

◆ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ ◆

УДК 629.12.053

DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.2.077-087

Ю.Л. АВАНЕСОВ, А.С. ВОРОНОВ, М.И. ЕВСТИФЕЕВ

**ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЛУБОКОВОДНОГО ДАТЧИКА
ИНДУКЦИОННОГО ЛАГА**

Рассматриваются проблемы, возникающие при разработке конструкции датчика индукционного лага для глубоководных исследований. Выполнен конечно-элементный анализ компьютерной модели конструкции и приведены результаты оптимизации конструктивных параметров по критерию минимизации механических напряжений, возникающих при внешнем гидростатическом давлении. Показана взаимосвязь проблем проектирования со спецификой технологии изготовления и условий эксплуатации.

Ключевые слова: индукционный датчик скорости, индукционный лаг, глубоководные исследования, модернизация конструкции.

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 в том числе необходимостью определения границ России и освоения Арктики, что подтверждается историческими погружениями аппарата «Мир» на глубину 4300 м в районе Северного полюса, где были размещены Российский флаг и капсула с посланием будущим поколениям [1–4]. В настоящее время наблюдается большая активность в создании и совершенствовании как обитаемых глубоководных аппаратов (например, «Мир» и «Русь»), так и необитаемых автономных аппаратов для погружения на глубины свыше 6 км [5–7]. В области развития Военно-Морского Флота одним из приоритетных направлений является создание глубоководных морских систем нового поколения [8].

Аванесов Юрий Леонидович. Кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург, Россия).

Воронов Александр Сергеевич. Младший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; аспирант, Университет ИТМО.

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, профессор, доцент, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Университет ИТМО. Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Несмотря на значительное развитие высокоточных навигационных систем, в особенности спутниковых [9–11], использование лага для измерения скорости судна является обязательным, что регламентировано во многих руководящих документах, в том числе в Российском Морском Регистре Судоходства. Наиболее известными отечественными индукционными лагами являются ЛИИ-1 (ОАО «Штурманские Приборы», Санкт-Петербург) [12], ИЭЛ-2М (Катав-Ивановский приборостроительный завод) [13], ЛЭМ2-1М (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург) [14], предназначенные для использования на надводных судах. Для подводных аппаратов, тем более глубоководных, такие датчики малоприменимы ввиду их низкой прочности к внешнему гидростатическому давлению.

Расширение областей применения индукционных лагов приводит к необходимости учета ряда существенных факторов, которые следует принимать во внимание при проектировании. При разработке глубоководного датчика индукционного лага (ГДИЛ), наряду с традиционными проблемами обеспечения чувствительности и динамических погрешностей разрабатываемого прибора, возникают новые проблемы конструкторско-технологического характера.

К ним относятся: модернизация конструкции; конечно-элементный анализ и выбор расчетной схемы, адекватно описывающей упругие деформации датчика; оптимизация параметров конструкции, обеспечивающая требуемые соотношения конструктивных параметров для минимизации механических напряжений; подбор материалов с необходимыми физическими характеристиками; поиск способов уменьшения влияния технологических, температурных и иных факторов на прочностные характеристики прибора и др.

Работа посвящена анализу проблем проектирования ГДИЛ, предназначенного для эксплуатации в условиях экстремально высокого внешнего гидростатического давления.

Модернизация конструкции датчика индукционного лага

Принцип работы индукционного лага основан на явлении электромагнитной индукции и возникновении электродвижущей силы (ЭДС), пропорциональной скорости перемещения судна [12]. Обязательными конструктивными элементами датчика являются блок электроники с катушками индуктивности и электрические контакты, воспринимающие ЭДС с забортной воды, являющейся проводником. Для герметизации блока электроники и контактов и создания электроизоляционного слоя между контактами в датчике используется специальный заливочный материал (компаунд), образующий внешний корпус датчика. Конструкция датчика ЛЭМ2-1М, построенного по этому принципу, представлена на рис. 1, а. Такая конструкция сохраняет прочность при величине внешнего гидростатического давления до 10 МПа, что соответствует глубине погружения около 100 м. В процессе испытаний под действием давления свыше 10 МПа в датчике обнаруживаются нарушения целостности компаунда – трещины в зонах А и Б (рис. 1, а и б), влекущие за собой разгерметизацию датчика и, как следствие, выход его из строя из-за электрического замыкания контактов.

Конструкция описанного датчика представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из разнородных по составу и физико-техническим характеристикам элементов, основными из которых являются электрические контакты, катушки индуктивности блока электроники и электроизоляционный материал (компаунд). Такая структура обуславливает сложность проектирования и обеспечения прочности устройства.

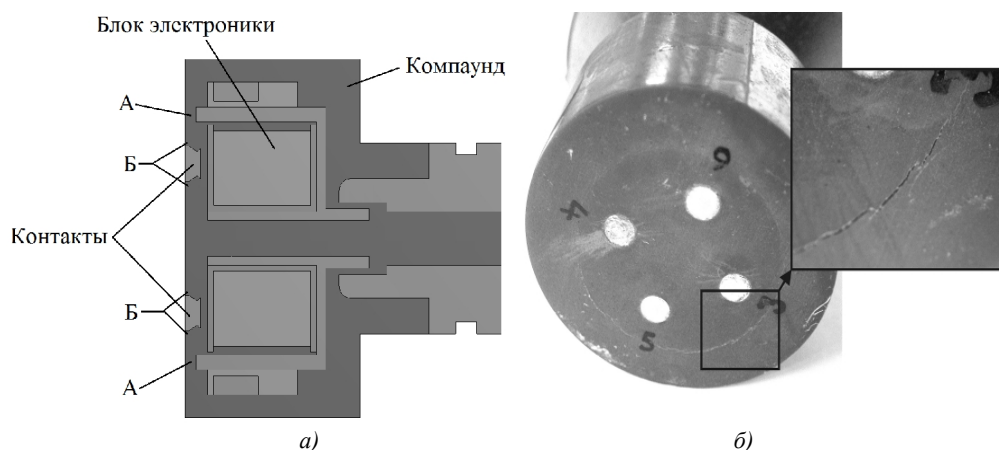


Рис. 1. Конструкция датчика индукционного лага:

- а) общий вид конструкции датчика ЛЭМ2-1М (А – зона образования трещин вблизи блока электроники, Б – зона образования трещин вблизи контактов);
 б) трещины в электроизоляционном материале в зоне А

Для того чтобы выполнить требования к эксплуатации ГДИЛ, используемых в аппаратах с глубиной погружения 6 км (соответствует гидростатическому давлению 60 МПа), за основу модернизации конструкции выбрана конструкция серийного датчика ЛЭМ2-1М, что вызвано хорошей обработкой всех его конструктивных элементов.

Известно, что структурная гетерогенность существенным образом влияет на прочность как твердых тел, так и составных конструкций [15]. У элементов, обладающих существенно более низкими по сравнению с металлами механическими характеристиками, нарушение прочности проявляется в виде трещин. На основании этого главной проблемой проектирования является обеспечение прочности гетерогенной структуры «контакты–катушки–компаунд». Эта проблематика требует решения следующих задач:

- 1) снижение механических напряжений в конструкции путем введения дополнительных элементов;
- 2) выбор свойств и обеспечение гомогенной структуры компаунда;
- 3) оптимизация конструктивных параметров и модернизация конструктивных элементов с обеспечением минимума механических напряжений в конструкции.

При выполнении первого комплекса задач для снижения механических напряжений в компаунде предложено использовать металлический немагнитный корпус, охватывающий снаружи массив компаунда в зоне расположения катушек блока электроники. Корпус защищает изоляционный компаунд от механических повреждений и снижает риск отказа датчика. Применение металлического корпуса позволяет снизить напряжения в компаунде вблизи блока электроники по внешней границе прибора (рис. 1, зона А). Однако, как показывают расчеты, для решения проблемы обеспечения прочности этого недостаточно.

Введение различных армирующих элементов для улучшения механических свойств материалов широко используется во многих областях промышленности. Для увеличения прочности датчика предлагается использовать дополнительный армирующий элемент в виде перфорированного немагнитного металлического кольца, расположенного между катушками блока электроники и внешним металлическим корпусом. Отверстия на армирующем элементе необходимы для лучшего выхода воздуха при заливке конструкции изоляционным

компаундом и, соответственно, снижения вероятности образования воздушных полостей. С этой же целью на цилиндрической поверхности корпуса выполнены овалы отверстия.

Вследствие анизотропии свойств существующих компаундов [16], у которых допустимые напряжения при сжатии примерно в 2 раза превышают допустимые напряжения при растяжении, геометрия элементов должна минимизировать зоны растяжения компаунда при его деформациях под давлением. Размещение армирующего элемента, прочность которого не меньше прочности корпуса, способствует перераспределению механических напряжений в датчике и позволяет добиться равномерной нагрузки внутренней структуры компаунда. При повышении внешнего гидростатического давления армирующий элемент приходит в более нагруженное состояние, чем изоляционный компаунд, но благодаря высокой прочности не разрушается. Это подтверждено компьютерными расчетами.

Второй комплекс задач связан с выбором свойств компаунда, удовлетворяющих условиям прочности и позволяющих осуществлять заливку изоляционного материала в достаточно узкие щели конструкции. Механические свойства должны быть таковы, чтобы предел прочности материала при любых видах деформаций (растяжение, сжатие, сдвиг) превышал возможные напряжения в конструкции при гидростатическом давлении. В конструкции опытного образца ГДИЛ был использован специализированный композиционный материал на основе эпоксидных смол с наполнителем из молотого кварца, однако наиболее перспективными для конструкций такого рода являются современные наноструктурированные композитные материалы, которые позволяют кардинально улучшить физико-механические характеристики компаундов. Разработка подобных материалов входит в приоритетные направления развития отечественной промышленности [17].

Физические свойства компаунда должны обеспечивать удовлетворительное смачивание для создания необходимой адгезии с внутренними конструктивными элементами. Обеспечение удовлетворительного смачивания является одним из способов исключить появление дефектов на границе раздела, чтобы прочность соединения «компаунд–корпус» оказалась максимально близкой к теоретической прочности [18]. Очевидно, что прочность соединения «компаунд–корпус» зависит от площади и качества обработки сопрягаемых поверхностей. На корпусе предусмотрено несколько кольцевых канавок для увеличения площади соединения. В случае их отсутствия критерием прочности изоляционного материала является величина напряжения на сдвиг. Введение кольцевых канавок изменяет основной тип напряжений, разрушающих изоляционный материал вблизи корпуса, на напряжения среза, предельные значения которых больше значений предельных напряжений сдвига.

Основные элементы конструкции модернизированного ГДИЛ показаны на рис. 2. Конструктивная схема такого датчика защищена патентом РФ [19].

Нарушение гомогенной структуры изоляционного компаунда возникает вследствие образования пустот (воздушных карманов) при заполнении полостей конструкции. Под воздействием внешнего гидростатического давления наличие воздушных пор даже микроскопических размеров приводит к появлению зон концентрации напряжений и вызывает образование микротрещин. Вследствие этого нарушается герметичность и происходит отказ ГДИЛ.

Требование к обеспечению гомогенной структуры компаунда вызывает целый ряд как конструктивных, так и технологических сложностей. Конструкция ГДИЛ должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить

заполнение всех труднодоступных полостей. На этапе проектирования проводится проверка заполнения внутреннего пространства конструкции на отсутствие воздушных карманов (пор) с использованием специализированных программ конечно-элементного анализа. Технология производства должна обеспечивать заливку компаунда в вакууме по аналогии с технологией заполнения высокоточных приборов, например поплавковых гироскопов или прецизионных гравиметров. Известно, что использование вибрации при заполнении внутренних полостей положительно влияет на качество технологического процесса заливки и повышение механических характеристик гетерогенных структур изделий. Применение такой технологии позволяет увеличить площадь сопрягающихся поверхностей «корпус–компаунд», уменьшить количество пустот как концентраторов напряжений и, соответственно, повысить прочность прибора [20].

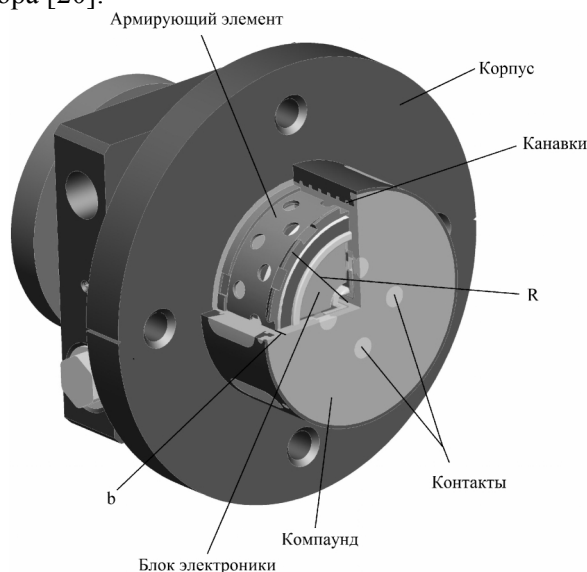


Рис. 2. Конструкция модернизированного датчика. R , b – некоторые параметры для оптимизации

Последний комплекс задач связан с обоснованным выбором конструктивных параметров, позволяющим минимизировать величину механических напряжений в компаунде. Для обоснованного выбора размеров конструкции проводится оптимизация параметров и конфигураций с целью достижения минимальных значений механических напряжений в компаунде. Решение задач оптимизации осуществляется с использованием компьютерного моделирования и программ конечно-элементного анализа. Анализ подвергались такие параметры конструктивных элементов, как конфигурация контактов, форма и количество канавок на корпусе, радиус и толщина армирующего элемента, толщина корпуса и слоя компаунда.

Компьютерное моделирование

Для анализа модернизированной конструкции ГДИЛ в пакете прикладных программ ANSYS Workbench была построена конечно-элементная модель. Расчеты проводились в модуле Static Structural, в котором на все наружные поверхности задавалась нагрузка, имитирующая внешнее гидростатическое давление. Количество конечных элементов в модели составило примерно 1,1 млн. Вблизи

критических областей были произведены трансформация сетки и ее измельчение. Для уменьшения времени расчета задача решалась в симметричной постановке (симметрия относительно плоскости).

В качестве критерия прочности в расчетах использовался предел прочности при растяжении материалов σ_b . В датчике основные конструктивные элементы выполнены из титанового сплава ВТ1-0 с пределом прочности $\sigma_b=610$ МПа, контакты – из серебра с $\sigma_b=200$ МПа, для исследуемого компаунда принято $\sigma_b=80$ МПа [21, 22]. Физические свойства материалов (модуль упругости, удельный вес, пределы прочности и пр.) были заданы непосредственно в трехмерных моделях деталей. При расчетах все материалы приняты изотропными.

При анализе модели, представленной на рис. 1, выявлено, что наибольшие напряжения и деформации возникают на наружной поверхности компаунда в области контактов и вблизи блока электроники, что соответствует результатам испытаний (см. рис. 3). Здесь и далее показан только изоляционный компаунд; корпус, блок электроники и прочие элементы не показаны.

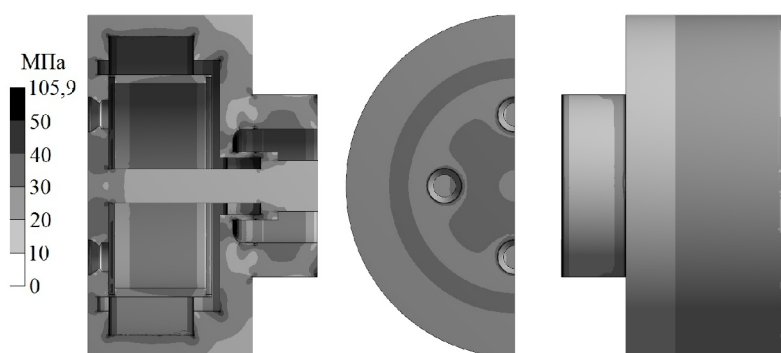


Рис. 3. Распределение напряжений в компаунде датчика

В процессе анализа модернизированной конструкции ГДИЛ (рис. 2) определено, что применение корпуса и армирование позволяют перераспределить возникающие напряжения в компаунде датчика. Часть нагрузки уменьшается и воспринимается армирующим элементом и корпусом. Наблюдается снижение напряжений вблизи блока электроники; напряжения вблизи контактов снижаются в меньшей степени, но величина зоны повышенных напряжений существенно уменьшается. Установлено, что применение защитного корпуса с толщиной стенки 7 мм снижает максимальные напряжения, возникающие в компаунде, на 23% [23].

Дополнительное снижение механических напряжений достигается при использовании армирующего элемента. В результате расчетов выявлено, что применение армирования снижает максимальные напряжения в компаунде на 10%. Расчетные значения напряжений в компаунде изображены на рис. 4. Как видно из рисунка, при введении в конструкцию корпуса и армирующего элемента напряжения уменьшаются, особенно в зоне образования трещин (рис. 1, зона А).

При решении задач оптимизации конструкции в результате моделирования установлено, что значение максимальных напряжений, возникающих в компаунде, уменьшается при увеличении толщины корпуса и количества канавок, но до определенного предела. Увеличение толщины корпуса и введение канавок уменьшают вероятность отслоения компаунда от стенок корпуса и снижают напряжения в компаунде в зоне рядом с

корпусом на 43%. Выявлено, что повышение толщины цилиндрической части корпуса свыше 7 мм и увеличение количества канавок (более 5 шт.) не ведут к дальнейшему снижению механических напряжений в компаунде.

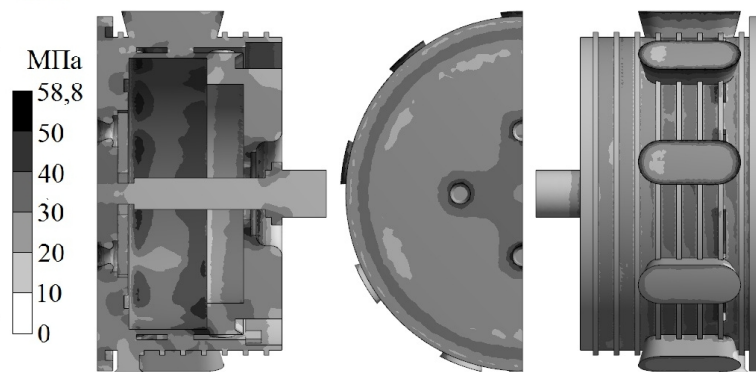


Рис. 4. Распределение напряжений в компаунде модернизированного датчика

Для того чтобы получить армирующий элемент оптимальных размеров, был проведен поиск оптимальных соотношений толщины слоя компаунда над армирующим элементом (b) и радиуса самого элемента (R) (см. рис. 2). В ходе расчетов толщина слоя компаунда над армирующим элементом варьировалась от 1 до 6 мм, радиус армирующего элемента изменялся с 27 до 30 мм. Шаг дискретизации расчета составил 0,2 мм. Указанные пределы выбраны из конструктивных соображений для сохранения габаритных размеров датчика, что позволяет применять модернизированный ГДИЛ без изменения места установки. В результате численных расчетов выявлено, что наименьшие значения напряжений в компаунде достигаются при выборе радиуса армирующего элемента $R=28,5$ мм и толщине слоя компаунда $b=3$ мм (снижение напряжений на 11%) [24].

В пакете ANSYS Fluid Flow проведена имитация заливки компаунда в широком диапазоне значений вязкости в корпус с канавками прямоугольного, треугольного и полукруглого сечения. Установлено, что использование канавок полукруглого сечения не приводит к образованию воздушных карманов при заливке компаунда и не создает в нем пор, приводящих к появлению концентраторов напряжений. С помощью этой программы определены размеры перфорации в армирующем элементе (диаметр и количество отверстий), при которых сохраняется однородная структура компаунда и обеспечивается качественная заливка внутренней полости без воздушных пузырей.

Основные результаты расчетов методом конечно-элементного анализа конструкции представлены в таблице.

Т а б л и ц а

Модернизация конструкции	Снижение механических напряжений, %
Введение защитного корпуса	23
Введение защитного корпуса и армирующего элемента	35
Введение защитного корпуса и армирующего элемента с последующей оптимизацией конструктивных параметров	43

Предпринятые усилия по модернизации конструкции и оптимизации ее параметров снижают максимальные напряжения в компаунде примерно на 43%, что подтверждено компьютерным моделированием. Это позволило создать кон-

струкцию ГДИЛ, работоспособную при внешнем гидростатическом давлении до 60 МПа.

Экспериментальные исследования

В результате модернизации конструкции и в соответствии с расчетами были разработаны и изготовлены несколько опытных образцов ГДИЛ (рис. 5).

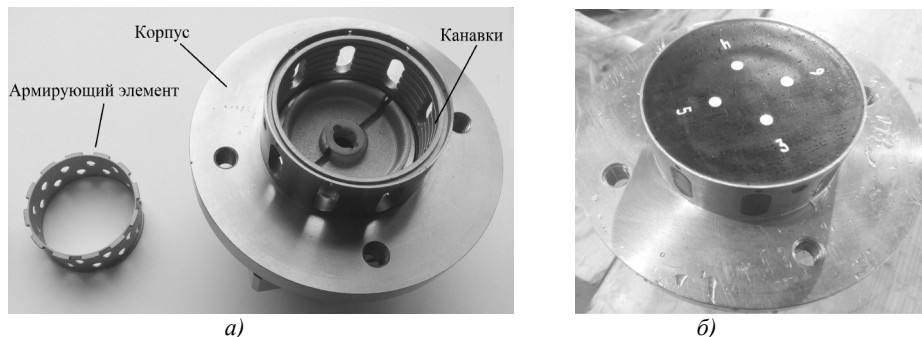


Рис. 4. а) Детали модернизированного ГДИЛ и б) опытный образец датчика для испытаний

Процедура изготовления и испытаний датчика состояла из трех последовательных этапов:

- 1) отработка технологии заливки компаундами различных консистенций на макетах для обеспечения гомогенности его структуры (без воздушных пор);
- 2) сборка опытных образцов с соблюдением отработанной технологии заливки внутренних полостей ГДИЛ;
- 3) гидростатические испытания опытных образцов ГДИЛ.

Первый этап служил для проверки заполнения компаундами различных марок корпусов с нарезанными канавками различной конфигурации. Корпуса, имеющие форму полуцилиндра, закрывались пластинами с нанесенными на них антиадгезионными покрытиями. После полимеризации компаунда и его затвердевания пластина снималась для проведения внешнего осмотра заливочной полости на предмет наличия трещин, заполнения пустот и отслоения компаунда от стенок корпуса.

На втором этапе выполнялась сборка опытных образцов при непрерывном контроле процесса заполнения компаундом, так как эта технологическая операция является наиболее критичной.

На третьем, завершающем этапе проводились апробация конструкторских решений и верификация компьютерной модели для подтверждения возможности работы модернизированного ГДИЛ на сверхбольших глубинах.

Испытания проводились в гидробаке путем ступенчатого повышения гидростатического давления с 10 МПа (глубина 1 км) до 60 МПа (глубина 6 км). Методика испытаний предусматривала изменение давления с шагом 10 МПа и выдержкой с новым значением давления в течение одного часа. На каждом шаге опытные образцы ГДИЛ вынимались из гидробака, после чего производились внешний осмотр и измерение электрического сопротивления изоляции между каждым из контактов и корпусом.

По результатам испытаний установлено, что в изоляционном компаунде не возникает остаточных деформаций и критических напряжений, вызывающих нарушение целостности структуры материала. Трещин, остаточных деформаций и изменений сопротивления электрической изоляции не обнаружено, что доказывает эффективность проектных решений.

Выводы

В связи с расширением направлений изучения Мирового океана и увеличением объема глубоководных исследований повышение прочности заборных средств измерения скорости судна представляет собой актуальную задачу современного приборостроения. В работе рассмотрены проблемы расчета и проектирования конструкций глубоководного датчика индукционного лага с учетом особенностей используемых технологий. Основные проблемы проектирования такого датчика связаны с принципиальной структурной гетерогенностью конструкции. Использование материалов и элементов с разнородными физико-механическими свойствами приводит к сложности обеспечения прочности конструкции при внешнем гидростатическом давлении. Достижение показателей прочности обеспечивается применением внешнего защитного корпуса, армирующего элемента, использованием современных компаундов и технологий их заливки. Проведенный конечно-элементный анализ компьютерной модели датчика и оптимизация параметров конструкции показали, что указанные меры позволяют повысить прочность ГДИЛ на 43%. Проведенные гидростатические испытания опытных образцов подтвердили правильность принятых решений и доказали возможность использования модернизированного датчика при глубине погружения до 6 км.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Буриличев А.В.** Будущее человечества неразрывно связано с изучением, исследованием океана // Безопасность России. 2011. №5. С. 40–43.
2. **Sagalevich, A.**, Methods of deep dives in whole ice cover conditions. *Oceanology*. Vol. 56, № 3. 2016. P. 452–458.
3. **Андреев С.И.** Минеральные ресурсы Мирового океана: перспективы изучения и освоения / 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 03.03.2018).
6. **Лисицын А.П.** Колумбы океанских глубин // Вестник РАН. 2003. Т. 73. № 9. С. 842–848.
7. **Тарасенко А.А., Краснов В.В., Смирнов К.А., Кирьянов А.В., Хан Р.Е.** Зарубежные самоходные необитаемые аппараты // СПб: АО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», 2016. 302 с.
8. Указ Президента РФ от 20.07.2017 № 327 «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области военно-морской деятельности на период до 2030 года».
9. **Peshkhanov, V.G.**, Gyroscopic Navigation Systems: Current Status and Prospects. *Gyroscopy and Navigation*, 2011, no. 3, pp. 111-118.
10. **Chakradhara Rao Ch., Pushpalatha P., Aditya Sundar N.** GPS Based Vehicle Navigation System Using Google Maps // *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, Vol. 4 (6), 2013, P. 979-982
11. **Leonard J.J., Bahr A.** Autonomous Underwater Vehicle Navigation. // *Springer Handbook of Ocean Engineering*. Springer, 2016, P.341-357.
12. **Воронов В.В., Яловенко А.В.** Индукционный лаг ЛИ 2-1 / Учеб. пособие. СПб: ГМА им. адмирала С.О. Макарова. 2009. 96 с.
13. **Баринов А.Ю.** Модернизированный индукционный лаг ИЭЛ-2М // Записки по гидрографии. 2017. С.13–24.
14. Электромагнитный лаг ЛЭМ2-1М [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.elektropribor.spb.ru/ru/newprod/rekl2014/lag_lem21m.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 03.03.2018).
15. **Регель В.Р., Слуцкер А.И.** Структурно-динамическая гетерогенность – основа физики разрушения твердых тел // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8. № 1. С.86-92.

16. **Кербер М.Л.** и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / СПб: Профессия, 2008. 560 с.
17. Прогноз научно-технологического развития России: 2030. Новые материалы и нанотехнологии / под. ред. Л.М. Гохберга, А.Б. Ярославцева. Москва: Министерство образования и науки Российской Федерации, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2014. 52 с.
18. **Скрипник Е.С., Золотов С.М.** Изменение смачивания акриловым компаундом различных поверхностей // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сборник научных трудов. Днепропетровск, ПГАСА, 2010. С. 5.
19. Патент №2637377, РФ, Датчик индукционного лага повышенной прочности / Аванесов Ю.Л., Воронов А.С., Евстифеев М.И., Каретин В.Г., Короленко И.В./ заявл. 30.11.2016; опубл. 10.12.2017, Бюл.№ 34.
20. **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. №9–12. P. 2075–2082. DOI: 10.1007/s00170-012-4632-z
21. **Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.** Справочник по сопротивлению материалов. / Наукова думка, 1975.
22. Компаунды на основе эпоксидных смол [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://all-epoxy.ru/tablici/kompaund.htm>, свободный. Яз. рус. (дата обращения 25.06.2016).
23. **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.
24. **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.

Avanesov Yu.L., (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg), **Voronov A.S., Evstifeev M.I.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University) *Electromagnetic Log Deep-Sea Sensor Design Issues. Giroskopiya I Navigatsiya*. 2018. Vol. 26. № 2. P. 77–87.

Abstract. The paper addresses the problems associated with the design of electromagnetic log sensor for deep-sea investigations. Finite element analysis has been performed for the design computer model, and the results of structural parameters optimization to reduce the strains due to external hydrostatic pressure are presented. Interrelation between the design challenges and the specific features of manufacturing and operation is demonstrated.

Key words: induction rate sensor, electromagnetic log, deep-sea surveys, design upgrading.

REFERENCES

1. **Burilichev, A.V.**, Future of humanity is inextricably linked with the ocean study and research, *Bezopasnost' Rossii*, 2011, no. 5, pp. 40–43 (In Russian).
2. **Sagalevich, A.M.**, Methods of deep dives in whole ice cover conditions, *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 3, pp. 452–458.
3. **Andreev, S.I.**, Mineral resources of the World Ocean: Exploration and Development Prospects. // *Geologiya morei i okeanov* (Geology of Seas and Oceans), Moscow, 2007, pp. 85–87.
4. **Filimonov, A.K.**, Underwater robotics, *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Ekstremal'naya robototekhnika"* (Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. on Extreme Robotics), St. Petersburg, Russia, 2011, pp. 43–49. (In Russian)
5. **Grishchenko, N.**, Apparatus "Rus" Submerges to Transcendent Depth. Available at: <http://rg.ru/2015/12/14/rus-site-anons.html> (accessed 03.03.2018).

6. **Lisitsyn, A.P.**, Columbus of ocean depths, *Vestnik RAN (Herald of the Russian Academy of Sciences)*, 2003, vol. 73, no. 9, pp. 842–848.
7. **Tarasenko, A.A. et al.**, *Zarubezhnye samokhodnye neobitaemye apparaty* (Foreign Automotive Unmanned Apparatuses), St. Petersburg: St. Petersburg Marine Engineering Bureau "Malakhit", 2016.
8. Edict of the President of the Russian Federation of 20 July, 2017, no. 327 "On Approval of the Russian Federation State Policy Fundamentals in the Field of Naval Activities for the Period till 2030".
9. **Peshkikhonov, V.G.**, Gyroscopic Navigation Systems: Current Status and Prospects, *Gyroscopy and Navigation*, 2011, no. 3, pp. 111-118.
10. **Chakradhara Rao, Ch., Pushpalatha, P., and Aditya Sundar, N.**, GPS Based Vehicle Navigation System Using Google Maps, *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2013, vol. 4 (6), pp. 979-982.
11. **Leonard, J.J., and Bahr, A.**, Autonomous Underwater Vehicle Navigation. In: Springer Handbook of Ocean Engineering. Springer, 2016, pp. 341-357.
12. **Voronov, V.V., and Yalovenko, A.V.**, *Induktsionnyi lag LI 2-1. Uchebnoe posobie* (Electromagnetic Log LI 2-1. Study Book), St. Petersburg: Admiral S.O. Makarov State Marine Academy, 2009.
13. **Barinov, A.Yu.**, Upgraded electromagnetic log IEL-2M, *Zapiski po gidrografii*, 2017, pp. 13-24.
14. Electromagnetic log LEM2-1M. Available at: http://www.elektropribor.spb.ru/ru/newprod/rekl2014/lag_lem21m.pdf (accessed 03.03.2018).
15. **Regel', V.R., and Slutsker, A.I.**, Structure-dynamic heterogeneity — the basis of physics of solid structure, *Soros Educational Journal*, 2004, vol. 8, no. 1, pp. 86-92. (In Russian).
16. **Kerber, M.L. et al.**, *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: uchebnoe posobie* (Polymeric Composite Materials: Structure, Properties, Technology: Study Book), St. Petersburg, Professiya, 2008.
17. *Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossii: 2030. Novye materialy i nanotekhnologii* (Outlook to Scientific and Technological Development of Russia: 2030. New Materials and Nanotechnologies), Gokhberg, L.M., and Yaroslavtsev, A.B., Eds., Moscow: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, National Research Institute Higher School of Economics, 2014.
18. **Skripnik, E.S., and Zolotov, S.M.**, Varying wetting of different surfaces with acrylic compound, *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials, Mechanical Engineering], Dnepropetrovsk, PGASA, 2010, p. 5.
19. **Avanesov, Yu.L., Voronov, A.S., Evstifeev, M.I., Karetin, V.G., and Korolenko, I.V.**, RF Patent no. 2637377, Bulletin No. 34, 2017.
20. **Abdul-Karem, W., Green, N., Al-Raheem, K.F., and 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, vol. 67, no. 9–12, pp. 2075–2082.
21. **Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P., and Matveev, V.V.**, *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* (Reference Book on Strength of Materials), Kiev: Naukova dumka, 1975.
22. Epoxy-based compounds, available at: <http://all-epoxy.ru/tablizi/kompaund.htm> (in Russian) (accessed 25.06.2016).
23. **Avanesov, Yu.L., Voronov, A.S., and Evstifeev, M.I.**, Computer simulation of electromagnetic log sensor strength characteristics, *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 738–744.
24. **Avanesov, Yu.L., Bukanova, A.N., Voronov, A.S., and Evstifeev, M.I.**, Optimization of design parameters for depth electromagnetic speed sensor, *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 140–146.

Материал поступил 12.03.2018