

16. Zhukov, V. A. "Outlook of improving of ship diesel engine's cooling system." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 131–137.

17. Bezjukov, O. K., V. A. Zhukov, and V. N. Timofeev. "Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 93–103.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —  
доктор технических наук, профессор.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*okb-nayka@yandex.ru*  
Жуков Владимир Анатольевич —  
доктор технических наук, доцент.  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*va\_zhukov@rambler.ru*  
Воробей Константин Александрович - аспирант.  
Научный руководитель:  
Жуков Владимир Анатольевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
*kaf\_sdvs@gumrf.ru*

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —  
Dr. of Technical science, professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*okb-nayka@yandex.ru*  
Zhukov Vladimir Anatolevich —  
Dr. of Technical science, associate professor.  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*va\_zhukov@rambler.ru*  
Vorobej Konstantin Aleksandrovich — postgraduate.  
Supervisor:  
Zhukov Vladimir Anatolevich  
Admiral Makarov State University  
of Maritime and Inland Shipping  
*kaf\_sdvs@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 21 октября 2015.

УДК 629.5.035-233.1-233.21-036.5.004.62:629.5.018.713

Г. А. Кушнер,  
В. А. Мамонтов,  
А. А. Халявкин

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ФОРМЫ И КОЭФФИЦИЕНТА ЖЕСТКОСТИ МОДЕЛЕЙ ДЕЙДУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ ИЗ КАПРОЛОНА

Рассматриваются результаты исследований формы и коэффициента жесткости капролоновых втулок. Отмечается, что износ дейдвудных подшипников приводит к возникновению колебаний гребного вала и винта. Описано экспериментальное исследование моделей дейдвудных подшипников из капролона. Построены графики зависимости толщин втулок по их длине. Представлены формы износа модели втулки, составлены уравнения регрессии, их характеризующие. Отмечается, что механическое поведение капролона является функцией времени и температуры, при этом увеличение коэффициента жесткости подшипника приводит к увеличению частоты собственных колебаний вала. Описана методика испытаний образцов, изготовленных из бывшего в эксплуатации дейдвудного подшипника. Построен график зависимости отношения длин образцов от задаваемой нагрузки. Установлено наличие неоднородности распределения коэффициента жесткости в зависимости от степени износа.

Ключевые слова: судовой валопровод, дейдвудный подшипник, износ, коэффициент жесткости.

#### Введение

Дейдвудные подшипники большого числа судов изготавливаются из капролона, в процессе эксплуатации изнашиваясь неравномерно по длине подшипника. Износ вызывает неравномерную

нагруженность по длине подшипника и оказывает существенное влияние на величину контактных давлений, возникающих от воздействия гребного вала на подшипник, и, в свою очередь, на параметры поперечных колебаний валопровода. Неравномерность износа подшипника в поперечной плоскости также влияет на характер колебаний.

Износ дейдвудных подшипников, износ и повреждение облицовки гребного вала, появление усталостных трещин на валах валопровода, а также протечка дейдвудных сальников являются следствием возникновения колебаний гребного винта и гребного вала [1], [2]. Недостаточная изученность условий работы вала является одним из оснований относительно малого периода эксплуатации валопровода без ремонта [3]. Следует отметить, что дейдвудные подшипники, установленные со стороны кормы или в ступице кронштейна судна, воспринимают постоянное непрерывное биение. Они не только несут на себе вес свисающей части концевой вала с гребным винтом, но и должны поглощать колебания винта и гребного вала, возникающие при движении лопастей через постоянно меняющийся попутный поток и большие усилия, возникающие в случае воздействия переменных и случайных нагрузок на гребной винт. Все эти обстоятельства вызывают необходимость экспериментальных исследований изменения формы и коэффициента жесткости капролоновых втулок в процессе эксплуатации.

### Исследование формы износа втулок

Для определения формы износа капролоновых кормовых дейдвудных подшипников во времени как самых нагруженных подшипников валопровода было проведено экспериментальное исследование на их моделях. Модели дейдвудных подшипников изготовлены из капролона (полиамид 6) согласно ТУ 605988-93.

Исследование проводилось на токарно-винторезном станке. В патрон станка установлен вал 1 диаметром  $d = 30$  мм и длиной  $l = 1760$  мм (рис. 1). Патрон станка 6 обеспечивает жесткое защемление вала. На другом конце вала расположен диск 2 диаметром 160 мм и толщиной  $h = 40$  мм. Масса диска составляет 6,3 кг. Вал опирается на капролоновую втулку 3, установленную в металлическом корпусе 4, и фиксируется прижимным болтом 5. Исследуемая капролоновая втулка имеет следующие размеры: внешний диаметр  $D = 47$  мм; внутренний диаметр  $d = 30,5$  мм; длина  $l = 60$  мм. Металлический корпус 4 закреплен на суппорте станка. Внутренняя поверхность втулки имеет шероховатость  $Rz 40$ .

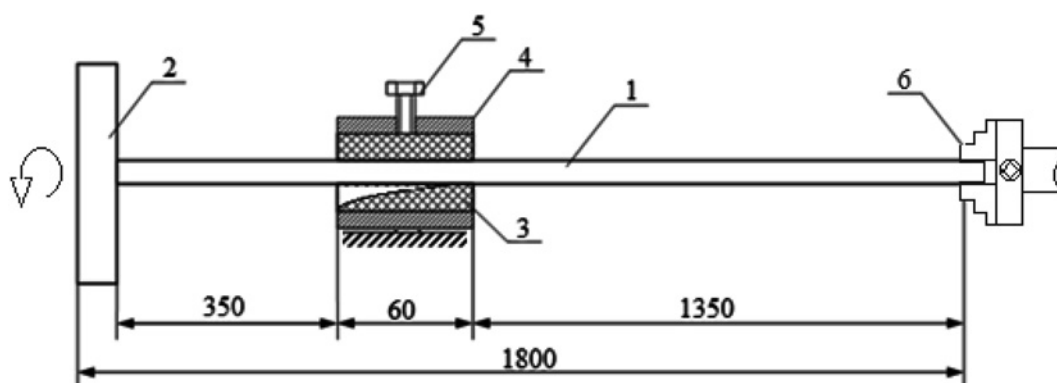


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования формы износа во времени

Для ускоренного износа втулок поверхность вращающегося вала имеет шероховатость  $Rz 160$ . Частота вращения валасоставляет 80 об/мин. Смазывание и охлаждение подшипника осуществляется проточной водой. Для испытаний были подобраны 15 капролоновых втулок. При испытаниях первых пяти втулок вал вращался в течение 15 ч; вторых пяти — 30 ч; оставшихся пяти втулок — 45 ч. Для измерения толщин изношенных втулок по их длине было просверлено по восемь отверстий. Толщина втулок измерялась через отверстия глубиномером штангенциркуля типа ШЦ-1.

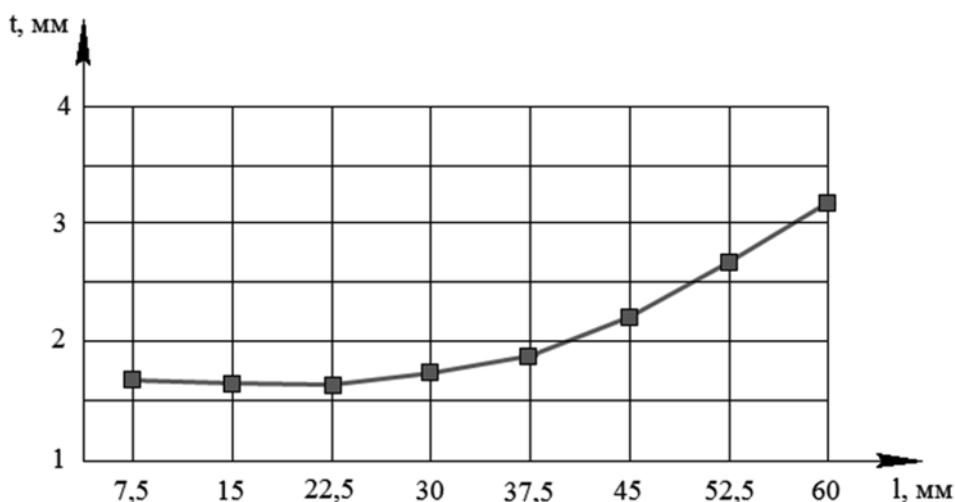


Рис. 2. Средние значения толщин стенок втулки

На основе полученных экспериментальных данных построены графики изменения толщины втулки  $t$  в зависимости от ее длины  $l$ . Форма износа имеет вид параболы (рис. 2) и не изменяется во времени.

Линии регрессии, представляющие собой полином четвертой степени:

$$y = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4, \quad (1)$$

где  $z$  — расстояние по оси абсцисс;  $y$  — износ, значения которого откладываются по оси ординат;  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  — константы, значения которых определяются исходя из реального эмпирического распределения точек, определены по данным следующей таблицы.

#### Регрессионные уравнения кривых, характеризующих форму износа втулок

| № пп. | Время, ч | $y_1$ , мм | $y_7$ , мм | Уравнение кривой износа                                                                             |
|-------|----------|------------|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 15       | 8,1        | 6          | $y = 8,1 - 3 \cdot 10^{-4} z - 3 \cdot 10^{-4} z^2 - 5 \cdot 10^{-7} z^3 - 8 \cdot 10^{-8} z^4$     |
| 2     | 30       | 8,0        | 5,9        | $y = 8,0 - 3 \cdot 10^{-4} z - 3 \cdot 10^{-4} z^2 - 4,9 \cdot 10^{-7} z^3 - 7,9 \cdot 10^{-8} z^4$ |
| 3     | 45       | 7,5        | 5,4        | $y = 7,5 - 3 \cdot 10^{-4} z - 2,8 \cdot 10^{-4} z^2 - 5 \cdot 10^{-7} z^3 - 8,1 \cdot 10^{-8} z^4$ |

#### Определение коэффициента жесткости капролона

Жесткость дейдвудных подшипников оказывает значительное влияние на частоту собственных колебаний вала, с увеличением жесткости значение собственной частоты растёт [4] — [6]. При кратковременном воздействии нагрузки и малых напряжениях капролон ведет себя как упругий материал с постоянным модулем упругости. При большой длительности нагружения и высоких напряжениях наблюдается ползучесть материала. При больших напряжениях хорошо заметен выход на горизонтальный участок кривой *напряжение — деформация* и, следовательно, развитие вынужденной высокоэластичной деформации. С увеличением температуры механический модуль и предел текучести уменьшаются при кратковременных воздействиях, а при большой длительности нагружения возрастает ползучесть [7].

Исследования поверхностного слоя после воздействия трения в воздушной среде показывают различия формы и структуры поверхности в зависимости от механизма износа. Углеродное волокно работает в условиях трения, зависящего от распределения давления по форме волокна [8]. При использовании углеродного армирующего волокна в процессе термического или естественного старения матрица утрачивает способность перераспределять нагрузки [9]. Следовательно, механическое поведение капролона является функцией времени и температуры. Способность ка-

пролона сорбировать влагу из окружающей среды приводит к значительному изменению механических свойств, в частности, коэффициента упругости.

Для исследования коэффициента жесткости капролона были изготовлены образцы согласно ГОСТ 4651-82. Часть образцов изготовлена из капролона дейдвудного подшипника, бывшего в эксплуатации (рис. 3). Образцы были взяты с участков, имеющих различную степень износа, и, следовательно, подвергались различным кратковременным и долговременным знакопеременным нагрузкам.

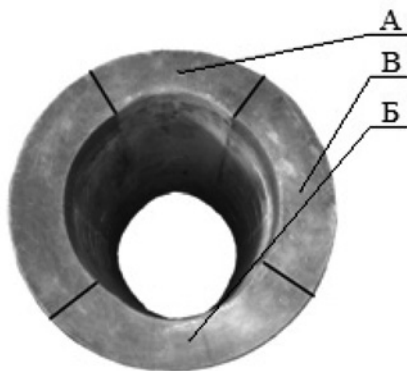


Рис. 3. Участки дейдвудного подшипника:  
А — верхний; Б — нижний; В — боковой

Методика эксперимента заключалась в следующем. Образцы из капролона, которые имели форму цилиндра сплошного сечения диаметром  $d = 20$  мм и длиной  $l_0 = 50$  мм, сжимались при действии задаваемой нагрузки лабораторным испытательным гидравлическим прессом П-125. Величина смещения образцов при сжатии измерялась микрометром. Согласно требованиям проведения измерений при малой выборке, в эксперименте использовано небольшое количество параллельных измерений. Полученные результаты подверглись статистической обработке при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$ . По средним значениям результатов исследования построен график зависимости отношения длин образцов  $y_{A,B}$  и  $y_B$ , вырезанных из участков А, Б и В, соответственно, от задаваемой нагрузки  $P$  (рис. 4). Отношение  $y_{A,B}/y_B$  наглядно демонстрирует различие величин в зависимости от изменяемого параметра — нагрузки.

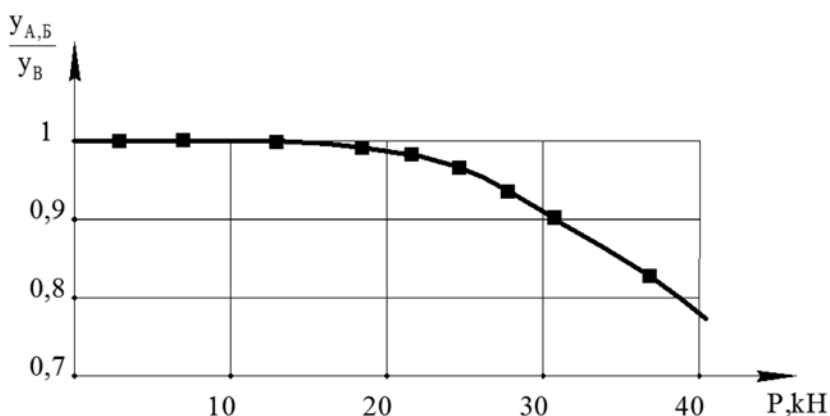


Рис. 4. Зависимость отношения длин образцов от задаваемой нагрузки

Среднее значение коэффициента жесткости образцов определялось в зоне пропорциональности, поскольку при нагрузке более 15 кН наблюдается нелинейный закон деформации образцов, о чем свидетельствует не только быстрое изменение длины образцов, но и интенсивное изменение их формы. Модуль упругости капролона в зоне действия закона пропорциональности определен

согласно ГОСТ 9550-81, коэффициент жесткости — по методу А. Б. Клейнера [10]. Среднее значение модуля упругости составляет:

– для образцов, вырезанных из участков *A* и *B*,  $E_{cp} = 2,79 \cdot 10^9$  Па, коэффициент жесткости  $k_{cp} = 1,12 \cdot 10^9$  Па;

– для образцов участка *B*  $E_{cp} = 3,9 \cdot 10^9$  Па, коэффициент жесткости  $k_{cp} = 1,59 \cdot 10^9$  Па.

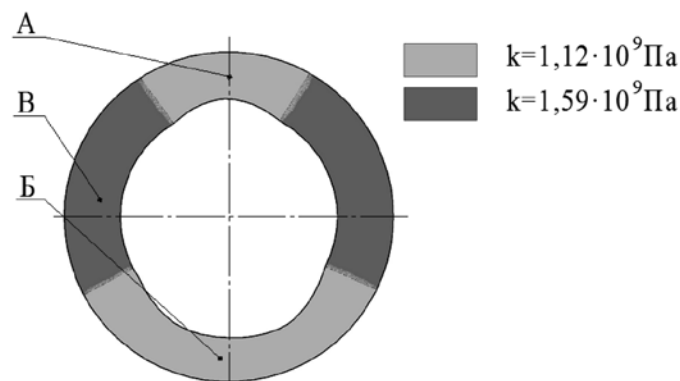


Рис. 5. Распределение коэффициента жесткости по периметру капролоновых втулок

Неоднородность коэффициента жесткости по периметру втулки приведена на рис. 5. Снижение коэффициента жесткости изношенных участков *A* и *B* по отношению к участку *B* составило примерно 40 %.

### Выводы

1. Установлено, что износ по длине капролоновых дейдвудных подшипников судов является неравномерным и представляет собой форму параболы четвертого порядка.
2. На изношенном капролоновом дейдвудном подшипнике существует неоднородность распределения коэффициента жесткости и модуля упругости в зависимости от степени износа отдельного участка. Снижение жесткости изношенных участков обусловлено различными факторами, в частности, увеличенной нагрузкой гребного вала.
3. Полученные данные могут быть полезны при расчете поперечных колебаний валопроводов судов, а также при прогнозировании их надежности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румб В. К. Прогнозирование долговечности дейдвудных подшипников / В. К. Румб // Морской вестник. — 2008. — № 2. — С. 30–31.
2. Мамонтов В. А. Анализ износов капролоновых втулок дейдвудных подшипников гребного вала / В. А. Мамонтов, А. И. Миронов, Ч. А. Кужахметов, А. А. Халявкин // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 1. — С. 30–35.
3. Миронов А. И. Поперечные колебания гребного вала при его одностороннем взаимодействии с дейдвудным подшипником / А. И. Миронов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 26–34.
4. Мамонтов В. А. Расчет поперечных колебаний валопроводов судов с учетом длины и жесткости дейдвудных подшипников / В. А. Мамонтов, А. Р. Рубан, Н. В. Куличкин, А. А. Халявкин // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 30–33.
5. Халявкин А. А. Влияние коэффициента жесткости капролона на частоту собственных колебаний валопроводов судов / А. А. Халявкин, В. А. Мамонтов, М. П. Комаров // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 45–50.
6. Халявкин А. А. Оценка влияния износа кормового дейдвудного подшипника на собственную частоту при поперечных колебаниях валопровода судна / А. А. Халявкин, М. П. Комаров, В. А. Мамонтов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 3. — С. 13–20.



7. Нелсон У. Е. Технология пластмасс на основе полиамидов / У. Е. Нелсон. — М.: Химия, 1979. — 254 с.
8. Wilczewska I. Механизм изнашивания используемых в судостроении полимеров, укрепленных однонаправленными углеродистыми волокнами / I. Wilczewska, R. Kaczyński, S. G. Chulkin // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 71–79.
9. Белецкий Е. Н. Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условиях эксплуатации / Е. Н. Белецкий, В. М. Петров, С. Н. Безпальчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 66–73.
10. Клейнер А. Б. Взаимосвязь износа вкладышей дейдвудных подшипников с несущей способностью гребного вала: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Клейнер. — Одесса, 1972. — 22 с.

## RESEARCH INTO THE CHANGE OF THE FORM AND STIFFNESS COEFFICIENT OF POLYAMIDE SLEEVE MODELS

*The article is devoted to the results of the research into wear and stiffness of polyamide bushes. It is noted that wear of the stern-tube bearings leads to vibrations of the propeller and propeller shaft. Experimental study was carried out on the models of the stern-tube bearings made of polyamide. The thickness of the bush wall was plotted as a function of the bush length. The forms of bush wear are presented, and regression equations are made up to describe them. It is noted that increasing stiffness of the bearing leads to an increase in the natural frequency of the shaft. It is alleged that the mechanical behavior of polyamide is a function of time and temperature. The technique to test the samples made from previously used stern-tube bearing is described. A plot of the samples lengths relationship versus a given load is constructed. The presence of inhomogeneity in stiffness distribution depending on the degree of wear is established.*

*Keywords: shafting, stern-tube bearing, wear, stiffness coefficient.*

## REFERENCES

1. Roub, V.K. "Forecasting of stern tube bearings' durability." *Morskoy Vestnik* 2 (2008): 30-31.
2. Mamontov, Victor Andreevich, Alfred Ivanovich Mironov, Chingiz Asanovich Kuzhakhmetov, and Alexey Aleksandrovich Khalyavkin. "Wear analysis of polycaprolactam bushings of deadwood bearings of the propeller shaft." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2012): 30-35.
3. Mironov, Alfred Ivanovich. "Transverse vibrations of the propeller shaft in its one-way interaction with stern bearing." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2012): 26-34.
4. Mamontov, Victor Andreevich, Anatoliy Rashidovich Ruban, Nickolay Vladimirovich Kulichkin, and Aleksey Aleksandrovich Khalyavkin. "Calculation of transverse vibrations of ship shafts taking into account the length and rigidity of stern-tube bearings." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2010): 30-33.
5. Khalyavkin, Aleksey Aleksandrovich, Victor Andreevich Mamontov, and Mikhail Petrovich Komarov. "Effect of caprolon stiffness on the natural frequency of marine shaft lines." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2012): 45-50.
6. Khalyavkin, Aleksey Aleksandrovich, Mikhail Petrovich Komarov, and Victor Andreevich Mamontov. "Assessment of influence of wear and tear of the stern shaft bearing on its own frequency while cross fluctuations of shaft lines of the vessel." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2014): 13-20.
7. Nelson, U. E. *Tehnologija plastmass na osnove poliamidov*. M.: Izd-vo "Himija", 1979.
8. Wilczewska, I., R. Kaczyński, and S. G. Chulkin. "The mechanism of wear process of the polymers used in shipbuilding strengthened by unidirectional carbonaceous fibres." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 71-79.

9. Beleckij, E. N., V. M. Petrov, and S. N. Bezpalchuk. "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