дизельное топливо [11].

Наиболее перспективные варианты утилизации получаемой низко- и высокопотенциальной энергии в судовых условиях:

- газовые смеси, состоящие из непрореагировавших компонентов, можно напрямую или с предварительным дожиганием в каталитических камерах сгорания подавать в приводные газовые турбины компрессоров или в газотурбогенераторы для выработки дополнительного количества электрической энергии;
- парогазовую смесь и перегретый пар можно подавать в риформер топлива, если используется технология паровой конверсии углеводородных топлив;
- насыщенный или слабо перегретый водяной пар можно направлять в паровые приводы судовых насосов (применимо преимущественно на танкерах), утилизационные паровые турбины для привода электрогенераторов или теплообменные аппараты для подогрева тяжёлого топлива либо нагрева рабочей среды в системах парового или водяного отопления;
- горячую воду можно использовать для опреснения морской воды в адиабатных опреснительных установках, для подогрева горячей воды хозяйственно-бытового назначения в водоводяных

теплообменниках или воздуха в системах воздушного отопления, для обработки балластных вод, используя технологию подогрева.

Наиболее перспективными для использования в судовых условиях являются ЭХЭУ на базе твердооксидных топливных элементов (*solid-oxide fuel cells*) или твердоотопливных ТЭ (*proton exchange membrane fuel cells*), как обладающие высокой энергетической эффективностью при сравнительно небольших массогабаритных показателях, что особенно важно для судовых условий [12].

Температура продуктов реакции на выходе из твердооксидных топливных элементов составляет (600–1000) °С, твердоотопливных низкотемпературных – (60–90) °С, твердоотопливных высокотемпературных – (150–250) °С при давлении пара на выходе до 0,5 МПа [5].

В данной статье рассмотрены варианты утилизации ВЭР ЭХЭУ на базе высоко- и низкотемпературных твердоотопливных топливных элементов, работающих на водороде и входящих в состав судовой энергетической установки (СЭУ). В зависимости от типа судна и требуемой суммарной установленной мощности СЭУ, топливные элементы могут частично или полностью заменять дизельные двигатели (главные и вспомогательные) в составе импульсивной установки или судовой электростанции.

Утилизация тепловой энергии ЭХЭУ в виде насыщенного или слабо перегретого пара позволит снизить требуемую тепловую мощность судовых котлов, что приведет к упрощению схем и снижению расхода топлива. В отдельных случаях это позволит отказаться от установки утилизационных и вспомогательных котлов, если вырабатываемой ЭХЭУ тепловой энергии достаточно для покрытия судовых потребностей.

Утилизация тепловой энергии ЭХЭУ в виде горячей воды позволит отказаться от электрических подогревателей, которые широко используются на небольших судах и судах с короткой рейсовой линией для подогрева воды для общесудовых нужд, снизив тем самым расход топлива за счет снижения потребления электрической энергии.

Для оценки целесообразности реализации тех или иных утилизационных схем на начальном этапе необходимо провести количественную и качественную оценку вторичных энергоресурсов (ВЭР). В данном исследовании приведены результаты количественной оценки ВЭР электрохимических энергоустановок с ТЭ мощностью от 100 до 2000 кВт, работающими на чистом водороде с единственным продуктом реакции –  $H_2O$  (в жидком состоянии с температурой (60–90) °С или в виде насыщенного или слабо перегретого пара с температурой (150–250) °С).

В соответствии с техническими характеристиками, заявляемыми производителями, при расчетах напряжение одной ячейки ТЭ принималось 0,8 В (при параллельной установке ячеек в батарею мощ-

ность и напряжение суммируются), коэффициенты использования водорода и кислорода принимались 0,8 и 0,6 соответственно. Расчет количества образующегося  $H_2O$  проводился на основе стехиометрических коэффициентов химического уравнения, содержание воды в воздухе, подаваемом в ТЭ, не учитывалось, плотность воздуха принималась при температуре 20 °С [5, 11].

Количественная оценка показала, что для ЭХЭУ на базе твердоотопливных ТЭ мощностью от 100 до 2000 кВт требуемая подача водорода составляет от 5,9 до 117,5 кг/ч, воздуха – от 220 до 4435 м<sup>3</sup>/ч (рис. 1–2). Удельная масса  $H_2O$  (в виде воды или пара) на выходе составляет от 42 до 846 кг/ч (рис. 3).

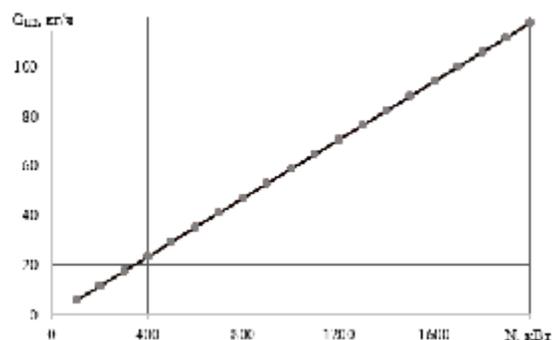


Рис. 1 – Зависимость расхода водорода от мощности ЭХЭУ

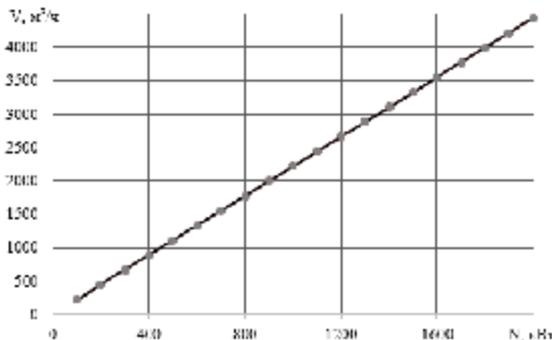


Рис. 2 – Зависимость расхода воздуха от мощности ЭХЭУ

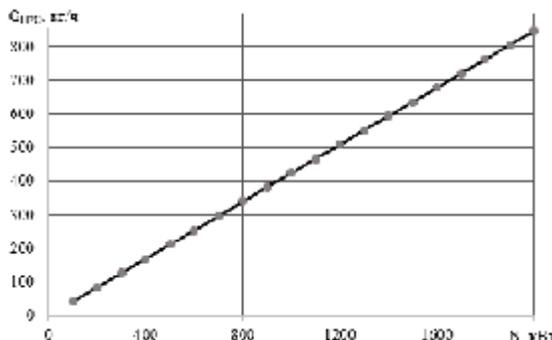


Рис. 3 – Количество образующейся воды/пара в зависимости от мощности ЭХЭУ

Зная подачу водорода можно определить массу и объем запасов топлива. На рис. 4–5 приведена укрупнённая оценка данных параметров (при одинаковой продолжительности рейса). Для сравнения рассматривались варианты работы ЭХЭУ не только на водороде, но и на метаноле и сжиженном природном газе (СПГ). Определение объёма требуемых запасов топлива производилось для разных способов хранения водорода – в сжиженном виде и металлгидридном (хранение в виде соединений  $H_2$  с металлами). Вариант хранения  $H_2$  в сжатом виде под давлением не рассматривался, т.к. полезная масса топлива составляет не более 3 % от массы баллона, что в условиях ограниченного пространства на судах делает нецелесообразным использование его в таком виде.

При использовании водорода в ЭХЭУ масса запасов топлива (без учета массы емкостей для его хранения) в 2 раза меньше, чем масса сжиженного природного газа (при давлении, близком к атмосферному и температуре  $-162\text{ }^\circ\text{C}$ ) и в 5,3 раза меньше, чем при использовании метанола в качестве источника  $H_2$  (рис. 4). Сравнение объёма запасов топлива на рейс (рис. 5) показало, что данный параметр наименьший при использовании в качестве источника водорода для топливных элементов сжиженно-природного газа. Для получения тех же мощностей требуется объем метанола на 65 % больше, чем СПГ, металлгидридного водорода – в 2,5 раза больше, сжиженного водорода – в 3,5 раза больше. Использование сжатого водорода нецелесообразно, поскольку для получения эквивалентной мощности в ЭХЭУ его требуемый объем в 16 раз выше, чем при применении СПГ, в 4,5 и 6,5 раз больше чем для металлгидридного и сжиженного, соответственно (при одинаковой массе).

На стадии концептуального проектирования СЭУ необходимо учитывать объем пространства на судне, занимаемый топливными емкостями со вспомогательным оборудованием, необходимым, например, для поддержания низких температур в криогенных танках со сжиженными газами.

Температура пара на выходе в ЭХЭУ на базе высокотемпературных твердотопливных топливных элементов достигает  $250\text{ }^\circ\text{C}$  при давлении до 5 бар [5]. При использовании рабочего тела с такими параметрами в утилизационных турбогенераторах (УТГ) с конечным давлением отработавшего пара 0,01 МПа дополнительно можно получить до 50 кВт электрической энергии (рис. 6), что составляет 2,5 % от электрической мощности ЭХЭУ.

С учетом того, что минимальная мощность серийно производимых паровых микротурбин в большинстве случаев превышает 50 кВт, использовать УТГ целесообразно при возможности получения минимум 75 кВт дополнительной электрической мощности. На такие значения рассчитаны, например, паровые микротурбины компании *Siemens* серии *SST-040*, включающие агрегаты от 75 до 300 кВт.

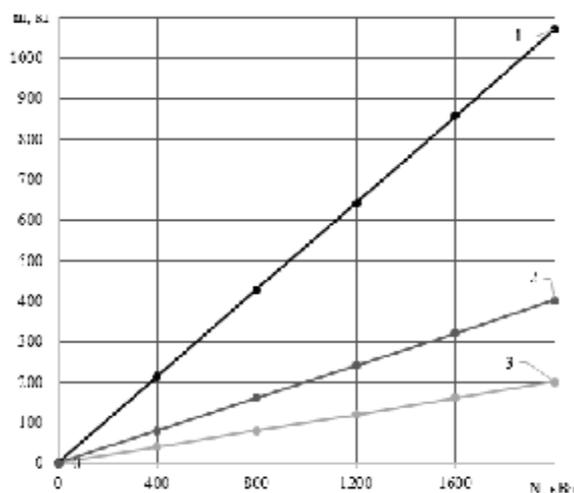


Рис. 4 – Зависимость массы запасов топлива на рейс от мощности ЭХЭУ: 1 – метанол; 2 – СПГ; 3 – водород

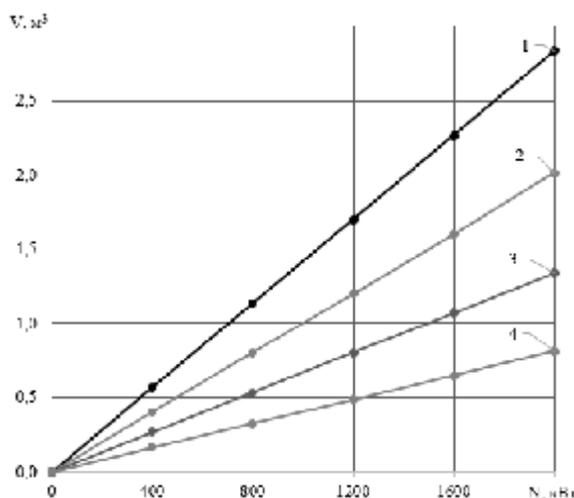


Рис. 5 – Зависимость объема запасов топлива на рейс от мощности ЭХЭУ: 1 – сжиженный водород; 2 – металлгидридный водород; 3 – метанол; 4 – сжиженный природный газ

Включение УТГ усложняет схему СЭУ, что нецелесообразно для судов с короткой рейсовой линией, на которых в большинстве случаев и применяются ТЭ [1–3].

Оценка производительности адиабатных опреснительных установок с давлением 30 кПа оценивалась при температуре теплоносителя (горячей воды после ТЭ) на входе  $90\text{ }^\circ\text{C}$  согласно методике, изложенной в [13]. Как видно из рис. 7 за счёт утилизации ВЭР в ЭХЭУ мощностью до 2 МВт можно получить до 440 кг пресной воды в сутки. Опреснительные установки обычно предусматриваются на судах с автономностью плавания свыше 5 суток (I категория согласно классификации «Санитарных правил и норм для морских судов»). Минимальные нормы водопотребления на судах I категории составляют 150 л/сутки (включая воду на питьевые и

хозяйственно-бытовые нужды) [14, 15]. Установка ЭХЭУ на базе твёрдотопливных топливных элементов суммарной мощностью 2 МВт за счёт утилизации ВЭР даст возможность обеспечить суточные потребности в пресной воде только для трёх человек.

При использовании воды после ТЭ в качестве греющей среды в водоводяном теплообменнике можно получить до 11 т/сутки горячей воды (рис. 8), что полностью удовлетворяет суточные потребности в воде для хозяйственно-бытовых нужд на грузовых судах с длинной рейсовой линией или для судов с большим количеством пассажиров при их кратковременном пребывании на борту (паромы), учитывая минимальные нормы потребления горячей воды для судов различных категорий [14, 15].

Также ВЭР высокотемпературных ЭХЭУ на твёрдотопливных топливных элементах можно использовать для подогрева высоковязких нефтяных топлив (вариант судовой энергетической установки, когда главный двигатель – дизельный, а ЭХЭУ входят в состав судовых электростанций вместо одного или нескольких дизель-генераторов). Оценка данного варианта утилизации согласно методике, приведённой в [16], показала, что таким образом можно обеспечить подогрев от 12 до 250 т/сутки тяжёлого топлива (рис. 9). Данный расход соответствует наличию на судне дизельных двигателей суммарной установленной мощностью от 3 до 58 МВт при соответственной мощности ЭХЭУ от 100 до 2000 кВт.

Ещё одним вариантом утилизации ВЭР на судне является использование «выхлопа» ЭХЭУ в качестве греющей среды в теплогенераторах водяной системы отопления на судне. Используя зависимости, приведенные в [17, 18] можно провести укрупнённую оценку производительности системы водяного отопления (для транспортных судов со стальными корпусами при температурах наружного воздуха в диапазоне  $-15 \dots -25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с привязкой к количеству людей, для обогрева которых будет достаточно рассчитанной мощности. Потенциала ВЭР низкотемпературных топливных элементов достаточно, чтобы обеспечить тепловую мощность системы водяного отопления (со средней температурой  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ) достаточную для обогрева от 9 до 189 человек при мощности ЭХЭУ от 100 до 2000 кВт (рис. 10).

Перспективным вариантом утилизации теплоты для малых судов со сравнительно небольшим объемом балласта является использование ВЭР для обеззараживания балласта путем нагрева в соответствии с требованиями «Конвенции по контролю и управлению балластными водами и осадками» [19]. Исследования показали, что поддержание температуры забортной воды на уровне  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 4 ч приводит к уничтожению 95 % микроорганизмов [20]. Для эффективного уничтожения кишечной палочки, содержание которой также нормируется кон-

венцией, необходимо нагревать забортную воду до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 60 с [21].

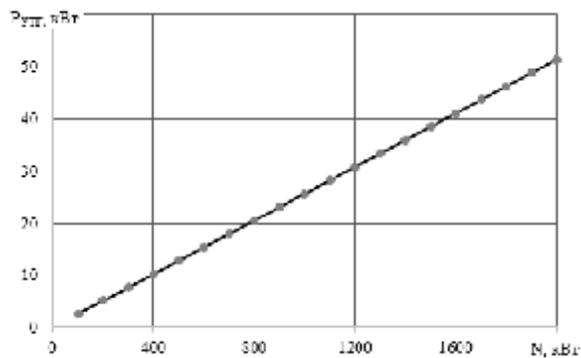


Рис. 6 – Потенціальне количество електроенергії, яке можна отримати в УПТ

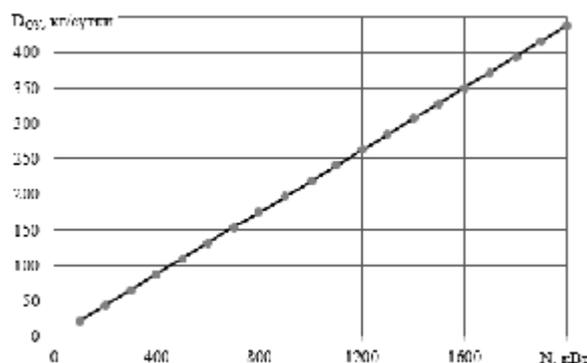


Рис. 7 – Потенціальний суточний об'єм прісної води, який можна отримати в адиабатних опреснительних установках

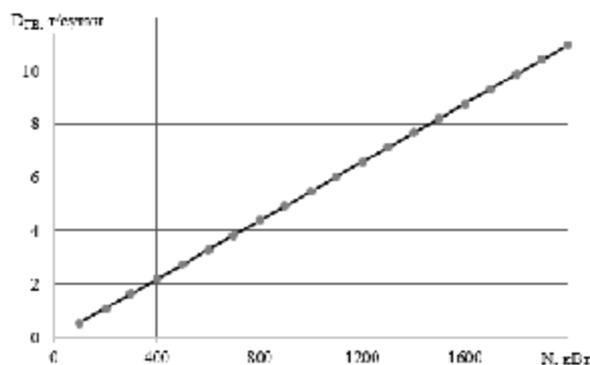


Рис. 8 – Потенціальний об'єм гарячої води, який можна отримати в водоводяних теплообмінних апаратах

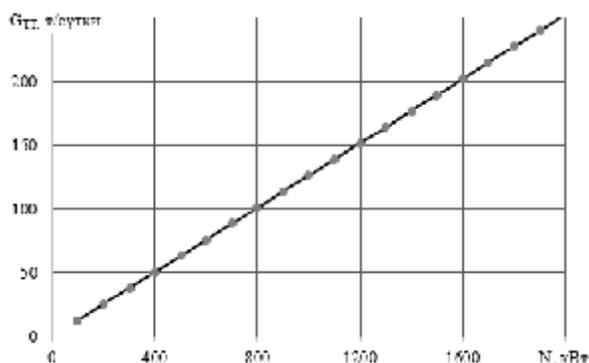


Рис. 9 – Потенціальний об'єм важкого палива, яке можна підогреть, використовуючи ВЭР ЭХЭУ

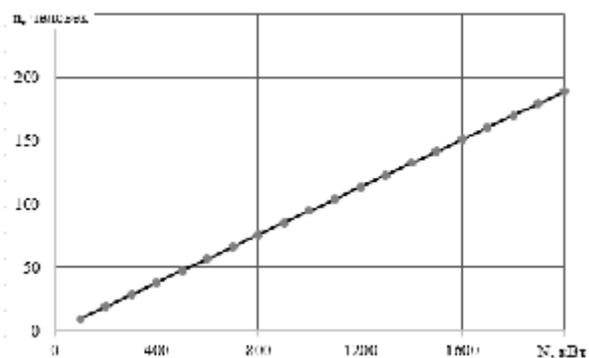


Рис. 10 – Кількість людей, комфортні умови для яких може забезпечити система водяного опалення з використанням ВЭР ЭХЭУ в теплогенераторі

### Выводы

При применении на судне ЭХЭУ на базе низкотемпературных ТЭ в качестве основного способа утилизации образующейся горячей воды целесообразно выбирать схемы, включающие подогрев горячей воды на хозяйственно-бытовые нужды в водоводяных теплообменных аппаратах или в теплогенераторах в составе водяной системы отопления. Использование воды в качестве теплоносителя в адиабатных опреснительных установках не позволит обеспечить потребности экипажа в пресной воде согласно существующим нормам водопотребления на судах.

Утилизация высокотемпературных ВЭР в виде насыщенного или слабо перегретого пара целесообразна для подогрева тяжелого топлива в комбинированных СЭУ, включающих дизельные двигатели и топливные элементы. Установка УТГ нецелесообразна, т.к. позволяет получить не более 50 кВт дополнительной энергии при использовании ВЭР установки мощностью 2 МВт.

### Список литературы

1 **Bård, M. H.** Fuel cell technology for ferries [Electronic resource] / **M. H. Bård** // MARINTEK paper at the

IMTA conference Gold Coast, Australia, October 2002. – Mode of access : [http://www.sintef.no/globalassets/upload/marintek/pdf-filer/publications/fuel-cell-technology-for-ferries\\_bmh.pdf](http://www.sintef.no/globalassets/upload/marintek/pdf-filer/publications/fuel-cell-technology-for-ferries_bmh.pdf). – Заглавие с экрана. – 01.01.2016.

2 Fuel cell ship in the real world [Text] // The Naval Architect. – 2008. – November. – P. 56–57.

3 Viking Lady tests fuel cell power [Text] // Marine Power & Propulsion (a one-year subscription to The Naval Architect). – 2009. – P. 30.

4 **Overton, T.** World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea [Electronic resource] / **T. Overton** // POWER Business & Technology for the Global Generation Industry Since 1882. – Дата опублікування 25.02.2014. – Mode of access: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/>. – Заглавие с экрана. – 01.12.2015.

5 **By EG&G Technical Services, Inc.** Fuel Cell Handbook (Seventh Edition) [Electronic resource] // U. S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory. – November 2004. – Morgantown, West Virginia 26507-0880. – Mode of access : <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/coal/energy%20systems/fuel%20cells/FCHandbook7.pdf>. – Заглавие с экрана. – 02.11.2015.

6 **Lee, T. S.** Design and optimization of a combined fuel reforming and solid oxide fuel cell system with anode off-gas recycling [Text] / **Tae Seok Lee, J. N. Chung, Yen-Cho Chen** // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52. – P. 3214–3226. – ISSN 0196-8904. – doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2011.05.009>

7 **LiMing, C.** Process modeling of fuel cell vehicle power system [Text] / **C. LiMing, ZhaoJia LIN, Ma ZiFeng** // Chinese Science Bulletin. – 2009. – Vol. 54, № 6. – P. 972–977. – ISSN 2095-9281 (online).

8 **Chaney, Larry J.** Fuel Cell/Micro-Turbine Combined Cycle [Electronic resource] / **Larry J. Chaney, Mike R. Tharp, Tom W. Wolf** [et al.] // Northern Research and Engineering Corporation. – December 1999. – Mode of access : <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/802823>. – Заглавие с экрана. – 02.11.2015. – doi: 10.2172/802823.

9 **Orecchini, F.** Process Simulation of a Neutral Emission Plant Using Chestnut's Coppice Gasification and Molten Carbonate Fuel Cells [Text] / **F. Orecchini, E. Enrico Bocci, A. Di Carlo** // Journal of Fuel Cell Science and Technology. – 2008. – May. – Vol. 5. – P. 1–9.

10 **Артемов, Г. А.** Суднові енергетичні установки [Текст] : навч. посібник / **Г. А. Артемов, В. М. Горбов.** – Миколаїв : УДМУТ, 2002. – 353 с.

11 **Коровин, Н. В.** Топливные элементы и электрохимические энергоустановки [Текст] / **Н. В. Коровин.** – М. : МЭИ, 2005. – 208 с.

12 **Горбов, В. М.** Состояние и перспективы применения топливных элементов на судах [Текст] / **В. М. Горбов, М. А. Карпов** // Суднова енергетика : стан та проблеми : матер. IV Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв : НУК, 2009. – С. 40–43.

13 **Коваленко, В. Ф.** Судовые водоопреснительные установки [Текст] / **В. Ф. Коваленко, Г. Я. Лукин.** – Ленинград : Судостроение, 1970. – 304 с.

14 СанПиН 2.5.2-703-98 Санитарные правила и нормы для водного транспорта [Текст]. – М. : ИнтерСЭН, 1999. – 139 с.

- 15 Гуськов, М. Г. Санитарные системы морских судов [Текст] : учеб. пособие / М. Г. Гуськов [и др.] – Ленинград : ЛКИ, 1989. – 112 с.
- 16 Копачинский, П. А. Судовые охладители и подогреватели жидкостей [Текст] / П. А. Копачинский, В. П. Тараскин. – Ленинград : Судостроение, 1968. – 245 с.
- 17 Макаров, В. Г. Судовые системы микроклимата. Вентиляция и отопление помещений [Текст] : учеб. пособие / В. Г. Макаров, Л. С. Ситченко, П. И. Плесевилюс. – С.-Петербург : ГМТУ, 1993. – 125 с.
- 18 Хордас, Г. С. Расчеты общесудовых систем [Текст] : справ. / Г. С. Хордас. – Ленинград : Судостроение, 1983. – 440 с.
- 19 BWT on Course for Compliance [Text] // The Naval Architect. – 2015. – May. – P. 46–48.
- 20 Acomi, N. Using Heat Treatment of Ballast Water for Killing Marine Microorganisms [Text] / N. Acomi, S. Ghilã // Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium. – Vienna, 2012. – Vol. 23, No. 1. – P. 1115–1118.
- 21 Yanran Cao Ballast Water Analysis and Heat Treatment Using Waste Heat Recovery Systems On board Ships [Electronic resource] / Yanran Cao, Vilmar Æsøy, Anne Stene. – Colorado : IHS Maritime, 2014. – Mode of access : [http://www.scs-europe.net/dlib/2014/ecms14papers/svt\\_ECMS2014\\_0058.pdf](http://www.scs-europe.net/dlib/2014/ecms14papers/svt_ECMS2014_0058.pdf). – Заглавие с экрана. – 02.11.2015.
- 7 LiMing, C., ZhaoJia LIN and Ma ZiFeng (2009), <sup>2</sup>Process modeling of fuel cell vehicle power system<sup>2</sup>, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 54, no. 6, pp. 972–977, o-ISSN 2095-9281.
- 8 Chaney, Larry J., Tharp, Mike R. and Wolf, Tom W. [et al.] (1999), <sup>2</sup>Fuel Cell/Micro-Turbine Combined Cycle<sup>2</sup>, *Northern Research and Engineering Corporation*, December 1999, available at: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/802823> (Accessed 02 November 2015), doi: 10.2172/802823.
- 9 Orecchini, F., Bocci, E. Enrico and Carlo, A. Di (2008), <sup>2</sup>Process Simulation of a Neutral Emission Plant Using Chestnut's Coppice Gasification and Molten Carbonate Fuel Cells<sup>2</sup>, *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, May, Vol. 5, pp. 1–9.
- 10 Artemov, G. A. and Gorbov V. M. (2002), Sudnovi energetychni ustanovky [Ship power plants], UDMTU, Nikolaev, Ukraine.
- 11 Korovin, N. V. (2005), Toplivnye jelementy i jelektrohimiicheskie jenergoustanovki [Fuel cells and electrochemical power plants], MJeI, Moscow, Russia.
- 12 Gorbov, V. M. and Karpov, M. A. (2009), <sup>2</sup>Sostojanie i perspektivy primenenija toplivnyh jelementov na sudah [State and prospective of fuel cells usage on ships]<sup>2</sup>, *Sudnova energetyka : stan ta problemy : mater. IV Mizhnar. nauk.-tehn. konf [Marine engineering: state and problems]*, NUK, Nikolaev, Ukraine.
- 13 Kovalenko, V. F. and Lukin, G. Ja. (1970), Sudovye vodoopresnitel'nye ustanovki [Marine desalination plant], [Marine desalination plant] Sudostroenie, Leningrad, Russia.
- 14 (1999), SanPiN 2.5.2-703-98 Sanitarnye pravila i normy dlja vodnogo transporta [Sanitary Rules and Regulations for water transport], InterSJeN, Moscow, Russia.
- 15 Gus'kov, M. G. et al. (1989), Sanitarnye sistemy morskih sudov, LKI, Leningrad.
- 16 Kopachinskij, P. A. and Taraskin, V. P. (1968), Sudovye ohladiteli i podogrevateli zhidkostej [Marine coolers and heaters for liquids], Sudostroenie, Leningrad, Russian.
- 17 Makarov, V. G., Sitchenko, L. S. and Plesevichjus, P. I. (1993), *Sudovye sistemy mikroklimata. Ventiljacija i otoplenie pomeshhenij* [Marine microclimate systems. Ventilation and air conditioning], GMTU, St. Petersburg, Russia.
- 18 Hordas, G. S. (1983), *Raschety obshhesudovyh sistem* [Ship piping systems design], Sudostroenie, Leningrad, Russia.
- 19 (2015), <sup>2</sup>BWT on Course for Compliance<sup>2</sup>, *The Naval Architect*, May, pp. 46–48.
- 20 Acomi, N. and Ghilã, S. (2012), <sup>2</sup>Using Heat Treatment of Ballast Water for Killing Marine Microorganisms<sup>2</sup>, *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium, Vienna, 2012*, vol. 23, no. 1, pp. 1115–1118.
- 21 Yanran Cao, Vilmar Æsøy, Anne Stene (2014), *Ballast Water Analysis and Heat Treatment Using Waste Heat Recovery Systems On board Ships*, IHS Maritime, Colorado available at: [http://www.scs-europe.net/dlib/2014/ecms14papers/svt\\_ECMS2014\\_0058.pdf](http://www.scs-europe.net/dlib/2014/ecms14papers/svt_ECMS2014_0058.pdf) (Accessed 02 November 2015)

#### Bibliography (transliterated)

- 1 Bård, M. H. (2002), <sup>2</sup>Fuel cell technology for ferries<sup>2</sup>, MARINTEK paper at the IMTA conference Gold Coast, Australia, October 2002, available at: [http://www.sintef.no/globalassets/upload/marintek/pdf-filer/publications/fuel-cell-technology-for-ferries\\_bmh.pdf](http://www.sintef.no/globalassets/upload/marintek/pdf-filer/publications/fuel-cell-technology-for-ferries_bmh.pdf) (Accessed 01 January 2016).
- 2 (2008), <sup>2</sup>Fuel cell ship in the real world<sup>2</sup>, *The Naval Architect*, November, pp. 56–57.
- 3 (2009), <sup>2</sup>Viking Lady tests fuel cell power<sup>2</sup>, *Marine Power & Propulsion (a one-year subscription to The Naval Architect)*, pp. 30.
- 4 Overton, T. (2014), <sup>2</sup>World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea<sup>2</sup>, *POWER Business & Technology for the Global Generation Industry Since 1882*, 25 February 2014, available at: <http://www.powermag.com/worlds-largest-fuel-cell-plant-opens-in-south-korea/> (Accessed 01 December 2015).
- 5 By EG&G Technical Services, Inc. (2004), <sup>2</sup>Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)<sup>2</sup>, U. S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, November 2004, Morgantown, West Virginia 26507-0880, available at: <https://www.netl.doe.gov/File%20Library/research/coal/energy%20systems/fuel%20cells/FCHandbook7.pdf>. – Заглавие с экрана (Accessed 02 November 2015).
- 6 Tae Seok Lee, J. N. Chung and Yen-Cho Chen (2011), <sup>2</sup>Design and optimization of a combined fuel reforming and solid oxide fuel cell system with anode off-gas recycling<sup>2</sup>, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 3214–3226, ISSN 0196-8904. – doi: 10.1016/j.enconman.2011.05.009.

## Сведения об авторах (About authors)

**Горбов Виктор Михайлович** – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: [viktor.gorbov@nuos.edu.ua](mailto:viktor.gorbov@nuos.edu.ua).

**Gorbov Viktor** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Professor, Head of the Marine and Stationary Power Plants Department, National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolaev, Ukraine.

**Митенкова Вера Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: [vera.mitenkova@gmail.com](mailto:vera.mitenkova@gmail.com), ORCID 0000-0001-5486-8559.

**Mitienkova Vira** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, the Marine and Stationary Power Plants Department, National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolaev, Ukraine.

**Карпов Максим Александрович** – старший преподаватель Херсонского филиала Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина, e-mail: [karpoff@i.ua](mailto:karpoff@i.ua).

**Karpov Maxim** – senior lector, the Ship Machine-building and Power-engineering Department, Kherson's affiliate of National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Kherson, Ukraine.

**Федорова Ольга Павловна** – магистрант кафедры судовых и стационарных энергетических установок Национального университета кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина.

**Fedorova Olga** – master's student, the Marine and Stationary Power Plants Department, National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Nikolaev, Ukraine.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Горбов, В. М.** Оценка эффективности утилизации вторичных энергоресурсов в электрохимических энергоустановках транспортных судов [Текст] / **В. М. Горбов, В. С. Митенкова, М. А. Карпов, О. П. Федорова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 17–24. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.02.

*Please cite this article as:*

**Gorbov, V., Mitienkova, M., Karpov, M. and Fedorova, O.** (2016), <sup>2</sup>Estimation of waste energy utilization efficiency in electrochemical power plants of transport vessels<sup>2</sup>, *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 17–24, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.02.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Горбов, В. М.** Оцінка ефективності утилізації вторинних енергоресурсів у електрохімічних енергоустановках транспортних суден [Текст] / **В. М. Горбов, В. С. Митенкова, М. А. Карпов, О. П. Федорова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 17–24. – Бібліогр.: 21 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.02.

**АНОТАЦІЯ.** Проведено аналіз та виконана оцінка ефективності утилізації вторинних енергоресурсів у суднових електрохімічних енергетичних установках на базі твердопаливних паливних елементів. Отримано значення потенційно можливої кількості енергетичних ресурсів для забезпечення загальносуднових вимог, що можна отримати шляхом утилізації пари або гарячої води на виході з паливних елементів. Представлено рекомендації щодо доцільності використання різних утилізаційних схем в суднових енергетичних установках.

**Ключові слова:** твердопаливні паливні елементи, електрохімічний генератор, електрохімічна енергетична установка, вторинні енергоресурси, утилізаційна парова турбіна, суднова опріснювальна установка, система господарчопобутового водопостачання, система водяного опалення, теплогенератор, обробка баластних вод.

*Поступила (received) 17.01.2016*