

УДК 531.-383-11:531.714.7

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-589-594

ВЫБОР КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В ДАТЧИКЕ ИНДУКЦИОННОГО ЛАГА

А.С. Воронов^{a,b}, М.И. Евстифеев^{a,b}

^a АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^b Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: Al.s.voronov@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.05.20, принята к печати 30.06.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Воронов А.С., Евстифеев М.И. Выбор композиционного материала в датчике индукционного лага // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 589–594. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-589-594

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена проблема выбора изоляционного материала для глубоководного датчика индукционного лага. Исследовано влияние характеристик изоляционного материала на эксплуатационные характеристики датчика. **Метод исследования.** При анализе влияния конструктивных параметров на инструментальную погрешность датчика использована программа MATLAB, в которой построена математическая модель составляющей инструментальной погрешности и проведена ее оценка. Моделирование напряженно-деформированного состояния датчика проведено методом конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS Workbench. Анализ отслаивания изоляционного материала от корпуса при усадке выполнен в модуле Static Structural. Моделирование заливки проведено в модуле Fluid Flow. При расчетах все материалы приняты изотропными. **Основные результаты.** Показано влияние характеристик изоляционного материала на величину инструментальной погрешности датчика индукционного лага. Описаны конструкторско-технологические проблемы выбора изоляционного материала. Приведены рекомендации по выбору конструктивных параметров для уменьшения отслаивания материала и возникновения пустот датчика, образующихся при заливке композиционным материалом. Обоснованность рекомендаций подтверждена компьютерным моделированием и испытаниями. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть применены при модернизации, проектировании и конструировании новых индукционных датчиков скорости.

Ключевые слова

датчик индукционного лага, композиционный материал, инструментальная погрешность, компьютерное моделирование

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-589-594

SELECTION OF COMPOSITE MATERIAL IN ELECTROMAGNETIC LOG SENSOR

A.S. Voronov^{a,b}, M.I. Evstifeev^{a,b}

^a Concern CSRI “Elektropribor”, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^b ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Al.s.voronov@yandex.ru

Article info

Received 27.05.20, accepted 30.06.20

Article in Russian

For citation: Voronov A.S., Evstifeev M.I. Selection of composite material in electromagnetic log sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 589–594 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-589-594

Abstract

Subject of Research. The paper considers the issues of choosing an insulating material for a deep-sea electromagnetic log sensor. The effect of the insulating material characteristics on the operational factors of the sensor is studied. **Method.** Matlab program was used to analyze the effect of design parameters on the instrumental error of the sensor. For this purpose a mathematical model of the instrumental error component was built, and its evaluation was carried out.

The stress-strain state of the sensor was simulated by the finite element method in the ANSYS Workbench application package. Analysis of insulating material peeling from the case during shrinkage was carried out in the Static Structural module. Fill simulation was performed in the Fluid Flow module. All materials are taken to be isotropic at calculations. **Main Results.** The effect of the insulating material characteristics on the instrumental error of the electromagnetic log sensor is shown. The design and technological issues of the insulating material choice are described. Recommendations on the choice of design parameters are given to reduce peeling of the material and the occurrence of sensors emptiness formed by filling with composite material. The validity of the recommendations is confirmed by computer simulation and experiments. **Practical Relevance.** The results obtained can be applied in the modernization, design and construction of new electromagnetic log sensors.

Keywords

electromagnetic log sensor, composite material, instrumental error, computer simulation

Введение

Современные исследования Мирового океана направлены на изучение подводной среды и донного рельефа, выполнение научной океанографической деятельности, определение возможности проведения подводно-технических и аварийно-спасательных работ на больших глубинах. Актуальность таких исследований обуславливается, например, необходимостью определения границ России и освоения Арктики, что подтверждается историческими погружениями аппарата «Мир» на глубину 4300 м в районе Северного полюса [1–4].

Несмотря на значительное развитие высокоточных навигационных систем, в особенности спутниковых, использование лага для измерения скорости судна является обязательным, что регламентировано во многих руководящих документах, в том числе в Российском морском регистре судоходства. Следует отметить, что при подводных работах невозможно применение спутниковых навигационных систем, что ужесточает требования к навигационным приборам.

В настоящее время, благодаря наборам специфических свойств и развитию технологий производства, композиционные материалы (КМ) находят применение в различных сферах деятельности, таких как машино-, авиа-, судостроение и т. д., причем сферы использования таких материалов постоянно расширяются.

Целью работы является определение основных требований к КМ, используемому в качестве заливочного изоляционного материала (ИМ), обеспечивающего работу датчика индукционного лага в заданных условиях эксплуатации.

Работа является продолжением исследований в области расширения эксплуатационных характеристик индукционных датчиков [5–7].

Влияние гидростатического давления на погрешность датчика

Принцип работы датчика индукционного лага основан на явлении электромагнитной индукции Фарадея. Согласно этому принципу при перемещении проводника в магнитном поле в нем индуцируется электродвижущая сила, пропорциональная скорости его перемещения [8]. Магнитное поле формируется катушкой с электродами, в качестве проводника используется забортная вода.

При эксплуатации датчика под действием внешнего гидростатического давления (ГД) происходят деформа-

ции элементов конструкции датчика (рис. 1), которые изменяют начальное положение электродов.

Вследствие относительного смещения конструктивных элементов, в частности электродов, меняются электромагнитные характеристики датчика, вызывающие изменения его показаний. Относительные смещения элементов связаны с конечной жесткостью конструкции и вызывают дополнительную инструментальную погрешность датчика [9].

Магнитная индукция на оси катушки на расстоянии z от ее торца определяется из закона Био–Савара–Лапласа [10]

$$B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 I n \frac{R^2}{(R^2 + z^2)^{1.5}}, \tag{1}$$

где μ — магнитная проницаемость среды; μ_0 — магнитная постоянная; I — ток в катушке; n — число витков в катушке; z — расстояние между электродами и катушкой; R — средний радиус катушки индуктивности.

Изменение расстояния между электродами и катушкой складывается из деформаций слоя ИМ материала между ними и деформаций самих электродов. Это вызывает изменение величины магнитной индукции в соответствии с выражением (1).

Учитывая закон Фарадея и введя допущение, что катушка является абсолютно жестким телом, относительная инструментальная погрешность, вызванная деформациями конструкции, определяется из выражения

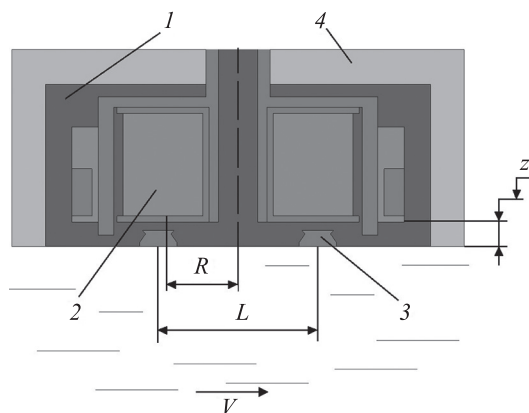


Рис. 1. Конструкция датчика индукционного лага: 1 — изоляционный материал; 2 — катушка; 3 — электрод; 4 — корпус; L — расстояние между электродами; R — средний радиус катушки индуктивности; z — расстояние между наружной поверхностью электрода и катушкой; V — скорость потока забортной воды

$$\delta V(X) = 1 - \left(\frac{1 + (n(1 - X) + m(1 - kX))^2}{1 + (n + m)^2} \right)^{1,5}, \quad (2)$$

где $k = \frac{E_1}{E_2}$, $X = \frac{P}{E_1}$, $n = \frac{l_1}{R}$, $m = \frac{l_2}{R}$ — безразмерные параметры; δV — относительная погрешность; P — гидростатическое давление; l_1 — высота электрода; l_2 — высота слоя изоляционного материала под электродом; E_1 — модуль Юнга материала электрода; E_2 — модуль Юнга изоляционного материала.

На основании формулы (2) можно получить, что величина инструментальной погрешности датчика, вызванная воздействием внешнего ГД, в основном зависит от изменения параметра m , характеризующего толщину ИМ, и при определенном соотношении конструктивных параметров составляет величину 3 %.

Помимо деформаций, обусловленных механическим воздействием ГД, конструкция подвержена изменению размеров при воздействии изменения температуры окружающей среды. В этом случае перемещение электродов складывается из механических и температурных деформаций, и выражение (2) принимает вид

$$\delta V(X, t) = 1 - \left(\frac{1 + (n(1 + \alpha_1 \Delta t - X) + m(1 + \alpha_2 \Delta t - kX))^2}{1 + (n + m)^2} \right)^{1,5}, \quad (3)$$

где α_1 — температурный коэффициент линейного расширения материала электрода; α_2 — температурный коэффициент линейного изоляционного материала; Δt — изменение температуры.

При реальных значениях параметров n , m , k и Δt , входящих в формулы (2) и (3), относительная погрешность датчика, учитывающая только механические деформации, отличается не более чем на 10 % от относительной погрешности, учитывающей дополнительно температурные деформации.

В качестве реальных данных выбраны следующие значения параметров: $n = 0-1$, $m = 0-1$, $k > 1$, Δt в интервале от -22 до 12 °С.

Это свидетельствует о малости влияния температурных деформаций в реальных конструкциях на погрешности датчика. Данное утверждение верно, при условии, что α_1 и α_2 имеют порядок 10^{-5} , что характерно для большинства конструкционных материалов.

После разложения выражения (2) по параметру $X (P \ll E_1)$ в ряд Маклорена, ограничившись первым порядком малости, получим:

$$\delta V(X) \approx 3X \frac{(n + m)(n + km)}{1 + (n + m)^2}. \quad (4)$$

Введя безразмерный параметр $x = \frac{m}{n} \geq 0$, из выражения (4) можно получить неравенство, определяющее соотношение параметров датчика, при выполнении которого величина возникающей инструментальной погрешности не превышает допустимого значения

$$n \leq \sqrt{\frac{\delta V_0 (\psi - 1)}{3X(1+x)(1+kx) \left[1 - \frac{\delta V_0 (\psi - 1)(1+x)}{3X(1+kx)} \right]}}, \quad (5)$$

где δV_0 — значение допустимой инструментальной погрешности датчика; $\psi = \frac{\delta V}{\delta V_0}$ — коэффициент запаса, определяемый из технических требований.

На рис. 2 изображена поверхность, под которой располагается область допустимых соотношений конструктивных параметров в соответствии с неравенством (5).

Анализ показывает, что параметр k , определяющий соотношение модулей Юнга применяемых материалов, оказывает существенное влияние на величину инструментальной погрешности датчика, что подтверждает важность выбора ИМ. Для обеспечения заданного уровня инструментальной погрешности требуется выбирать ИМ, исходя из его механических свойств, конструктивных параметров датчика и условий эксплуатации.

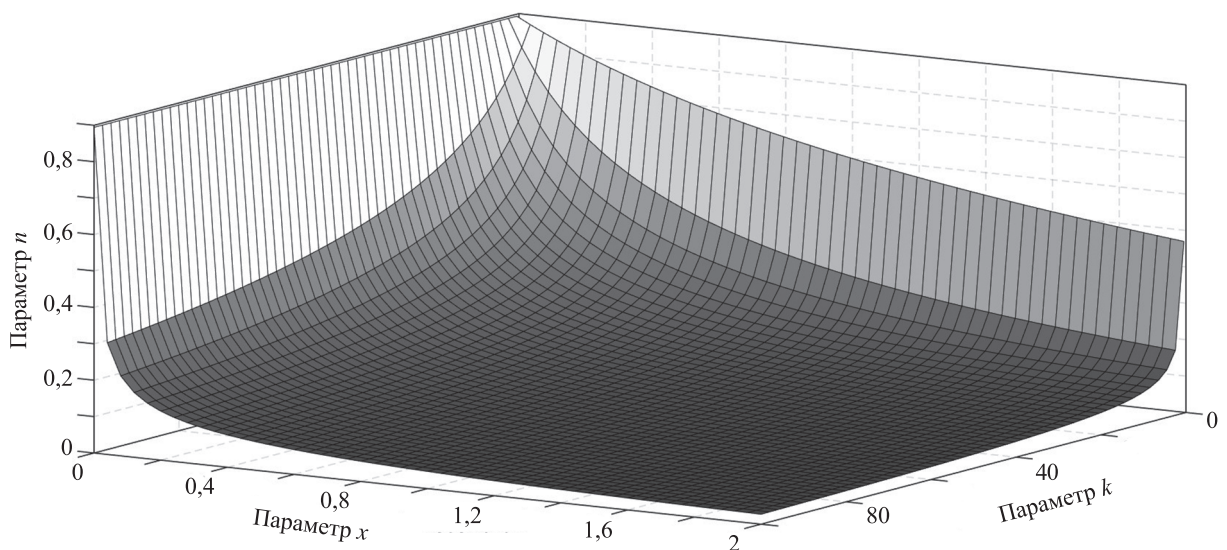


Рис. 2. Область допустимых значений конструктивных параметров n , x и k при $\delta V_0 = 0,02$; $X = 7,5 \cdot 10^{-4}$; $\psi = 1,05$

Выбор свойств изоляционного материала

Выбор характеристик ИМ связан с решением ряда проблем конструкторско-технологического характера [7]. Механические свойства материала должны быть таковы, чтобы предел его прочности при любых видах деформаций (растяжение, сжатие, сдвиг, срез и пр.) превышал возможные напряжения в конструкции при воздействии ГД. В качестве ИМ для датчика возможно применение современных композитных и наноструктурированных материалов, активно используемых в судостроении [11–15]. Очевидно, что применяемый материал должен быть диамагнетиком и не должен создавать возмущающих магнитных эффектов, вызывающих дополнительные погрешности датчика.

Технология изготовления датчика предусматривает заливку жидкого ИМ для дальнейшего обволакивания им блока электроники и электродов, выбранный материал должен обладать необходимой вязкостью. Обязательным требованием для ИМ является обеспечение максимальной адгезии контактирующих с ним элементов (корпус, электроды и пр.), что позволяет минимизировать возможность отслаивания ИМ, и как следствие, образования пустот и незаполненных зон, являющихся потенциальными концентраторами напряжения. Прочность соединения «изоляционный материал — корпус датчика» («ИМ — корпус») зависит от площади и качества обработки сопрягаемых поверхностей. Для улучшения адгезии перед заливкой ИМ рекомендуется¹ шкурить и пескоструить поверхности для повышения шероховатости и неровностей, что увеличивает площадь соприкосновения материалов. Вследствие возможного образования пустот (воздушных карманов), заполнение ИМ следует производить в вакууме.

Одним из критических свойств ИМ является его усадка при затвердевании. В случае больших деформаций, обусловленных полимеризацией, в конструкции возникают зоны отслаивания ИМ на стадии изготовления, даже без воздействия внешнего ГД. Если невозможно подобрать материал с допустимой усадкой, требуется уменьшение толщин ИМ для минимизации абсолютных значений линейных деформаций. Альтернативным способом уменьшения вероятности трещинообразования в ИМ, обладающего высокой усадкой, является применение ИМ с малыми значениями модуля Юнга. В этом случае в ИМ образуются впадины, которые требуется устранить дополнительной заливкой.

Для нормального функционирования датчика не допускается засорение торцевой поверхности, на которой находятся электроды: тиной, планктоном и прочими организмами, которые активно обрастают на забортных приборах и корпусах аппаратов [16]. В связи с этим ИМ не должен содержать в своем составе биологических добавок. Изоляционные свойства материала не должны ухудшаться со временем под действием температурных факторов или в связи с постоянным нахождением датчика в воде. Приведенный список требований к ИМ не является полным.

¹ Компаунды на основе эпоксидных смол [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://all-epoxy.ru/tablizi/kompaund.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.06.2020).

Выбор заливочного материала

Очевидно, что при изменении температуры элементы конструкции датчика подвержены тепловым деформациям, величины которых пропорциональны коэффициентам теплового расширения материалов. Известно, что напряжения в деталях не возникают, если при нагреве или охлаждении ничего не препятствует тепловым деформациям. Если контакт между телами, имеющими различные коэффициенты теплового расширения, зафиксирован (имеется болтовое, клеевое или прочее соединение), в нем возникают термомеханические напряжения, существенно превосходящие механические [17].

В конструкции датчика индукционного лага ИМ имеет адгезионную связь с корпусом. Одной из обязательных технологических операций, требуемых для заливки ИМ, является нагрев корпуса и ИМ до определенной температуры с последующим охлаждением по регламентированному режиму². При охлаждении конструкции целостность контакта «ИМ — корпус» нарушается. Вследствие того, что ИМ обладает значительно большим значением коэффициента теплового расширения, чем металл корпуса, (значения коэффициентов теплового расширения эпоксидного компаунда и титана — $5,98 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ и $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно) возникающие напряжения могут быть значительными.

Наличие нарушения целостности контакта «ИМ — корпус» можно прогнозировать по величине напряжений, возникающих в контакте. Если возникающие напряжения превышают максимально допустимые напряжения на отрыв в паре «ИМ — корпус», то происходит отслоение материала.

С целью выявления возникающих в контакте «ИМ — корпус» напряжений построена компьютерная физико-механическая модель, в которой определены деформации и напряжения, вызванные тепловым воздействием при изготовлении датчика.

В компьютерной модели использовались характеристики материалов: для корпуса датчика — титан ВТ1-0; для ИМ — эпоксидный компаунд УП-5-105/1А.

На корпусе выполнены кольцевые канавки различной конфигурации для повышения адгезии материала. Исследован наименее благоприятный случай заполнения ИМ корпуса — во внутренней полости электроника датчика отсутствует, тогда тепловым деформациям подвержен значительно больший объем ИМ. В процессе моделирования принято допущение, что ИМ полностью заполняет все канавки корпуса. Изменение температуры принято в соответствии с технологическими режимами, применяемыми в ходе изготовления датчика. Задача решалась в осесимметричной поставке.

В результате компьютерного моделирования методом конечных элементов в программе ANSYS установлено, что применение в качестве ИМ компаунда УП-5-105/1А, используемого ранее для безкорпусной заливки надводных датчиков, для заливки в корпус датчика недопустимо, так как при охлаждении происходит

² ОСТ 5.8224-81. Герметизация электроэлементов эпоксидными компаундами. Типовые технологические процессы. Введен 01.01.1983. 338 с.

нарушение адгезионной связи и отслаивание компаунда от корпуса. Вблизи нескольких канавок возникают эквивалентные напряжения, превышающие максимально допустимые (более 40 МПа)¹, что вызывает образование трещин. На рис. 3 представлены результаты испытаний макета датчика (рис. 3, а) и численного моделирования (рис. 3, б). Красным цветом указаны места с возникновением критических напряжений.

Проведенные испытания показали, что допустимым материалом — заменителем ИМ компаунда УП-5-105/1А в исследуемой конструкции датчика является компаунд УП-592/II-2. Более подробно о влиянии ИМ отмечено в [6, 7]. Результаты испытаний и моделирования представлены на рис. 4.

Красным цветом указаны места с возникновением критических напряжений.

Получено, что в зоне контакта «корпус–компаунд» не возникает напряжений, превышающих допустимые. На основании этого применение компаунда УП-592/II-2 в конструкции датчика можно считать обоснованным.

Заключение

Рассмотрена проблематика выбора изоляционного материала для датчика индукционного лага. Показано, что при воздействии внешнего гидростатического давления в датчике возникает инструментальная погрешность, величина которой зависит от величины взаимного смещения конструктивных элементов. Приведены аналитические выражения, позволяющие подобрать соотношения механических свойств изоляционного материала и конструктивных параметров датчика, при которых выявленная погрешность не превышает допустимую.

¹ Компаунды на основе эпоксидных смол [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://all-epoxy.ru/tablizi/kompaund.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 20.06.2020).

Литература

1. Андреев С.И. Минеральные ресурсы Мирового океана: перспективы изучения и освоения // Геология морей и океанов. М., 2007. С. 85–87.
2. Буриличев А.В. Будущее человечества неразрывно связано с изучением, исследованием океана // Безопасность России. 2011. № 5. С. 40–43.
3. Филимонов А.К. Подводная робототехника // Материалы международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб., 2011. С. 43–49.
4. Sagalevich A. Methods of deep dives in whole ice cover conditions // *Oceanology*. 2016. V. 56. N 3. P. 452–458. doi: 10.1134/S0001437016030176
5. Аванесов Ю.Л., Воронов А.С., Евстифеев М.И. Компьютерное моделирование прочностных характеристик датчика индукционного лага // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 738–744. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-738-744
6. Аванесов Ю.Л., Буканова А.Н., Воронов А.С., Евстифеев М.И. Оптимизация конструктивных параметров глубоководного индукционного датчика скорости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 140–146. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-140-146
7. Аванесов Ю.Л., Воронов А.С., Евстифеев М.И. Проблемы проектирования глубоководного датчика индукционного лага //

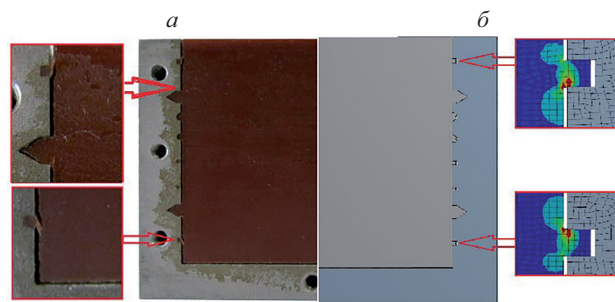


Рис. 3. Исследование применения компаунда УП-5-105/1А: испытание макета датчика (а); численное моделирование (б)

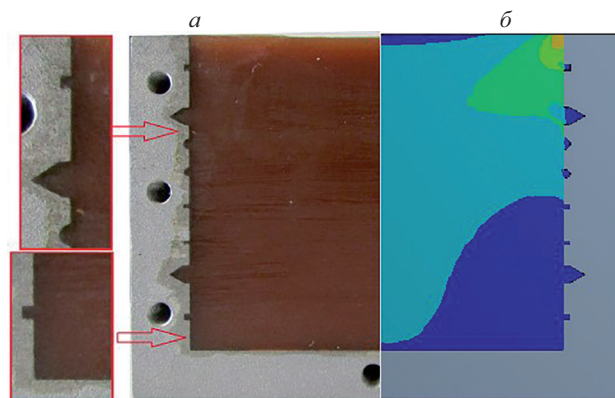


Рис. 4. Исследование применения компаунда УП-592/II-2: испытание макета датчика (а); численное моделирование (б)

Обоснованы ключевые требования к изоляционному материалу датчика индукционного лага, проведен конечно-элементный анализ компьютерной модели заливки компаунда в корпус датчика и натурные испытания, подтвердившие результаты моделирования.

References

1. Andreev S.I. Global ocean mineral resources: study and development prospects. *Geology of the Seas and Oceans*. Moscow, 2007, pp. 85–87. (in Russian)
2. Burilichev A.V. The future of mankind is inextricably linked with ocean study and exploration. *Bezopasnost' Rossii*, 2011, no. 5, pp. 40–43. (in Russian)
3. Filimonov A.K. Underwater robotics. *Proc. of the International Scientific and Technical Conference “Extreme robotics”*, 2011, pp. 43–49. (in Russian)
4. Sagalevich A. Methods of deep dives in whole ice cover conditions. *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 3, pp. 452–458. doi: 10.1134/S0001437016030176
5. Avanesov Y.L., Voronov A.S., Evstifeev M.I. Computer simulation of electromagnetic log sensor strength characteristics. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 738–744. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-738-744
6. Avanesov Y.L., Bukanova A.N., Voronov A.S., Evstifeev M.I. Optimization of design parameters for depth electromagnetic speed sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 140–146. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-140-146
7. Avanesov Yu.L., Voronov A.S., Evstifeev M.I. Electromagnetic log deep-sea sensor design issues. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2018,

- Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 2(101). С. 77–87. doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.2.077-087
8. Саранчин А.И., Полковников В.Ф., Завьялов В.В. Индукционный электронный лаг ИЭЛ-2М: учебное пособие. Владивосток, 2003. 40 с.
 9. Avanesov Yu.L., Evstifeev M.I., Voronov A.S. Estimating the instrumental error of electromagnetic log sensor in ultradeep water // Proc. of the International Workshop Navigation and Motion Control 2017. 2017. P. 62–67.
 10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3. Электричество: учебное пособие для вузов. М.: Наука, 1996. 704 с.
 11. Гуменюк Н.С., Грушин С.С. Применение композитных материалов в судостроении // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 8-1. С. 116–117.
 12. Пикун В.В. К созданию композиционного наноматериала на базе стекла // Перспективные материалы. 2008. № 3. С. 78–81.
 13. Саргсян А.С., Бахарева В.Е. Новые теплостойкие стеклопластики электроизоляционного назначения // Вопросы материаловедения. 2016. № 1(85). С. 92–98.
 14. Ушков С.С., Николаев Г.И., Михайлов В.И., Матвеев Г.В., Хесин Ю.Д. Конструкционные материалы для глубоководных аппаратов // Судостроение. 2004. № 5. С. 111–114.
 15. Юреско Т.А. Сферопластик как тепловая изоляция обитаемых подводных технических средств // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2014. № 2. С. 21–26.
 16. Звягинцев А.Ю. Изучение морского обрастания в Институте биологии моря ДВО РАН (1968-2006 гг.) // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2007. № 4. С. 3–16.
 17. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов: учебник для авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.

Авторы

Воронов Александр Сергеевич — кандидат технических наук, научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; доцент практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57203148343, ORCID ID: 000-002-5003-1097, Al.s.voronov@yandex.ru

Евстифеев Михаил Илларионович — доктор технических наук, доцент, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 37053633100, ORCID ID: 000-001-8785-767X, mevstifeev@eprib.ru

Authors

Aleksander S. Voronov — PhD, Researcher, Concern CSRI “Elektroprigor”, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Associate Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57203148343, ORCID ID: 000-002-5003-1097, Al.s.voronov@yandex.ru

Mikhail I. Evstifeev — D.Sc., Associate Professor, Department Head, Concern CSRI “Elektroprigor”, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 37053633100, ORCID ID: 000-001-8785-767X, mevstifeev@eprib.ru