

ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЬДА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕДОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЕЙ

д-р техн. наук А.В. БОГОРОДСКИЙ¹, д-р физ.-мат. наук Г.А. ЛЕБЕДЕВ²

¹ — ОАО «Концерн «Океанприбор»», Санкт-Петербург, e-mail: mail@oceanpribor.ru

² — Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Рассматриваются возможные варианты построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на границах «зоны экстренного отключения» плавучей нефтегазовой платформы от подводного оборудования. Для обеспечения защиты платформы от ледовых угроз предлагается система, основу которой составляют высокочастотные многолучевые гидролокаторы (эхолоты, эхоледомеры) для зондирования поверхности океана, из которых формируются стационарные или подвижные «акустические рубежи». Приводится состав средств, обеспечивающих работоспособность системы гидроакустического мониторинга, для различных вариантов построения акустических рубежей. Рассматриваются особенности канала распространения акустических сигналов, характерные для замерзающих морских акваторий.

Ключевые слова: ледовые угрозы, мониторинг, гидроакустика, нефтегазовая платформа.

ВВЕДЕНИЕ

Начавшиеся в 70-х годах прошлого века исследования и эксперименты по бурению нефтяных скважин на шельфе канадского сектора Арктики к настоящему времени перешли в стадию промышленного освоения углеводородных месторождений, находящихся на шельфе замерзающих морей, объемы и темпы которого, вероятно, будут возрастать, а география расширяться. Операции по морскому бурению дна проводились в сложной ледовой обстановке в диапазоне глубин от 3 м в северном Каспии до 1200 м в Центральном арктическом бассейне (район хребта Ломоносова) (Kenneth, 2010). Добыча нефти производилась как среди айсбергов в акватории Большой Ньюфаундлендской банки, так и в покрытом многолетними льдами море Бофорта, что продемонстрировало приемлемую ледовую безопасность использованных технологий добычи. В то же время опыт разведки и добычи углеводородного сырья в замерзающих акваториях показывает, что широко применяемые технологии обнаружения и мониторинга морского льда (спутниковые, судовые, авиационные) не всегда обеспечивали своевременное обнаружение опасных ледяных образований (ОЛО), что создавало реальные угрозы для платформ и подводного оборудования скважин (Kenneth, 2010). Поэтому дальнейшие работы по совершенствованию технологии обнаружения, мониторинга и параметризации (оценки морфометрических характеристик) ледяных образований (ЛО) представляются актуальными как в

научном, так и в практическом аспектах. По мнению некоторых исследователей, перспективная технология, которая способна обеспечивать высокие, вне зависимости от метеоусловий и времени суток, вероятности обнаружения ледяных образований любых типов, их параметризацию и определение элементов дрейфа должна базироваться на использовании существенно более широкого комплекса разнородных систем и средств наблюдения (Kenneth, 2010; Богородский, Лебедев, 2009, 2012). В этом смысле исследование возможностей применения существующих и перспективных гидроакустических методов и средств освещения ледовой обстановки для обеспечения ледовой защиты морских нефтегазовых платформ представляется перспективным, и работы в этом направлении уже ведутся (Kenneth, 2010; Богородский, Лебедев, 2009). Данная публикация является продолжением этих работ. В ней рассматриваются возможные варианты построения системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова, базирующиеся на использовании как известных, широко применяемых на практике, так и перспективных гидроакустических и подводно-технических средств.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ, СТОЯЩИЕ ПЕРЕД СИСТЕМАМИ ЗАЩИТЫ ОТ ЛЕДОВЫХ УГРОЗ

Главная цель создания системы защиты морских плавучих нефтегазодобывающих платформ от ледовых угроз — это обеспечение ледовой безопасности морской нефтегазодобычи в любых ледовых условиях, которые вследствие широкой географии морских нефтегазовых месторождений могут быть весьма многообразными. Однако с точки зрения обеспечения ледовой безопасности все многообразие ледовых условий можно свести к двум основным типам: условия, предполагающие наличие в акватории дрейфующих айсбергов и ледяного покрова, и условия, характеризуемые наличием только дрейфующего ледяного покрова без айсберговой опасности. Несмотря на то, что как в одной, так и в другой ситуации необходимо решать общую задачу защиты сооружений от ОЛО, защита от опасного морского ледяного покрова и защита от айсбергов имеют свою специфику, в связи с чем общая задача распадается на две частные, каждую из которых целесообразно рассматривать отдельно. Такой подход обусловлен тем, что основная цель защиты от айсбергов состоит в возможно большем снижении вероятности столкновения айсберга с сооружениями и оборудованием, в то время как защита от морского дрейфующего льда, вообще говоря, имеет целью снизить до приемлемых значений механические воздействия льда на эти объекты. В этой связи за рубежом ведутся работы по совершенствованию сразу двух технологий, которые в англоязычных публикациях именуется как “iceberg management” и “sea ice management”, что можно перевести как «управление айсбергами» и «управление морским ледяным покровом» (Kenneth, 2010). Учитывая принципиальную общность целей и задач, стоящих перед системами защиты от ледовых угроз (или системами обеспечения ледовой безопасности), авторы данной работы применяют общий термин «защита от ледовых угроз», понимая под ним совокупность действий, цель которых состоит в том, чтобы избежать механического воздействия ОЛО на сооружения или снизить воздействия на них до безопасных значений. Применительно к гидроакустическим методам и средствам мониторинга ЛО эти действия включают, но не ограничивают необходимость осуществлять:

– обнаружение, параметризацию (оценку морфометрических характеристик), прогнозирование векторов дрейфа ледяного покрова и айсбергов и слежение за ними;

– своевременную выдачу информации о ЛО в систему более высокого уровня с целью оценки степени угроз от ОЛО и принятия решения о последующих действиях системы.

АКУСТИЧЕСКИЙ РУБЕЖ КАК СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Все известные на сегодняшний день концепции мониторинга ЛО построены, так или иначе, по зональному принципу, предусматривающему разделение пространства вокруг сооружения на концентрические круговые зоны (зоны наблюдения и зоны безопасности) различного радиуса (Богородский, Лебедев, 2009; Ice and Iceberg Management..., 2008; Kenneth, 2010). Исходя из зонального принципа, в работе (Богородский, Лебедев, 2009) был предложен рубежный метод организации гидроакустического мониторинга ЛО. Его суть состоит в том, что для адекватной реакции системы защиты от ледовых угроз на меняющуюся ледовую обстановку система должна получать необходимую информацию о дрейфующих в зонах мониторинга ЛО периодически, но обязательно в те моменты, когда ЛО пересекают воображаемую линию (рубеж), определяемую границами зон мониторинга. Наименования, количество и протяженности этих зон в разных концепциях различны, однако т.н. «зона экстренного отключения» (радиус ~ 1800 м) платформы от подводного оборудования присутствует во всех концепциях. Технологии гидроакустического мониторинга ОЛО на границах этой зоны и являются предметом рассмотрения в рамках данной работы.

Будем рассматривать типичную для морской нефтегазодобычи ситуацию, при которой в некоторой точке акватории шельфа замерзающего моря с глубинами места 30... 300 м находится стоящая на якорях плавучая нефтегазовая платформа (охраняемое гидротехническое сооружение) или буровое судно, ведущие бурение дна или добычу углеводородов. Буровое судно может удерживаться над скважиной не якорями, а системой динамического позиционирования. В случае преодоления ОЛО границы «зоны экстренного отключения» и появления непосредственной угрозы его воздействия на сооружение, возможно экстренное безопасное разъединение трубного става, трубопроводов и кабелей, связывающих надводную и подводную части бурового и добычного оборудования, и последующий отвод платформы или бурового судна от скважины. В непосредственной близости от платформы находятся суда технического флота, способные разрушать участки ледяного покрова, которые по результатам параметризации и оценки угроз классифицируются как ОЛО.

Стационарный донный акустический рубеж

Рассмотрим один из возможных вариантов реализации системы гидроакустического мониторинга ледяного покрова, основу которого составляют высокочастотные многолучевые гидролокаторы для зондирования поверхности океана, пространственно и информационно объединенные в т.н. стационарный донный акустический рубеж вокруг охраняемого сооружения (рис. 1). Такого рода замкнутый донный акустический рубеж целесообразно применять в условиях, когда возможны резкие и трудно предсказуемые изменения скорости и направления дрейфа ледяного покрова, т.е. когда лед может приближаться к платформе или судну с любых направлений. В этой связи ледовая обстановка должна постоянно контролироваться в любой точке площади замкнутого кольца, внутренний радиус которого R_6 примем равным рассто-

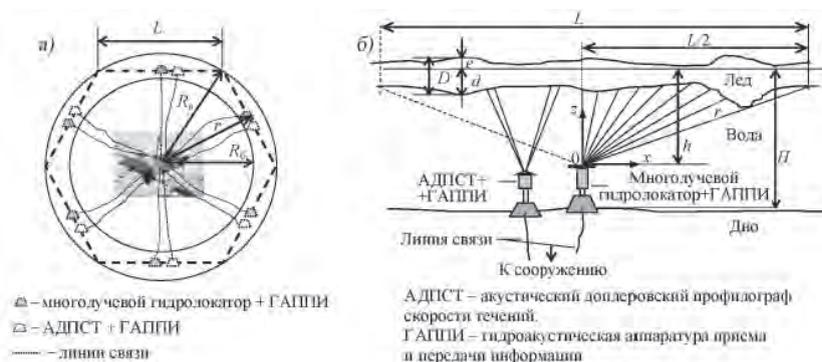


Рис. 1. Примерная схема расположения элементов стационарного донного акустического рубежа (а) и схема применения гидроакустических средств, входящих в его состав (б).

янию до ближней границы «зоны экстренного отключения» охраняемого сооружения (~1800 м), а его внешний радиус R_0 — расстоянию до дальней границы этой зоны.

При этом протяженность кольца в радиальном направлении должна быть такой, чтобы даже при максимально возможных скоростях дрейфа время прохождения ЛО через него было бы достаточным для того, чтобы система гидроакустического мониторинга имела возможность получить, обработать и передать в центр управления (ЦУ) необходимую информацию о ледяном покрове, а ЦУ мог принять решение о дальнейших действиях системы защиты.

По данным работ (Ice and Iceberg Surveillance..., 2008; Kenneth, 2010) для экстренного безопасного разъединения трубного става и коммуникаций, связывающих надводную и подводную части бурового и добычного оборудования, и начала отхода платформы или бурового судна от скважины необходимо около 15 или 30 мин. В своих расчетах мы будем ориентироваться на большее из значений этого интервала времени. Примем также, что необходимо затратить еще 10 мин на параметризацию ЛО с помощью гидроакустических средств, передачу информации в ЦУ и принятие центром решения о дальнейших действиях системы защиты. Тогда, предположив, что в течение указанных выше периодов времени направление и скорость дрейфа ледяного покрова не меняются, значения R_0 и r (см. рис. 1) можно рассчитать с помощью следующих выражений:

$$R_0 \text{ (м)} = 1800 \text{ (с)} \cdot v_{\text{дн}} \text{ (м/с)}; r = (1800+600) \cdot v_{\text{дн}} = 2400 \text{ (с)} \cdot v_{\text{дн}} \text{ (м/с)}, \quad (1)$$

где $v_{\text{дн}}$ — наибольшая наблюдавшаяся скорость дрейфа ледяного покрова.

Если совокупность зон обзора L акустического рубежа представляет собой правильный многоугольник, как это представлено на рисунке 1а, то количество n сторон L такого многоугольника определяется значением отношения r/L , где r — радиус окружности, вписанной в многоугольник (Бронштейн, Семендяев, 1981). Для нашего случая $r/L = (2400 \cdot v_{\text{дн}})/L$. Исходя из практических и экономических соображений, количество гидролокаторов в акустическом рубеже, определяемое значением n , должно быть минимально необходимым. Однако чем меньше значение n , тем более протяженную зону обзора L должен обеспечивать каждый многолучевой гидролокатор в реальных гидролого-акустических условиях его работы, которые зависят от времени года, ледовой обстановки, глубины акватории и др. Предположим, что в состав рубежа должно входить не более $n = 12$ гидролокаторов. Далее для рас-

четов воспользуемся данными, приведенным в (Ice and Iceberg Management..., 2008; Ice and Iceberg Surveillance..., 2008), согласно которым внезапно изменяющаяся по направлению скорость дрейфа льда в Баренцевом море может достигать 1,3 м/с (вероятность не превышает 1 % в течение года) при среднем значении скорости дрейфа 0,2 м/с. Тогда, вычислив r/L и используя (Бронштейн, Семендяев, 1981), найдем, что при $v_{\text{др}} = L \cdot 1,3 \text{ м/с} = 1677 \text{ м} \approx 1700 \text{ м}$.

При обзоре неровных поверхностей, к которым относится и морской ледяной покров, могут возникать непросматриваемые участки поверхности, находящиеся в зонах акустической тени, протяженность которых зависит от морфометрических характеристик неровностей и углов скольжения α акустических лучей, падающих на эту поверхность (Басс, Фукс, 1972). Практика показывает, что при углах скольжения α больших или равных среднему углу наклона $\bar{\gamma}$ неровностей затенение поверхности неровностями незначительно, вследствие чего его можно не учитывать и считать обзор беспропускным. Наиболее крупные неровности характерны для восторошенных участков ледяного покрова. Если средний угол наклона (ската) подводной части торосов $\bar{\gamma}$ принять равным $26,5^\circ$ (Богородский, Гаврило, 1984) и воспользоваться соотношением $\text{tg} \alpha = 2h/L$ (см. рис. 2), то получим, что беспропускный обзор поверхности восторошенного льда возможен в полосе обзора, протяженность которой (обозначим ее L_0) можно оценить из равенства

$$L_0/2 \leq 2,0h. \quad (2)$$

Опыт эксплуатации серийных гидроакустических средств освещения ледовой обстановки из-под воды показывает, что при соотношении $L/2 \approx 2,5h$ наблюдаемое самозатенение поверхности еще не настолько велико, чтобы существенно снизить информативность гидролокационного изображения обследуемой поверхности.

При обзоре нижней поверхности ровного (без наслоений и торосов) льда соотношение (2) может быть увеличено. Однако каковы реальные границы этого увеличения, пока неясно. Отказавшись от условия (2), можно изменить геометрию обзора многолучевого гидролокатора, произвольно увеличив отношение $L/2h$. При этом большая часть полосы обзора (обозначим ее L_3) $L_3/2 = L/2 \cdot L_0/2$ может оказаться затененной рельефом нижней поверхности льда. В этой связи реальные возможности предложенного в работе (Kenneth, 2010) способа увеличения протяженности полосы обзора за счет установки антенны многолучевого гидролокатора под некоторым углом наклона θ_0 относительно горизонта (см. рис. 2.) требуют экспериментального подтверждения.

При установке гидролокатора в донном модуле можно считать, что $h \approx H$. В этом случае при локации нижней поверхности многолетнего или толстого восторошенного однолетнего льда значение $L = L_0 = 1700 \text{ м}$ можно реализовать при глубинах места $H \geq 425 \text{ м}$. В табл. 1 приведено минимально необходимое количество гидролока-

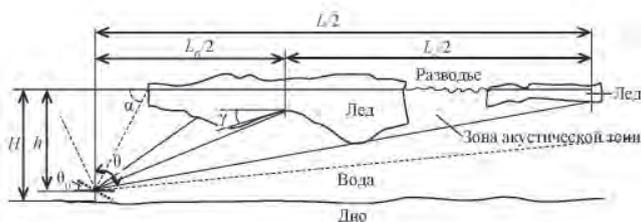


Рис. 2. К определению протяженности зон обзора $L_0/2$ и $L_3/2$.

Минимально необходимое количество многолучевых гидролокаторов для построения донного акустического рубежа

$v_{\text{дн}}, \text{ м/с}$	1,3 м/с				0,2 м/с				
$H, \text{ м}$	60	90	200	340	20	50	90	200	340
$L, \text{ м}$	300	450	1000	1700	100	250	450	1000	1700
n	64	48	20	12	32	12	7	4	3
$R_{\text{с}}, \text{ м}$	2340				360				

торов донного акустического рубежа, обеспечивающих выполнение условия $L/2 \approx 2,5h$ при различных глубинах акватории и двух значениях скорости дрейфа — наибольшей и средней. Из табл. 1 видно, что при $v_{\text{дн}} = 1,3$ м/с количество многолучевых гидролокаторов на акватории глубиной менее 340 м становится недопустимо большим, в то время как при $v_{\text{дн}} = 0,2$ м/с оно остается приемлемым и для глубин 50 м.

Разрешающая способность гидролокаторов в полосе обзора ухудшается пропорционально дальности и на краях полосы может характеризоваться значениями в десятки метров. Так, при ширине крайнего луча статического веера ХН приемной антенны многолучевого гидролокатора, равной $3 \times 3^\circ$, размер элемента разрешения в плоскости, перпендикулярной плоскости веера, на дальности 850 м будет равен 44 м. В настоящее время неясно, достаточна ли подобная разрешающая способность и какой она должна быть для того, чтобы гидролокационная информация о ледяном покрове могла эффективно использоваться центром управления.

В работе (Kenneth, 2010) отмечается, что разрешающая способность гидролокатора порядка 1×1 м представляется целесообразной для обнаружения «самых важных деталей нижней поверхности льда». Однако обеспечить с помощью донных многолучевых гидролокаторов подобную разрешающую способность в плоскости, перпендикулярной плоскости веера ХН, на дальностях в несколько сотен метров вряд ли возможно.

В качестве многолучевых гидролокаторов акустического рубежа могут быть использованы многолучевые эхолоты (МЭЛ) с плоскими или выпуклыми фазированными антенными решетками. МЭЛ позволяет выполнять вычисление координат z, x (см. рис. 1) точек пересечения лучей r веера парциальных характеристик направленности с нижней поверхностью льда в системе прямоугольных координат $x, 0, z$, связанных с приемной антенной МЭЛ, и графически отображать функцию $z(x)$. Резкое уменьшение координаты z при каком-либо значении координаты x является признаком наличия в этой области льда с большой осадкой d . Отечественный опыт практического применения МЭЛ для решения задач мониторинга ледяного покрова и, в частности, для оценки его морфометрических характеристик пока отсутствует. За рубежом опубликованы результаты работ иностранных исследователей, использовавших МЭЛ “GeoSwath”, Kongsberg EM 2000 и “Echoscope” для локации нижней поверхности ледяного покрова (CodaOctopus, 2008; GeoAcoustics, 2008; Wadhams et al., 2006), которые К. Johannessen Eik (2010) считает обнадеживающими. Так, Wadhams и Doble (2008) утверждают, что с помощью МЭЛ можно уверенно различать однолетний и многолетний льды, а также классифицировать характер поверхности разводий по признаку «вода–лед». О результатах оценки других характеристик ледяного покрова, в частности морфометрических, не сообщается.

Достоверность информации о морфометрических характеристиках дрейфующего ледяного покрова может быть существенно повышена, если гидроакустические средства донного акустического рубежа обеспечат получение данных не только о характере функции $z(x)$, но также об осадке d и толщине D льда в полосе обзора (см. рис. 1), т.е. будут обеспечивать функцию эхоледомера. Однолучевые эхоледомеры были и остаются незаменимым инструментом для долговременных наблюдений и измерений осадки и толщины льда. Обычно они используются в донном варианте на заглублениях 50... 200 м от поверхности и озвучивают ограниченный ее участок диаметром не более 10 м. Однако, несмотря на относительную простоту конструкции и небольшую стоимость однолучевых эхоледомеров, их использование в качестве основного средства донного акустического рубежа вряд ли целесообразно вследствие малой полосы обзора. В этой связи перспективным решением представляется разработка и использование в составе донного акустического рубежа многолучевых или интерферометрических (фазовых) акусто-гидростатических эхоледомеров, технический облик и принцип действия которых описаны в патентах (Богородский, 2013а; Богородский, 2013б) соответственно.

Для оценки параметров дрейфа ледяного покрова в составе донного рубежа могут быть использованы гидроакустические измерители скорости и направления движения. В качестве такого средства целесообразно использовать АДПСТ (см. рис. 1), имеющий режим измерения составляющих вектора скорости дрейфа ледяного покрова. Количество АДПСТ в составе акустического донного рубежа должно быть минимально необходимым для репрезентативной оценки поля скорости дрейфа в акватории.

Работоспособность рассматриваемой выше системы гидроакустического мониторинга ледяного покрова будет также зависеть от возможностей системы связи (приемопередающая аппаратура + канал распространения сигналов) обеспечить бесперебойный и качественный обмен информацией между гидролокаторами рубежа и ЦУ. Учитывая необходимость обеспечения высоконадежной связи, представляется целесообразным иметь кроме основной еще и резервную связную систему. При размещении центра управления на охраняемом сооружении это можно реализовать, применив в системе гидроакустического мониторинга как гидроакустическую (ГАППИ + гидроакустический канал распространения сигналов), так и кабельную системы связи, несмотря на определенные сложности, возникающие при прокладке и эксплуатации кабельных трасс в замерзающих акваториях. Применительно к обсуждаемой схеме построения донного акустического рубежа система связи должна обеспечивать передачу необходимой информации о параметрах ледяного покрова в «зоне экстренного отключения», т.е. на дальностях $r \leq 3,0$ км при нахождении источника информации на глубинах $h \leq 350$ м.

Если ледовые условия в районе охраняемого сооружения характеризуются наличием устойчивого коридора однонаправленного дрейфа льдов, система гидроакустического мониторинга ледяного покрова может быть реализована в одном из двух, отличающихся друг от друга вариантов (см. рис. 3). Вариант первый нами уже рассмотрен выше — это стационарный донный акустический рубеж, но не замкнутый вокруг охраняемого сооружения, а перекрывающий часть коридора дрейфа льда с опасных для охраняемого сооружения направлений (см. рис. 3а).

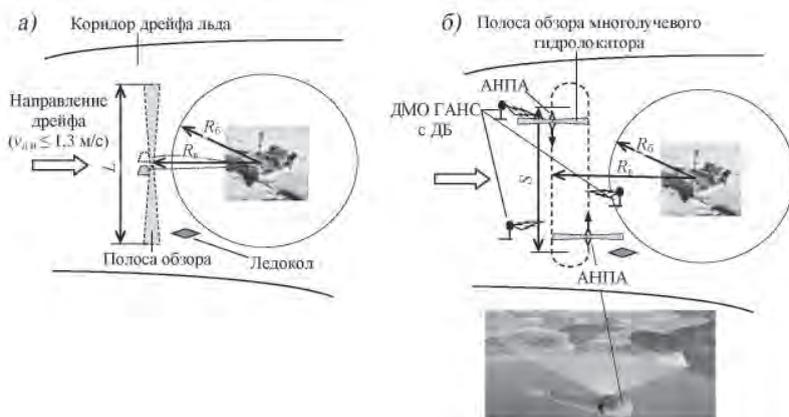


Рис. 3. Возможные варианты построения системы гидроакустического мониторинга дрейфующего льда при наличии устойчивого коридора дрейфа: *a* — стационарный донный акустический рубеж; *б* — подвижный акустический рубеж на базе АНПА.

Подвижный акустический рубеж

Второй вариант построения системы — создание подвижного акустического рубежа, перекрывающего часть коридора дрейфа льда и располагающегося выше по направлению дрейфа (по течению) на дальности $R_{в}$ от охраняемого сооружения, как это показано на рис. 3б.

В качестве подвижного элемента такого рубежа может использоваться автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА). Подвижный акустический рубеж целесообразно применять при больших (более 400 м) глубинах акваторий и при относительно небольшой ($v_{д} \approx 0,2$ м/с) скорости дрейфа льда, что обусловлено ограниченными скоростными возможностями АНПА, поисковые скорости хода которых, как правило, находятся в пределах 3... 5 узлов (1,5... 2,5 м/с). Разумеется, применение АНПА возможно и в более мелких акваториях при условии, что глубина хода аппарата обеспечит не только приемлемые условия работы установленных на нем гидроакустических средств, но и навигационную безопасность самого АНПА при маневрировании подо льдом, неровности которого (кили торосов) могут иметь осадку 20 м и более. Кроме одного из типов многолучевых гидролокаторов или однолучевого эхоледомера, который в этом варианте использования может быть весьма эффективен, и системы гидроакустической связи, необходимо применение гидроакустических средств, обеспечивающих высокоточную навигацию АНПА на всех этапах его подводного плавания. В этой связи система автономной навигации аппарата, скорее всего, не сможет обойтись без навигационного эхолота и гидроакустического абсолютного лага. В качестве одного из возможных средств позиционирования аппарата и коррекции его системы автономной навигации можно предложить гидроакустическую навигационную систему (ГАНС) с донными маяками-ответчиками (ДМО). Так, по мнению авторов работы (Матвиенко и др., 2009), отечественный и зарубежный опыт в этой области показывает экономическую и техническую целесообразность решения этой задачи путем оборудования акватории, где должна осуществляться работа АНПА, системой стационарных источников навигационных сигналов с дальностью действия, не меньшей максимального размера акватории.

Таковыми источниками могут быть изображенные на рис. 3б три ДМО ГАНС с длинной базой (ДБ).

Полезная нагрузка, которую могут нести аппараты среднего класса, весьма ограничена, в связи с чем на этих аппаратах могут размещаться только высокочастотные гидролокационные средства, имеющие существенно меньшие дальности действия, чем многолучевые гидролокаторы донного акустического рубежа. Если считать, что в отсутствие айсбергов глубины погружения 30... 40 м являются вполне достаточными для безопасной эксплуатации АНПА подо льдом, полоса обзора многолучевого гидролокатора L , исходя из условия $L/2 \approx 2,5h$, будет иметь протяженность 150... 200 м, что вполне реализуемо с помощью высокочастотных МЭЛ или многолучевых и интерферометрических эхоледомеров. Согласно (1) при скорости дрейфа 0,2 м/с $R_0 = 360$ м, а $R_b = 480$ м. Предположим, что для создания подвижного акустического рубежа используются два АНПА, движущихся из противоположных точек замкнутой траектории навстречу друг другу на глубине 40 м со скоростью 1,5 м/с каждый. Траектория вытянута вдоль рубежа протяженностью $S = 2R_0 = 720$ м, и ее дальняя от сооружения ветвь находится на расстоянии $R_b = 480$ м (см. рис. 3б). Тогда многолучевые гидролокаторы, установленные на АНПА, обеспечат за 340 с ($\approx 5,5$ мин) обследование нижней поверхности льда вдоль рубежа $S = 2R_0 = 720$ м в полосе обзора шириной 300 м. За 340 с ледяной покров при скорости дрейфа 0,2 м/с пройдет путь 68 м. Темп поступления гидролокационной информации от АНПА о параметрах ледяного покрова должен выбираться исходя из возможности беспрерывного обзора нижней поверхности льда. Так, при ширине полосы обзора 200 м, скорости хода аппаратов 1,5 м/с и ширине парциальной характеристики направленности гидролокатора $3 \times 3^\circ$ гидролокационная информация может обновляться с частотой не выше 0,3 Гц.

Применительно к обсуждаемой схеме построения подвижного акустического рубежа система связи должна обеспечивать передачу и прием большого объема разнородной по своему характеру информации. Кроме гидролокационной информации о дрейфующем ледяном покрове от АНПА в центр управления необходимо передавать информацию о позиции аппарата на траектории, его параметрах движения и положении в пространстве. От центра управления на АНПА должны передаваться сигналы управления, обеспечивающие его функционирование по заданной программе.

В ледовых условиях, характеризующихся малыми и очень малыми скоростями дрейфа льдов ($v_{\text{дн}} < 0,1$ м/с) и внезапными изменениями направления дрейфа, вызванными изменением направления ветра, система гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова может быть построена на основе использования одного АНПА, движущегося по замкнутой траектории вокруг охраняемого сооружения (см. рис. 4). При скоростях дрейфа $v_{\text{дн}} < 0,1$ м/с R_0 может иметь протяженность не более 180 м, а R_b – не более 240 м.

При скорости АНПА 2,5 м/с время его пробега по окружности радиуса $R = (R_0 + R_b)/2$ составит не более 530 с. За это время максимальное радиальное перемещение ледяного покрова не превысит 53 м. Таким образом, при протяженности полосы обзора многолучевого гидролокатора 200 м обнаруженные на ее внешней границе ОЛО будут периодически (в данном случае не менее трех раз) попадать в зону обзора гидролокатора прежде, чем они достигнут ближней границы «зоны экстренного отключения» с наиболее опасного направления. Учитывая невысокую при малых скоростях дрейфа динамику изменения ледовой обстановки вокруг охраняе-

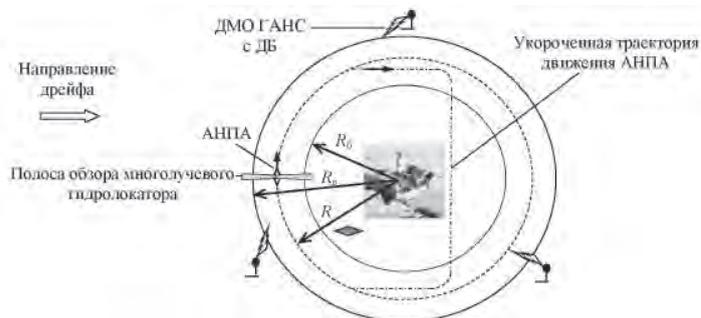


Рис. 4. Схема построения системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова при малых и очень малых скоростях дрейфа.

мого сооружения, частота обновления информации о параметрах ледяного покрова, поступающая от многолучевого гидролокатора, может быть существенно снижена. При наличии надежного прогноза о параметрах дрейфа протяженность траектории движения может быть существенно уменьшена путем оперативного изменения ее геометрической формы («срезания») в тех областях зоны мониторинга, где ледовые угрозы в данный момент маловероятны. Создание промышленной технологии применения АНПА как элемента системы гидроакустического мониторинга ледяного покрова находится на начальной стадии, хотя определенные обнадеживающие результаты имеются. Так, АНПА Maridan Martin 150, Autosub и Gavia выполняли обследование ледяного покрова в ходе подледных экспериментальных работ (CodaOctopus, 2008; Wadhams, Doble, 2008; Wadhams et al., 2004).

Акустические особенности канала распространения сигналов

Возможности реализации необходимых дальностей действия многолучевых гидролокаторов и гидроакустических систем связи, точности и дальности позиционирования подводных объектов, а следовательно, и работоспособность рассмотренных систем мониторинга существенно зависят от гидролого-акустических параметров канала распространения сигналов. Сезонные и пространственные мезо- и микромасштабные изменения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в окраинных морях СЛО и других морских замерзающих акваториях могут существенно отличаться от среднестатистических характеристик, усредненных на больших площадях и временных интервалах. Так, при ВРСЗ, наблюдаемом в зимний период в районах Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ) с глубинами ≈ 250 м, вряд ли возможно эффективно использовать многолучевые гидролокаторы в донном варианте установки. При зимней структуре ВРСЗ их эффективная работа возможна в диапазоне глубин с положительным градиентом скорости звука. В этой связи в составе гидроакустических средств как стационарного донного, так и подвижного акустических рубежей должна быть система измерения скорости звука (ИСЗ), обеспечивающая возможность построения эпюры ВРСЗ, а также расчет и отображение лучевой картины в канале распространения сигнала непосредственно в акватории работы гидротехнического сооружения.

Работа всех гидроакустических средств как стационарного, так и подвижного акустических рубежей происходит в поле технических шумов, создаваемых механизмами охраняемого сооружения, судами технического флота, а также шумов, связанных с разрушением и движением ледяного покрова. Данные по спектральному составу,

уровням давления и пространственным характеристикам акустических помех, создаваемых нефтегазодобывающими платформами подо льдом в различных режимах их работы (развертывание и монтаж, бурение, добыча, перекачка и т.д.), практически отсутствуют, что затрудняет априорную корректную оценку помехосигнальной обстановки в канале распространения акустических сигналов.

Морской ледяной покров оказывает существенное влияние на параметры распространения акустических сигналов, в частности значительно увеличивает потери при распространении. В последнее десятилетие за рубежом активно проводятся работы по созданию и натурной отработке акустических моделей ледяного покрова и моделей акустических эффектов, возникающих при распространении сигналов вдоль его неровной границы (Alexander et al., 2012). У нас в стране (Минаев и др., 2013) и за рубежом (Novem et al., 2008) проводятся экспериментальные исследования каналов передачи информации в покрытых льдом акваториях. Результаты этих работ указывают на возможность передачи разнородной информации пакетных сообщений различного объема (включая файлы изображений), NMEA сообщений в реальном масштабе времени, видеоконференции с передачей видеоряда по гидроакустическому каналу на горизонтальных дальностях по крайней мере 500 м и глубинах 11–18 м.

Состав основных средств системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова

Рекомендуемый состав средств системы гидроакустического мониторинга в целом и варианты ее реализации представлены на схеме рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ



Рис. 5. Гидроакустические средства (ГАС) системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова при различных вариантах ее построения.

Идея использования гидроакустических технологий для обеспечения ледовой безопасности морских сооружений, хотя и возникла давно, находится пока на концептуальной стадии своей реализации. Вероятно, такое положение в значительной степени определяется мнением многих специалистов по морской нефтегазодобыче,

полагающих, что существующие технологии продемонстрировали приемлемый уровень безопасности, а разработка, внедрение новых технологий мониторинга потребуют больших и, может быть, экономически не оправданных финансовых затрат, а также усложнят и без того непростую и дорогостоящую технологию морской нефтегазодобычи. Основания для таких сомнений, конечно, есть, поскольку уже сейчас ясно, что предлагаемые системы гидроакустического мониторинга не будут универсальными в смысле своей работоспособности и эффективности в акваториях с разными глубинами, в различных гидрологических и ледовых условиях. В этой связи их реальная перспектива развития видится не в том, чтобы заместить, но дополнить существующие технологии мониторинга ЛО и тем самым не только сохранить, но существенно повысить достигнутый уровень ледовой безопасности морской нефтегазодобычи в условиях постоянно растущих темпов и расширяющейся географии освоения шельфа замерзающих морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- Богородский А.В., Лебедев Г.А.* Основные принципы построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на шельфе замерзающих морей для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 69–79.
- Богородский А.В., Лебедев Г.А.* Результаты моделирования дальней гидролокации айсбергов в Баренцевом море // Гидроакустика. 2012. Вып. 15 (1). С. 53–61.
- Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 384 с.
- Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981. 720 с.
- Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н.* Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2 (8). С. 44–49.
- Минаев Д.Д., Негода В.В., Леоненков Р.В., Корытко А.С.* Результаты экспериментальных исследований цифрового гидроакустического канала передачи информации в мелководном районе при наличии ледового покрова // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2 (16). С. 56–64.
- Патент № 126122 РФ МПК G01B 17/02. Эхоледомер / А.В. Богородский (РФ). 10 с. Опубл. 20.03.2013 г., бюл. № 8. (а).
- Патент № 2500985 РФ МПК G01B 17/02. Способ дистанционного определения осадки, толщины и высоты льда / А.В. Богородский (РФ). 10 с. Опубл. 10.12.2013 г., бюл. № 34. (б).
- Alexander P., Duncan A., Bose N.* Modelling sound propagation under ice using the Ocean Acoustics Library's Acoustic Toolbox // Proceedings of Acoustics 2012 - Fremantle. 21–23 November 2012, Fremantle, Australia. P. 1–7.
- CodaOctopus, “Real-time 3D Acoustic Imaging”, CodaOctopus technical specification. URL: http://www.codaoctopus.com/3d_ac_im/index.asp#, cited Dec. 2008, [дата обращения 07.04.2012 г.].
- GeoAcoustics, 2008, “GeoSwath ROV/AUV Swath Bathymetry with co-reisterred Side Scan for Survey ROV's & AUV's”, GeoAcoustics specification sheet. URL: <http://www.geoacoustics.com/specifications.htm#GeoSwath>, cited Dec. 2008, [дата обращения 07.04.2012 г.].
- Hovem J.M., Shefeng Y., Xueshan B., Hefeng D.* “Modelling Underwater Communication Links”, Sensor technologies and Applications, 2008, SENSORCOMM'08. Second International Conference on, Cap Esterel, France. 2008. P. 679–686.

Ice and Iceberg Management Philosophy // Shtokman Development Aktiengesellschaft, RU-SH1-50-F001-051201. 23/Dec/2008. P. 1–5.

Ice and Iceberg Surveillance Plan // Shtokman Development Aktiengesellschaft, Ref: SH1-30-0940-000024. P. 14.

Kenneth J. Eik. Ice Management in Arctic Offshore Operations and Field Developments // Thesis for the degree of philosophiae doctor. Trondheim, 2010. P. 24–33.

Wadhams P., Doble M.J. Digital terrain mapping of the underside of sea ice from a small AUV // Geophysical Research letters. 2008. Vol. 35. L01501, doi: 10.1029/2007GL031921.

Wadhams P., Wilkinson P.J., Kaletsky A. Sidescan sonar imagery of the winter marginal ice zone obtained from an AUV // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. Vol. 21. P. 1462–1470.

Wadhams P., Wilkinson J.P., McPhail S.D. A New View of the Underside of Arctic Sea Ice // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. L04501, doi:10.1029/2005GL025131.

A. V. BOGORODSKIY, G. A. LEBEDEV

TECHNOLOGIES OF HYDROACOUSTIC MONITORING OF DRIFTING ICE FOR PROVIDING ICE SAFETY OF HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS ON THE SHELF OF THE FREEZING SEAS

Possible variants of arrangement of system of hydroacoustic monitoring of dangerous ice formations on boundaries of “emergency disconnection zone” of offshore oil and gas platform from the underwater equipment are considered. For maintenance of platform protection from ice threats the system which is based on high-frequency multi beam sonars (multi beam echo sounders, ice profilers) for sounding of ocean surface which are used to create stationary or mobile “acoustic frontiers” is offered. The configuration of means providing operability of system of hydroacoustic monitoring, for various variants of arrangement of “acoustic frontiers” is given. Features of underwater acoustic channel typical for freezing sea water areas are considered.

Keywords: ice threats, monitoring, underwater acoustic, oil and gas platform.