

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК. 681.5:621.37:534.321.9:502

**ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ПОДВОДНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ИЗМЕРЕНИИ
ПРИДОННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ В ГЛУБОКОВОДНЫХ
АКВАТОРИЯХ**

© 2020 А.П. Елохин*, А.А. Василенко*, С.Е. Улин*, С. Юксеклер**, М. Юксеклер**

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

**АО АККУЮ НУКЛЕАР, Мерсин, Турция

В статье представлено исследование системы автоматизированного управления подводного радиоуправляемого беспилотного аппарата (в рамках макета), осуществляющего радиационный контроль придонных областей глубоководных акваторий (глубиной больше 10 м), и система построения канала связи между оператором и аппаратом. Радиационный контроль осуществляется стандартным методом с использованием спектрометрического, дозиметрического оборудования и эхолота, располагающихся на подводном аппарате. Построение канала связи с объектом, расположенным на земле, осуществляется двумя способами: в воде – путём передачи информации посредством ультразвука до буферного устройства, плавающего на поверхности акватории, и через него, путём ретрансляции – оператору на берег по радиоканалу. Управление подводным аппаратом осуществляется в обратном порядке: от оператора до буферного устройства – по радиоканалу, с последнего до подводного аппарата – путём ретрансляции сигнала в ультразвук и далее путём последующей ретрансляции до приёмного устройства подводного аппарата.

Ключевые слова: ультразвуковая передача информации, радиоуправляемый подводный аппарат, радиационный контроль придонных областей акваторий, спектрометрическое, дозиметрическое оборудование, радиоканал связи.

Поступила в редакцию 24.03.2020

После доработки 16.07.2020

Принята к публикации 24.07.2020

Анализ радиационных аварий в России и за рубежом убеждают в необходимости разработки дистанционных (бесконтактных для человека) средств оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды. В представленной работе рассматривается подобное средство оценки радиоактивного загрязнения акваторий и их донной поверхности, например, прудов-охладителей АЭС или прибрежной области Японского моря в регионе японской АЭС «Фукусима-1» и др.

Прецедентов, связанных с утечкой радиации в окружающую среду, с начала освоения атомной энергетики человечеством произошло уже более чем достаточно. Излучение радиоактивных веществ оказывает очень сильное воздействие на все живые организмы, поэтому совершенствование средств контроля радиационного фона окружающей среды в настоящее время просто необходимо. Внедрение подобных технологий радиационного контроля окружающей среды, позволит осуществлять радиационный контроль не только прудов-охладителей АЭС, но служить более фундаментальным целям охраны водной среды при радиационных авариях, связанных с утечкой радиации, яркими примерами которых являются: авария на Фукусима-1 в

Японии в марте 2011 года, авария в бухте Чажма в августе 1985 г., радиационная авария в губе Андреева в феврале 1982 г. (СССР).

Суть метода, используемого для оценки радиоактивного загрязнения акваторий и их донной поверхности [1, 2], довольно проста. Метод, реализуемый путем применения погружного спектрометрического комплекса «Нырок-2» [2] (рис. 1), который содержит блок детектирования, представляющий собой полупроводниковый детектор (ППД) из особо чистого германия в портативном многопозиционном криостате, впервые был разработан и применен на практике специалистами ООО «Грин Стар Инструмент-с» и ОАО «ВНИИАЭС» в 2007 г. при проведении радиационного обследования в зоне влияния утечки жидких радиоактивных отходов (ЖРО) из хранилища № 2 жидких отходов (ХЖО-2) Нововоронежской АЭС (НВАЭС) (1985 г.). Кроме спектрометрического комплекса «Нырок-2» содержит: специальный контейнер (герметичную капсулу из нержавеющей стали); установленный в капсулу свинцовый коллиматор; гофрированный шланг (для вентиляции блока детектирования и отвода испарений азота); процессор импульсных сигналов SBS-75 (многоканальный анализатор); профессиональный переносной компьютер (Notebook).



Рисунок 1 – Проведение радиационного обследования в зоне влияния утечки ЖРО из ХЖО-2 НВАЭС (1985 г.) [Radiation survey in the zone of influence of liquid radioactive waste leakage from No. 2 of Novovoronezh NPP liquid waste storage (1985)]

Сравнение результатов измерений рассматриваемым методом и традиционным (методом отбора проб), приведенное в таблице 1 [1, 2], демонстрирует хорошую точность измерения относительно традиционного (пробоотборного) метода.

Таблица 1 – Сравнение результатов радиационного контроля донных отложений пробоотборным и дистанционным методами (отн. ед.) [Comparison of radiation monitoring results of bottom sediments by sampling and remote sensing methods (rel. units)]

№	Метод радиационного контроля		Отличие, %
	Пробоотборный (традиционный)	Дистанционный («Нырок-2»)	
1	40 ± 1,21	41 ± 10	2,5
2	3,4 ± 1,0	3,2 ± 0,9	6,3
3	6,5 ± 1,8	6,7 ± 1,7	3,1
4	0,4 ± 0,1	0,4 ± 0,1	< 1
5	42 ± 12	39 ± 10	2,6
6	1,0 ± 0,3	0,85 ± 0,20	18
Суммарная неопределенность контроля (P = 0,95)			

Однако существенным недостатком приведенного метода оценки радиоактивного загрязнения донной поверхности акватории является отсутствие информации относительно геометрических параметров, ограничивающих область радиоактивного загрязнения, приводящей к необходимости исследования большой площади акватории, что требует большого количества времени на исследования, обработку информации и не позволяет передавать её в режиме реального времени

(on-line). Другим существенным недостатком метода является его низкая мобильность, поскольку, фактически, работа осуществляется методом «удочки» с водной поверхности акватории (см. рис. 1). Кроме того, используемый спектрометрический метод, основанный на использовании традиционных полупроводниковых детекторов, требует крупногабаритного криогенного оборудования для охлаждения детектора и уменьшения, таким образом, паразитного фона, что создаёт значительные неудобства при работе на ограниченном пространстве на воде.

В методе, рассматриваемом авторами в настоящей работе, оценка радиоактивного загрязнения донной поверхности глубоководных (глубиной больше 10 м) акваторий с речной или морской водой осуществляется путем использования радиоуправляемого подводного аппарата (подводного дозиметрического комплекса, ПДК), содержащего как необходимое дозиметрическое оборудование, выполняющее измерения мощности дозы и спектрального состава γ -излучения радионуклидов, загрязняющих донную поверхность, так и ряд других приборов и устройств, функциональные возможности которых позволяют передавать полученную информацию оператору, располагающемуся на берегу. Этот результат достигается за счет того, что кроме размещения на небольшом (не более 1,5 м) подводном беспилотном радиоуправляемом аппарате γ -спектрометра, дозиметра поглощенной дозы γ -излучения, эхолотов, измеряющих расстояние между донной поверхностью и подводным аппаратом, а также между подводным аппаратом и каким-либо препятствием, возникающим на пути его следования, располагается блок бесконтактной дистанционной передачи информации, которая предварительно оцифровывается, кодируется и затем поступает на ультразвуковой датчик, расположенный на поверхности подводного аппарата. Причем, передача информации, осуществляемая в водной среде, регистрируется ультразвуковым детектором, располагающимся на буферном устройстве, которое помещают на водной поверхности вблизи побережья, декодируется и затем ретранслируется по радиоканалу на приемное устройство оператора, располагающегося на берегу, что наглядно показано на рисунке 2: обмен информацией ПДК – 1) с буферным устройством (ретранслятором) – 2), плавающим на поверхности водоёма, осуществляются посредством ультразвуковых преобразователей. Данные с ретранслятора передаются на рабочую станцию оператору – 3), расположенному на берегу, по радиоканалу.

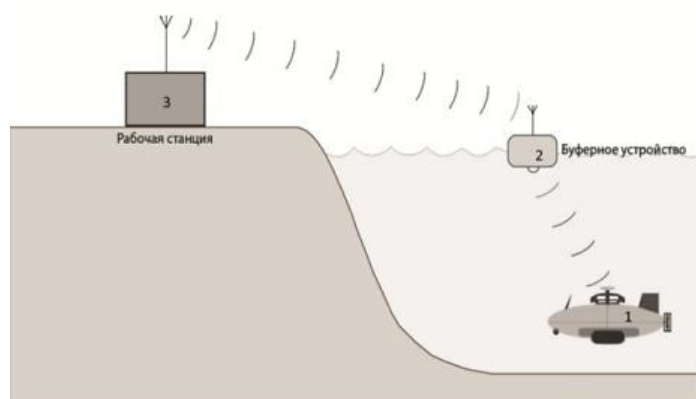


Рисунок 2 – Принципиальная схема приема и передачи информации ПДК [Schematic diagram of receiving and transmitting information of an underwater dosimetry complex]

Ультразвуковой сигнал может распространяться только в водной среде, поскольку на границе раздела сред (вода-воздух) происходит его полное отражение. Когда аппарат находится на поверхности акватории, его управление осуществляется по радиоканалу. Эскиз ПДК представлен на рисунке 3, где

изображен корпус подводного исследовательского аппарата (подводного дозиметрического комплекса) – 1); ёмкости «танки» балластных вод – 2); горизонтальные рули – 3); крышка – 4); прокладка – 5); вентиль – 6); ксеноновый γ -спектрометр – 7); γ -детектор – 8); фонарь – 9); видеокамера – 10); ультразвуковой детектор – 11); киль – 12); винты левого и правого поворота – 13); силовой винт – 14); эхолот – 15), газгольдер – 16), представляющий собой баллон со сжатым воздухом (до 300 атм), который используется для его подачи в «танки» при всплытии, и насосы для закачивания заборной воды при погружении – 17).

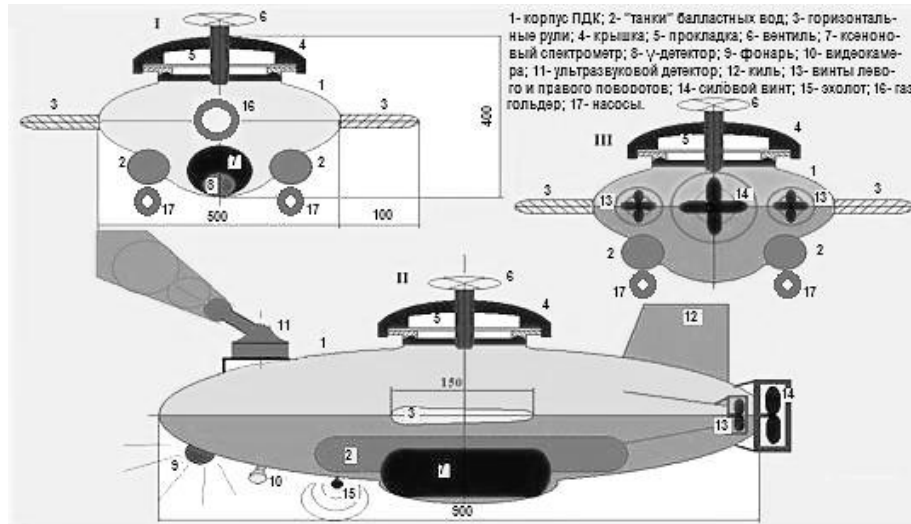


Рисунок 3 – Принципиальная схема подводного радиоуправляемого аппарата ПДК с дозиметрическим оборудованием на борту (7, 8), газгольдером (16) и насосами заборной воды (17) из ХЖО-2 НВАЭС (1985 г.) [Schematic diagram of an underwater radio-controlled apparatus of an underwater dosimetry complex with dosimetry equipment on board (7, 8), a gas holder (16) and seawater pumps (17) from No. 2 of Novovoronezh NPP liquid waste storage (1985)]

Отличительной особенностью выбранного метода оценки радиоактивного загрязнения донной поверхности глубоководных акваторий, в отличие от рассмотренного выше [1], является предварительное измерение эхолотом эффективной высоты ПДК над придонной поверхностью акватории h_D , оптимальное значение которой с учетом поглощения водой γ -излучения радионуклидов, осевших на донную поверхность акватории, рассчитывалось методом Монте-Карло. Расчет, представляя собой высотное распределений мощности дозы γ -излучения от загрязненной донной поверхности, показал, что эффективная высота ПДК над донной поверхностью должна составлять порядка $h_D = 40$ см, а значение эффективного радиуса сканирования, может быть определено через измеренную высоту по формуле $R_D = 0,75h_D$ (рис. 4) [3].

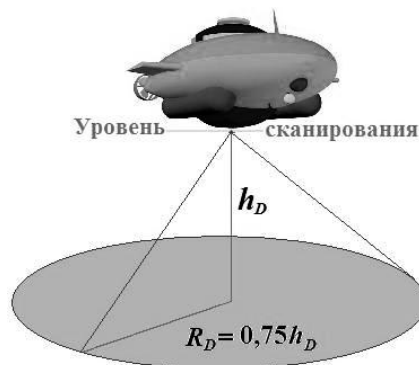


Рисунок 4 – К методу определения придонной активности в прудах-охладителях [The method for determining the bottom activity in cooling ponds]

Другой отличительной особенностью предлагаемого метода является то, что использование ультразвуковых датчиков позволяет осуществлять передачу информации относительно радиоактивного загрязнения донной поверхности в режиме реального времени из глубоководных акваторий глубиной больше 10 м в морской воде. В основе этого утверждения лежит известная спектральная зависимость коэффициента поглощения электромагнитных волн для пресной и морской воды [4], приведенная на рисунке 5, из которой следует, что передача информации по радиоканалу из глубоководных акваторий (связь с подводными лодками, находящимися в погруженном состоянии) наиболее целесообразна на низких частотах, которым соответствуют только длинные и сверхдлинные волны [5].

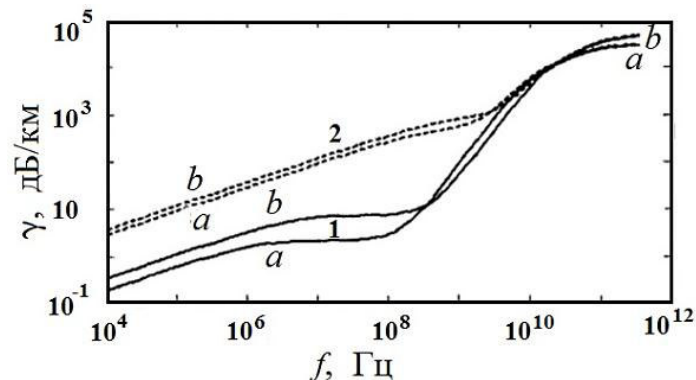


Рисунок 5 – Спектральная зависимость коэффициента поглощения электромагнитных волн для пресной (1) и морской (2) воды, при температуре 0 °C (a) и 25 °C (b) [4] [Spectral dependence of the absorption coefficient of electromagnetic waves for fresh (1) and sea (2) water, at a temperature of 0 °C (a) and 25 °C (b)]

Но при этом следует заметить, что передача информации на низких частотах требует многокилометровых антенн, стоимость которых значительно превосходит стоимость оборудования, включая и подводный аппарат, используемый для решения рассматриваемой задачи.

Автоматизация управления ПДК осуществляется следующим образом. ПДК с γ -спектрометром, интегральным детектором γ -излучения и т.д., т.е. со всем оборудованием на борту (см. рис. 3), направляют в заданный сектор области акватории, в которой необходимо выполнить сканирование донной поверхности, управляя подводным аппаратом путём передачи информации (см. рис. 2), т.е. подводят аппарат в заданный сектор и осуществляют его погружение, управляя заполнением «танков» балластных вод (см. поз. 2 рис. 3). Затем, используя силовой (см. поз. 14 рис. 3) и поворотные (см. поз. 13 рис. 3) винты, а также горизонтальные рули (см. поз. 3 рис. 3), подводят аппарат в заданной точке на заданную высоту от донной поверхности, используя показания эхолота (см. поз. 15 рис. 3). Измеряемые параметры радиоактивного загрязнения донной поверхности, регистрируемые детектором мощности дозы γ -излучения (см. поз. 8 рис. 3) и γ -спектрометром (см. поз. 7 рис. 3) кодируются и передаются оператору. Видеокамера (см. поз. 10 рис. 3) используется для наблюдения особенностей донной поверхности, а фонарь (см. поз. 9 рис. 3) для её освещения. Процессы погружения и всплытия ПДК описываются на примере использования макета, вид которого представлен на рисунке 6а,б: 1) – газгольдер с краном – 2) и редуктором – 3), пробкой для выхода воздуха – 13), магнитным клапаном – 4) и тройником – 5) для подачи воздуха в «танки балластных вод» – металлические емкости с пластмассовыми заглушками – 6), которые установлены на платформе – 7); насосы – 9) располагаются с нижней стороны платформы – 7); электромагнитные клапаны – 8) располагаются на задней торцевой стороне «танков» сверху для воздуха, снизу для воды.

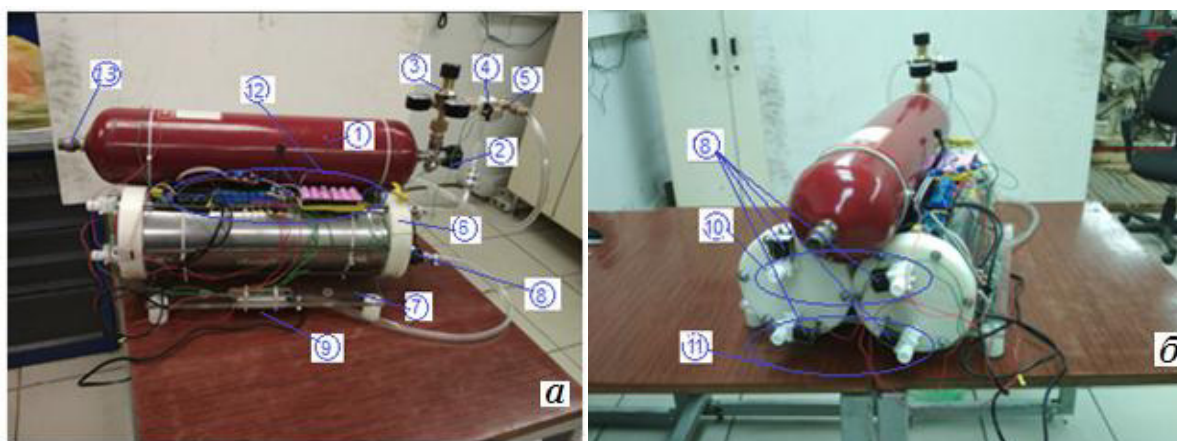


Рисунок 6 – Макет подводного аппарата, представляющий собой систему погружения/всплытия ПДК
[A model of an underwater vehicle which is a submersion / ascent system of an underwater dosimetry complex]

Макет представляет собой пластмассовую платформу, на которой располагаются оборудование, отвечающее за процессы погружения и всплытия ПДК, а также приборы, контролирующие работу оборудования. «Танки» балластных вод (далее просто «танки») располагаются под днищем ПДК (см. рис. 3). Насосы забортной воды (см. поз. 17 рис. 3) располагаются снизу на внешней стороне «танков» (см. поз. 2 рис. 3), представляющих собой пустые цилиндры, заполняемые водой (при погружении) или воздухом (при всплытии). Газгольдер располагается внутри ПДК (см. рис. 3). Это устройство обеспечивается манометром, регистрирующим остаточное давление воздуха в газгольдере после каждого всплытия, редуктором, регулирующим подачу воздуха в «танки» для вытеснения из них воды при всплытии, и электромагнитным клапаном, открывающимся для прохождения воздуха в «танки» в условиях всплытия. Воздух при всплытии выходит из газгольдера через редуктор и открывающийся электромагнитный клапан (см. поз. 4 рис. 6а) и через переходный тройник поступает в «танки» (см. поз. 6 рис. 6а), вытесняя воду. Управление процессами погружения/ всплытия ПДК осуществляется специальным программным обеспечением при помощи контролеров, на основе плис-систем (программируемых логических интегральных схем).

На лицевой стороне на «танках» (см. рис. 6а) при открытых магнитных клапанах (см. поз. 8 рис. 6), расположенных внизу и соединенных трубопроводом с водяными насосами (см. поз. 9 рис. 6), при погружении осуществляется забор забортной воды, а с тыльной стороны «танков» установлены магнитные клапаны (см. поз. 8 рис. 6), открывающиеся при заборе балластной воды для выхода воздуха через выходные патрубки (см. поз. 10 рис. 6), расположенные сверху «танков» (см. рис. 6б). После погружения подводного аппарата магнитные клапаны забора воды закрываются, а на водяные насосы подается сигнал, прекращающий их работу. При всплытии открывается воздушный клапан (см. поз. 4 рис. 6), расположенный после редуктора (см. поз. 3 рис. 6) (назначение редуктора состоит в регулировании давления воздуха, поступающего из газгольдера в «танки») и открываются магнитные клапаны (см. поз. 8 рис. 6), расположенные на тыльной стороне внизу «танков», через которые вода под давлением воздуха вытесняется через выходные патрубки, расположенные снизу на тыльной стороне «танков», обеспечивая всплытие аппарата. Регулирование давления воздуха, поступающего из газгольдера в «танки», особую роль играет при работе на большой глубине ($h > 10$ м). На такой глубине давление воды составляет $P_h = h/10$ атм, поэтому давление воздуха на регуляторе должно быть больше этой величины, для того чтобы вытеснить воду из «танка» при всплытии. На «танке» (см. рис. 6а) расположен электронный блок управляющей программы (см. поз. 12 рис. 6а) и пробка газгольдера

(см. поз. 13 рис. 6а), которую при испытаниях заменили на кран (см. поз. 2 рис. 6а), используемый для зарядки газгольдера воздухом (см. поз. 13 рис. 6а). В реальном исполнении ПДК также могут быть использованы подобное оборудование и аппаратура, поэтому авторам, в первую очередь, было необходимо уточнить особенности работы системы погружения/всплытия, в дальнейшем реализуемой на ПДК.

Используя систему погружения в ПДК в виде «танков», необходимо решить вопрос относительно их геометрических размеров по отношению к габаритам ПДК. Действительно, вес ПДК, его оборудования, решающего те или иные задачи, форма и геометрические размеры определённым образом должны коррелировать с размерами и формой «танков» балластных вод. Ответ на этот вопрос даёт нижеследующий вывод.

Оценка длины резервуара «танка» балластных вод и его радиуса в зависимости от длины подводного аппарата и веса его оборудования

Для решения задачи принимаем длину «танка» равной величине l , а соотношение между длиной «танка» и его радиусом зададим произведением $l = mr$ (m – целое число); $m_{\text{опт}}$ – оптимальное значение этого параметра, которое следует определить. Положим, что ПДК представляет собой цилиндр радиуса $R = 35$ см. и длиной L . Соотношение между длиной ПДК и его радиусом задаем в виде произведения $L = GR$, $G = 3 - 4$. Корпус подводного аппарата из дюралевого листа $\rho_{\text{Al}} = 2,7$ г/см³. Толщина корпуса аппарата и «танков» $d = 0,5$ см; плотность воды $\rho_{\text{вод}} = 1$ г/см³; $m_{\text{и.п.}}$ – масса дополнительного оборудования подводного аппарата и источников питания.

В основе оценки оптимального радиуса «танка» лежит равенство сил, определяемых весом оборудования подводного аппарата, включая вес двух «танков» балластных вод, заполненных водой, и выталкивающей лодку силой Архимеда $F_y = F_{\text{Ar}} \sin \varphi$, $F_{\text{Ar}} = \rho_{\text{в}} g h d S$, \mathbf{n} – нормаль к поверхности (рис. 7).

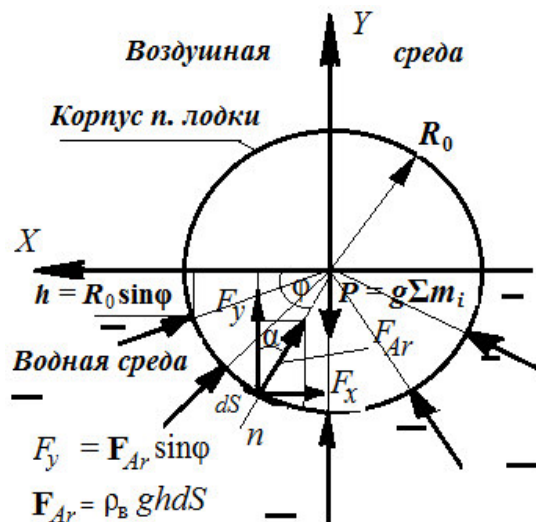


Рисунок 7 – К вопросу об оценке оптимального радиуса «танка» балластных вод [The question of evaluating the optimal radius of the "tank" ballast water]

Для этого составляется уравнение равенства сил, решение которого для радиуса «танка» r_t и определяет искомый радиус. Введём обозначения: $[2\pi R^2 d \rho_{\text{Al}} (G+1) + 2m_{\text{и.п.}}]g$ – вес подводного аппарата; $4\pi r_t^2 d \rho_{\text{Al}} [m+1]g$ – вес пустых «танков»; $2\pi r_t^3 m \rho_{\text{в}} g$ – вес воды в «танках». Тогда при $h = R \sin \varphi$, $dF_y = \rho_{\text{в}} g R \sin \varphi \cdot ds$; $ds = L dl = GR dl$; $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + (dy/dx)^2}$, а уравнение кривой, описывающей контур дна подводного аппарата, определим уравнением окружности (1):

$$y^2 + x^2 = R^2, \tag{1}$$

что позволяет нам найти производную dy/dx при $x = R\cos\varphi$ (см. рис. 7), определить $dF_y = \rho_B R^2 L g \sin^2\varphi d\varphi$ и, интегрируя по φ , $0 \leq \varphi \leq \pi$, найти $F_y = \rho_B R^2 L g \pi/2$. Тогда уравнение относительно оптимального радиуса «танка» балластных вод будет иметь вид формулы (2):

$$[R^2 d\rho_{AI}(G+1) + m_{и.п.}/\pi] + 2r_T^2 d\rho_{AI}(m+1) + r_T^3 m \rho_B = \rho_B R^3 G/4. \tag{2}$$

Таким образом, относительно радиуса «танка» балластных вод r_T получаем неполное кубическое алгебраическое уравнение (3):

$$r_T^3 + r_T^2(2d \times \rho_{AI}(m+1))/m\rho_B + [R^2 d \times \rho_{AI}(G+1) + m_{и.п.}/\pi]/m\rho_B - \rho_B R^3 G/4m\rho_B = 0. \tag{3}$$

Полученное уравнение соответствует полному кубическому уравнению [6]: $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$ при следующих значениях коэффициентов: $a = (2d\rho_{AI}(m+1))/m\rho_B$; $b = 0$; $c = [R^2 d\rho_{AI}(G+1) + m_{и.п.}/\pi - 0,25\rho_B R^3 G]/m\rho_B$. Решение уравнения (решение Кардано) находят следующим образом. Проводят замену переменной: $x = y - a/3$, получая уравнение (4):

$$y^3 + py + q = 0, \tag{4}$$

где $p = -a^2/3 + b$; $q = 2(a/3)^3 - ab/3 + c$; и находят его действительное решение:

$$y_1 = A + B; \quad A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}, \quad B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \quad Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2; \quad y_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}.$$

Вычисляя параметры, окончательно находим действительное решение для радиуса «танка» r_T балластных вод как функцию параметра m при различной длине ПДК, зависящей от числа G (заданная величина), определяющего его длину L , формула (5):

$$r_T = y_1 - a/3 = A + B - a/3. \tag{5}$$

Величины радиусов r_T , вычисленных при различных значениях параметров m и G , приводятся в таблице 2, а на рисунке 8 – оптимальные значения радиусов r_T «танков», соответствующие оптимальным параметрам $m_{опт}$ для двух значений параметра G .

Таблица 2 – Зависимость радиуса «танка» r_T балластных вод от параметра m [Dependence of the radius r_T of the “tank” of ballast water on the parameter m]

m	$r_T(m, G = 3)$	$r_T(m, G = 4)$
2	22.02	24.503
3	19.202	21.387
4	17.415	19.4
5	16.136	17.978
6	15.155	16.888
7	14.368	16.014
8	13.718	15.292
9	13.166	14.68
10	12.691	14.151
11	12.271	13.689
12	11.905	13.279
13	11.575	12.912

Продолжение таблицы 2

m	$r_T(m, G = 3)$	$r_T(m, G = 4)$
14	11.276	12.584
15	11.005	12.28
16	10.756	12.004
17	10.528	11.75
18	10.316	11.515
19	10.12	11.297
20	9.937	11.094
21	9.766	10.904
22	9.605	10.726
23	9.454	10.588
24	9.311	10.399
25	9.176	10.249
26	9.047	10.107
27	8.926	9.972

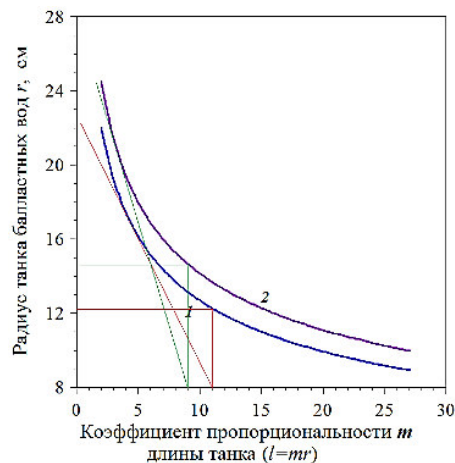


Рисунок 8 – Зависимость радиуса r_T «танка» балластных вод от параметра m , определяющего длину «танка» l ($l = mr_T$) в зависимости от параметра G , определяющего длину подводного аппарата ($L = GR$), $G = 3$ (1); $G = 4$ (2) [Dependence of the radius r_T of the «tank» of ballast water on the parameter m which determines the length of the «tank» l ($l = mr_T$), depending on the parameter G which determines the length of the underwater vehicle ($L = GR$), $G = 3$ (1); $G = 4$ (2)]

Из таблицы 4 и рисунка 8 следует, что с ростом параметра m радиус «танка» уменьшается, а длина увеличивается. При некотором радиусе «танка» его длина может превысить длину ПДК, что недопустимо. Это и приводит к необходимости оптимизации радиуса «танка». Из рисунка 8 следует, что при длине ПДК $L = 140$ см ($G = 4$) оптимальное значение радиуса «танка», при котором будет иметь место равновесие сил, действующих на подводный аппарат, будет составлять $r_T = 14,68$ см ($m = 9$) (при длине «танков» $l = 133,2$ см). Оставляя длину «танков» неизменной, и, выбирая радиус «танка» большего значения, например, r_T при ($m = 8$), мы обеспечим условия доминирования веса подводного аппарата над архимедовой силой при заборе заборной воды в «танк», и лодка будет осуществлять погружение. Для полного обоснования стабилизации аппарата в подводном и надводном положениях необходимо ещё использовать условие равенства нулю суммы моментов относительно центра масс подводного аппарата, распределяя их таким образом, чтобы выполнялось условие: $\sum l_i m_i = 0$; $i = 1, 2, 3, \dots, N$, где l_i – расстояние от центра масс подводного аппарата до центра масс i -го элемента с массой m_i ; N – общее число элементов. Это условие обеспечит равновесие аппарата на плаву и не допустит его дифферент (при плавании подводной лодки постепенно нарушается равенство между ее весом и силой поддержания (плавучести). Изменяется также вес носа и кормы относительно друг друга, что приводит к возникновению дифферентов).

Электронная схема электронных модулей управления узла погружения/всплытия радиоуправляемого ПДК приведена на рисунке 9, где

1 – электромагнитный клапан для выхода воздуха из первого «танка» при поступлении в него балластных вод (при погружении); 2 – электромагнитный клапан для выхода воздуха из второго «танка» также при заполнении его балластными водами (при погружении); 3 – электромагнитный клапан для выхода воды из первого «танка» балластных вод при вытеснении воды из «танка» (при всплытии); 4 – электромагнитный клапан для выхода воды из второго «танка» балластных вод также при её вытеснении (при всплытии); 5 – электромагнитный клапан, открывающий подачу воздуха из газгольдера (при всплытии); 6, 14, 15 – повышающий конвертер тока XL6009E1; 7 – восьмиканальный DC 5. В релейный модуль 8 – Hc-12 433 МГц Si4463 беспроводной модуль; 9, 10 – датчик расхода воды; 11 – микроконтроллер MEGA 2560; 12 – литиевая батарея; 13 – выключатель; 16, 18 – насосы забора балластных вод; 17 – драйвер (управляющая программа работы) двигателя.

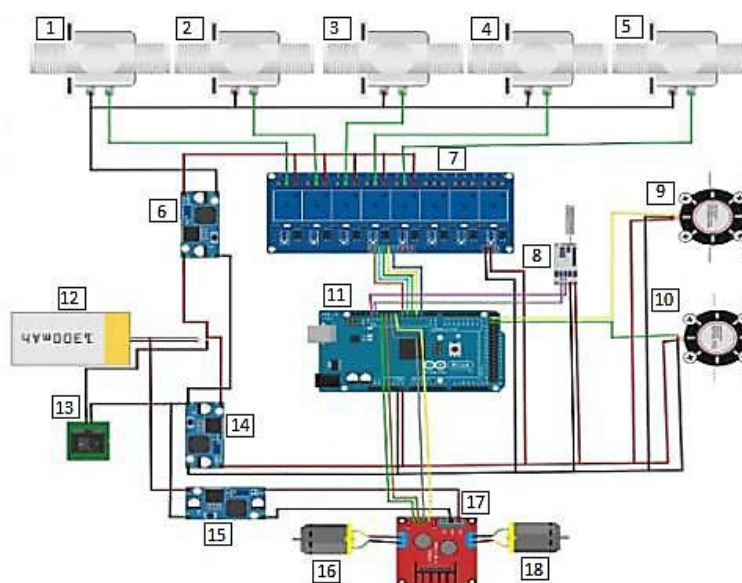


Рисунок 9 – Схема электронных модулей радиоуправляемого ПДК [Diagram of electronic modules of the radio-controlled underwater dosimetry complex]

Схема пульта управления подводного аппарата приведена на рисунке 10. Принципиальная схема пульта электронного оборудования управления узлом погружения/всплытия радиоуправляемого ПДК состоит из следующих элементов: 19 – батарея питания; 20 – выключатель; 21 – микроконтроллер; 22 – понижающий конвертер тока LM2596; 23 – Hc-12 433 МГц Si4463 беспроводной модуль; 24 и 25 – потенциометры.

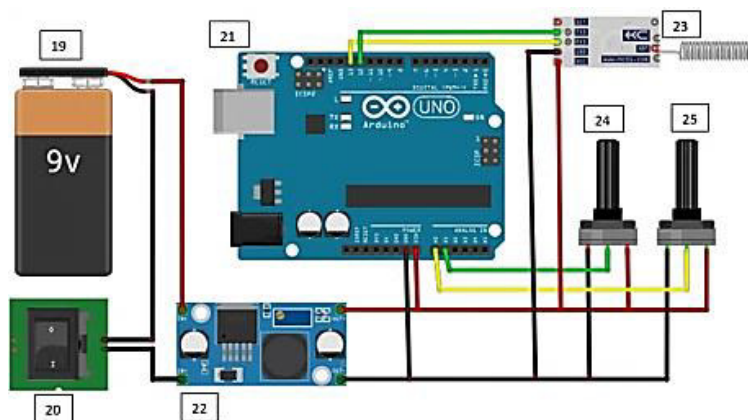


Рисунок 10 – Схема пульта управления ПДК [Diagram of the control panel of the underwater dosimetry complex]

Управление узлом подводного аппарата осуществляется следующим образом. Подводный аппарат выполняет задачу погружения/всплытия через команду, которую получает через пульт управления по радиоканалу или через систему ультразвуковых детекторов (см. ниже). Пульт управления имеет два потенциометра (см. поз. 24, 25 рис. 10). Потенциометр (см. поз. 24 рис. 10) дает команду погружения, далее эта команда передается с помощью микроконтроллера через передатчик (см. поз. 23 рис. 10) по радиоканалу к ПДК. После того, как подводный аппарат получил команду погружения через приемник (см. поз. 8), микроконтроллер (см. поз. 11 рис. 9) в то же время обрабатывает информацию и выдает определенные сигналы через релейный модуль (см. поз. 7 рис. 9) для открытия электромагнитных клапанов (см. поз. 1, 2 рис. 9) и выхода воздуха из первого и второго «танков» и одновременно дает сигналы через драйвер двигателя (см. поз. 17 рис. 9). Насосы (см. поз. 16, 18 рис. 9) забора балластных вод включаются, и расходомеры рассчитывают определенное количество воды, после чего выключают насосы автономно. В результате работа погружения ПДК выполнена.

Потенциометр (см. поз. 25 рис. 10) дает команду всплытия, эта команда передается с помощью микроконтроллера через передатчик (см. поз. 23 рис. 10) по радио каналу к ПДК. После того, как подводный аппарат получил команду всплытия через приемник (см. поз. 8 рис. 9), микроконтроллер (см. поз. 11 рис. 9) в то же время обработает информацию и выдаст определенные сигналы через релейный модуль (см. поз. 7 рис. 9) для открытия электромагнитного клапана (см. поз. 3, 4 рис. 9) для выхода воды из первого и второго «танков», открытия электромагнитного клапана (см. поз. 5 рис. 9) и выхода воздуха из газгольдера. В это время таймер рассчитает определенное время, чтобы выключить все электромагнитные клапаны. В результате работа всплытия ПДК выполнена. Блок-схема работы управляющей аппаратурой при выполнении процедур: погружение/всплытие приведена на рисунке 11, где приняты следующие обозначения: n – полученное значение на потенциометре по радиоканалу (0 – 255), L – объем «танка» на литр, $K1$ – клапан на выходе воздуха в первом «танке», $K2$ – клапан на выходе воздуха во втором «танке», $K3$ – клапан на выходе воды в первом «танке», $K4$ – клапан на выходе воды во втором «танке», $K5$ – клапан на входе воздуха в газгольдере, $H1$ – насос для входа воды в первом «танке», $H2$ – насос для входа воды во втором «танке».

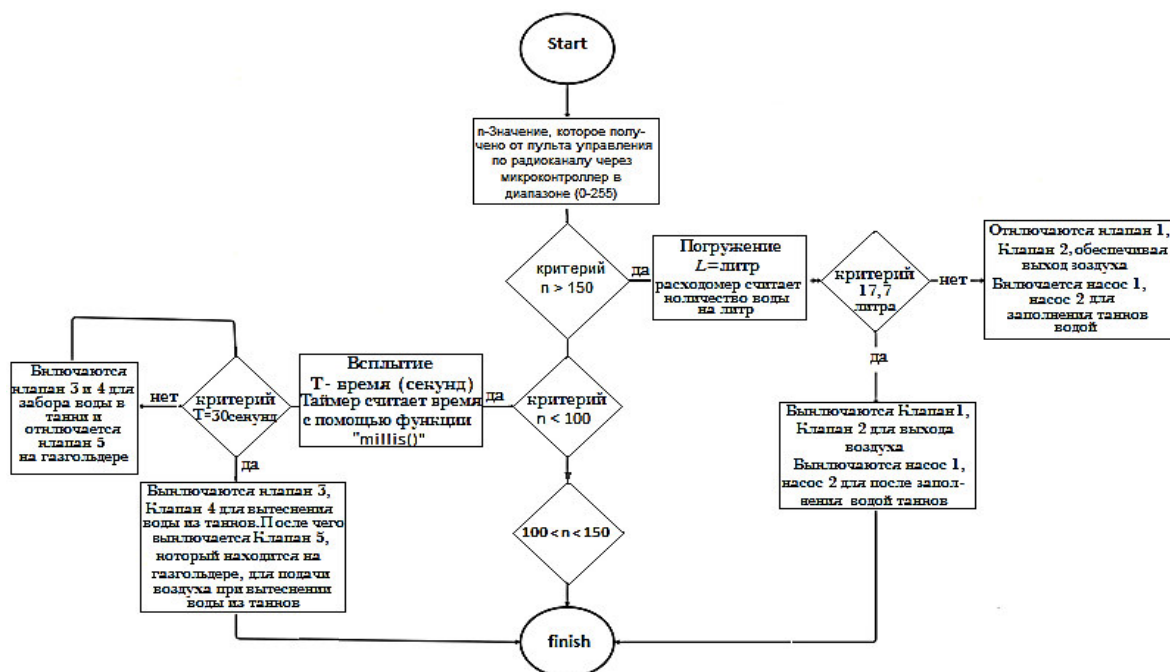


Рисунок 11 – Блок-схема узла управления процессов погружения/всплытия ПДК [Block diagram of the control unit for the processes of immersion / ascent of an underwater dosimetry complex]

На рисунке 12 приведен общий вид условий проведения эксперимента, демонстрирующего погружение и всплытие ПДК в техническом бассейне. При проведении испытаний подводного аппарата обнаруживается дифферент в области расположения редуктора. На газгольдере пробка для выпуска воздуха (см. поз. 13 рис. 6 б), заменена краном (см. поз. 2 рис. 6 б).



Рисунок 12 – Условия проведения эксперимента, демонстрирующего погружение и всплытие макета аппарата в техническом бассейне [Conditions for the experiment demonstrating the immersion and ascent of the apparatus model in the technical pool]

На рисунке 13 – детали процесса: *а, б, в, г* – процесс погружения, на что указывает временной индикатор продолжительности видеоролик (сопровождается забором воды насосами и выходом воздуха из верхних патрубков, на что указывают пузырьки воздуха (*а, б, в*); этот процесс закончен на *г* – газгольдер полностью покрыт водой); *д, е, ж* – процесс всплытия (сопровождается интенсивным выбросом воды из нижних патрубков «танков» (*д, е*) и заканчивается шипением выходящего воздуха (*ж*) при дополнительной его подаче).

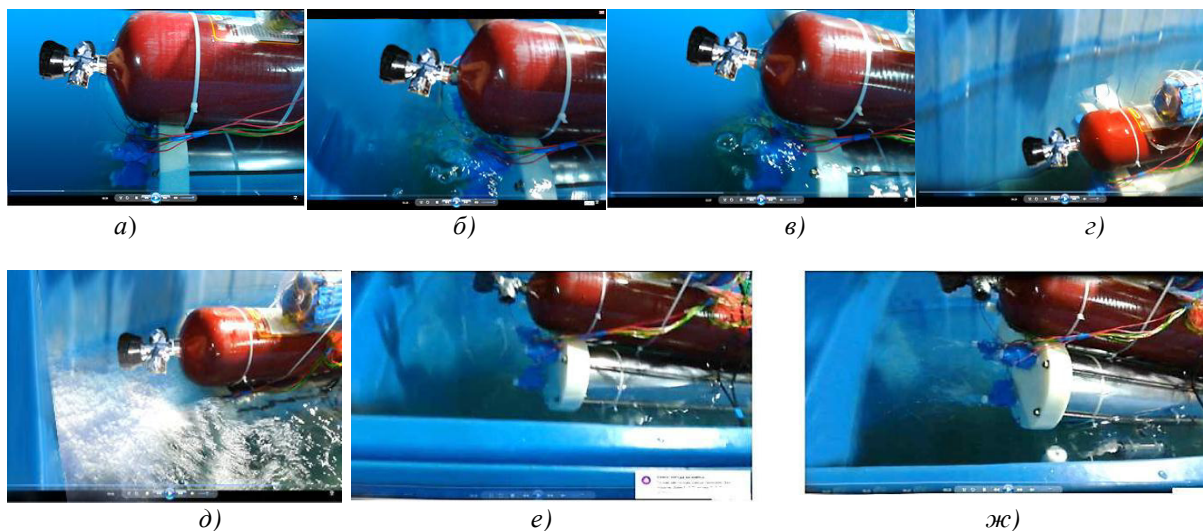


Рисунок 13 – Детали процесса погружения и всплытия ПДК [Details of the process of submersion and ascent of the underwater dosimetry complex]

Анализ результатов эксперимента

Результаты эксперимента полностью подтвердили идею работы узла подводного аппарата на погружение и всплытие, т.е. выбор методики погружение-всплытие; электронного блока управления процессами и оборудования, осуществляющего этот процесс. В дальнейшем, при разработке опытного образца ПДК, особое внимание следует обращать на балансировку аппаратуры и оборудования, что позволит исключить дифферент подводного аппарата. С этой же целью загрузку заборной воды

следует разместить в центре «танков», а патрубки выброса из «танков» забортной воды следует размещать с той и другой их стороны, что позволит исключить эффект реактивного движения подводного аппарата при таком эффективном выбросе воды, а сами же «танки» следует размещать по бокам подводного аппарата. Значительное внимание следует уделять выбору оборудования, например, насосам забортной воды, обращая внимание не только на их технические характеристики, определяемые ТУ изделия, но и реальной мощностью, а также продолжительностью их работы, что позволит исключить как дифферент подводного аппарата в воде, так и предотвратить его полное перевертывание. С этой целью, т.е. в случае отказа какого-либо важного узла, грозящего потерей аппарата, необходимо предусмотреть аварийное всплытие.

Передача информации

Предлагаемый способ связи с ПДК на основе ультразвуковых преобразователей, о чем говорилось ранее, позволит в реальном времени получать данные с датчиков, установленных на его борту, а также осуществлять дистанционное управление его положением под водой, в режиме реального времени, ориентируясь на показания эхолотов и данных детекторов ГЛОНАСС или GPS. Достоинством предложенного способа связи с подводным аппаратом является способность сохранять его мобильность при функционировании на большой глубине ввиду компактности ультразвуковых элементов, используемых для осуществления связи.

При исследовании донной поверхности относительно её радиоактивного загрязнения, которое осуществляется с помощью ксенонового γ -спектрометра, детектора мощности дозы γ -излучения и измерения расстояния между подводным дозиметрическим комплексом (ПДК) и донной поверхностью, необходимо передавать информацию в режиме реального времени оператору, который располагается на берегу. Эта процедура осуществляется следующим образом. Результаты измерений, представляющие собой аналоговые сигналы, оцифровываются и передаются на ультразвуковой детектор, который предварительно выбирает оптимальное направление передачи сигнала между ПДК и буферным устройством, располагающимся на поверхности акватории и также содержащим ультразвуковой датчик. Далее сигнал (информация) с ультразвукового датчика буферного устройства кодируется и передаётся по радиоканалу на персональный компьютер (ПК) оператору, где и происходит её окончательная обработка. Для эффективной работы ультразвукового детектора, передающего информацию из подводного положения ПДК, необходимо использовать излучатели с резко выраженной диаграммой направленности* излучения (рис. 14), форма которой зависит от технологии изготовления детектора. Использование излучателей такого вида позволит увеличить дальность действия акустических волн без дополнительного увеличения мощности [7].

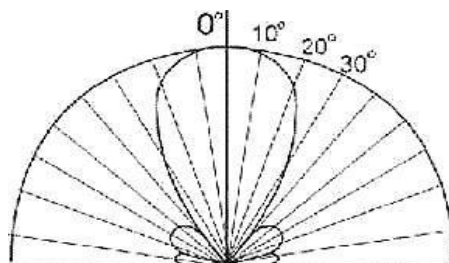


Рисунок 14 – Пример диаграммы направленности ультразвукового датчика прямого преобразователя [An example of a radiation pattern of a direct transducer ultrasonic transducer]

* Диаграмма направленности - это зависимость амплитуды акустического поля в дальней зоне от угла между акустической осью и направлением конкретного луча. Акустическая ось - геометрическая ось, проходящая через точку выхода преобразователя и служащая направлением, от которого отсчитываются угловые координаты, используемые для построения характеристики, направленности преобразователя. Центральная часть диаграммы, в пределах которой интенсивность изменяется от 1 до нуля, называют основным лепестком, в пределах которого заключается 80-85% энергии излучения.

Однако следует иметь в виду, что при распространении ультразвуковых волн в воде, как и в любой другой среде, имеют место некоторые ограничения, обусловленные как затуханием сигнала с расстоянием, так и потерей мощности излучения, вызванной перегревом ультразвукового генератора (детектора) в случае длительной непрерывной работы. Эффективная дальность распространения ультразвуковых волн в разных средах приведена в таблице 3 [8], из которой следует, что наиболее оптимальная частота f для ультразвуковых датчиков, используемых для достижения поставленной цели, должна составлять порядка 100 - 200 кГц.

Таблица 3 – Дальность распространения акустических волн [Acoustic wave propagation distance]

f , кГц	10	20	30	100	500	1000
Воздух, м	220	55	24	2,20	0,088	0,022
Вода, км	400	100	44	4	0,16	0,04
Резины и пластические материалы, см	1-100	1-20	~1	0	0	0

Более детально причины затухания ультразвука в воде рассмотрены ниже.

Для экспериментальной проверки основных характеристик ультразвукового канала связи был собран макет, структурная схема которого представлена на рисунке 15, а частотные характеристики системы излучатель – приемник приведены на рисунке 16.

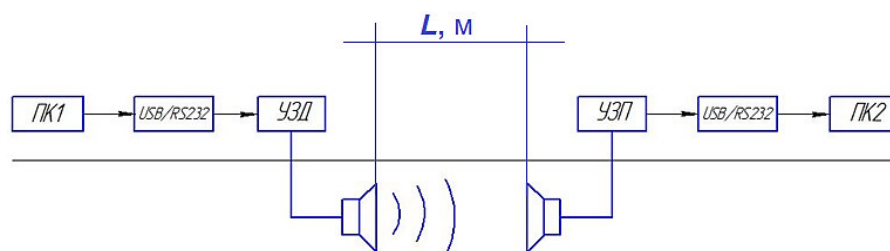


Рисунок 15 – Структурная схема макета ультразвукового канала связи в водной среде на основе датчиков эхолота Lucky Fish Finder FF1108-1 (Китай) с углом излучения 45°, рабочей частотой 200 кГц и максимально возможным погружением (рабочей глубиной) на 100 м [Block diagram of a model of an ultrasonic communication channel in an aquatic environment based on the Lucky Fish Finder FF1108-1 echo sounder sensors (China) with a radiation angle of 45°, an operating frequency of 200 kHz and the maximum possible immersion (operating depth) at 100 m]

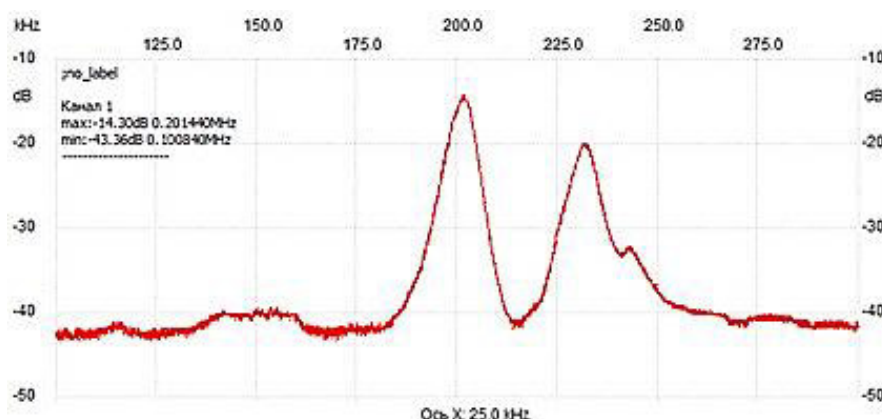


Рисунок 16 – Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ультразвуковой системы, состоящей из двух передающего и принимающего сигналы ультразвуковых детекторов, максимальное значение которых в области частот (пики) также наблюдаются на частотах 201,44 – 203,75 кГц (данные авторов) [Experimental amplitude-frequency characteristic (AFC) of an ultrasonic system, consisting of two transmitting and receiving signals of ultrasonic detectors, the maximum value of which in the frequency range (peaks) is also observed at frequencies 201.44 - 203.75 kHz (data of the authors)]

В макете была реализована возможность передачи цифрового сигнала через водную среду. Эксперимент проводился в водоеме, рядом с береговой линией. В процессе эксперимента ультразвуковые передатчик и приемник погружались в воду на глубину 50 см с изменением расстояния L между ними (см. рис. 15).

Передаваемый сигнал формировался виртуальным СОМ портом первого компьютера и использовался в качестве модулирующего сигнала для передаваемого ультразвукового преобразователя. УЗД – ультразвуковой драйвер питает частотно модулированным сигналом ультразвуковой преобразователь, находящийся в воде. Для приема сигнала использовался ультразвуковой преобразователь такого же типа. Принятый сигнал усиливался, детектировался и нормировался. Таким образом, на выходе приемного устройства формировался цифровой сигнал постоянной амплитуды, который принимался виртуальным СОМ портом второго компьютера.

Для работы ультразвукового передатчика требовался отдельный источник питания, в качестве которого при проведении испытаний использовался портативный источник питания power bank. Для работы ультразвукового приемника отдельный источник питания не требовался, на устройство подавалось питание от порта USB компьютера.

Конструкция ультразвукового передатчика позволила осуществлять передачу со скоростью 1200 Бод/с, но максимальное расстояние, на которое удавалось успешно передать информацию без существенных искажений, составило порядка 15 метров. При этом было необходимо точно направить ультразвуковые датчики друг на друга, ввиду их узкой диаграммы направленности. Скорость передачи, которую удалось получить, всё еще далека от теоретического максимума, в настоящий момент слабым местом является макет ультразвукового приемника, не способный декодировать сигнал на скорости более 1200 Бод/с, что решится доработкой его конструкции. Также для увеличения дальности передачи необходимо увеличить чувствительность ультразвукового приемника.

Работа системы «излучатель – приемник» характеризуется своей амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ системы). Характерной особенностью АЧХ системы (см. рис. 16) является наличие резонансных пиков, максимальный из которых наблюдается в области частот 201,44-203,75 кГц, что обеспечит наибольшую дальность и наименьшую погрешность приема информации на этой частоте. В таблице 4 представлены зависимости погрешности $\varepsilon(L)$ от расстояния L при передаче сигнала между передатчиком и приемником. Ошибкой считался неверно, декодированный приемником символ, который при приеме возникает из-за искажения сигнала по причине многочисленных переотражений его от донной поверхности и поверхности воды, а также в условиях, когда амплитуда принимаемого сигнала находится на границе чувствительности приемника.

Таблица 4 – Зависимости погрешности $\varepsilon(L)$, как функции расстояния L при передаче сигнала между передатчиком и приемником [Dependences of the error $\varepsilon(L)$ as a function of the distance L during signal transmission between the transmitter and the receiver]

Расстояние L , м	$\varepsilon(L)$, %
1	2 %
3	1 %
5	1 %
7	5 %
9	15 %
11	19 %
13	27 %
15	35 %
17	95 %

Максимальное расстояние передачи можно значительно увеличить, повысив чувствительность приемника, а также мощность передатчика. Очевидно, что при работе на глубине, т.е. вдали от береговой линии и границе раздела сред воздух-вода подобные эффекты будут исключены, чувствительность приёма существенно повысится, а погрешность регистрации полезного сигнала уменьшится. Кроме того, чтобы уменьшить возможное отражение сигналов от металлической поверхности ПДК её, согласно данным таблицы 3, целесообразно покрыть слоем резины, что позволит повысить чувствительность детекторов и уменьшит погрешность при передаче информации. Так как средством передачи информации в данном случае выбран ультразвук, распространяющийся в воде, то для оценки скорости передачи данных и максимального расстояния необходимо знать такие параметры среды как скорость распространения звука и затухание амплитуды звуковой волны с расстоянием. Передача информации в водной среде с помощью ультразвука имеет некоторые особенности, которые имеют разную степень влияния на процесс передачи. К таким особенностям относятся – зависимость скорости распространения ультразвуковой волны от температуры, уровня солености воды, глубины; реверберация волн*. Эффект Доплера – изменение частоты при движении передатчика и приемника относительно друг друга, или при наличии течений, учитывать не будем, поскольку в момент передачи информации не предполагается передвижение ни ПДК, ни буферного устройства, а течение отсутствует.

Затухание ультразвуковых волн в водной среде обусловлено несколькими факторами. При распространении сферической волны площадь ее фронта увеличивается пропорционально квадрату расстояния, соответственно энергия, приходящаяся на единицу площади фронта, убывает пропорционально квадрату расстояния от излучателя. Кроме того падение интенсивности также происходит за счет теплопроводности, рассеяния на неоднородностях среды, и внутримолекулярных процессов. Реальная среда обладает трением, на преодоление которого тратится часть звуковой энергии. Потери энергии, обусловленные наличием трения или вязкости, называют поглощением. Таким образом, вследствие поглощения, часть звуковой энергии переходит в тепловую, постоянную на каждой единице пути, проходимого звуком. Полное затухание, с учетом поглощения и расширения фронта волны без учета её анизотропии, обусловленной диаграммой направленности, излучения описывается формулой (6) [7, 9]:

$$I_r = \frac{I_0}{4\pi r^2} e^{-\delta r}. \quad (6)$$

Коэффициент поглощения δ , согласно классической теории затухания, учитывающей лишь сдвиговую вязкость [7, 9], обусловленный внутренним трением между частицами или сдвиговой вязкостью, определяется по формуле (7):

$$\delta = \frac{2}{3} \frac{\omega^2 \gamma}{\rho c^3}, \quad (7)$$

где ω – частота ультразвука;

c – скорость звука;

ρ – плотность среды;

*Реверберация волн – процесс постепенного уменьшения интенсивности звука при его многократных отражениях. Реверберация акустических волн приводит к искажению принятого сигнала, вследствие переотражений акустических волн от границы раздела сред и неоднородностей, которые действуют как помехи. Поэтому для обеспечения уверенного приема необходимо учитывать этот эффект, передавая информацию с паузами между сообщениями. Длительность пауз выбирается достаточной, для затухания переотраженного сигнала ниже уровня полезного сигнала.

γ – коэффициент внутреннего трения или коэффициент вязкости среды ($\gamma = \nu \times \rho$, ν – кинематическая вязкость).

Общая структурная схема передачи данных из подводного дозиметрического комплекса на ПК оператора

На структурной схеме, иллюстрирующей принцип передачи данных из ПДК, находящемся под водой (рис. 17), представлено: 1 – микроконтроллер, осуществляющий управление подводным аппаратом, сбор данных с датчиков, и передачу их в модуль 2; 2 – ультразвуковой передатчик, осуществляющий передачу информации в ультразвуковом диапазоне через ультразвуковой пьезоэлемент в водную среду; 3 – ультразвуковой приемник, осуществляющий прием данных с ультразвукового пьезоэлемента, и их передачу в модуль 4; 4 – радиопередатчик, осуществляющий перенос полезной информации из ультразвуковой области в диапазон радиоволн; 5 – радиоприемник, осуществляющий прием данных по радиоканалу на стороне рабочей станции, находящейся на побережье; 6 – микроконтроллер, осуществляющий обработку принятых данных и подготовку их для передачи на ПК рабочей станции; 7 – программный блок, осуществляющий окончательную обработку данных и их передачу потребителю.

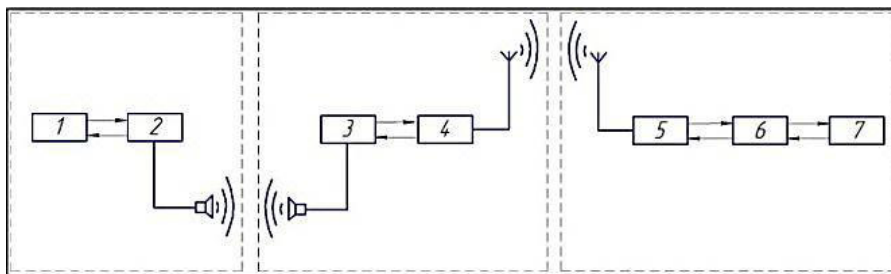


Рисунок 17 – Основные элементы передачи информации из подводного дозиметрического комплекса на ПК оператора [Basic elements of information transfer from the underwater dosimetry complex to the operator's PC]

Передача сигнала с детектора мощности дозы γ -излучения не представляет каких-либо значительных трудностей. Определённую сложность представляет передача информации с γ -спектрометра, который регистрирует спектр γ -излучения радионуклидов, осевших на донную поверхность (рис. 18) [10].

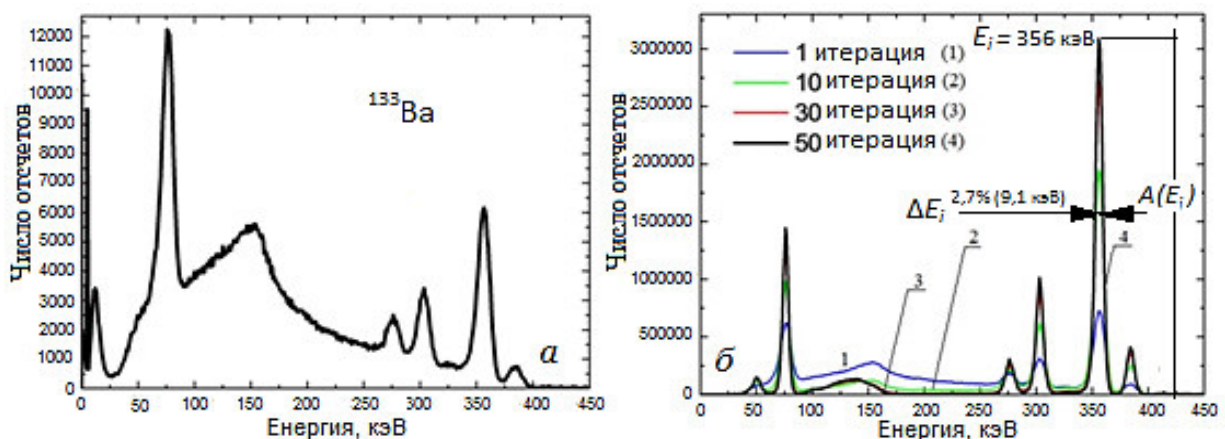


Рисунок 18 – Измеренный (приборный) (а) и восстановленный (б) спектры γ -источника ^{133}Ba : после обработки итерационным методом приборного спектра: (1) – 1 итерации; (2) – 10-ой; (3) – 30-ой; (4) – 50-ой [Measured (instrumental) (a) and reconstructed (b) spectra of the γ -source of ^{133}Ba : after iterative processing of the instrumental spectrum: (1) – 1 iteration; (2) – 10th; (3) – 30th; (4) – 50th]

Для передачи такой сложной информации используют ПЛИС систему, на которой предварительно программируют линейную шкалу энергий γ -излучения, корректируют шкалу, используя радиоизотопы с известной схемой распада* и энергией γ -излучения и, наконец, задаются определённым промежутком времени, в течение которого набирают реальный спектр γ -излучения радионуклидов, загрязняющих донную поверхность акватории. При этом расстояние между ПДК и донной поверхностью должно поддерживаться постоянным. Полученная информация передаётся в режиме реального времени с указанием начала и конца передачи. Последнее осуществляется в рамках специального программного обеспечения.

Выбор оптимального направления передачи сигнала между ПДК и буферным устройством

Общая структурная схема передачи данных показана ранее (см. рис. 17), а эскиз устройства определения и передачи информации в оптимальном направлении – на рисунке 19.

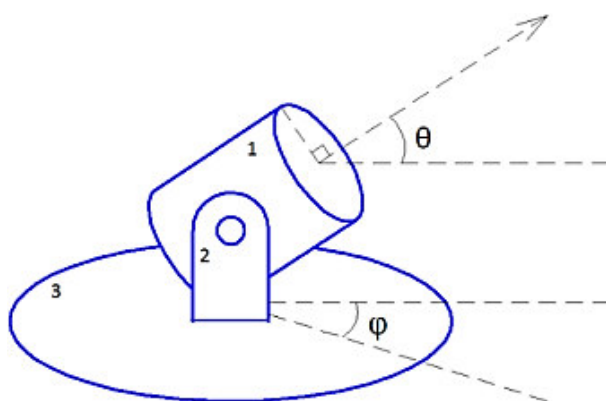


Рисунок 19 – Принципиальная схема устройства поиска оптимального направления передачи информации с ПДК на буферное устройство: 1 – ультразвуковой детектор; 2 – стойка; 3 – вращающаяся платформа [Schematic diagram of a device for the optimal direction searching of information transfer from an underwater dosimetry complex to a buffer device: 1 – ultrasonic detector; 2 – rack; 3 – rotating platform]

Это устройство, представляющее собой вращающуюся в меридианальном (по θ) и азимутальном (по ϕ) направлениях платформу, на которой укреплен ультразвуковой приемо-передатчик, осуществляет выбор оптимального направления приема-передачи (см. поз. 11 рис. 3). Передатчик располагается снаружи на верхней поверхности подводного аппарата (см. рис. 3). Оборудование с целью его изолирования от попадания воды помещается в водонепроницаемый корпус, а ультразвуковой детектор, напротив, находится в воде.

Шаговый двигатель, расположенный под платформой в корпусе ПДК осуществляет вращение в меридианальном и азимутальном направлениях, а ультразвуковой детектор регистрирует ультразвуковой сигнал определённого характера, посылаемый ему с базы и означающий начало приёма-передачи с определённого заданного направления, которое детектор должен обнаружить. В меридианальном направлении угол θ изменяется от 0 до $\pi/2$, а в азимутальном ϕ – от 0 до π (180 градусов), затем быстро возвращается к 0 и продолжает вращение от 0 до $-\pi$. Последнее связано с

* Для проверки и градуировки γ -спектрометров используют набор образцовых источников ОСГИ, который состоит из 11 источников на основе различных радионуклидов, имеющих относительно простую схему распада: ^{60}Co (E_γ равно 1173,237 и 1332,502 кэВ); ^{22}Na (E_γ равно 511,000 и 1274,543 кэВ); ^{54}Mn (E_γ равно 834,848 кэВ); ^{57}Co (E_γ равно 122,061 и 136,474 кэВ); ^{241}Am (E_γ равно 59,537 кэВ); ^{137}Cs (E_γ равно 661,660 кэВ); ^{139}Ce (E_γ равно 165,857 кэВ); ^{113}Sn (E_γ равно 391,705 кэВ); ^{88}Y (E_γ равно 834,848; 898,047 и 1836,066 кэВ); ^{203}Hg (E_γ равно 279,197 кэВ) и ^{65}Zn (E_γ равно 1115,546 кэВ). Погрешность определения активности каждого нуклида составляет не более $\pm 3\%$; активность – около 10^5 Бк.

тем, чтобы не запутать и не оборвать кабели питания, управления и считывания информации с ультразвукового детектора. Такая процедура осуществляется для любого заданного меридианального угла, заполняя, таким образом, матрицу $\hat{A}(\varphi/\theta)$, приведённую в таблице 5, которая записывается на специальное считываемое устройство – микроконтроллер.

Таблица 5 – Значение показаний ультразвукового детектора (отн. ед.) [Ultrasonic detector readings (rel. units)]

φ/θ	θ_0	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
φ_0	0	15	30	45	60	75	90
φ_1	30	63	63	63	63	63	63
φ_2	60	78	82	90	100	90	82
φ_3	90	73	70	70	65	60	56
φ_4	120	57	60	64	67	67	67
φ_5	150	61	52	59	67	49	59
φ_6	180	60	36	48	46	49	53
φ_7	210	19	31	46	54	25	39
φ_8	240	29	22	25	42	54	60
φ_9	270	41	52	56	50	38	27
φ_{10}	300	34	30	24	15	9	6
φ_{11}	330	6	6	6	16	16	16
φ_{12}	360	6	6	4	3	3	9

После заполнения матрицы показаний, микроконтроллер проводит её анализ и детектор поворачивается в соответствие с направлением, в кото-ром показания детектора максимально, после чего осуществляется сеанс приёма-передачи информации, который также заканчивается спе-циальным кодом. Работа детектора может осуществляться более детально, для чего необходимо перепрограммировать микроконтроллер, задавая более мелкий шаг по углам θ и φ .

При проведении экспериментов на макете, проверяющих работоспособность приведенного устройства и справедливости идеи, вместо ультразвукового датчика использовался потенциометр, имеющий аналоговый сигнал, с помощью которого получали сигналы и формировали матрицу. Из таблицы 7 видно, что в указанной матрице для выбранных условий самое большое значение сигнала имело место при азимутальном угле $\varphi = 60$ градусам, а меридианальном $\theta = 60$ градусам. При изменении положения ПДК, очевидно, максимум сигнала будет иметь место при значении других углов φ и θ .

Оценка радиоактивного загрязнения донной поверхности

Для достижения этой цели, как указывалось ранее, предлагается использовать подводный беспилотный радиоуправляемый дозиметрический комплекс, выполненный в виде подводного аппарата (ПДК) с дистанционным управлением. При этом для исследования радиационной обстановки в исследуемый водоем помещают беспилотный подводный аппарат, на борту которого установлен γ -детектор и γ -спектрометр. Также на борту установлена система эхолотов, для определения глубины и расстояния до препятствий и устройство приема и передачи информации. Показания датчиков передаются на поверхность через приёмо-передающее устройство в режиме реального времени и могут быть выведены на монитор оператора, или записываются на встроенный носитель памяти и затем используются для дальнейшей её обработки. Для проведения оценки уровня радиоактивного загрязнения донной поверхности акватории проводится подводное исследование акватории с помощью беспилотного радиоуправляемого подводного аппарата (ПДК) с дозиметрическим оборудованием на определенной расстоянии (высоте) над донной поверхностью, с помощью γ -спектрометра регистрируется аппаратурный спектр γ -излучения радионуклидов, загрязняющих подстилающую поверхность, а γ -детектором

регистрируется значение мощности дозы γ -излучения. Обработка приборного спектра осуществляется путем использования специального программного обеспечения, основанного на методе итераций или методе Гаусса, после поступления результатов измерений на ПК оператора [10]. После обработки приборного спектра (см. рис. 18 а) получают амплитудное распределение семейства «монолиний» (см. рис. 18 б), каждая из которых характеризуется амплитудой $A(E_i)$ по шкале амплитуд и энергией E_i по шкале энергий. Амплитудное распределение обработанного спектра характеризуется также и полушириной пика ΔE_i , измеряемой на его полувывоте.

Используя данные обработки спектрограмм, определяют площади пиков полного поглощения гамма-излучения различных нуклидов и рассчитывают весовые множители, характеризующие вклад каждого из них в величину суммарной активности радионуклидов на подстилающей поверхности. На основе полученных данных, а также результата измерения мощности дозы в воде рассчитывают парциальные активности интересующих радионуклидов, загрязняющих подстилающую поверхность, в соответствии с приведенным выражением. При этом, поскольку высота, на которой осуществляется измерение значения мощности дозы, согласуется с измеряемым значением высоты, входящей в выражение, представленное, в знаменателе расчетной формулы, то это обеспечивает уменьшение погрешности определения парциальных активностей радионуклидов. Для расчета активностей радионуклидов на донной поверхности используют выражение (8) [3]:

$$\chi_i(p_i) = \frac{D'(x_0, y_0, h_D) \cdot p_i}{2\pi \cdot 1,458 \cdot 10^5 \sum_{i=1}^N \mu_a(E_i) E_i \nu(E_i) \psi(E_i) \beta(E_i) p_i \left\{ \int_{h_D}^{h_D \sqrt{m^2+1}} \frac{\exp[-\mu(E_i)U]}{U} dU + \frac{a_i}{1-b_i} \exp[\mu(E_i)h_D(b_i-1)\sqrt{m^2+1}] \right\}}, \quad (8)$$

где $p_i = [\alpha(E_i)A(E_i)\Delta(E_i)/\nu_i] / \sum_{i=1}^N [\alpha(E_i)A(E_i)\Delta(E_i)/\nu_i]$ – весовой множитель данного нуклида, определяемый по спектру γ -излучения;

$A(E_i), \Delta(E_i), E_i$ – энергетические характеристики монолинии γ -излучения (см. рис. 18 б);

$D'(x_0, y_0, h_D)$ – измеренная мощность дозы γ -излучения в точке размещения блока детектирования;

x_0, y_0 – координаты точки детектирования;

$\gamma(E_i)$ – коэффициент поглощения γ -излучения с энергией E_i в воде;

$\mu(E_i)$ – коэффициент линейного ослабления γ -излучения с энергией E_i в воде (определяемые параметры по таблицам, по найденной энергии γ -излучения радионуклида);

$\nu(E_i)$ – квантовый выход γ -излучения с энергией E_i при распаде данного радионуклида;

$\beta(E_i)$ – энергетическая чувствительность детектора γ -излучения;

$\psi(E_i)$ – поправочная функция энергии γ -излучения, определяемая путем сравнения расчетных величин мощности дозы, полученных методом Монте-Карло, и с использованием аналитических методов, основанных на использовании фактора накопления в виде формулы Бергера [11], для различных источников, отличающихся энергией γ -квантов;

h_D – высота точки детектирования над донной поверхностью, измеряемая эхолотом; a_i, b_i – безразмерные параметры формулы Бергера, зависящие от энергии γ -излучения (определяемые параметры по таблицам, по найденной энергии γ -излучения радионуклида).

Передача информации от оператора на ПДК и обратно, как уже указывалось, осуществляется через ультразвуковой детектор, рабочая частота которого может находиться в широком диапазоне и выбирается исходя из условий работы. Чем ниже частота, тем больше глубина на которой возможна связь с устройством, но с понижением частоты уменьшается и скорость передачи данных. Для ультразвуковой связи целесообразно использовать так называемые «обратимые» ультразвуковые преобразователи, т.е. устройство, которое можно использовать как для передачи сигнала, так и для приема, например, пьезоэлектрики на основе цирконата-титаната свинца ЦТС -19 и ЦТС-23, однако их работа ограничивается температурным режимом для $T \geq 365 \text{ }^\circ\text{K}$ [12], который может возникать при продолжительной работе детектора, что и обуславливает дискретность метода передачи информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нырок-2: дистанционный метод радиационного контроля донных отложений. – URL : <http://www.atomic-energy.ru/technology/18974>.
2. Пырков, И. В., Коротков А.С., Тихонов И.И. Разработка и апробация метода радиационного контроля донных отложений IN STU на основе погружного полупроводникового γ -спектрометра / И. В. Пырков, А. С. Коротков, И. И. Тихонов // Экологические системы и приборы. – 2010. – № 9. – С.15-18.
3. Елохин, А. П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / А. П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
4. Яковлев, О. И. Распространение радиоволн / О. И. Яковлев, В. П. Якубов, В. П. Урядов, А. Г. Павельев, 2009. – Москва : Ленанд. – 496 с.
5. Грудинская, Г. П. Распространение радиоволн / Г. П. Грудинская // Москва : Высшая школа, 1975. – 280 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1974.
7. Лепендин, Л. Ф. Акустика / Л. Ф. Лепендин // Москва : Высшая школа, 1978. – 448 с.
8. Воробьев, Е. А. Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации / Е. А. Воробьев // Санкт-Петербург : СПбГУАП, 2002. – 54 с.
9. Волновой фронт. Плоские, сферические и цилиндрические волны. – URL : <https://helpiks.org/6-14939.html>.
10. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов / С. Е. Улин [и др.] // Вопросы электромеханики. – Т. 114. – 2010. – С. 43-50.
11. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 494 с.
12. Химия и химическая технология. Пьезоэлектрики на основе цирконата-титаната свинца. – Справочник химика 21. – URL : <https://www.chem21.info/info/195947/>.

REFERENCES

- [1] Nyrok-2: distancionnyi metod radiacionnogo kontrolya donnykh otlozheniy. [Nyrok-2: the Method of Remote Radiation Monitoring of Bed Slit]. URL: <http://www.atomic-energy.ru/technology/18974>] (in Russian).
- [2] Pyrkov I.V., Korotkov A.S., Tikhonov I.I. Razrabotka i aprobaciya metoda radiacionnogo kontrolya donnykh otlozheniy IN STU na osnove pogruzhnogo poluprovodnikovogo γ -spektrometra [Development and Testing of the Method of Radiation-Monitoring of Bed Slit IN STU-Established on the Basis of an Immersible Semiconducting γ -spectrometer]. Ekologicheskiye sistemy i pribory [Environmental Systems and Devices]. 2010. № 9. P. 15-18 (in Russian).
- [3] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistemradiacionnogo kontrolya okruzhayushey sredy: monografiya [Methods and Tools for Environmental Radiation Monitoring: monograph]. Moskva: NIYAU MIFI [Moscow: NRNU MEPH]. 2014. 520 p. (in Russian).
- [4] Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavelev A.G. Rasprostraneniye radiovoln [Radio-Wave Propagation]. 2009, Moskva: Lenand [Moscow: Lenand]. 496 p. (in Russian).

- [5] Grudinskaya G.P. Rasprostraneniye radiovoln [Radio-Wave Propagation]. Moskva: Vysshaya Shkola [Moscow: Higher school]. 1975. 280 p. (in Russian).
- [6] Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i ingenerov) [Mathematics Handbook (for Academic Researchers and Engineers)]. Moskva: Nauka [Moscow: Science]. 1974 (in Russian).
- [7] Lependin L.F. Akustika [Acoustics]. Moskva: Vysshaya Shkola [Moscow: Higher school]. 1978. 448 p. (in Russian).
- [8] Vorobyov E.A. Teoriya ultazvukovikh kolebaniy kak osnova postroyeniya i primeneniya tekhnicheskikh sredstv polucheniya informacii [Theory of Ultrasonic Vibrations as a Basis for the Development and Application of Technical Information]. Sankt-Peterburg : SPbGUAP [St. Petersburg: SPbGUAP]. 2002. 54 p. (in Russian).
- [9] Volnovoy front. Ploskiye, sferichskiyei cilindricheskiye volny [Wave Front. Plane, Spherical, and Cylindrical Waves]. URL: <https://helpiks.org/6-14939.html> (in Russian).
- [10] Ulin S.E. [et al] Gamma-spektrometry na szhatom ksenone dlya obnaruzheniya i identifikatsii radioaktivnykh i delyashchikhnya materialov [Compressed Xenon Gamma Spectrometers for Detection and Identification of Radioactive and Fissile Materials]. Voprosy elektromekhaniki [Questions of electromechanics]. T. 114. 2010. P. 43-50 (in Russian).
- [11] Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyuschikh Izlucheniyy. Spravochnik [Protection against Ionizing Radiation. Reference Book]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat]. 1995. 494 p. (in Russian).
- [12] Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. Pezoelektriki na osnove cirkonata-titanata svinca. Spravochnik khimika 21 [Chemistry and Chemical Technology. Piezoelectrics Based on Zirconate-Lead Titanate. Reference book for chemists 21]. URL: <https://www.chem21.info/info/195947/> (in Russian).

Study of Automated Control System of Underwater Dosimetry Kit in Remote Bottom Radioactivity Measurement in Deepwater Areas

A.P. Elokhin ^{*1}, A.A. Vasilenko ^{*2}, S.E. Ulin ^{*3}, S. Yuksekler ^{4}, M. Yuksekler ^{**5}**

**National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute (NRNU MEPhI), Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

***AKKUYU NUCLEAR JSC, Buyukejeli District, Akkuyu Avenue No: 0 Gulnar / Mersin, Turkey 33715*

¹ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

WoS Researcher ID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

²e-mail: im-ver@yandex.ru

³ORCID iD: 0000-0001-6737-7070

WoS Researcher ID: B-4616-2016

e-mail: seulin@gmail.com

⁴e-mail: millinukleer@gmail.com

⁵e-mail: m.yukseker@akkuyu.com

Abstract – The paper presents a study of the automated control system of the underwater radio-controlled unmanned vehicle (as a prototype) which monitors the radiation in the deepwater area bottom (with the depth over 10 m), and a system of the operator-vehicle communication line. A standard approach to the radiation monitoring is applied with the help of spectrometric and dosimetry equipment, as well as an echo sounder mounted on the underwater vehicle. The communication line with a facility located on the ground is exercised in the following two ways: when in water, it is arranged through the information transmission by ultrasound to the buffer gear floating on the surface of the water area, and through the gear it gets in a retransmission to the operator on the ground via a radio channel. The control of the underwater vehicle is exercised in the reversed sequence: from the operator to the buffer gear, it goes through a radio channel, then it goes from the latter to the underwater vehicle by the retransmission into ultrasound, and then it reaches the receiving device of the underwater vehicle through further retransmission.

Keywords: ultrasound data transmission, radio-controlled underwater vehicle, radiation monitoring of water area bottom, spectrometric, dosimetry equipment, radio communication channel.