

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572

ENERGY EFFICIENCY OF AIR-INDEPENDENT MICRO-GAS-TURBINE PLANT OF COMPLEX CYCLES FOR THE UNDERWATER EQUIPMENT

V. T. Matviienko¹, V. A. Ocheretianyi², A. V. Dologlonyan³

¹—Nakhimov Black Sea Naval School, Sevastopol, Russian Federation

²—Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

³— Institute of nature and technical systems, Sevastopol, Russian Federation

The underwater equipment will be played an essential role in investigation, arrangement both further operation of fields, and minerals transportation, on the Arctic shelf with severe ice conditions. Possibilities of the underwater equipment substantially depend on power equipment to carry out both transport, and technological functions. Among different types of power stations the closed-cycle gas turbine plants (CCGTP) with big power density are perspective for these purposes. The characteristics analysis of CCGTPs operating cycles of traditional schemes is made and CCGTP with heat recovery is selected as basic one as the most economical in comparison with CCGTP of a simple cycle and structurally preferable for the micro-gas-turbine unit using organic fuel in a single-circuit scheme with oxygen as an oxidizer. The methods of complicating the CCGTP cycles are considered in the paper for the purpose of further increasing the installation profitability and, as a result, more rational use of the oxidizer stock determining duration of underwater navigation. The direction of deeper utilization of warmth of the CCGTP exhaust gases by means of their partial transformation into mechanical work in the overexpansion turbine is chosen. The turbo-compressor utilizer (TCU) consisting of the overexpansion turbine driving the pressurizing compressor and cooler of gases between them joins the CCGTP exhaust. The next way for increasing the efficiency of the CCGTP with heat recovery and TCU is to transfer warmth regenerator in the TCU behind the overexpansion turbine. It is established that profitability of CCGTP with TCU and heat recovery is 15–25% higher in comparison with the basic CCGTP with heat recovery, at the same time, the power density increases by an average of 1,5 times. Also profitability of CCGTP with TCU and heat recovery has an intermediate position without power density increase. In terms of profitability and due to lower values of pressure ratio in the microturbine compressor it is reasonable to apply CCGTP with TCU and heat recovery.

Keywords: closed-cycle gas turbine plant, microturbine, heat recovery, overexpansion turbine, turbo-compressor utilizer.

For citation:

Matviienko, Valerii T., Vladimir A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Energy efficiency of air-independent micro-gas-turbine plant of complex cycles for the underwater equipment.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 565–572. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572.

УДК 621.438

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК СЛОЖНЫХ ЦИКЛОВ ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

В. Т. Матвеевко¹, В. А. Очеретяный², А. В. Дологлонян³

¹— Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация

²— ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

³— ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь, Российская Федерация

Отмечается, что в связи с тяжелыми ледовыми условиями на Арктическом шельфе в разведке, обустройстве, эксплуатации месторождений и транспортировке полезных ископаемых существенную роль будет играть подводная техника, обладающая необходимой энергетической оснащенностью для обеспечения транспортных и технологических функций. Среди различных типов энергоустановок для этих целей перспективными являются замкнутые газотурбинные установки, обладающие большой удельной мощностью. Выполнен анализ характеристик рабочих циклов замкнутых газотурбинных установок традиционных схем, в качестве базовой выбрана замкнутая газотурбинная установка с регенерацией теплоты как наиболее экономичная по сравнению с ЗГТУ простого цикла и конструктивно предпочтительная для микрогазотурбинной установки, работающей на органическом топливе по одноконтурной схеме с кислородом в качестве окислителя. Рассмотрены методы усложнения циклов замкнутых газотурбинных установок с целью дальнейшего повышения экономичности установки и, как следствие, более рационального использования запаса окислителя, определяющего длительность подводного плавания. Выбрано направление более глубокой утилизации теплоты выхлопных газов замкнутых газотурбинных установок путем частичного их превращения в механическую работу в турбине перерасширения. К выхлопу присоединяется турбокомпрессорный утилизатор, состоящий из турбины перерасширения, приводящей дожимающий компрессор, и охладителя газов между ними. Рассмотрен также способ повышения эффективности замкнутых газотурбинных установок с регенерацией теплоты с турбокомпрессорного утилизатора как перенос регенератора теплоты в турбокомпрессорный утилизатор за турбину перерасширения. Установлено, что экономичность замкнутых газотурбинных установок с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты выше по сравнению с базовой замкнутой газотурбинной установкой с регенерацией теплоты на 15–25 %, при этом удельная мощность увеличивается в среднем в 1,5 раза. Отмечается, что экономичность замкнутой газотурбинной установки с регенерацией и турбокомпрессорным утилизатором занимает промежуточное положение без увеличения удельной мощности. По экономичности и в силу меньших значений степени повышения давления в компрессоре микротурбины целесообразно применять замкнутые газотурбинные установки с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор.

Для цитирования:

Матвеев В. Т. Энергоэффективность воздуонезависимых микрогазотурбинных установок сложных циклов для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 565–572. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-565-572.

Введение

Освоение природных богатств Арктического шельфа, связанное с наличием тяжелых ледовых условий, требует разработки новых технологий и технических решений. Технологии освоения шельфа незамерзающих морей только частично применимы для подледной разведки и обустройства месторождений, добычи и транспортировки полезных ископаемых. В условиях Арктики в освоении месторождений шельфа морей и океанов существенная роль отводится подводной технике, выполняющей как технологические, так и эксплуатационные функции.

Возможности подводной техники в значительной степени зависят от энергетической оснащенности аппаратов. Среди различных типов энергоустановок [1] вызывают интерес замкнутые воздуонезависимые газотурбинные установки сложных циклов как более энергоэффективные, способные в одноконтурном варианте работать на органических видах топлива с кислородом в качестве окислителя. Поэтому необходимы исследования термодинамических процессов воздуонезависимых газотурбинных установок сложных циклов для определения оптимальных параметров, схемных решений и их характеристик с учетом допустимых технологических возможностей их создания для оснащения ими подводной техники, обладающей высокой эффективностью и специальными возможностями.

В работе [2] обоснована перспективность применения воздуонезависимых энергетических установок (ВНЭУ) на базе газотурбинных двигателей (ГТД), работающих по замкнутому циклу. Рассмотрены методы усложнения рабочего цикла замкнутых газотурбинных установок (ЗГТУ) простого цикла с целью повышения экономичности двигателя и, как следствие, более рациональ-

ного использования запаса окислителя, определяющего длительность подводного плавания [3]. Усложнение рабочего цикла ЗГТД выполнено за счет использования регенерации теплоты выхлопных газов (рис. 1), а также применения турбины перерасширения (рис. 2) [4]–[6]. Рабочим телом в двигателе является смесь продуктов сгорания органического топлива с окислителем — кислородом O_2 . Исследования рабочего процесса в ЗГТУ проводились при горении органического топлива в рабочем теле с объемной долей кислорода, равной не менее 25 %, что обеспечивает сгорание топлива подобным горению в среде воздуха [7]. Термодинамические характеристики базовых тепловых схем и их рабочих процессов в ЗГТД, работающих на органическом топливе и окислителе-кислороде, определялись применительно к микрогазотурбинным установкам для подводной техники.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Характеристики базовых замкнутых микрогазотурбинных установок (ЗМГТУ).

Схемы замкнутых одноконтурных ЗМГТУ, работающих на органическом топливе, приведены на рис. 1 и 2. В схеме рис. 1 выхлопные газы за турбиной T охлаждаются в регенераторе (рекуператоре), отдавая теплоту рабочему телу перед камерой сгорания $КС$, и далее — в охладителе газа $ОГ$ с сепаратором влаги. Перед компрессором охлажденные выхлопные газы в смесителе $СМ$ подпитываются кислородом. Излишки CO_2 в рабочем теле в барботере $Б$ растворяются в воде и откачиваются за борт.

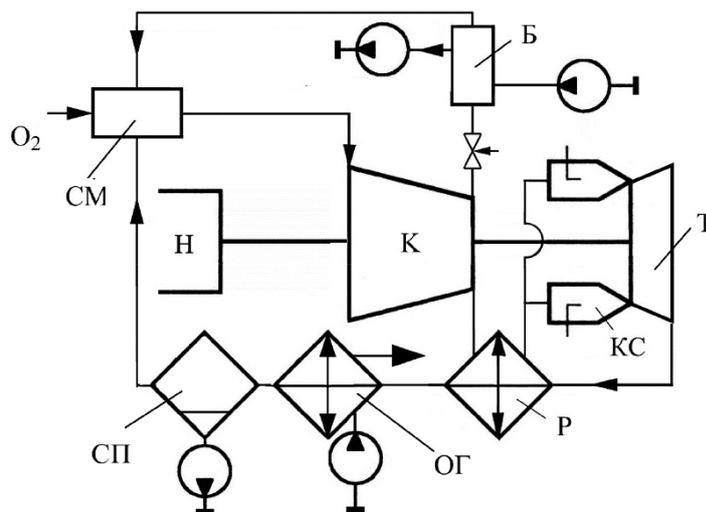


Рис. 1. Схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты:
 K — компрессор; T — турбина; $КС$ — камера сгорания;
 P — регенератор; $ОГ$ — охладитель газа; $СМ$ — смеситель;
 H — нагрузка; $СП$ — сепаратор влаги; $Б$ — барботер

При схеме рис. 2 выхлопные газы после турбины T поступают в турбину перерасширения ($ТП$), которая приводит дожимающий компрессор ($ДК$), посредством которого за турбиной T создается пониженное давление, увеличивающее мощность турбины. Охладитель газа $ОГ1$ перед $ДК$ может выполнять функцию теплофикационного теплообменника. Далее выхлопные газы поступают в компрессор двигателя так же, как в схеме рис. 1.

При определении характеристик циклов ЗМГТУ параметры элементов турбомашин и аппаратов выбирались с учетом масштабного фактора, характерного для микрогазотурбинных двигателей [8]. Для начальной температуры газов $T_3 = 1373$ К использовалось охлаждение турбины. В настоящее время для микротурбин оптимальная степень регенерации $\sigma = 0,8$. Температуру газов на входе в компрессор $T_1 = 313$ К можно получить при нахождении аппарата в подводном положении.

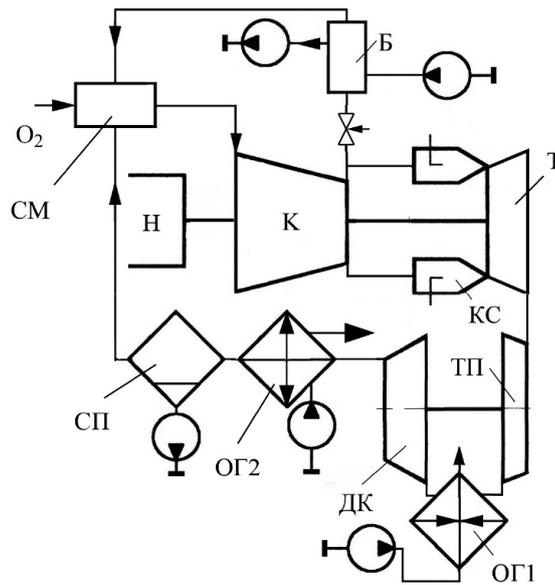


Рис. 2. Схема ЗМГТУ с турбиной перерасширения:
 К — компрессор; Т — турбина; КС — камера сгорания;
 ТП — турбина перерасширения; ДК — дожимающий компрессор;
 ОГ1 — охладитель газа (котел утилизатор); СМ — смеситель;
 Б — барботер; Н — нагрузка; СП — сепаратор влаги

На рис. 3 показаны характеристики циклов ЗМГТУ с регенерацией теплоты (Р) и ЗМГТУ с турбиной перерасширения (П + ТП). Для сравнения на рис. 3 приведены характеристики ЗГТУ простого цикла (П) при $T_3 = 1373$ К, $\sigma = 0,8$, $\pi_{\text{дк}} = 2,25$, рабочее тело: $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

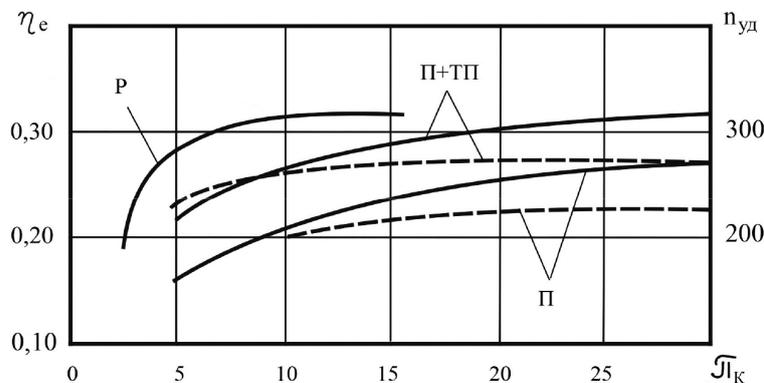


Рис. 3. Зависимости КПД (η_e) и удельной мощности ($n_{\text{уд}}$) от степени повышения давления для ЗМГТУ с ТП (П + ТП), ЗМГТУ с регенератором и простого цикла

Условные обозначения:

η_e — сплошные линии; $n_{\text{уд}}$ — пунктирные линии

Из рис. 3 видно, что КПД ЗГТУ с регенерацией и ЗГТУ с ТП примерно равны и позволяют повысить КПД установки на 15–20 %. Поэтому ЗМГТУ с регенерацией теплоты примем за базовую и рассмотрим задачу дальнейшего повышения ее энергоэффективности для подводной техники.

Методы повышения энергоэффективности ЗМГТУ усложнением рабочих циклов. Повышение КПД ЗМГТУ с Р возможно за счет более глубокой утилизации теплоты выхлопных газов ГТД путем частичного ее превращения в механическую работу. К выхлопу микрогазотурбинного двигателя с регенерацией теплоты присоединяется турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ), со-

стоящий из турбины перерасширения, приводящей в действие дожимающий компрессор (ДК), и охладителя газов между ними. На рис. 4 показана схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты и турбокомпрессорным утилизатором. ДК создает пониженное давление за ТП и частично за турбиной двигателя, что увеличивает степень расширения газа в турбине, а, следовательно, увеличивает ее мощность и повышает КПД установки. Охладитель газа *ОГ1* обеспечивает понижение температуры газа перед ДК с целью снижения в нем работы сжатия газа. Одновременно *ОГ1* может выполнять роль теплообменника-утилизатора для обеспечения объекта теплотой. Подготовка рабочего тела перед компрессором двигателя и удаление продуктов сгорания из контура выполняются так же, как и в схеме рис. 1.

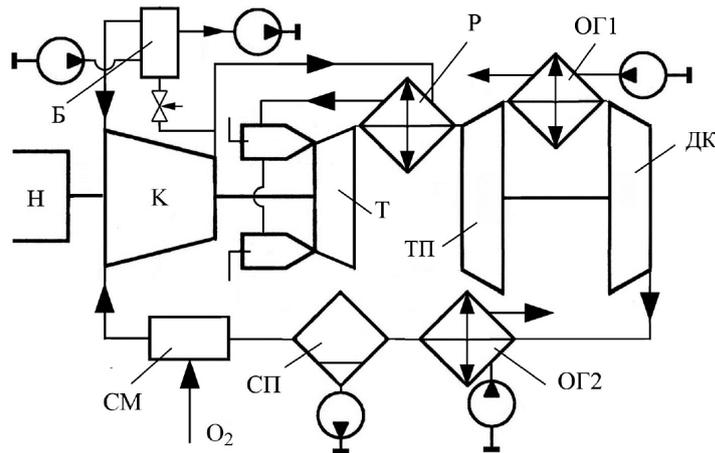


Рис. 4. Схема ЗМГТУ с регенерацией теплоты и турбокомпрессорным утилизатором

Возможно построение схемы ЗМГТУ путем присоединения ТКУ непосредственно к турбине двигателя (рис. 5). Это дает возможность увеличить суммарную мощность турбин, расположить регенератор за турбиной перерасширения, так как за ней достаточно высокая температура газа [9], [10].

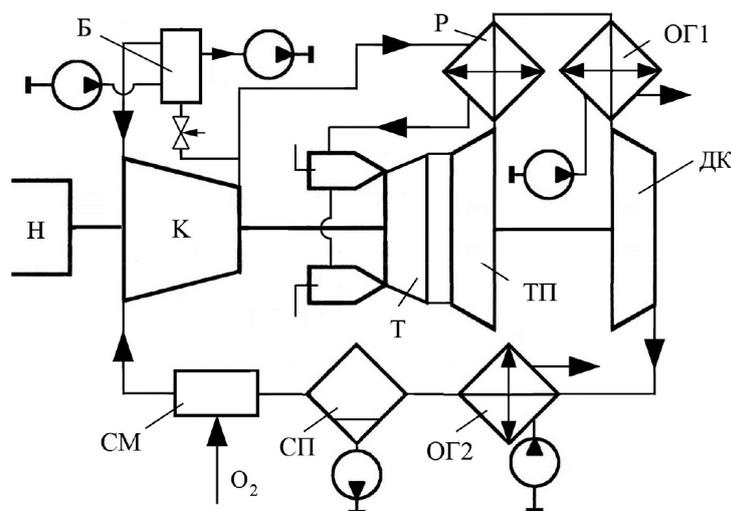


Рис. 5. Схема ЗМГТУ с турбокомпрессорным утилизатором, включающим регенератор теплоты

Результаты исследования работы ЗМГТУ сложных циклов. Анализ параметров циклов одноконтурных ЗМГТУ производился по имеющимся физико-математическим моделям [11] с новыми

параметрами рабочего тела (смеси газов), по стабильному давлению на входе в компрессор двигателя, которое поддерживалось посредством сброса излишка выхлопных газов из контура установки. Параметры узлов (турбомашин и оборудования) при исследовании циклов ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией применялись при расчетах в микротурбинных установках так же, как и в ЗМГТУ с регенерацией теплоты (см. рис. 1). Для определения оптимальных параметров циклов ЗМГТУ исследования проводились при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя и при различных начальных температурах газа T_3 в двигателе. На рис. 6 показаны характеристики циклов ЗГТУ с регенерацией и ТКУ, ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией, а также для сравнения ЗМГТУ с регенерацией при $T_3 = 1373 \text{ К}$, $\sigma = 0,8$, $\pi_{dk} = 2,25$ (рабочее тело: $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$).

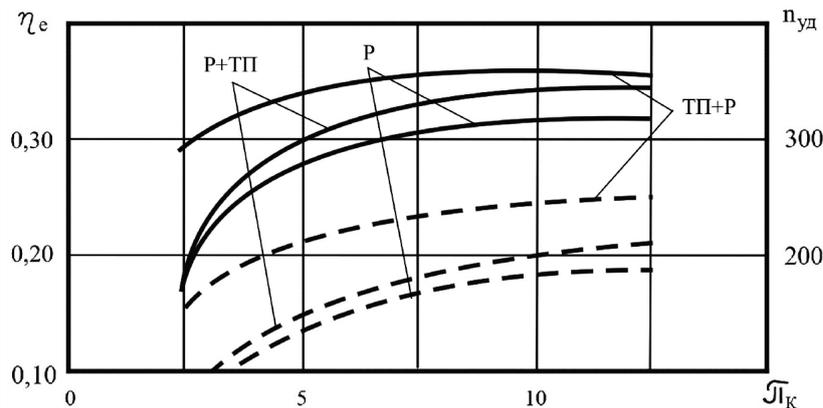


Рис. 6. Зависимости КПД и удельной мощности от степени повышения давления π_k для ЗМГТУ
Условные обозначения: η_e — сплошные линии; $n_{уд}$ — пунктирные линии

Проанализировав приведенные на рис. 6 зависимости было установлено, что при оптимальных степенях повышения давления π_k в ЗГТУ с ТКУ и регенерацией значения КПД более высокие, чем в ЗМГТУ с регенерацией на 15–25 %, удельная мощность увеличивается в среднем в 1,5 раза, что при прежней мощности установки позволяет уменьшить размеры проточных частей турбомашин и теплообменных аппаратов, расход топлива и, главное, окислителя, определяющего длительность пребывания объекта в подводном положении.

Экономичность ЗМГТУ с регенерацией и ТКУ выше, чем в ЗМГТУ с регенерацией, и занимает промежуточные значения по отношению к ЗМГТУ с ТКУ и регенерацией. Удельная мощность в ЗМГТУ с регенерацией и ТКУ примерно такая же, как и в ЗМГТУ с регенерацией. Положительным является то, что введение в замкнутый контур ТКУ не требует переделки базового ГТД с регенерацией.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Усложнение циклов ЗМГТУ за счет применения турбины перерасширения и регенерации теплоты дает суммарный положительный эффект повышения энергоэффективности установки.
2. Усложнение цикла ЗМГТУ применением турбокомпрессорного утилизатора, включающего регенератор теплоты, не требует изменения параметров газогенератора базового двигателя.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00469.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышев, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и реч-

ного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33) — С. 140–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152.

2. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.

3. Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

4. Матвеев В. Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В. Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. — 1997. — Т. 19 — № 4–5. — С. 81–85.

5. Матвеев В. Т. Приводные ГТД с турбокомпрессорным утилизатором и регенерацией теплоты / В. Т. Матвеев [и др.] // Газотурбинные технологии. — 2005. — № 6 (41). — С. 42–44.

6. Bianchi M. A Feasibility Study of Inverted Brayton Cycle for Gas Turbine Repowering / M. Bianchi, G. Negri di Montenegro, A. Peretto, P. R. Spina // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2005. — Vol. 127. — Is. 3. — Pp. 599–605. DOI:10.1115/1.1765121

7. Бабурин А. В. Стабилизация пламени метана при замене окислительной среды воздуха на смесь (O₂+CO₂) / А. В. Бабурин // Технологии техносферной безопасности. — 2009. — № 3. — С. 2.

8. Манушин Э. А. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / Э. А. Манушин, В. Е. Михальцев, А. П. Чернобровкин. — М.: Машиностроение, 1977. — 447с.

9. Пат. 180005 Российская Федерация, МПК F 02 С 6/02. Газотурбинная воздухонезависимая установка подводного аппарата / В. Т. Матвеев, А. В. Дологлонян, В. А. Очеретяный; заяв. и патентообладатель — Черноморское высшее военно-морское училище им. П. С. Нахимова. — № 2011111332; заяв. 04.04.2017; опубл. 30.05.2018, Бюл. № 16.

10. Bhargava R. K. Gas turbine bottoming cycles for cogenerative applications: Comparison of different heat recovery cycle solutions / R. K. Bhargava, M. Bianchi, A. De Pascale // ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. — American Society of Mechanical Engineers, 2011. — Pp. 631–641. DOI: 10.1115/ GT2011-46236

11. Матвеев В. Т. Энергетические и приводные газотурбинные двигатели с блокированной силовой турбиной / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. Г. Андриец // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2013. — Т. 3. — № 12 (63). — С. 33–37.

REFERENCES

1. Chernyshov, Evgeny Aleksandrovich, Elena Anatolievna Romanova, and Aleksey Dmitrievich Romanov. “Development of air independent power stations of submarines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 140–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152

2. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. “Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines.” *Shipbuilding* 4 (2012): 29–33.

3. Matviienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

4. Matveenko, V.T. “Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinykh dvigatelyakh s turbinoj pererasshireniya.” *Prom. teplotekhnika* 19.4–5 (1997): 81–85.

5. Matveenko, V.T., V.P. Troshin, A.A. Filonenko, and O.S. Kucherenko. “Privodnye GTD s turbokompresornym uutilizatorom i regeneratsiej teploty.” *Gazoturbinye tekhnologii* 6(41) (2005): 42–44.

6. Bianchi, M., G. Negri di Montenegro, A. Peretto, and P. R. Spina. “A Feasibility Study of Inverted Brayton Cycle for Gas Turbine Repowering.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 127.3 (2005): 599–605. DOI:10.1115/1.1765121

7. Baburin, A. V. “Stabilization of the methane flame in course of replacing the air oxidation medium for synthetic mixture (O₂ + CO₂).” *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti* 3 (2009): 2.

8. Manushin, E. A., V. E. Mikhal'tsev, and A. P. Chernobrovkin. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinykh i kombinirovannykh ustanovok*. M.: Mashinostroenie, 1977.

9. Matveenko, V.T., A.V. Dologlonyan, and V. A. Ocheretyanyi. Gazoturbinnaya vozdukhonezavisimaya ustanovka podvodnogo apparata. RU 180005, IPC F 02 S 6/02. Russian Federation, assignee. Publ. 30 May 2018.

10. Bhargava, Rakesh K., Michele Bianchi, and Andrea De Pascale. "Gas turbine bottoming cycles for cogenerative applications: Comparison of different heat recovery cycle solutions." *ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2011. DOI: 10.1115/GT2011-46236.

11. Matviinko, Valerii, Vladimir Ocheretuanij, and Alexandr Andriets. "Power and driving gas turbine engines with a blocked power turbine." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3.12(63) (2013): 33–37.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеенко Валерий Тимофеевич —

доктор технических наук, профессор
Черноморское высшее военно-морское ордена
Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова
299028, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Дыбенко Павла 1, корп. А
e-mail: mvt3900@mail.ru

Очеретяный Владимир Анатольевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул.
Университетская, 33
e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Дологлонян Андрей Вартазарович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБНУ «Институт природно-технических систем»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Ленина, 28
e-mail: dologlonyan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matviienko, Valerii T. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Nakhimov Black Sea Higher Naval School
1–A, Dybenko Pavla Str., Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: mvt3900@mail.ru

Ocheretianyi, Vladimir A. —

PhD, associate professor
Sevastopol State University
33, Universitetskaia Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Dologlonyan, Andrey V. —

PhD, associate professor
Institute of nature and technical systems
28, Lenina Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2019 г.

Received: April 25, 2019.