

## **РАЗРАБОТКА ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО БЕЗГАЗОВОГО ТОПЛИВА**

**Е.А. Чернышов, А.Д. Романов, Е.А. Романова**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

e-mail: nil\_st@nntu.nnov.ru

*Приведены данные практических экспериментов по созданию тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива для воздухонезависимых энергетических установок малых неатомных подводных лодок и других подводных объектов. Подтверждены теоретические предположения по горению массива высокометаллизированного топлива. Разработка воздухонезависимых энергетических установок на основе высокометаллизированного безгазового топлива позволит создать малогабаритный источник энергии для малых подводных лодок и других подводных объектов.*

**Ключевые слова:** подводная лодка, воздухонезависимая энергетическая установка, высокометаллизированное топливо.

## **DEVELOPMENT OF HIGHLY-METALLIZED GAS-FREE FUEL ELEMENT**

**E.A. Chernyshov, A.D. Romanov, E.A. Romanova**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation

e-mail: nil\_st@nntu.nnov.ru

*The article presents data obtained during the experimental testing of the fuel element development based on the highly-metallized gas-free fuel for the air independent power plants of small-size conventional submarines and other underwater objects. The data confirm some theoretical assumptions for burning of the highly-metallized fuel. The development of the air independent power plants based on the highly-metallized gas-free fuel will allow creating a small-sized power source for small submarines and other underwater objects.*

**Keywords:** submarine, air independent power plant, highly-metallized fuel.

В настоящее время оборудование подводных лодок (ПЛ) воздухонезависимыми энергетическими установками (ВНЭУ) является одним из условий участия в конкурсах на поставку ПЛ, кроме того, для большинства стран актуальной проблемой является оснащение собственного флота неатомными ПЛ с ВНЭУ [1, 2]. Эффективность применения неатомных ПЛ в прибрежной и ближней морской зоне достигла уровня, а зачастую превосходит эффективность атомных ПЛ. Одним из ключевых факторов успеха стала разработка и внедрение ВНЭУ, которые позволяют значительно увеличить дальность подводного хода. В настоящее время только три страны в мире, США, Франция и Великобритания, полностью отказались от оснащения своих флотов неатомными ПЛ, при этом Франция предлагает неатомные ПЛ на экспорт. В других странах ведутся активные разработки проектов неатомных ПЛ с различными вариантами ВНЭУ.



Рис. 1. Структура критериев выбора ВНЭУ [2]

Задачу создания ВНЭУ различные страны в мире решают разными путями и приоритетное направление развития (рис. 1) выбирают, исходя из уровня развития соответствующей отрасли гражданского энергомашиностроения [2].

Необходимо отметить, что в тот момент, когда в СССР отказались от ВНЭУ на основе тепловых двигателей, они стали успешно внедряться в зарубежных проектах.

Воздухонезависимые энергетические установки позволяют ПЛ находиться в подводном положении почти в 10 раз дольше, чем ПЛ со стандартной дизель-электрической энергетической установкой. В настоящее время активно внедряются ВНЭУ на основе электрохимических генераторов, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells и Solid Oxide Fuel Cells (Германия, Испания, РФ и др.), паротурбиной установки замкнутого цикла (Франция), двигателя с внешним подводом теплоты (Швеция, Япония), двигателей внутреннего сгорания по замкнутому циклу (Чили, вероятно С. Корея и др.). Кроме того, ведутся разработки ВНЭУ на основе газотурбинных энергоустановок, высокометаллизированного топлива, в том числе “полутопливные элементы” (Semi-fuel cells) и др. [3, 4].

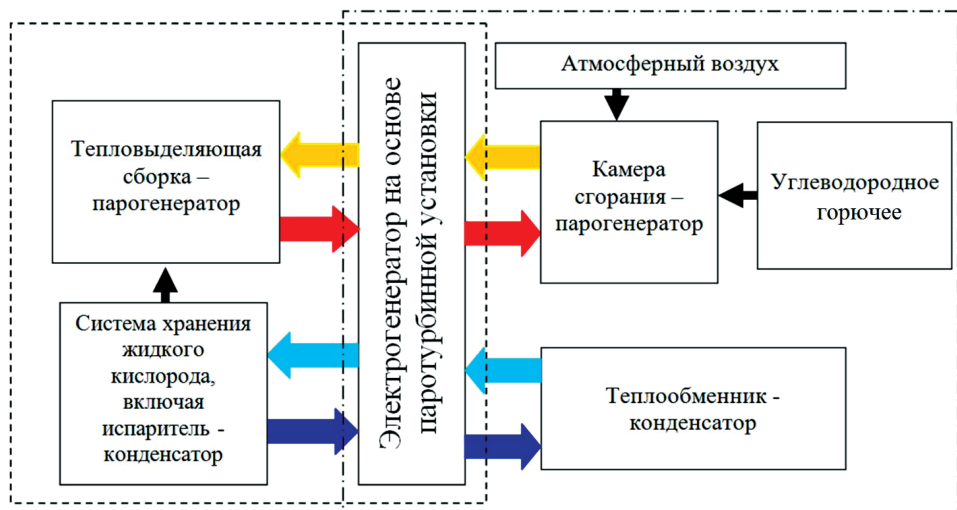
Одним из первых использовать алюминий в качестве горючего для энергетической установки ПЛ предложил в 30-е годы XX в. М.А. Рудницкий. Воздухонезависимые энергоустановки на основе газо-паротурбинных установок замкнутого цикла с использованием различных комбинаций горючего и окислителя ( $Mg + CO_2$ ,  $Al + CrO_3/S/Fe_2O_3$ ,  $Li + CrO_3$  и др.) исследовались в Военно-морском инженерном институте (ВМИИ, Санкт-Петербург) [3]. Однако практическое внедрение прошли только малые энергоустановки, например в Advanced Lightweight Torpedo ALWT Mk.50 (горючее Li, окислитель  $SF_6$ ), и подводные ракеты на гидрореагирующем топливе. Известны также системы аварийного обогрева водолазов на основе безгазового топлива [5].

Такие металлы, как магний или алюминий, при соединении с фтором выделяют большее количество теплоты, чем при соединении с

кислородом. Однако кислород является универсальным окислителем, он применяется практически для всех энергетических установок на основе тепловых двигателей. Это связано с относительной простотой его получения, отработанностью систем его хранения, заправки, мобильностью данных установок, возможностью применения как в топливном цикле, так и для жизнеобеспечения экипажа. Наибольшее количество теплоты при окислении кислородом выделяют следующие металлы — литий, бериллий, магний, кальций, алюминий, титан и цирконий; неметаллы — водород, бор, углерод, кремний и фосфор [6, 7].

С практической точки зрения лучшим по применению в качестве горючего является алюминий, поскольку он имеет сравнительно небольшую стоимость, безопасен в обращении в монолитном состоянии, его запасы на борту, по сравнению с углеводородными горючими, являются более компактными. При этом удельная теплота сгорания алюминия на один килограмм продуктов сгорания в 1,2–1,6 раза выше, чем у углеводородного горючего за счет меньшего расхода окислителя на 1 кг горючего. При этом продукты сгорания углеводородного горючего в нормальных условиях представляют собой газы и сконденсированную воду, которые нуждаются в утилизации. Необходимо отметить, что основную сложность представляет не хранение топлива, а хранение кислорода, поскольку система хранения, испарения и подачи кислорода по массе сравнима или превышает массу содержащегося в нем кислорода.

Практически все упомянутые установки используют топливо в гранулированном состоянии. Авторами настоящей работы предложен вариант сжигания высокометаллизированного топлива из монолитного состояния (отливка топливного элемента), что снижает стоимость (отсутствие процесса грануляции), упрощает хранение и перезарядку, повышает удельную плотность топлива. Другой особенностью установки является хранение окислителя в жидком состоянии, при этом конденсатор турбины совмещен с испарителем кислорода, что позволяет исключить необходимость использования забортной воды в охладителе-конденсаторе и, как следствие, тепловыделения в окружающую среду. В разрабатываемой установке основным горючим является алюминий, основным окислителем — кислород, при этом вторичный окислитель (оксиды химически менее активных металлов) позволяет уменьшить необходимый объем кислорода на борту. Однако применение только вторичного окислителя не позволяет контролировать реакцию и делает необходимым использование для охладителя-конденсатора забортной воды, а также увеличивает стоимость топливной сборки. В то же время использование в надводном положении высокометаллизированного топлива не является оптимальным, поэтому в проекте предусматривается применение двухконтурной системы, которая позволит использовать жидкое углеводородное горючее и воздух в качестве окислителя



**Рис. 2. Принципиальная схема энергетической установки:**

--- — комплекс ВНЭУ на основе высокометаллизированного топлива; - · - · - · - · — возможный вариант работы в надводном положении или на перископной глубине

(рис. 2). Это способствует снижению затрат на эксплуатацию, так как высокометаллизированный топливный элемент используется только в подводном положении.

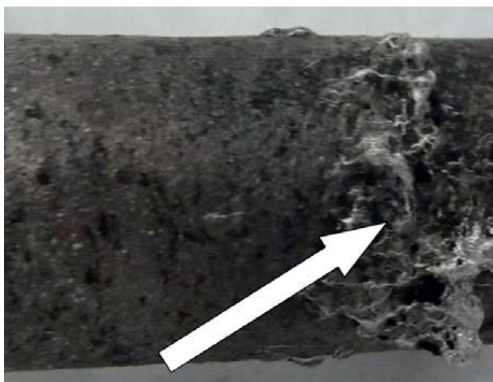
Особенностью работы разрабатываемого тепловыделяющего элемента является то, что, изменяя скорость подачи окислителя, можно регулировать тепловыделение и реакция может быть остановлена, что невозможно сделать в термитных установках. Температура поверхности разрабатываемого тепловыделяющего элемента при расчетных параметрах работы не должна превышать температуру плавления алюминия. При проектной аварийной ситуации (разрыв трубопровода, подающего теплоноситель в парогенератор, и отключение подачи кислорода в тепловыделяющий элемент) температура поверхности парогенератора не должна превышать температуру плавления материала парогенератора.

Для практического подтверждения был изготовлен экспериментальный стенд, на котором проведены исследования горения расплава топлива, включая зажигание, расплавление и горение массива топлива, а также временное и полное прекращение подачи окислителя. Исследование проводилось для образцов длиной до 500 мм, диаметром 20...40 мм. В ходе испытаний было показано, что при прекращении подачи окислителя через канал, заполненный мелкодисперсными (менее 10 мкм) либо крупными частицами оксидов, реакция через некоторое время прекращается (рис. 3). На рис. 4 показан частично прогоревший тепловыделяющий элемент.

По результатам экспериментов по определению границ зоны горение-расплавление со сливом расплава горючего и продуктов сгорания и захлаживание инертным газом, было установлено что зона



**Рис. 3.** Кристаллизация фронта горения расплава в канале вторичного окислителя



**Рис. 4.** Выгоревший тепловыделяющий элемент, стрелка указывает на прогар на стыке секций парогенератора

горения имеет форму, близкую к шарообразной (рис. 5), слева расположена выгоревшая часть, справа — частично оплавленная несгоревшая часть. Причем интенсивное горение происходит на значительном удалении от фурмы и канал подачи в расплавившемся, но несгоревшем металле имеет конусообразную форму (рис. 6). Диаметр основания конуса и его высота зависят в основном от скорости подачи газа. Данные эксперименты проводились без парогенератора и каналов вторичного окислителя.

Согласно проведенному рентгенофазному анализу образцов, фазой внедрения является оксид алюминия, микроструктура выгоревшего элемента приведена на рис. 7. В настоящее время достигнута степень выгорания более 40 %, это связано, в первую очередь, с малым размером образцов и необходимостью исследования именно процесса горения. Кроме того, высокая твердость получаемого элемента при



**Рис. 5.** Зона горения



Рис. 6. Канал подачи кислорода в зоне частичного расплавления

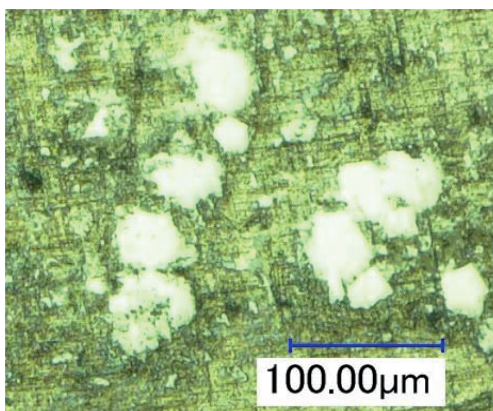


Рис. 7. Микроструктура частично выгоревшего элемента

степени выгорания более 40 % значительно затрудняет резку образцов и подготовку шлифов.

Анализ вариантов преобразования тепловой энергии в механическую показал, что в настоящее время практически осуществим только вариант использования турбины-электрогенератора. Двигатель с внешним подводом теплоты (Стирлинга) был изобретен раньше двигателя внутреннего сгорания, и в настоящее время двигатели Стирлинга ограниченно применяются в различных отраслях, в том числе и в качестве ВНЭУ ПЛ. Однако в РФ распространения данные двигатели не получили, хотя предлагаются различными компаниями.

По этой причине в качестве вариантов электрогенератора прорабатываются два основных варианта: использование высокотемпературной паровой турбины и паротурбинной установки с низкокипящим теплоносителем (Organic Rankine Cycle — ORC), который является примером конденсационного цикла, с использованием вместо водяного пара смеси органических соединений. Преимуществом данного цикла является то, что при температуре порядка 200... 300 °С рабочее тело удерживается в жидком состоянии при более низком давлении, чем вода, турбины могут иметь более высокий внутренний КПД ( $\eta_{oi} = 0,85$ ) по сравнению с паровыми мощностью менее 1,5 МВт ( $\eta_{oi} = 0,75$ ) [8, 9]. В ORC объемный расход теплоносителя через последнюю ступень турбины, например в случае применения бутана вместо водяного пара, уменьшается на два порядка и для пропуска в конденсатор 30 т/ч водяного пара длина рабочей лопатки последней ступени составит ~350 мм, а для пропуска равного по тепловой мощности массового расхода бутанового пара необходима лопатка длиной менее 50 мм.

Выбор ORC также обусловлен тем, что после окончания горения топливный элемент работает как аккумулятор теплоты. В частности, удельная теплоемкость оксида алюминия составляет порядка 830... 1000 Дж/(моль·К) в диапазоне 20... 500 °С, или порядка

0,27 Вт/(кг·К), что дает возможность дополнительного съема тепловой энергии. Это сравнимо со свинцово-кислыми батареями, имеющими удельную энергоемкость 30...60 Вт·ч/кг. Причем по данным [10] энергоемкость системы двигатель Стирлинга–аккумулятор теплоты с теплоаккумулирующим веществом  $Al_2O_3$  в 8 раз превосходит классическую систему свинцово-кислотная батарея–электродвигатель.

Разработка ВНЭУ на основе высокометаллизированного безгазового топлива позволит создать малогабаритный источник энергии для малых ПЛ и других подводных объектов. При этом масса единичного тепловыделяющего блока, включая вторичный окислитель, составляет не более 2 т (не превышая массу стандартной торпеды).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романова Е.А., Романов А.Д., Чернышов Е.А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок // Вооружение и экономика. 2015. № 1 (30). С. 100–106.
2. Замуков В.В., Сидоренков Д.В. Перспективы создания воздухонезависимой энергоустановки для неатомных подводных лодок России // Изобретательство. 2014. № 10. С. 23–30.
3. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки. СПб.: Судостроение, 2006. 424 с.
4. Автономные комбинированные энергоустановки с топливными элементами, работающие на продуктах гидротермального окисления алюминия / А.Л. Дмитриев, В.К. Иконников, А.И. Кириллов, В.Ю. Рыжкин, Е.А. Ходак // Междунар. науч. журнал “Альтернативная энергетика и экология”. 2008. № 11. С. 10–16.
5. Анаэробный источник теплоты на безгазовом топливе для аварийного обогрева водолазов / А.Н. Генкин, А.В. Гужиев, В.Н. Мошков, А.М. Сильян, В.Н. Темнов // Судостроение. 2010. № 2. С. 36–39.
6. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 424 с.
7. Шидловский А. Основы пиротехники. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
8. Экономическая эффективность утилизации низкопотенциальных вторичных энергетических ресурсов посредством установки турбины на низкокипящем рабочем теле / А.Л. Шубенко, Н.Ю. Бабак, М.И. Роговой, А.В. Сенцкий // Энергосбережение. 2010. № 6. С. 18–26.
9. Гринман М.И., Фомин В.А. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами // Энергомашиностроение. 2006. № 1. С. 63–69.
10. Кормилицин Ю.Н., Хализев О.А. Устройство подводных лодок. Т. 2. СПб.: Элмор, 2009. 280 с.

## REFERENCES

- [1] Romanova E.A., Romanov A.D., Chernyshov E.A. Export potential of not nuclear submarines. *Vooruzhenie i ekonomika* [Arms and economy], 2015, no. 1 (30), pp. 100–106 (in Russ.).
- [2] Zamukov V.V., Sidorenkov D.V. Prospects of creation of the airindependent power station for not nuclear submarines of Russia. *Izobretatel'stvo* [Invention], 2014, no. 10, pp. 23–30 (in Russ.).

- [3] Dyadik A.N., Zamukov V.V., Dyadik V.A. Korabel'nye vozdukhonezavisimyye energeticheskie ustanovki [Ship airindependent power stations]. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 2006. 424 p.
- [4] Dmitriev A.L., Ikonnikov V.K., Kirillov A.I., Ryzhkin V.YU., Khodak E.A. The independent combined power stations with fuel elements working at products of hydrothermal oxidation of aluminum. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative Power Engineering and Ecology], 2008, no. 11, pp. 10–16 (in Russ.).
- [5] Genkin A.N., Guzhiev A.V., Moshkov V.N., Sil'yan A.M., Temnov V.N. Anaerobic source of warmth on gas-free fuel for emergency heating of divers. *Sudostroenie* [Shipbuilding], 2010, no. 2, pp. 36–39 (in Russ.).
- [6] Yagodnikov A. Vosplamnenie i gorenie poroshkoobraznykh metallov [Ignition and burning of powdery metals]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2009. 424 p.
- [7] Shidlovskiy A. Osnovy pirotekhniki [Fundamentals of pyrotechnics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 280 p.
- [8] Shubenko A.L., Babak N.Yu., Rogovoy M.I., Senetskiy A.V. Economic efficiency of utilization of low-potential secondary energy resources by means of installation of the turbine on the low-boiling working body. *Energoberezhenie* [Energy Saving], 2010, no. 6, pp. 18–26 (in Russ.).
- [9] Grinman M.I., Fomin V.A. Prospects of use of power stations of low power with the low-boiling working bodies. *Energomashinostroenie* [Powermachinebuilding], 2006, no. 1, pp. 63–69 (in Russ.).
- [10] Kormilitsin Yu.N., Khalizev O.A. Ustroystvo podvodnykh lodok. T. 2 [Device of submarines. Vol. 2]. St. Petersburg, Elmor Publ., 2009. 280 p.

Статья поступила в редакцию 5.05.2015

Чернышов Евгений Александрович — д-р техн. наук, профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева (НГТУ).

НГТУ им. Р.Е. Алексева, Российская Федерация, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24.

Chernyshov E.A. — D.Sc. (Eng.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University. Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, N. Novgorod, 603950 Russian Federation.

Романов Алексей Дмитриевич — инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева (НГТУ).

НГТУ им. Р.Е. Алексева, Российская Федерация, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24.

Romanov A.D. — engineer, Nizhny Novgorod State Technical University.

Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, N. Novgorod, 603950 Russian Federation.

Романова Елена Анатольевна — аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева (НГТУ).

НГТУ им. Р.Е. Алексева, Российская Федерация, 603950, г. Н. Новгород, ул. Минина, д. 24.

Romanova E.A. — Ph.D. student, Nizhny Novgorod State Technical University.

Nizhny Novgorod State Technical University, ul. Minina 24, N. Novgorod, 603950 Russian Federation.

### **Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Чернышов Е.А., Романов А.Д., Романова Е.А. Разработка тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 6. С. 74–81.

### **Please cite this article in English as:**

Chernyshov E.A., Romanov A.D., Romanova E.A. Development of highly-metalized gas-free fuel element. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 6, pp. 74–81.