

9. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpachuk. "The physical-mechanical characteristics of composite plastics influence on the processes of destruction at realization of technological process of machining and extreme conditions." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 66-73.

11. Klejner, A. B. *Vzaimosvjaz iznosa vkladyshej dejdvudnyh podshipnikov s nesushhej sposobnostju grebnogo vala: Abstract of Ph.D. (Tech.) dissertation. Odessa, 1972.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кушнер Гурий Алексеевич — аспирант.
Научный руководитель:
Мамонтов Виктор Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
dinalt_13@mail.ru
Мамонтов Виктор Андреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
a.ruban1974@mail.ru
Халявкин Алексей Александрович —
кандидат технических наук.
ФГБОУ ВПО «АГТУ»
sopromat112@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kushner GuriyAlexeevich — postgraduate.
Supervisor:
Mamontov Viktor Andreyevich
FSBEI HPE "ASTU"
dinalt_13@mail.ru
Mamontov Viktor Andreyevich —
Dr. of Technical science, professor.
FSBEI HPE "ASTU"
a.ruban1974@mail.ru
Haljavkin Alexei Alexandrovich —
PhD.
FSBEI HPE "ASTU"
sopromat112@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 октября 2015.

УДК 623.827

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

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО БЕЗГАЗОВОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Выполнено исследование вопроса о ведении интенсивных поисков источников энергии, альтернативных атомным, в том числе для оснащения ими морских и подземных объектов — подводных лодок, подводных аппаратов, подземных электростанций и др. В этом плане значительный интерес представляют анаэробные или воздухонезависимые энергетические установки, т. е. установки, работающие без использования атмосферного воздуха, применение которых позволяет значительно улучшить тактико-технические характеристики неатомных подводных лодок, в частности значительно увеличить дальность непрерывного подводного плавания. Представлены результаты практических испытаний тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива для воздухонезависимой энергетической установки неатомных подводных лодок и других подводных объектов. Приведены фотоснимки, микроструктура образцов и результаты рентгенофазного анализа, подтверждающие теоретические предположения относительно горения массива высокометаллизированного топлива.

Ключевые слова: неатомная подводная лодка, воздухонезависимая энергетическая установка, тепловыделяющий элемент, горение, алюминий, оксид алюминия

В

НАСТОЯЩЕЕ время как для наземных так и для подводных объектов разрабатываются и внедряются воздухонезависимые энергетические установки [1] – [4]. В большинстве случаев для данных энергоустановок в качестве топлива используется углеводородное

топливо либо водород, однако также разработаны установки на основе высокометаллизированного топлива [2], [5], [6]. При этом практическое внедрение получили только малые энергоустановки, в частности подводные ракеты на гидрореагирующем топливе ВА-111 и торпеды Mk.50 Advanced Lightweight Torpedo. При этом, по данным [7], энергоемкость системы «двигатель Стирлинга — аккумулятор тепла» с теплоаккумулирующим веществом Al_2O_3 в 8 раз превосходит классическую систему «свинцово-кислотная батарея — электродвигатель». Практически все разработанные установки на основе высокометаллизированного топлива используют топливо в гранулированном состоянии.

Наибольшее количество тепла при окислении кислородом выделяют следующие металлы: литий, бериллий, магний, кальций, алюминий, титан и цирконий, а также неметаллы: водород, бор, углерод, кремний и фосфор [8], [9]. С практической точки зрения в качестве горючего лучшим вариантом является алюминий, поскольку он имеет сравнительно небольшую стоимость, безопасен в обращении в монокристаллическом состоянии при комнатной температуре, 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.

В работе предложен вариант сжигания высокометаллизированного топлива из монокристаллического состояния, что снижает стоимость топлива, упрощает хранение и перезарядку, повышает удельную плотность. 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 (таблица).

Характеристики применяемого топлива и окислителей

Характеристики топлива и окислителя	Топливо /Окислитель		
	алюминий / кислород	алюминий / оксид железа	углеводородное топливо* / кислород
Удельная теплота сгорания, кДж, на 1 г топлива	31,04	15,81	42,7
Расход окислителя на 1 г топлива	0,89	2,96	3,33
Удельная теплота сгорания, кДж, на 1 г продуктов сгорания	16,43	3,99	9,86
Удельный вес систем хранения, испарения и подачи окислителя, г/г окислителя	0,1 – 1	0 (окислитель механически смешан с топливом)	0,1 – 1
Удельная теплота сгорания, кДж, на 1 г продуктов сгорания с учетом систем хранения окислителя	11,17 – 15,68	3,99	5,57 – 9,16

* Приведено для примера.

Необходимо отметить, что продукты сгорания углеводородного горючего в нормальных условиях представляют собой газы и сконденсированную воду, которые нуждаются в утилизации. При этом системы утилизации продуктов сгорания (вымораживание, химическое поглощение

и др.) занимают дополнительный объем либо требуют дополнительных затрат энергии для удаления продуктов сгорания за борт.

Изменение соотношений высокометаллизированное топливо / окислитель (кислород) / вторичный окислитель (оксиды металлов), в зависимости от применяемого преобразователя энергии, двигатель с внешним подводом тепла (Стirlingа) либо паровая турбина (включая установки с низкокипящим теплоносителем) позволяет оптимизировать массогабаритные параметры установки с нулевым показателем тепловых выбросов в окружающую среду при условии использования энергии холода жидкого кислорода. Несмотря на то, что создание энергетических установок только с применением термитных смесей практически реализовано, данные смеси представляют опасность как при хранении, так и при применении, поэтому оптимальным вариантом будет являться комбинированное использование окислителей: кислорода и оксидов железа, хрома и др. При этом изменяя скорость подачи окислителя (кислорода), возможно регулирование тепловыделения, и реакция горения может быть остановлена при прекращении подачи кислорода, что невозможно сделать в энергетических установках, работа которых основана на горении термитных смесей.

В то же время использование в надводном положении высокометаллизированного топлива не является оптимальным, поэтому в проекте предусматривается применение двухконтурной системы (рис. 1), которая позволит использовать в надводном положении жидкое углеводородное горючее и воздух в качестве окислителя. На схеме пунктирной линией показан комплекс воздухо-независимых энергетических установок на основе высокометаллизированного топлива, штрихпунктирной — возможный вариант работы с использованием углеводородного топлива и атмосферного воздуха в качестве окислителя.

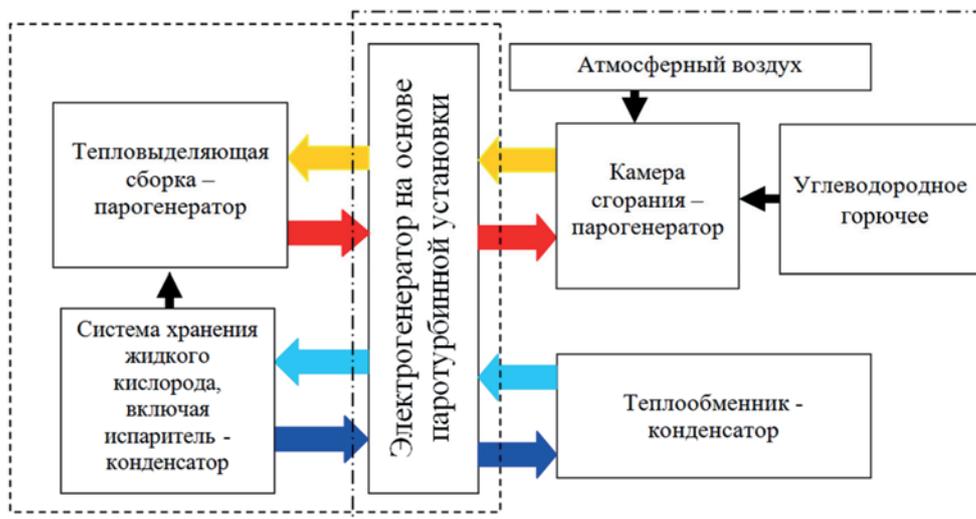


Рис. 1. Принципиальная схема энергетической установки

На рис. 2 приведен пример схемы парогенератора, в котором указано возможное расположение тепловыделяющего элемента, парогенератора, корпуса — теплового аккумулятора, теплоизоляции и внешнего газонепроницаемого корпуса. На рис. 3 представлен пример схемы тепловыделяющего элемента, в котором указано возможное расположение горючего, запального устройства, канала вторичного окислителя, канал подачи кислорода.

Температура поверхности разрабатываемого тепловыделяющего элемента при расчетных параметрах работы не должна превышать температуру плавления алюминия либо в случае применения защитной гильзы — температуру плавления материала, из которого она изготовлена. При проектной аварийной ситуации (разрыв трубопровода, подающего теплоноситель в парогенератор, и отключение подачи кислорода в тепловыделяющий элемент) температура поверхности пароген-

нератора не должна превышать температуру плавления материала парогенератора. Запроектной аварийной ситуацией считается полное расплавление корпуса теплового аккумулятора и парогенератора, при этом расплав удерживается теплоизоляцией и внешним металлическим контуром. Необходимо отметить, что количество вторичного окислителя в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) должно исключать возможность воспламенения и самораспространяющегося горения.

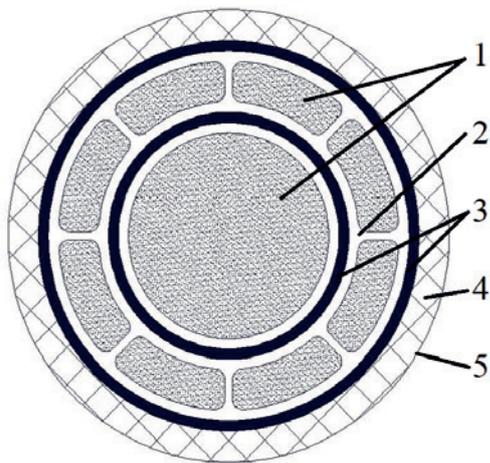


Рис. 2. Пример схемы парогенератора:
1 — тепловыделяющий элемент (высокометаллизируемое топливо);
2 — корпус-теплоаккумулятор;
3 — парогенератор;
4 — теплоизоляция;
5 — внешний газонепроницаемый корпус (размеры приведены произвольно)

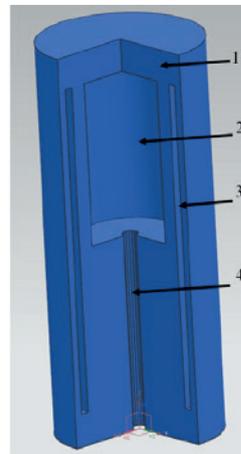


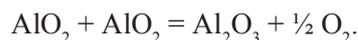
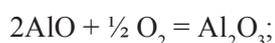
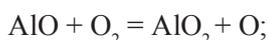
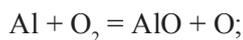
Рис. 3. Пример схемы тепловыделяющего элемента:
1 — заряд горючего (Al сплав);
2 — пространство для размещения запального устройства, обеспечивающего прогрев и расплавление первоначальной реакционной зоны;
3 — канал вторичного окислителя;
4 — канал подачи окислителя (кислород) (размеры каналов и камеры запального устройства приведены произвольно)

С точки зрения практической применимости одной из основных задач является прогрев исходных компонентов до заданных температур и обеспечение полноты прохождения реакции, расчет зоны горения и тепловыделения.

В условиях экспериментального стенда, фактически, можно рассматривать следующие основные протекающие реакции:



Кроме того, согласно [10], возможно протекание промежуточных реакций окисления алюминия:



При этом реакция (1) происходит в заряде, предназначенном для предварительного разогрева, и выделившаяся теплота в первоначальный момент времени расходуется на нагрев, расплавление и перегрев топлива. В дальнейшем она происходит в зоне канала вторичного окислителя, обеспечивая более полное сгорание вблизи стенок твэла. Реакция (2) является основной, и ее теплота расходуется на нагрев, расплавление и перегрев топлива в ходе всего цикла горения. Как показано далее, реакция (3) протекает при уменьшении скорости подачи окислителя, при этом расплавы алюминия и железа образуют интерметаллид.

Экспериментальная часть

Для практического подтверждения был изготовлен экспериментальный стенд, на котором проведены исследования горения расплава топлива, включая зажигание, расплавление и горение массива топлива, снижение расхода окислителя, а также временное и полное прекращение подачи окислителя. В ходе испытаний было показано, что при прекращении подачи окислителя через некоторое время тепловыделение только за счет взаимодействия горючего с вторичным окислителем прекращается. На рис. 4 приведены фотографии закристаллизовавшегося фронта горения в каналах, заполненных мелкодисперсными (менее 5 мкм) — рис. 4, а либо крупнодисперсными частицами оксидов (рис. 4, б).

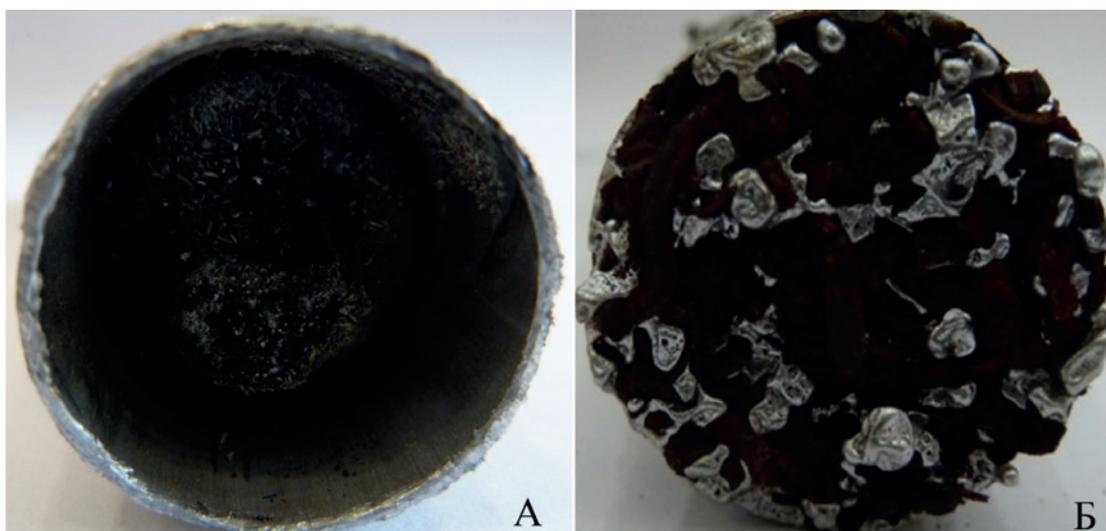


Рис. 4. Кристаллизация фронта горения расплава в канале вторичного окислителя:
 а — канал, заполненный мелкодисперсными частицами вторичного окислителя после прекращения горения;
 б — канал, заполненный крупнодисперсными частицами вторичного окислителя после прекращения горения

На основе полученных результатов экспериментов без применения вторичного окислителя по определению границ зоны «горение — расплавление» со сливом расплава горючего и продуктов сгорания и их захлаживания инертным газом было установлено, что зона горения имеет форму, близкую к шарообразной с диаметром, близким к диаметру элемента. Диаметр основания конуса и его высота зависят в основном от скорости подачи газа.

Скорость горения металла и движения зоны горения вниз определяется двумя основными факторами: скоростью подачи окислителя и скоростью обгорания фурменной зоны. На рис. 5 приведены фотографии элементов твэла, вырезанных после 5 мин горения. Захлаживание зоны горения производилось инертным газом, слив расплава топлива и продуктов горения выполнялся через боковое окно. На рис. 5, а приведена схема горения твэла, на рис. 5, б показана верхняя часть конусной части зоны горения (конус закрыт тонкой металлической пленкой), на рис. 5, в — конусная часть, на рис. 5, г — сопловая часть (плоскость реза развернута параллельно оси сопла), выполненная из стали 316L, причем на фото видно, что горения металла сопла не происходило. Внешний диаметр трубки составляет 6 мм, толщина стенки — 1 мм. Установлено, что горение

массива топлива имеет значительные отличия от горения одиночных частиц, описание математической модели которых приведено в литературе [10] – [14]. Перегрев расплава в ходе горения предположительно приводит к вскипанию алюминия и прорыву его через слой оксида алюминия в конусной части выше сопла, т. е. горение металла переходит в газовую фазу. Данный эффект был ранее подтвержден экспериментально и описан в литературе [14]. Из рис. 5 следует, что распространение фронта горения массива значительно отличается от горения термитной смеси. При этом существенным ограничением является наличие следующих условий.

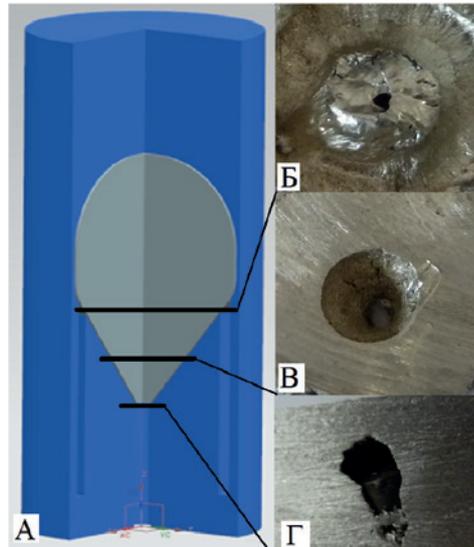


Рис. 5. Пример испытаний по горению высокометаллизированного элемента:
а — схема горения твэл; б — верхняя часть конусной зоны горения;
в — конусная часть; г — сопловая часть

Обеспечение прогрева массива металла для устойчивого горения. При этом условно считается, что количество передаваемой энергии пропорционально площади поперечного сечения твэла (в частности, квадрату радиуса). Необеспечение выполнения данного условия приводит к неполному сгоранию топлива либо прекращению реакции.

Обеспечение теплосъема теплоносителям. При этом величина теплосъема, пропорциональная площади нагретой части твэла, пропорциональной радиусу твэла в первой степени, должна находиться в определенных пределах. Необеспечение данного условия приводит к прогарам и / или искажению геометрии твэла либо неполному сгоранию топлива, что также может сопровождаться искажением геометрии и / или прорывом кислорода в теплоноситель. На рис. 6 приведен образец ТВЭЛ при интенсивном охлаждении стенок. Отделение верхней части было выполнено отрезной машиной, в нижней части был выполнен кольцевой надрез, с последующим доломом образца. Следует отметить, что по периметру ТВЭЛ представляет собой монолитную структуру, разрушение которой наступает при подготовке образца.



Рис. 6. Пластинчатая структура в центре твэл при интенсивном охлаждении поверхности

При работе данной системы накладывается существенное ограничение на подачу окислителя — в случае длительного прекращения подачи окислителя расплав топлива и продуктов горения проникает в канал окислителя и через некоторое время кристаллизуется, что делает невозможным продолжение работы. Поэтому необходимо постоянно поддерживать давление подачи окислителя, не меньшее, чем гидростатическое давление расплава топлива и продуктов горения. При этом расход окислителя может быть незначительным и определяться тепловыми потерями в системе. Однако при снижении расхода окислителя (кислорода) происходит уменьшение конусной части зоны горения, при этом температура сопловой части возрастает и происходит её интенсивное обгорание, при этом зона горения перемещается вниз быстрее, чем в случае развитого струйного течения, при этом происходит неполное сгорание топлива. В частности, на рис. 4, з приведен сопловый блок после более чем пятиминутной работы, при этом обгорания практически не происходит. На рис. 7 приведен частично сгоревший сопловый блок. В верхней части рисунка показан сопловый блок из стали 316L, в средней части приведена аналогичная трубка в исходном состоянии, в нижней части — аналогичный блок из стали 12Х18Н10Т.



Рис. 7. Сопловый блок

При одинаковом времени горения продолжительностью 5 мин наблюдается различный характер разрушения сопла. На рис. 8 приведена микроструктура образца, вырезанного из тепловыделяющего элемента из зоны горения в штатном режиме. При этом обгорание соплового блока отсутствовало или было минимальным, суммарное время проведения эксперимента составило примерно 15 мин. Согласно рентгенофазовому анализу, неметаллическими включениями являются частицы оксида алюминия.

На рис. 9 приведена микроструктура элемента после работы с минимальной мощностью и, соответственно, высокой степенью обгорания соплового блока. Согласно рентгенофазовому анализу, включениями являются частицы оксида интерметаллида (Fe-Al), причем, по данным анализа, оксид алюминия отсутствует.

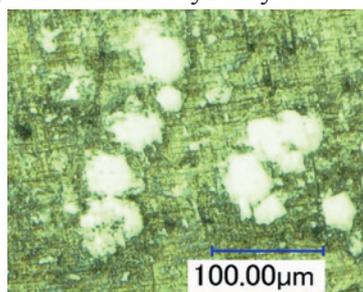


Рис. 8. Микроструктура частично выгоревшего элемента

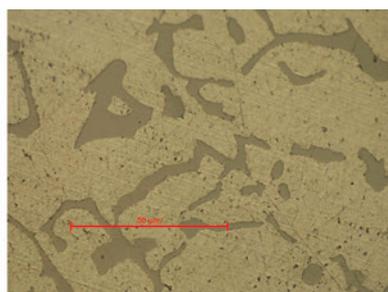


Рис. 9. Микроструктура образца в зоне образования интерметаллидных соединений

Обзор литературы по данному вопросу показал, что в ряде случаев может наблюдаться отсутствие дифракционных отражений оксида алюминия [16]. Это можно объяснить образованием рентгеноаморфной разновидности либо частицы высокодисперсного оксида алюминия «окутаны», т. е. пространственно разделены и «замаскированы» пластичными металлами. Факт отсутствия дифракционных отражений оксида алюминия является косвенным свидетельством его нанодисперсности и гомогенности распределения в образце.

Вывод

Проведенные опытные пуски подтвердили практическую возможность горения массива топлива, изменения мощности и удержания процесса горения при минимальном расходе окислителя. При этом реакция горения при прекращении подачи кислорода прекращается, что делает установку более безопасной в применении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.
2. Дядик А. Н. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А. Н. Дядик, В. В. Замуков, В. А. Дядик. — СПб.: Судостроение, 2006. — 414 с.
3. Чернышов Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышов, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 140–152.
4. Романова Е. А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок / Е. А. Романова, А. Д. Романов, Е. А. Чернышов // Вооружение и экономика. — 2015. — № 1 (30). — С. 99–105.
5. Дмитриев А. Л. 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 // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». — 2008. — № 11. — С. 10–16.
6. Грейнер Л. Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов. — Л.: Судостроение, 1978. — 384 с.
7. Кормилицин Ю. Н. Устройство подводных лодок: в 2 т. — Т. 2. / Ю. Н. Кормилицин, О. А. Хализев. — СПб.: Элмор, 2009. — 280 с.
8. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов / Д. А. Ягодников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 424 с.
9. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский. — М.: Машиностроение, 1973. — 280 с.
10. Бектед М. В. Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) / М. В. Бектед, У. Лианг, К. В. Паддуппаккам // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41. — № 6. — С. 15–33.
11. Федоров А. В. Воспламенение частицы алюминия / А. В. Федоров, Ю. В. Харламова // Физика горения и взрыва. — 2003. — Т. 39. — № 5. — С. 65–68.
12. Бабук В. А. Горение металлического горючего в поверхностном слое твердого ракетного топлива / В. А. Бабук // Второй между. семинар «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем». — СПб., 1997. — С. 194–219.
13. Бектед М. В. Анализ данных по временам горения частиц алюминия / М. В. Бектед // Физика горения и взрыва. — 2005. — Т. 41. — № 5. — С. 55–69.
14. Григорьева Т. Нанокompозиты металл/оксид и интерметаллид/оксид / Т. Григорьева, Т. Киселева, А. Новакова, И. Ворсина, А. Барина, V. Sepelak, K. Becker, H. Lяхов // Труды X Международной конференции «Порядок, беспорядок и свойства оксидов». — Ростов н/Д. — Лоо, 2007. — С. 43–46.

DEVELOPMENT OF THE HEATALLOCATING ELEMENT ON THE BASIS OF THE HIGH-METALLIZED GAS-FREE FUEL FOR THE AIR INDEPENDENT POWER STATION

Research of a question of conducting intensive searches of the power sources alternative nuclear, including for equipment of sea and underground objects by them — submarines, submersibles, underground power plants, etc. is executed. In this plan considerable interest is presented by anaerobic or air-independent power stations, i.e. the installations working without use of atmospheric air which application allows improving considerably tactical

technical characteristics of not nuclear submarines in particular considerably to increase range of continuous scuba diving. Results of practical tests of the warm allocating element on the basis of the high-metallized gas-free fuel for air-independent power station of not nuclear submarines and other underwater objects are presented. The pictures, microstructure of samples and results of the X-ray phase analysis confirming theoretical assumptions concerning burning of the massif of the high-metallized fuel are given.

Keywords: not nuclear submarine, the air-independent power station, burning, aluminum, aluminum oxide.

REFERENCES

1. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines." *Sudostroenie* 4 (2012): 29–33.
2. Dyadik, A. N., V. V. Zamukov, and V. A. Dyadik. *Korabelnye vozdukhnezavisimye energeticheskie ustanovki*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
3. Chernyshov, E.A., E. A. Romanova, and A. D. "Romanov. Development of airindependent power stations of submarines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 140–152.
4. Romanova, E. A., A. D. Romanov, and E. A. Chernyshov. "Assessment of relevance of development of airindependent power installations and export potential of not nuclear submarines." *Armament and economics* 1(30) (2015): 99–105.
5. Dmitriev, A. L., V. K. Ikonnikov, A. I. Kirillov, V. Ju. Ryzhkin, and E. A. Khodak. "Autonomous combined power plants with fuel cell which works on products of hydrothermal aluminium oxidation." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 11 (2008) :10–16.
6. Greiner, Leonard. *Gidrodinamika i jenergetika podvodnyh apparatov*. L.: Sudostroenie, 1978.
7. Kormilitsin, Yu. N., and O. A. Halizev. *Ustrojstvo podvodnyh lodok. Tom 2*. SPb.: «Jelmor», 2009.
8. Jagodnikov, D. A. *Vosplamnenie i gorenje poroshkoobraznyh metallov*. M.: Izdatelstvo MGTU im. N.Je. Baumana, 2009.
9. Shidlovskij, A. A. *Osnovy pirotehniki*. M.: Mashinostroenie, 1973.
10. Beksted, M. V., U. Liang, and K. V. Padduppakkam. "Matematicheskoe modelirovanie gorenija odinochnoj aljuminiovoj chasticy (obzor)." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 41.6 (2005): 15–33.
11. Fedorov, A. V., and Yu. V. Kharlamova. "Ignition of an Aluminum Particle." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 39.5 (2003): 544–547.
12. Babuk, V. A. "Gorenje metallichesкого gorjuchego v poverhnostnom sloe tverdogo raketnogo topliva." *Vtoroj mezhdunarodnyj seminar «Vnutrekamernye processy, gorenje i gazovaja dinamika dispersnyh sistem»*. SPb., 1997: 194–219.
13. Bekted, M. V. "Analiz dannyh po vremenam gorenija chastic aljuminija." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 41.5 (2005): 55–69
14. Grigoreva, T., T. Kiseleva, A. Novakova, I. Vorsina, A. Barinova, V. Sepelak, K. Becker, and N. Ljahov. "Nanokompozity metall/oksid i intermetallid/oksid." *Trudy X Mezhdunarodnoj konferencii "Porjadok, besporjadok i svojstva oksidov"*. Rostov-na-Donu–Loo, 2007: 43–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернышов Евгений Александрович —
 доктор технических наук, профессор.
 Нижегородский государственный технический
 университет им. Р.Е.Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
 Романова Елена Анатольевна — аспирант.
 Научный руководитель:
 Чернышов Евгений Александрович.
 Нижегородский государственный технический
 университет им. Р.Е.Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
 Романов Алексей Дмитриевич — инженер.
 Нижегородский государственный технический
 университет им. Р.Е.Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernyshov Evgeny Aleksandrovich —
 Dr. of Technical science, professor.
 Nizhny Novgorod State Technical
 University n.a. R.E.Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
 Romanova Elena Anatolievna — postgraduate.
 Supervisor:
 Chernyshov Evgeny Aleksandrovich.
 Nizhny Novgorod State Technical
 University n.a. R.E.Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
 Romanov Aleksey Dmitrievich — engineer.
 Nizhny Novgorod State Technical
 University n.a. R.E.Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru