



УДК 629.5.05

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА ИНДУКЦИОННОГО ЛАГА

Ю.Л. Аванесов<sup>a</sup>, А.С. Воронов<sup>a,b</sup>, М.И. Евстифеев<sup>a,b</sup><sup>a</sup> АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация<sup>b</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация,

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

### Информация о статье

Поступила в редакцию 04.04.16, принята к печати 14.06.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-738-744

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** 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

### Аннотация

**Предмет исследования.** Исследованы проблемы недостаточной прочности датчика индукционного лага. Проанализирована конструкция датчика индукционного лага для глубоководных аппаратов, построена математическая модель. Продемонстрированы конструкторские и технологические решения, способствующие повышению эксплуатационных характеристик данного типа лага. **Метод исследования.** Исследование выполнено с применением метода конечных элементов в пакете прикладных программ ANSYS. Расчеты проведены в модуле static structural, в котором создана нагрузка, имитирующая внешнее гидростатическое давление. Для проверки сходимости результатов выполнен анализ модели встроенными средствами оценки качества элементов. При расчетах все материалы приняты изотропными. **Основные результаты.** Представлены пути повышения прочности забортных средств измерения скорости судна. Методом конечно-элементного анализа получены результаты расчета напряженно-деформированного состояния приборов под воздействием забортной воды при различных глубинах. Указаны технологические особенности производства датчика. Приведены рекомендации по изменению конструкции для увеличения его прочности, подтвержденные компьютерным моделированием. **Практическая значимость.** Указанные пути повышения прочности прибора позволяют расширить сферу его использования. Полученные результаты могут быть применены при модернизации, проектировании и конструировании новых датчиков индукционных лагов, работающих при повышенных давлениях.

### Ключевые слова

глубоководные исследования, индукционный лаг, прочность

## COMPUTER SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC LOG SENSOR STRENGTH CHARACTERISTICS

Y.L. Avanesov<sup>a</sup>, A.S. Voronov<sup>a,b</sup>, M.I. Evstifeev<sup>a,b</sup><sup>a</sup> Concern “CSRI Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation<sup>b</sup> ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

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

### Article info

Received 04.04.16, accepted 14.06.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-738-744

Article in Russian

**For citation:** 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. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-738-744

### Abstract

**Subject of Research.** The problems of insufficient strength of the EM log sensor are studied. The EM log sensor design for deep-sea vehicles is analyzed; a mathematical model of EM log sensor is built. The design and technological solutions that improve the performance of this type of log are shown. **Method.** The study was performed using the finite element method in the ANSYS software. The calculations were performed in the static structural module, in which the load was created in the way that simulated the external hydrostatic pressure. To check the reproducibility the analysis of model was carried out by built-in assessment of the quality elements. All materials are taken to be isotropic. **Main Results.** The ways of increasing the strength of outboard tools for measuring the ship speed are presented. Calculating results of the stress-strain state of devices

under the influence of seawater at various depths were obtained by the method of finite element analysis. The technological features of the sensor production are shown. The recommendations for changing the log construction to increase its strength, supported by computer modeling, are given. **Practical Relevance.** The discussed ways of increasing the strength of the device enable to expand implementation area. The results can be applied in the modernization of the design and construction of new EM log sensor operating at high pressures.

### Keywords

deep-sea research, electromagnetic log, strength

### Введение

Современные глубоководные 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, в том числе, обуславливается необходимостью определения границ России и освоения Арктики, что подтверждается историческими погружениями аппарата «Мир» на глубину 4300 м в районе Северного полюса [1–4]. Совершенствование глубоководных аппаратов, таких как «Мир» и «Русь», позволяет совершать погружения на глубины до 6 км [5–7]. При таких глубинах забортная аппаратура испытывает давление до 60 МПа. Это выдвигает требования обеспечения прочности бортовых средств при эксплуатации.

Несмотря на бурное развитие высокоточных навигационных приборов и 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 [8].

По типу получаемой информации лаги разделяются на абсолютные и относительные. Под абсолютными понимаются лаги, измеряющие скорость судна относительно грунта. Относительные лаги измеряют скорость относительно воды. Абсолютные и относительные лаги подразделяются на отдельные подтипы в зависимости от принципа действия, который в них реализован [9]. Получаемая информация может как напрямую передаваться пользователю, так и использоваться для дополнительных корректировок систем навигации [10–12].

В работе рассмотрены вопросы прочности конструкции датчика относительного индукционного лага при заданном гидростатическом давлении.

### Конструкция индукционного лага

Принцип работы индукционного лага основан на явлении электромагнитной индукции. Согласно этому принципу, при перемещении проводника в магнитном поле в проводнике индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости перемещения судна. В связи с этим обязательными конструктивными элементами датчика являются катушки индуктивности и электрические контакты, воспринимающие ЭДС с забортной воды, являющейся проводником. Для герметизации электроники и контактов в датчике используется заливочный материал (компаунд) [13]. Общая конструкция такого датчика представлена на рис. 1.

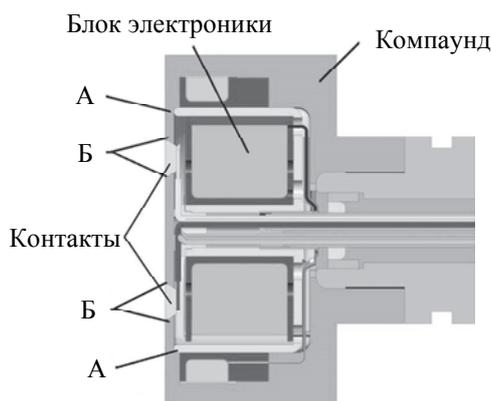


Рис. 1. Конструкция датчика индукционного лага.

А – зона образования трещин вблизи блока электроники, Б – зона образования трещин вблизи контактов

Представленный датчик индукционного лага содержит блок электроники, основной частью которого является катушка, создающая направленное магнитное поле, и два контакта, поверхности которых сопрягаются с водной средой. Все элементы датчика, кроме поверхностей контактов, герметизированы неэлектропроводным компаундом. Такая конструкция работоспособна при незначительной глубине погружения (до 1 МПа), однако не пригодна для глубоководных погружений. В процессе испытаний под

действием внешнего гидростатического давления до 60 МПа в датчике обнаруживаются нарушения целостности компаунда – трещины в зонах А и Б (рис. 1), влекущие за собой разгерметизацию датчика и, как следствие, выход его из строя из-за электрического замыкания контактов.

### Пути повышения прочности

Ключевым элементом, ограничивающим прочность датчика лага при гидростатическом давлении, является компаунд, обеспечивающий электрическую изоляцию и герметичность прибора в целом. Для безотказной конструкции индукционного лага при заданном гидростатическом давлении намечены следующие пути повышения его прочности:

- введение защитного корпуса;
- армирование заливочной полости прибора;
- оптимизация геометрической формы контактов;
- оптимизация характеристик компаунда;
- применение новых технологий заливки.

Использование защитного металлического корпуса позволяет снизить напряжения в компаунде в зоне А по внешней границе прибора. Введение различных армирующих элементов для повышения механических свойств материалов широко используется во многих областях промышленности [14, 15]. Для повышения прочности датчика предлагается использовать дополнительные армирующие элементы в виде перфорированной трубки. В силу разномодульной природы компаунда [16] (допустимые напряжения при сжатии превышают допустимые напряжения при растяжении) геометрия элементов должна минимизировать зоны растяжения компаунда при его деформациях под давлением. В первую очередь это необходимо в зоне контактов, взаимодействующих с забортной водой и воспринимающих гидростатическое давление. Контакты типа 1 (рис. 2), используемые в датчике на рис. 1, не обеспечивают герметичное соединение «контакт-компаунд» при повышенных давлениях в связи с большой зоной растяжения на конусной части контакта.

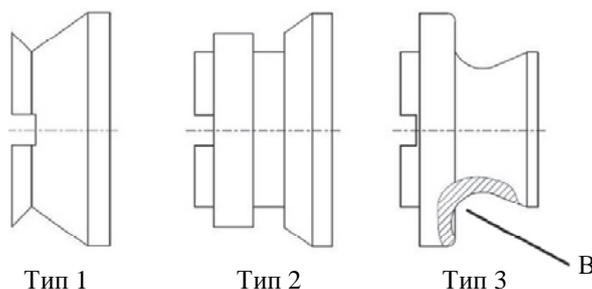


Рис. 2. Изменение формы электрических контактов

Наличие канавки на контакте типа 2 позволяет увеличить площадь связи компаунд–контакт и повысить запас прочности компаунда вблизи контактов. Геометрия контакта по типу 3, благодаря отсутствию острых кромок и наличию зоны В, позволяет еще больше снизить максимальные напряжения в компаунде, возникающие вблизи контактов.

Помимо оптимизации формы контактов, необходимо уменьшить концентраторы напряжений компаунда вблизи блока электроники, где возникают механические напряжения, приводящие к образованию трещин. Для этого следует устранить острые углы и кромки, максимально возможно увеличить радиусы скругления. Помимо устранения концентраторов напряжения в деталях и в компаунде, это поможет уменьшить пустоты, образующиеся при заливке.

Очевидно, что прочность соединения компаунд–корпус напрямую зависит от площади и качества обработки сопрягаемых поверхностей. Перед заливкой компаунда рекомендуется [16] шкурить и пескоструить поверхности для увеличения шероховатости и неровности, что увеличивает площадь соприкосновения материалов. Вследствие неизбежного образования пустот (воздушных карманов) заполнение компаундом следует производить в вакууме, однако из-за неабсолютной смачиваемости корпуса и снижения текучести компаунда при заливке возможно сохранение отдельных незаполненных объемов, которые представляют собой зоны концентрации напряжений.

Получение удовлетворительного смачивания является одним из способов исключения появления дефектов на границе раздела, чтобы прочность соединения корпус–компаунд оказалась максимально близкой к теоретической прочности [17].

Установлено положительное влияние вибрации на качество технологического процесса заливки и увеличение механических характеристик изделий [18]. Использование такой технологии позволяет увеличить площадь «склеенных» поверхностей и уменьшить количество пустот как концентраторов напряжений, что увеличивает прочность прибора.

### Компьютерное моделирование

Для анализа датчика лага в пакете прикладных программ ANSYS Workbench построена конечно-элементная модель (рис. 3). Расчеты проводились в модуле static structural, в котором на все внешние поверхности задавалась нагрузка, имитирующая гидростатическое давление заборной воды. Количество конечных элементов в модели составило примерно 1,1 млн. Вблизи критических областей была произведена трансформация сетки и ее измельчение. Для уменьшения времени расчета задача решалась в симметричной постановке (симметрия вдоль продольной оси).

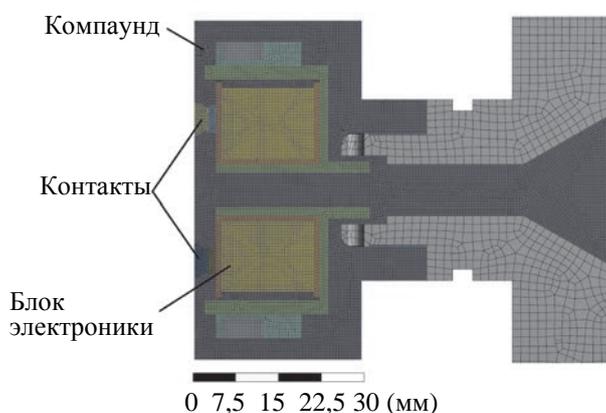


Рис. 3. Расчетная модель прибора

Использована гексагональная сетка с дополнительными узлами, с допущением тетраэдрических элементов (scoping method – Hex Dominant, element midside nodes – kept, free face mesh type – Quad/Tri).

Для оценки качества элементов использовались встроенные средства анализа ANSYS. Качество элементов сетки определялось параметром  $K$  в пределах от нуля до единицы:

$$K = C \frac{V}{\sqrt{(\sum a^2)^3}},$$

где  $C$  – параметр, зависящий от типа элементарного элемента (тетраэдр, пирамида, куб, и т.д.),  $V$  – объем,  $a$  – длина стороны [19].

Сводная характеристика качества элементов сетки представлена на рис. 4. Дальнейшее измельчение сетки не ведет к существенному улучшению точности расчетов, при этом сильно увеличивает ресурсоемкость задачи.

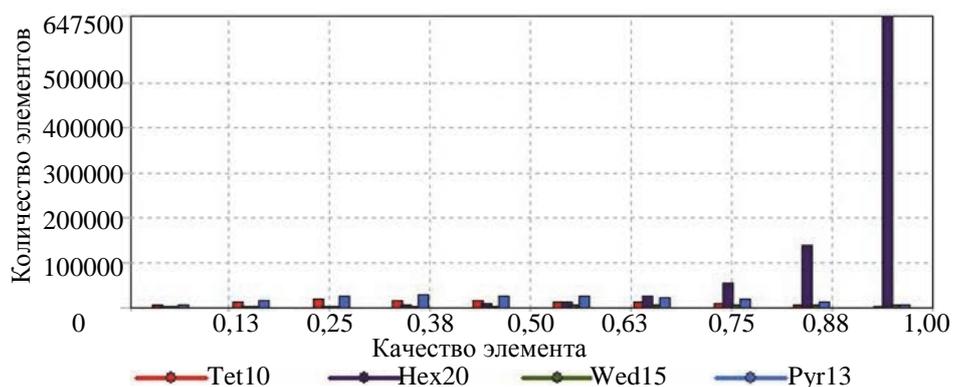


Рис. 4. Количество конечных элементов в сетке в зависимости от их качества.

Tet10, Hex20, Wed15, Pyr13 – типы конечных элементов, используемые Ansys для расчета

В качестве критерия прочности в расчетах использовался предел прочности при растяжении материалов  $\sigma_b$ . В ходе расчетов нагрузка задавалась по всем наружным поверхностям. В датчике основные конструктивные элементы выполнены из титанового сплава ВТ1-0 с  $\sigma_b = 610$  МПа, контакты – из серебра Ср999 с  $\sigma_b = 200$  МПа, а исследуемый компаунд УП-5-105/1А имеет  $\sigma_b = 80$  МПа [16, 20] Физические свойства материалов (модуль упругости, удельный вес, пределы прочности и пр.) были заданы непосредственно в трехмерных моделях деталей. При расчетах все материалы приняты изотропными. Результаты моделирования представлены на рис. 5. Здесь и далее на цветовой палитре представлено распределение эквивалентных напряжений (Equivalent (von-Mises) Stress). Эквивалентные напряжения  $\sigma_e$  более пред-

почтительны для текущего анализа, так как имеет место сложнапряженное нагружение (происходит объемное сжатие компаунда), и определяются по формуле

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]},$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения.

Наибольшие напряжения и деформации возникают на наружной поверхности компаунда в области контактов и вблизи блока электроники, что соответствует результатам испытаний.

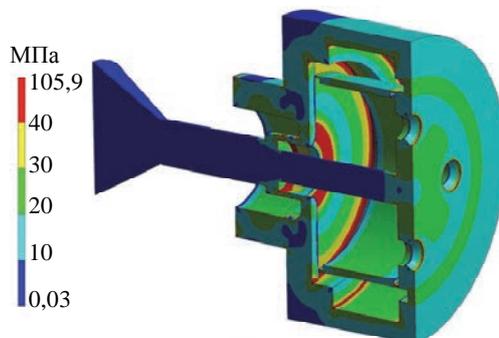


Рис. 5. Распределение напряжений в компаунде

В процессе моделирования выявлено, что применение корпуса и армирование позволяет перераспределить возникающие напряжения в приборе. Часть нагрузки снимается с компаунда и воспринимается армирующим элементом и корпусом. В этом случае максимальные напряжения в компаунде, очевидно, уменьшаются. На рис. 6 показано распределение напряжений в бескорпусном (рис. 6, а) и корпусном (рис. 6, б) исполнении. Наблюдается снижение напряжений вблизи блока электроники, напряжения вблизи контактов снижаются в меньшей степени, но величина зоны повышенных напряжений существенно уменьшается.

Применение защитного корпуса помогло снизить максимальные напряжения, возникающие в компаунде, на 16%.

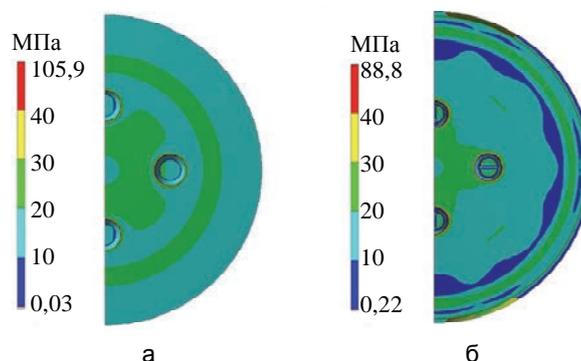


Рис. 6. Влияние корпуса: датчик без корпуса (а); датчик с корпусом (б)

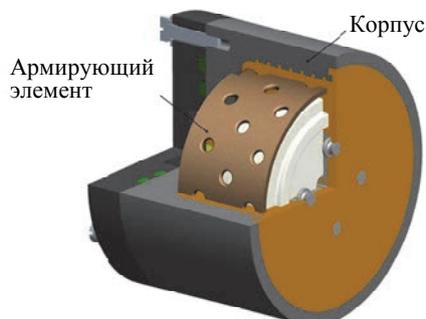


Рис. 7. Армирование датчика

Схематично конструкция датчика с корпусом и армирующим элементом изображена на рис. 7. На рис. 8 показаны распределения напряжений в компаунде корпусного исполнения датчика без армирования (рис. 8, а) и с применением армирования (рис. 8, б). Получено, что применение армирования в корпусном исполнении снижает максимальные напряжения в компаунде на 10%. Окончательно введение

защитного корпуса и армирующего элемента, по результатам моделирования, снизило максимальные напряжения примерно на 43%.

В настоящее время производится изготовление опытного образца для верификации результатов моделирования.

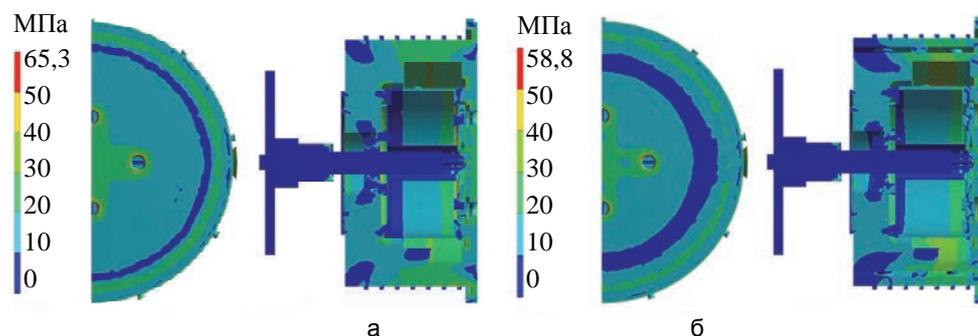


Рис. 8. Влияние армирования компаунда: датчик без армирующего элемента (а); датчик с армирующим элементом (б)

### Заключение

В связи с расширением народно-хозяйственных задач и увеличением объема глубоководных исследований повышение прочности забортных средств измерения скорости судна представляет собой актуальную задачу современного приборостроения. В работе проанализированы пути повышения прочности датчика относительного индукционного лага и проведена оценка намеченных решений с использованием компьютерного моделирования на основе конечно-элементного анализа. Применение внешнего защитного корпуса, армирование компаунда, изменение формы контактов, использование современных компаундов и технологий их заливки позволяют повысить показатели прочности на 43%. В ближайшее время результаты моделирования будут проверены по результатам испытаний.

Указанные пути повышения прочности прибора позволяют расширить его сферу использования. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть применены как при проектировании новых датчиков, так и при модернизации уже существующих приборов.

### Литература

1. Буриличев А.В. Будущее человечества неразрывно связано с изучением, исследованием океана // Безопасность России. 2011. №5. С. 40–43.
2. Сагалевич А.М. Подводные обитаемые аппараты ИО РАН // Материалы XIV международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанических исследований (МСОИ-2015)». Москва, 2015. Т. 2. С. 14–30.
3. Андреев С.И. Минеральные ресурсы Мирового океана: перспективы изучения и освоения / В кн. Геология морей и океанов. М., 2007. С. 85–87.
4. Филимонов А.К. Подводная робототехника // Материалы международной научно-технической конференции «Экстремальная робототехника». СПб., 2011. С. 43–49.
5. Грищенко Н. Аппарат «Русь» погрузился на предельную глубину [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://rg.ru/2015/12/14/rus-site-anons.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.06.2016).
6. Лисицын А.П. Колумбы океанских глубин // Вестник РАН. 2003. Т. 73. №9. С. 842–848.
7. Колюхов Ф. Российский проект погружения в Марианскую впадину Тихого океана [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://konyukhov.ru/projects/expedition/rossijskij-proekt-pogruzeniya-v-marianskuyu-vpadinu-tixogo-okeana.html>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.06.2016).
8. Российский морской Регистр Судоходства.
9. Саранчин А.И., Полковников В.Ф., Завьялов В.В. Индукционный электронный лаг ИЭЛ-2М. Владивосток, 2003. 40 с.
10. Dmitriev S.P., Zinenko V.M., Litvinenko Yu.A. Correction and damping of medium accuracy INS using electromagnetic log // Gyroscopy and Navigation. 2012. V. 3. N 4. P. 270–274. doi: 10.1134/S2075108712040025
11. Joon L., You-Chol L. Transfer alignment considering measurement time delay and ship body flexure // Journal of Mechanical Science and Technology. 2009. V. 23. N 1. P. 195–203. doi: 10.1007/s12206-008-0821-y
12. Li Q., Sun F., Yu F., Gao W. The use of adaptive network-based fuzzy inference system for marine AHRS // Gyroscopy and Navigation. 2014. V. 5. N 2. P. 108–112. doi: 10.1134/S2075108714020059

13. Электромагнитный лаг Лэм 2М [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.elektropribor.spb.ru/ru/newprod/rekl2014/lag\\_lem21m.pdf](http://www.elektropribor.spb.ru/ru/newprod/rekl2014/lag_lem21m.pdf), свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.06.2016).
14. Kute S.Y., Wakchaure M.R. Performance evaluation for enhancement of some of the engineering properties of bamboo as reinforcement in concrete // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2013. V. 94. N 4. P. 235–242.
15. Foster S.J. The application of steel-fibres as concrete reinforcement in Australia: from material to structure // Materials and Structures. 2009. V. 42. N 9. P. 1209–1220. doi: 10.1617/s11527-009-9542-7
16. Компауды на основе эпоксидных смол [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://all-eroxy.ru/tablici/kompaund.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.06.2016).
17. Скрипник Е.С., Золотов С.М. Изменение смачивания акриловым компаундом различных поверхностей // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сборник научных трудов. Днепропетровск, ПГАСА, 2010. С. 5.
18. Abdul-Karem W., Green N., Al-Raheem K.F., Hasan A.H.A. Effect of vibration after filling on mechanical reliability in thin wall investment casting with fillability filling regime – part 1 // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. V. 67. N 9–12. P. 2075–2082. doi: 10.1007/s00170-012-4632-z
19. Element Quality [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb\\_msh/msh\\_Element\\_Quality\\_Metric.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/wb_msh/msh_Element_Quality_Metric.html), свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.06.2016).
20. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Наукова думка, 1975.

- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| <i>Аванесов Юрий Леонидович</i>      | – кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, <a href="mailto:y.l.avanesov@yandex.ru">y.l.avanesov@yandex.ru</a>  |
| <i>Воронов Александр Сергеевич</i>   | – младший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <a href="mailto:Al.s.voronov@yandex.ru">Al.s.voronov@yandex.ru</a>                |
| <i>Евстифеев Михаил Илларионович</i> | – доктор технических наук, доцент, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <a href="mailto:evstifeevm@mail.ru">evstifeevm@mail.ru</a> |
| <i>Yuriy L. Avanesov</i>             | – PhD, Head of section, Concern “CSRI Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, <a href="mailto:y.l.avanesov@yandex.ru">y.l.avanesov@yandex.ru</a>  |
| <i>Alexander S. Voronov</i>          | – junior scientific researcher, Concern “CSRI Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation, <a href="mailto:Al.s.voronov@yandex.ru">Al.s.voronov@yandex.ru</a>                     |
| <i>Michail I. Evstifeev</i>          | – D.Sc., Associate professor, Head of section, Concern “CSRI Elektropribor” JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation, <a href="mailto:evstifeevm@mail.ru">evstifeevm@mail.ru</a>       |