

# МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА В НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ

Ю.А. Боженев

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Развиваемая военно-морским флотом США концепция действий подводных лодок в прибрежной зоне предусматривает детальное знание окружающей подводной обстановки на больших пространствах. Такую задачу предполагается решать с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), для чего необходимо радикальным образом уменьшить их размеры, снизить стоимость и организовать их массовое или крупносерийное производство. Это может произойти благодаря внедрению в конструкцию и бортовые системы АНПА принципиально новой технологической базы на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) и разработок в области нанотехнологий.

МЭМС представляют собой многокомпонентные устройства различной физической природы с большим уровнем интеграции микроскопических элементов, имеющих типичные размеры 50–100 мкм [8]. В отличие от ранее разработанных микроэлектронных систем, в которых преобладали большие интегральные схемы (чипы) на кремниевой основе, в МЭМС кроме кремния могут применяться и другие материалы: полимеры, пластмассы, металлы, керамика. МЭМС производятся с применением объемной и поверхностной микрообработки, а также традиционных технологий интегральных схем. Для примера, на рис. 1. приведена схема технологического процесса изготовления пла-

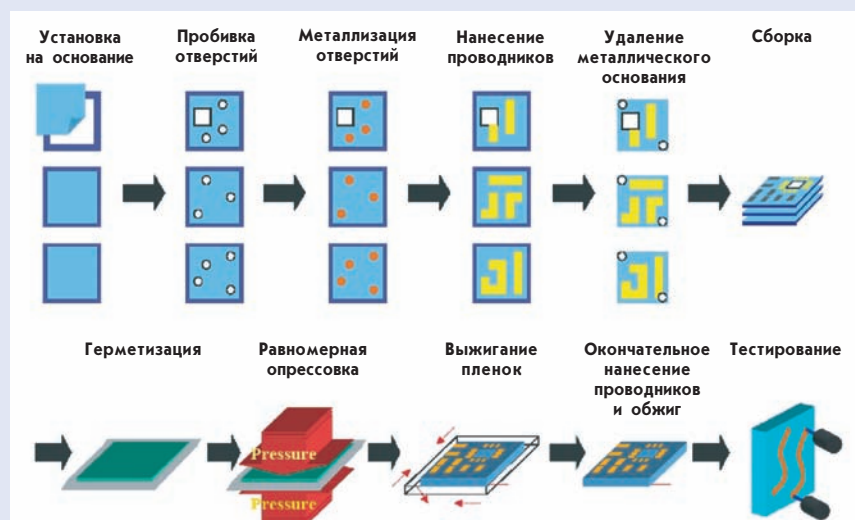


Рис. 1. Схема технологического процесса изготовления планарной основы микро электрогенератора

нарной основы для микроэлектрогенератора на базе низкотемпературной спекаемой керамики Nd-Fe-B (постоянные магниты на основе неодим-железобор), демонстрирующая его многооперационность.

Различные микроскопические элементы (стержни, шестерни, шарниры, оптические линзы, постоянные магниты и пр.) позволяют создавать на их основе миниатюрные приборы. К их числу можно отнести приводы, насосы, электрогенераторы, конденсаторы переменной емкости, реле, переключатели, потенциометры, многокомпонентные биологические, химические, физические датчики и анализаторы, устройства связи, гироскопы, акселерометры и многое др.

Применительно к АНПА необходимо иметь набор высокочувствительных прецизионных датчиков состояния морской среды, датчиков и устройств для подводной навигации, связи и поисковых систем. На основе МЭМС исследовательские лаборатории США *Nekton Research of Duke University, Sandia Lab., Woods Hole Oceanographic Institute* при взаимодействии с *DARPA* разрабатывают семейство микро-АНПА [9]. Аппарат М3 серии *Micro Hunters* имеет цилиндрический корпус диаметром 25 мм, массой 75 г, может развивать скорость 0,5 м/с (1 узел) и выполнять миссию в течение 20 ч. При проведении первой серии испытаний в бассейне с помощью бортовых датчиков он многократно наводился с расстояния 20 м в секторе 180° на галогенный источник света мощностью 800 Вт с точностью 0,1 м, обходя препятствия и ловушки. Во второй серии испытаний демонстрировались проникновение аппарата в охраняемую зону диаметром 1–2 м для уничтожения источника света (с вероятностью 0,5), а также обход горизонтальных препят-

ствий за установленное время.

Аппарат М4 несколько большего размера (диаметр 50 мм и масса 700 г) имеет на борту дополнительные датчики для навигации и связи, которые включают 3-осевые магнитометр и акселерометр, датчики электропроводности, температуры, давления (СТД). Он может взаимодействовать с гидроакустической навигационной системой (ГАНС) с короткой и длинной базой, удерживать установленную глубину с точностью 0,3 м и курс с точностью 2°. Аппарат развивает линейную скорость 1 м/с (2 узла), угловую скорость 20 град/с и может перемещаться в вертикальной плоскости под углом 90°.

Аппарат «*MicroRanger*» (диаметр 90 мм, масса 3,5 кг) имеет двигатель-двигательный комплекс с управляемым в двух плоскостях вектором тяги. Он снабжен компасом, многоцелевыми датчиками и акустическим микродемом. Последний обеспечивает работу ГАНС и акустическую связь со скоростью 30–100 кбит/с. Аппарат также имеет поверхностную радиосвязь 880 кбит/с.

Примерами мини-АНПА, в которых широко применены МЭМС, являются аппараты М3, М4 серий *MicroHunters* (рис. 2) и *MicroRanger* (рис. 3) США.

Микроэлектромеханические системы АНПА применяются при создании:

- датчиков и анализаторов состояния морской среды;
- систем навигации;
- систем связи;
- поисковых систем;
- систем картографирования морского дна.

### Датчики и анализаторы морской среды

Микроэлектромеханические технологии не только уменьшают размеры датчиков, но и позволяют повысить их чувствительность и снизить энергопотребление. Среди самых выдающихся достижений в этой области можно назвать подводный масс-спектрометр (ПМС) [7, 8]. Он определяет химический состав морской воды в реальном времени, следы летучих органических соединений, растворенных газов и других продуктов, исходящих от судов, с точностью до одной миллиардной доли и меньше и 1–100 единиц атомной массы. Спектрометр разработан в университете Южной Флориды (США) для применения в АНПА. В нем использованы новейшие мембраны, представляющие собой трубки, изготовленные из газопроницаемого полидиметилсилоксана. Под действием насоса перистальтического типа создается давление с одной стороны мембраны и вакуум – с другой, порция жидкости с растворенными в ней газами или органическими соединениями про-



Рис. 2

Микро АНПА М3 (справа внизу) и М4 (слева сверху) серии *microHunters*



Рис. 3

Аппарат *microRanger* в модульной транспортировочной сборке

гоняется через спектрометр. Высокую чувствительность ПМС обеспечивает электронный детектор. Он ионизирует загрязненную жидкость, которая затем сравнивается с неионизированной. Через мембранный блок могут проходить соединения, имеющие 300 единиц атомной массы. Это позволяет определять соединения диметилсульфидов, хлороформа, толуола так же хорошо, как и низкомолекулярный вес газов: диоксида углерода, кислорода, азота. Временной цикл таких измерений составляет 5–10 мин. Спектрометр может работать в длительном режиме. На борту АНПА «Ocean Explorer» такой прибор работал 4 ч, потребляя мощность 100 Вт.

**ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКТОРА**

**Потребляемая мощность достаточно велика, что ставит под сомнение возможность использования спектрометра на борту малого АНПА.**

На базе МЭМС созданы датчики давления (рис. 4), комплексные системы измерения электропроводности, температуры, акустические доплеровские измерители течений (ADCP), биологические, химические, физические датчики, ультрафиолетовые спектрометры для измерения нитратов, спектрофотометрическая анализирующая элементная система и многие другие приборы и устройства.

**Системы навигации**

Основу навигационных систем АНПА составляют магнитные и гироскопические компасы, инерциальные навигационные системы, сопрягаемые с датчиками абсолютной и относительной глубины, доплеровскими лагами, приемниками спутниковой и приемопередающими устройствами гидроакустических навигационных систем. Использование твердотельных пьезогироскопов [3] и микроакселерометров [1, 2] позволя-



Рис. 4  
Комплекс *Micro CTD* с цифровым выходом фирмы *FSI*

ет создавать бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) чрезвычайно малых размеров.

Пьезогироскоп функционально является датчиком угловой скорости. Чувствительный эле-

мент датчика представляет собой биморфную структуру, состоящую из пьезоэлектрических пластин, в которых возбуждаются механические вибрации. Ниже приведены технические параметры гироскопа ENV-05F-03:

Напряжение питания, В	5 ± 0,5
Потребляемый ток, мА	15
Максимальная угловая скорость (w), град/с	60
Выходное напряжение при w=0, В	2,5 ± 0,4
Коэффициент преобразования, мВ/град/с	25
Температурный коэффициент	± 10
Линейность	0,5 %
Дрейф нуля, макс.	9 град/с

**ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКТОРА**

**Использование данного гироскопа в ИНС представляется весьма сомнительным ввиду его очень малой точности и стабильности. Речь может идти лишь о возможности его применения для демпфирования углового движения АНПА при маневрировании.**

Акселерометры (интегральные датчики ускорения) создаются по технологиям поверхностной микрообработки, комбинации технологий биполярных плоскостных транзисторов и комплементарных металло-

оксидных полупроводников. Чувствительным элементом является инерциальная масса, представляющая собой набор стержневых пластин длиной 150 мкм, расположенных на расстоянии 2 мкм от подложки. Выходной сигнал формируется емкостным методом. При отклонении пластин изменяется емкостное сопротивление между ними, преобразуемое в выходное напряжение. Ниже приведены для примера технические параметры микроакселерометра ADXL202 фирмы «Analog Devices»:

Максимальное значение ускорения, g	2
Количество осей	2
Разрешение, mg	5
Ширина полосы частот, кГц	5
Напряжение питания, В	3–5
Потребляемый ток, мА	0,6

Примером малых размеров ИНС с применением МЭМС может служить автопилот фирмы «Mavionics» массой 85 г (рис. 5).

**ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКТОРА**

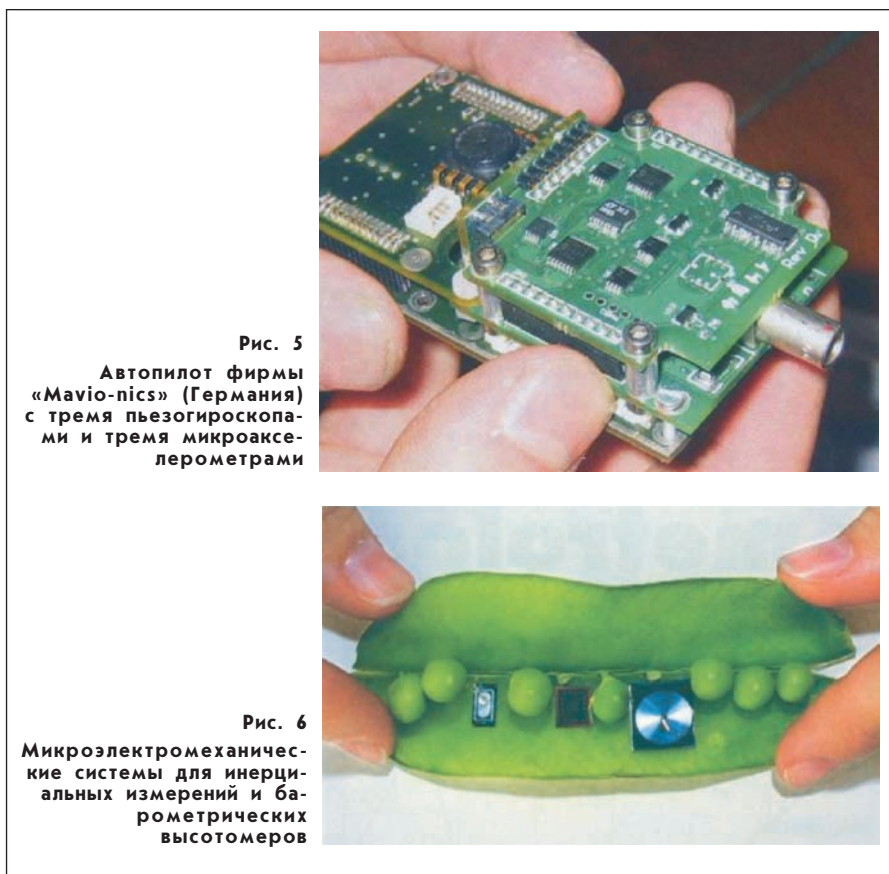
**Данное устройство может быть использовано в качестве автопилота для очень быстрых и динамичных объектов, для которых вопросы обеспечения точности навигации вообще не стоят.**

Использование микроэлектромеханических систем для инерциальных измерений и барометрических высотомеров (рис. 6) в определении изменения высоты дифференциальным методом позволит иметь при эксплуатации спутниковых систем позиционирования сантиметровые точности определения местоположения. Размеры приемных устройств не превысят, как утверждает в [5], размеров мобильного телефона.

**Системы связи**

Радиочастотные, акустические и оптические каналы связи хорошо согласуются с МЭМС. Используя механические массовые и пружинные структуры в МЭМС-устройствах, можно создавать комплексные резонансные фильтры, содержащие пассивные элементы и выключатели. Устройства могут работать на частотах в несколько десятков гигагерц при дальности передачи данных в несколько километров (в воздухе) [8].

Акустические МЭМС-структуры также могут быть созданы с использованием пьезоэлектрических и других материалов. На рис. 7 показан набор миниатюрных керамических полусфер, цилиндров и дисков, используемых в гидроакустических устройствах, полученных фирмой «Morgan Electroc ceramics» (Великобритания) методом пластичной литевой керамики (VPP – Viscous Plastic Processing). Акустическая двухсторонняя связь может



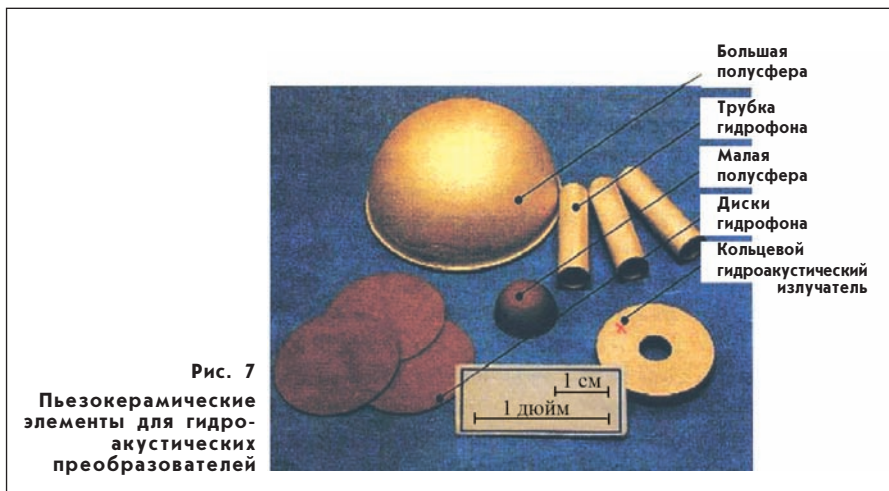
**Рис. 5**  
Автопилот фирмы «Mavio-nics» (Германия) с тремя пьезогироскопами и тремя микроакселерометрами

**Рис. 6**  
Микроэлектромеханические системы для инерциальных измерений и барометрических высотомеров

быть достигнута теми же методами, что и в обычных акустических модемах. Основное различие заключается в конструкции преобразователя. Технологии МЭМС позволяют проектантам легко создавать акустические преобразователи различных типов, используя лишь один многократно воспроизведенный элемент.

Микрооптоэлектромеханические системы могут исполь-

зоваться для фокусировки выходного луча лазера в волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) в качестве сканирующего зеркала для управления лучом, а также для других систем, например микроспектрометров видимого и инфракрасного диапазона, деформируемых микрозеркал лазерных гироскопов, устройств сопряжения в ВОЛС и пр.



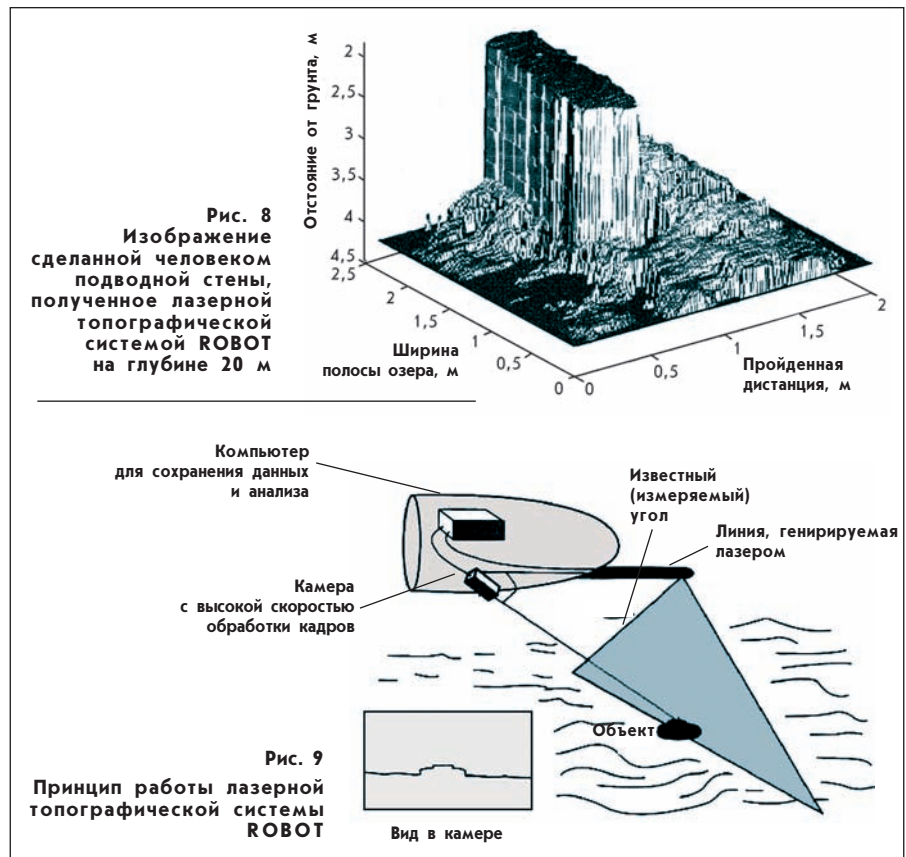
**Рис. 7**  
Пьезокерамические элементы для гидроакустических преобразователей

### Системы поиска и картографирования морского дна

В научном центре университета Южной Флориды (США) была разработана по технологии МЭМС, изготовлена и испытана на аппарате «*Ocean Explorer*» лазерная система для топографической съемки морского дна, названная *ROBOT* (*Real-time Ocean Bottom Optical Topographer*) [8]. Система за счет лазерного линейного сканирования позволяет создавать в реальном времени трехмерное изображение рельефа морского дна, предметов на грунте, мин, взрывных террористических устройств на корпусах судов и т. п. О ее высокой разрешающей способности можно судить по рис. 8, на котором изображен фрагмент морского дна, полученный на глубине 20 м аппаратом «*Ocean Explorer*».

Схема линейного лазерного сканирования системы *ROBOT* приведена на рис. 9. Лазерный луч веерообразной формы, развернутый зеркальным отражателем под углом 90° к оси трубки, освещает морское дно в процессе продольного движения аппарата, а высокоскоростная видеокамера, расположенная под известным углом на некотором расстоянии от лазерного луча, собирает и анализирует «линейные» данные, а затем передает их в обрабатывающий компьютер.

Система состоит из 65 мВ 532 нм СВ лазера, высокоскоростной (50 кадров/с) цифровой видеокамеры с разрешением 256 x 256 пикселей в поле зрения, процессора на базе *Pentium* для получения трехмерного изображения и блока питания. Процесс преобразования данных в трехмерное изображение поддерживается программным обеспечением *MATLAB*. Обработка 256 пикселей в линейной развертке данных происходит непосредствен-



но в видеокамере методом пороговых значений или последовательной аппроксимации. Поперечное разрешение зависит от высоты аппарата над объектом и поля зрения камеры. Стандартная величина разрешения составляет 5 мм при высоте 3 м, 256 пикселей в поле зрения камеры, расположенной под углом 24° к продольной оси аппарата. При движении аппарата со скоростью 1 м/с разрешение между линиями (продольное) – 2 см.

Одним из особых преимуществ МЭМС является чрезвычайно малое энергопотребление. Поэтому не соответствующие этому условию стандартные источники энергии плохо согласуются с ними. Особенно это касается соединительных устройств. Нужны новые способы передачи энергии в МЭМС, например беспроводные. Исследуются возможности использования микроволновой энергии, низкочастотных

электромагнитных полей, световой, акустической энергии и температурных градиентов в объеме устройства. Рассматриваются также электрохимические элементы и генераторы, изготавливаемые по другим технологиям. Во всех случаях устройства внутреннего энергообеспечения МЭМС являются предпочтительнее по сравнению с внешними.

Одним из трудных моментов при создании устройств с МЭМС является совмещение всех элементов в единой конструкции. Здесь требуется учет многих системообразующих факторов: высокой объемной тепловой плотности, перепадов температуры и давления, физических и химических свойств применяемых материалов, вида интерфейса и многих других. Оптимизация конструктивных решений и в традиционных технологиях чрезвычайно важна. Здесь она выступает на первый план.

Необходимо отметить, что техническая реализация МЭМС в АНПА не ограничивается рассмотренными выше примерами. Следует еще обратить внимание на то обстоятельство, что такие

крупнейшие мировые фирмы, как «Philips», «Hewlett Packard», «Texas Instruments», вложили большие инвестиции в МЭМС. Академические институты, такие как *University of*

*Twente* (Голландия), *Cornell University* (США), *University of Tokyo* (Япония) и многие другие, имеют обширные программы исследований в области микро- и нанотехнологий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Автономные необитаемые подводные аппараты смогут стать прекрасным инструментом для подводных исследований, действенным морским оружием и интеллектуализируемой системой, если будут снабжены соответствующими датчиками и устройствами. Такую возможность предоставляют интенсивно развивающиеся микро- и нанотехнологии.

2. Уже реализованные в АНПА устройства с МЭМС значительно сократили объемы для их размещения, повысили точность и разрешающую способность аппаратуры, снизили

энергопотребление, уменьшили стоимость. Это позволило создать миниаппараты, обладающие теми же техническими возможностями, что и их крупногабаритные предшественники.

3. Необходим скорейший и тщательный пересмотр существующих технологий отечественного подводного аппаратастроения в сторону широкого применения МЭМС- технологий.

### ПРИМЕЧАНИЕ РЕДАКТОРА

**Созданные в различных странах миниаппараты играют пока роль интеллектуальных игрушек и по многим функциональным ограничениям, часть которых была**

**отмечена выше, пока не могут конкурировать в решении практических задач с современными аппаратами средних и больших размеров. Кроме того, существует целый ряд конструктивных и технологических условий для глубоководных АНПА, которые, в принципе, не могут быть обеспечены в рамках микроконструкции. Тем не менее затронутая проблема представляется достаточно актуальной и ее решение связано с проведением широких исследований и технических экспериментов в области миниатюризации элементной базы подводных роботов.**

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акселерометры фирмы «Analog Devices». [www.analog.com](http://www.analog.com).
2. Акселерометры фирмы «Kongsberg». [www.kongsberg-seatex.no](http://www.kongsberg-seatex.no).
3. Пьезогироскопы фирмы «Murata». [www.platan.ru](http://www.platan.ru).
4. Chris Brown. Making «Sense» of the sea // *Marine Scientist*. Winter 2002/03. N 2. P. 16-19.
5. Colin Beatty Frin. Global navigation satellite systems in mid – 2003. *International Ocean Systems*. November / December 2003. P. 6-9.
6. Kevin McCarthy. REMUS – a role model for AUV technology transfer *International Ocean Systems*. November / December. 2003. P. 22-23.
7. Kristen M. Kusek. The micro technology with macro potential // *Marine Scientist*, Winter 2002/03. N 2. P. 14-15.
8. Lawrence C. Langebrake. AUV sensors for Marine Research // *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. Publ. By Taylor and Francis, London, 2003. P. 245-277.
9. Mark Hewish. MicroAUVs collaborate to track down their prey // *Jane's Defense Weekly*, 12/v35, 2004.
10. Mini-AUV the next generation. *The Journ.of Offshore Technology*. July/August. 2003, P. 23-26.