

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

© 2019 г. А.В. Федоров¹, В.А. Быченко^{2*}, М.Ф. Кормильцева^{1**},
Д.С. Сергеев², Н.В. Ткачева², К.А. Батанов³, А.В. Гаринков³

¹Университет информационных технологий, механики и оптики (ИТМО), Россия
197101 Санкт-Петербург, пр-т Кронверкский, 49

²ООО «НТЦ «Эталон», Россия 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57А

³ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Россия 197046 Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, 30
E-mail: *bychenok-vladimr@mail.ru; **mariekor@outlook.com

Поступила в редакцию 30.05.2018; после доработки 24.08.2018;
принята к публикации 27.09.2018

Рассмотрена проблема неразрушающего контроля качества объектов сложной конструкции, в частности, гидроакустических антенн. Определены особенности структуры данных изделий, влияющие на выбор методов и средств контроля. Исследована возможность применения ультразвукового метода (в частности, эхометода при иммерсионном обеспечении акустического контакта) и средств контроля качества гидроакустических антенн, предложены средства для обеспечения автоматизации контроля.

Ключевые слова: контроль качества, неразрушающий контроль, дефектоскопия, ультразвуковой метод, гидроакустическая антенна, автоматизированный комплекс.

DOI:10.1134/S0130308219020040

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, ультразвуковые волны способны распространяться в воде на большие расстояния благодаря сравнительно малому затуханию. С их помощью решаются задачи измерения глубин и обследования рельефа дна, обеспечения безопасности судоходства, обнаружения и распознавания морских объектов, подводной связи, передачи информации от автономных приборов в океане и многие другие. В подавляющем большинстве современные корабли оснащены гидроакустической аппаратурой. В состав каждого гидроакустического устройства входят гидроакустические антенны (ГА), которые предназначены, с одной стороны, для преобразования электрических колебаний, создаваемых генератором, в акустические колебания водной среды (режим излучения) и, с другой, акустических колебаний воды в электрические сигналы (режим приема). Процесс преобразования электрической энергии в акустическую и обратно выполняют подводные электроакустические излучатели и приемники антенны, которые называются гидроакустическими преобразователями (ГАП). Помимо преобразования энергии, антенна обеспечивает пространственную концентрацию излучаемых и принимаемых сигналов, то есть направленность устройства.

Свойство направленности (качество апертуры) антенны важно с точки зрения концентрации энергии в нужном направлении при излучении и повышения отношения сигнал/шум при приеме. Данная характеристика подвергается проверке при контроле на функционирование. Габариты современных антенн могут достигать десятков метров, а их масса — десятков тонн. Эксплуатация антенн на больших глубинах является ответственным процессом, так как они испытывают воздействие гидростатического давления порядка десятков и сотен атмосфер. В связи с этим в настоящее время к ГА предъявляются повышенные требования к обеспечению механической и электрической прочности, температурному режиму эксплуатации, коррозионной стойкости и коэффициенту полезного действия.

Для обеспечения защиты элементов ГА от воздействия воды и давления в процессе эксплуатации они помещаются в оболочку с наполнителем. В процессе производства и эксплуатации ГА в наполнителе могут образовываться дефекты типа поры и расслоения. От их типоразмеров зависит качество апертуры направленности, поэтому следует проводить как контроль ГА на функционирование, так и неразрушающий контроль (НК) их качества на отсутствие дефектов.

Целью данного исследования является разработка комплексного подхода, направленного на обеспечение оперативного автоматизированного неразрушающего контроля качества гидроакустических антенн. Для ее достижения необходимо решить ряд логически взаимосвязанных задач:

анализ чувствительности методов и средств неразрушающего контроля для определения наиболее рационального и оперативного метода;

разработка методов и средств обеспечения позиционирования датчика относительно объекта контроля (ОК);

анализ особенностей сбора и обработки измерительной информации для оперативного получения достоверных результатов контроля;

опытная отработка автоматизированного неразрушающего контроля качества гидроакустических антенн.

МЕТОДЫ

Особенности ОК (состав и геометрия). На рис. 1 представлена 3D-модель приемного блока гидроакустической антенны (ПБГА).

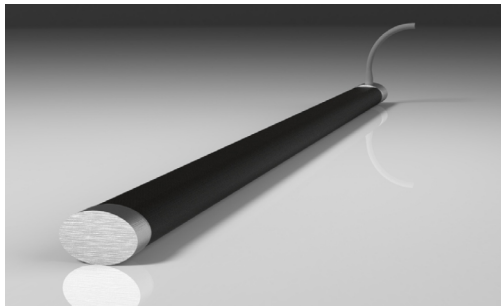


Рис. 1. 3D-модель ПБГА.

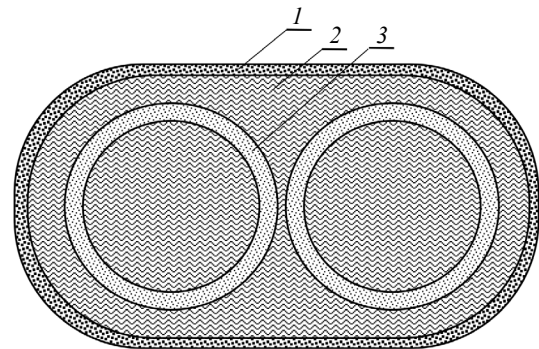


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного сечения ГА:
1 — наружная оболочка; 2 — наполнитель; 3 — пьезокерамический преобразователь.

ПБГА представляет собой набор гидроакустических преобразователей (3), помещенных в оболочку (1), заполненную наполнителем (2) (рис. 2).

ГАП состоит из последовательно соединенных чувствительных элементов, представляющих собой пьезокерамические кольца. Особенности устройства подобного рода ГАП достаточно полно изложены в [1].

Анализ чувствительности методов и средств неразрушающего контроля. Изготовление ГА является сложным технологическим процессом, на каждом этапе которого возможно образование различного рода дефектов, влияющих на работоспособность как гидроакустической антенны в целом, так и ее составных частей. В настоящее время работоспособность ГА обеспечивается за счет соблюдения всех технологических приемов и контроля качества их выполнения. Заполнение формы ПБГА наполнителем является наиболее ответственным процессом, в результате которого возможно возникновение различного рода дефектов: отсутствие адгезии, поры, расслоения и т.д. В настоящее время работоспособность ГА подтверждается контролем на функционирование. Данный способ является достаточно трудоемким и не позволяет определять причину отказа (неисправности). Контроль с целью обнаружения дефектов, которые значительным образом влияют на работоспособность ГА, на сегодняшний день не осуществляется. Поэтому разработка и внедрение методов неразрушающего контроля позволят повысить качество и снизить трудоемкость контроля качества ГА.

Для контроля ГА было принято использовать эхометод ультразвукового контроля, который обладает возможностью выявления внутренних дефектов. Другие методы НК, кроме радиационного, обнаруживают только поверхностные и подповерхностные дефекты [2]. Эхометод основан на регистрации волн, отраженных от дефекта или поверхности раздела двух сред [3]. При контроле эхометодом источником и приемником ультразвуковых импульсов является один и тот же преобразователь.

Для обеспечения стабильности акустического контакта, а также ввиду особенностей поверхности ОК предлагается использовать иммерсионный способ акустического контакта (рис. 3а, б). При иммерсионном вводе на А-развертке будут отображаться излученный (зондирующий) сигнал (3), сигнал, отраженный однократно (1) и двукратно (1') от передней грани изделия, сигнал от границы раздела «оболочка — наполнитель» (2), от ГАП (3). При наличии дефекта в объекте контроля (рис. 3б) между сигналами 2 и 3 на временной развертке будет появляться сигнал от дефекта (Д).

Для обеспечения выявляемости дефектов в ОК путем проведения опытной отработки был осуществлен подбор датчиков пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), подходящих для реше-

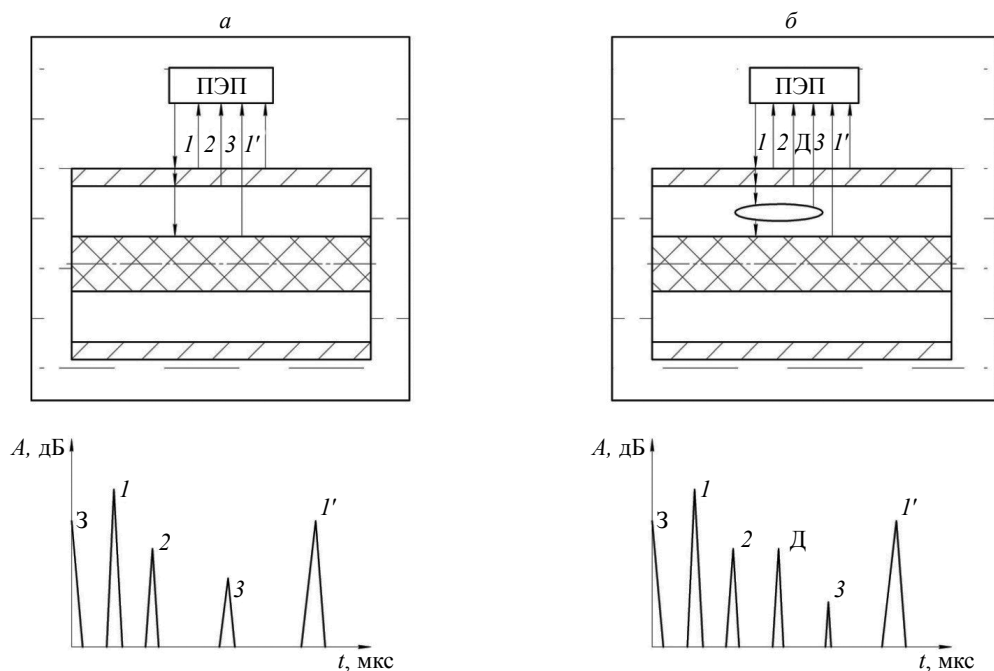


Рис. 3. Схема распространения и отражения ультразвука при иммерсионном вводе:
а — при отсутствии дефекта; *б* — при наличии.

ния поставленной задачи, и их оптимальных характеристик [4]. После предварительных исследований удовлетворительные результаты получены при использовании преобразователя с частотой 2,5 МГц, сфокусированного на глубину, которая определяется геометрическими параметрами конструкции ГА, с помощью вогнутой радиальной излучающей поверхности (П111-2.5-12F).

Разработка методов и средств обеспечения позиционирования датчика относительно объекта контроля. Стоит отметить, что успех применения акустических методов контроля зависит от точности позиционирования датчика относительно объекта контроля. В связи с этим ручной контроль изделий сложной геометрической формы не обеспечивает его достоверность и оперативность, поэтому необходимо разработать комплексный подход для позиционирования ПЭП относительно ОК и автоматизации процесса контроля качества.

С целью проведения автоматизированного НК была разработана схема контроля и определена траектория движения датчика с учетом геометрических особенностей формы ОК и специфики акустического метода контроля (рис. 4).

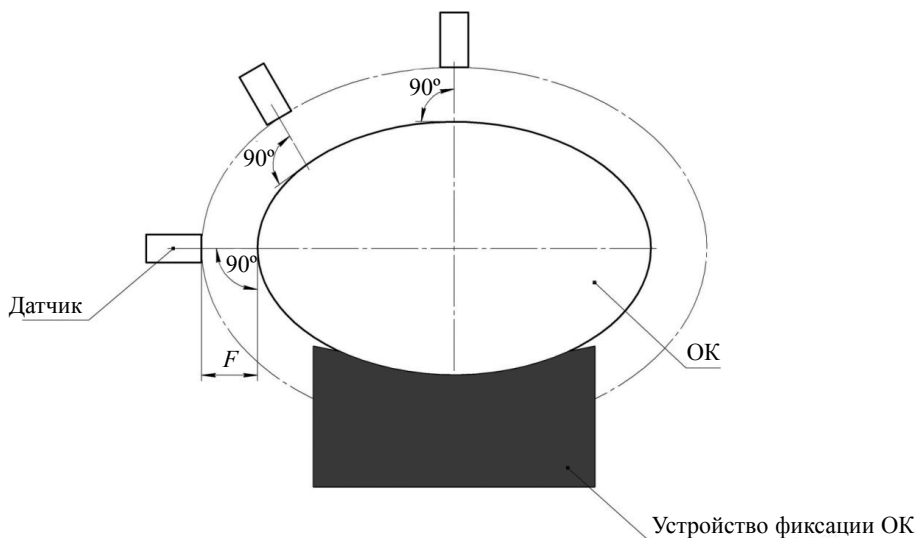


Рис. 4. Схема движения датчика.

При осуществлении контроля качества ГА ультразвуковым методом необходимо обеспечить ортогональность положения датчика относительно объекта контроля и постоянство расстояния F от датчика до поверхности ОК (см. рис. 4), определяемого наилучшими акустическими характеристиками принимаемого сигнала и фокусным расстоянием датчика. Также при разработке и проектировании конструкции важным фактором является использование иммерсионного способа обеспечения акустического контакта, следовательно, автоматизированная установка должна иметь возможность проведения НК в иммерсионной среде (дистиллированная вода).

Анализ особенностей сбора и обработки измерительной информации. При проведении ультразвукового контроля возможны различные варианты отображения результатов контроля. При автоматизированном контроле предпочтительно использовать развертку типа В (или В-скан), которая успешно применяется при решении различных задач контроля качества [5, 6]. В-скан — изображение информативных сигналов в плоскости сечения объекта контроля, перпендикулярной поверхности ввода и параллельной плоскости падения волны [7].

В настоящее время большинство дефектоскопов крупных производителей позволяют получать А-, В- и С-сканы в случае необходимости [8]. Данный факт дает возможность осуществлять автоматизированный контроль ГА с помощью штатного программного обеспечения (ПО) дефектоскопа. Однако для автоматического контроля необходима разработка ПО, способного провести оценку наличия или отсутствия дефектов и определить места их расположения. Данное ПО находится на стадии разработки.

Схема проведения опытной отработки. Оработка предложенного подхода осуществлялась на образце ГА с использованием ультразвукового дефектоскопа УСД-60 со специализированным преобразователем. Позиционирование преобразователя, закрепленного в разработанной для первичных испытаний оснастке, осуществлялось при помощи трехкоординатной системы позиционирования и специализированной компьютерной программы.

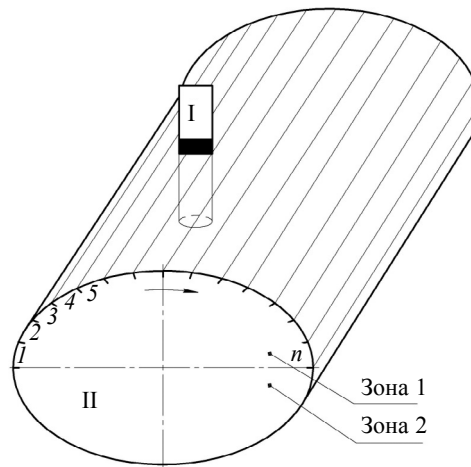


Рис. 5. Схема сканирования ГА:
1... n — номер сектора; I — датчик; II — объект контроля (антенна).

Сканирование проводилось в 32 сечениях поверхности АГ с заданным шагом поворота ПЭП относительно объекта (рис. 5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты разработки методов и средств обеспечения позиционирования датчика относительно объекта контроля. С целью автоматизации неразрушающего контроля качества гидроакустических антенн была разработана конструкция автоматизированного комплекса неразрушающего контроля качества гидроакустических антенн, позволяющая выполнять все предъявляемые к контролю требования. На рис. 6, 7 представлены виды 3D-моделей конструкции стенда в двух исполнениях.

Принципиальным отличием представленных конструкций является способ задания движения датчика по заданной траектории, которое в конструкции стенда первого исполнения осуществляется с помощью направляющей криволинейного движения, форма которой повторяет форму объ-

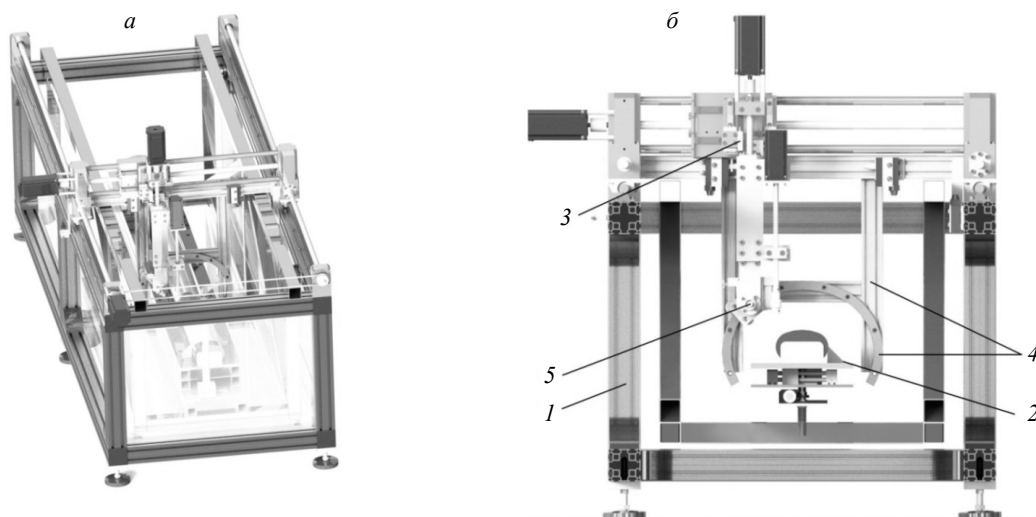


Рис. 6. 3D-модель конструкции стенда, исполнение 1:

a — общий вид; *б* — вид спереди (*1* — каркас с иммерсионной ванной; *2* — устройство фиксации объекта контроля; *3* — каретка горизонтального движения; *4* — криволинейная направляющая с каркасом; *5* — датчик с оправкой).

екта контроля, а их центр точно совпадает. В таком случае для движения датчика необходимо два шаговых двигателя, расположенных по осям OX и OY , комбинированное воздействие которых позволит обеспечить заданную точность позиционирования. Использование криволинейной направляющей позволяет выдерживать расстояние F между датчиком и объектом контроля и ортогональность положения датчика относительно поверхности объекта контроля. Отсутствие универсальности данной конструкции является ее существенным недостатком. В случае изменения формы и размеров объектов контроля обеспечение условия ортогональности положения датчика не будет выполнено.

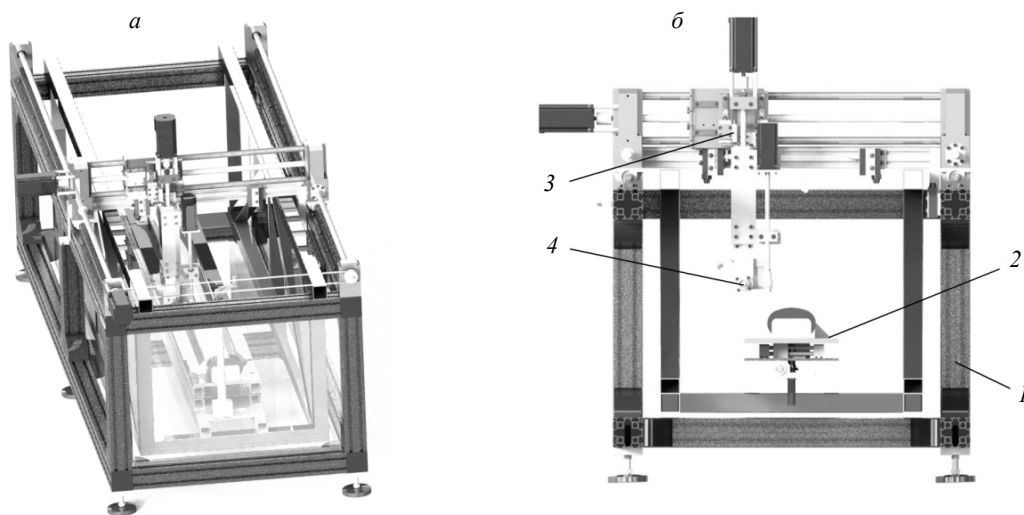


Рис. 7. 3D-модель конструкции стенда, исполнение 2:

a — общий вид; *б* — вид спереди (*1* — каркас с иммерсионной ванной; *2* — устройство фиксации объекта контроля; *3* — каретка горизонтального движения; *4* — датчик с оправкой).

В конструкции стенда второго исполнения движение датчика по заданной траектории осуществляется с помощью трех шаговых двигателей, два из которых обеспечивают позиционирование в плоскости XOY , а третий — поворот датчика для обеспечения нормали относительно поверхности объекта контроля.

Результаты проведения опытной отработки автоматизированного неразрушающего контроля качества гидроакустических антенн. В ходе опытной отработки было проведено сканирование ГА по разработанной схеме. В результате для каждого сечения были получены В-сканы, аналогичные приведенному на рис. 8.

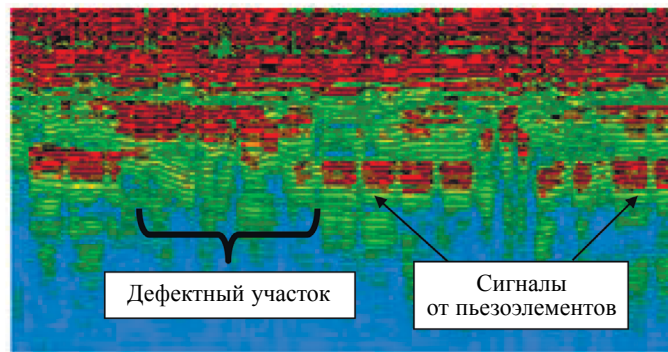


Рис. 8. В-скан участка ГА.

По результатам ультразвукового контроля были обнаружены две дефектные зоны. Наличие в них дефектов также было подтверждено результатами контроля на функционирование.

В ходе отработки образец ГА был разрезан и вскрыт по контуру дефектных участков, на которых было обнаружено отсутствие адгезии между внешней оболочкой и наполнителем, что предположительно является основной причиной снижения чувствительности соответствующих модулей.

На рис. 9 представлено сопоставление результатов неразрушающего контроля и вскрытия участка ГА.

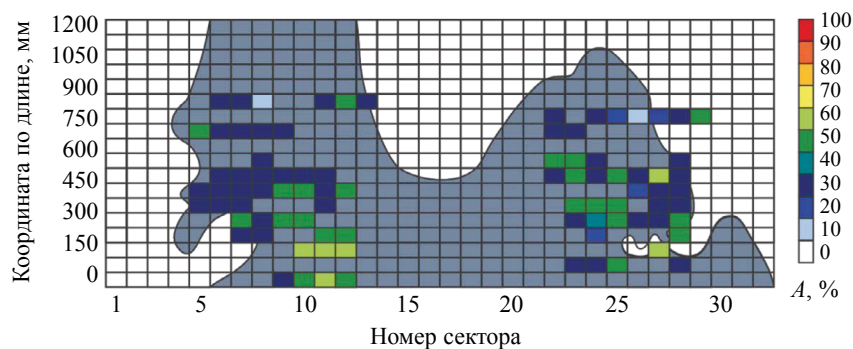


Рис. 9. Сопоставление результатов ультразвукового контроля качества ГА и вскрытия фрагмента ГА.

Цветными квадратами условно обозначены несплошности, обнаруженные в результате опытной отработки неразрушающего контроля, а линией — контур обнаруженной при вскрытии несплошности.

Обсуждение результатов работы. В части анализа чувствительности методов и средств неразрушающего контроля ультразвуковой контроль эхометодом при иммерсионном вводе показал применимость к контролю качества ГА.

В части разработки методов и средств обеспечения позиционирования датчика относительно объекта контроля был разработан стенд в двух исполнениях, который показал свою работоспособность при проведении опытной отработки.

В ходе исследования были выбраны состав средств контроля, способ сбора и обработки измерительной информации результатов контроля, а также сделан вывод о необходимости разработки специального ПО для автоматизации ультразвукового контроля ГА.

В ходе опытной отработки автоматизированного контроля качества ГА ультразвуковой метод контроля при иммерсионном вводе показал высокую чувствительность к несплошностям в наполнителе ГА. Стоит отметить, что результаты предварительных испытаний привели к обнаружению того типа дефекта (отсутствие адгезии), наличие и обнаружение которого не обсуждалось при постановке задачи. Отмечено, что выявленные расслоения имеют значительную площадь (единицы квадратных сантиметров), сложную форму и границу, что определяет необходимость их точного оконтуривания.

Таким образом, был разработан комплексный подход, направленный на обеспечение оперативного автоматизированного неразрушающего контроля качества ГА.

В дальнейшем необходимо проводить исследования по созданию автоматизированного комплекса неразрушающего контроля качества изготовления гидроакустических антенн.

ВЫВОДЫ

При анализе чувствительности методов и средств НК был выбран ультразвуковой метод контроля с иммерсионным способом обеспечения акустического контакта, проводимый дефектоскопом УСД-60 со специализированным преобразователем. Для позиционирования датчика относительно объекта контроля и его перемещения были разработаны две конструкции стенда. Опытный образец стенда в исполнении 1 (см. рис. 6) находится на этапе изготовления. Для сбора и обработки измерительной информации разрабатывается программное обеспечение, которое позволит снизить влияние человеческого фактора.

Результаты исследования и экспериментальной отработки ультразвуковых методов неразрушающего контроля качества применительно к приемным блокам гидроакустических антенн признаны положительными. Ультразвуковые методы неразрушающего контроля пригодны для контроля блоков гидроакустических антенн, заполненных наполнителем, и определения места расположения внутренних дефектов с заданной чувствительностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карташев Е.Н., Куц Д.А.* Определение параметров гидроакустических пьезокерамических преобразователей путем численного моделирования / Материалы XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург: «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2013. С. 160—165.
2. *Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3. Ультразвуковой контроль. И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. М.: Машиностроение, 2008. 864 с.*
3. ГОСТ Р 56542—2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
4. *Мартыненко А.В.* К вопросу о возможности повышения чувствительности и разрешения иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 3—12.
5. *Попович А.А., Масайло Д.В., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Полозов И.А., Быченко В.А., Кинжагулов И.Ю., Беркутов И.В., Ашихин Д.С., Ильинский А.В.* Применение лазерно-ультразвукового метода для исследования характеристик изделий, полученных аддитивными технологиями // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 3—10.
6. *Марков А.А.* Альтернативное представление дефектоскопической информации в переносных ультразвуковых дефектоскопах // В мире неразрушающего контроля. 2000. № 1. С. 42—44.
7. ГОСТ Р ИСО 5577—2009. Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь.
8. Электронный ресурс. Сайт научно-технического центра «Эксперт» <http://www.ntsexpert.ru>