

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПРОКИДЫВАНИЯ ВСПЛЫВАЮЩЕГО БУЯ НА СТАЦИОНАРНОМ ТЕЧЕНИИ В СОСТАВЕ СРЕДНЕЧАСТОТНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ХАРАКТЕРИСТИК

М.Н. Мозговая

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

С.Н. Бычков

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

К.А. Костылев

*Институт прикладной физики Российской академии наук,
г. Нижний Новгород, Россия*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1061-9192>

Аннотация. В рамках акустических исследований мелкого моря возникла задача создания сервисного среднечастотного гидроакустического комплекса (далее ССГК). Данный комплекс предназначен для обеспечения информационного взаимодействия надводного плавсредства с донным оборудованием через гидроакустический канал связи, а также обеспечения поиска и подъема донного оборудования на поверхность и представляет собой набор аппаратуры, устанавливаемой, в том числе, на всплывающем бую. В настоящей работе рассматривается методика расчета остойчивости указанного бую на больших углах крена, а также его пространственная конфигурация на стационарном течении с учетом требований по расположению аппаратуры. Спроектированный буй остойчив и отвечает основным критериям технического задания.

Ключевые слова: остойчивость, плавучесть, плечо статической остойчивости, кренящий момент, восстанавливающий момент, метацентрическая высота, динамическая остойчивость, остойчивость на больших углах крена, гидроакустическая станция, трос нулевой плавучести, стационарное течение.

Введение

В состав ССГК входят: бортовая часть (бортовая аппаратура управления) и донная часть (гидроакустический модем-размыкатель, всплывающий маяк).

Гидроакустический модем-размыкатель – это устройство, предназначенное для поднятия на поверхность подводного оборудования (в данном случае – всплывающий маяк) за счет отсоединения контейнера с тросом нулевой плавучести.

Разработанный всплывающий маяк (рис. 1) предназначен для определения местоположения донной гидроакустической станции, находящейся в подводном положении, посредством гидроакустических сигналов связи [1]. Всплывающий маяк состоит из следующих элементов: корпус маяка с электронной аппаратурой; опорная труба; несущая конструкция; кухтыли глубоководные с положительной плавучестью 150Н в количестве 3 шт. Назначение маяка – маркировка положения устройства на поверхности воды в темное время суток. Поиск осуществляется оптико-электронными средствами визуального контроля по проблесковому маячку.

К всплывающему бую предъявляются следующие основные требования: обеспечение положительной плавучести согласно ТЗ, отсутствие абсорбции морской воды, устойчивость конструкции к гидростатическому давлению, стойкость к коррозии, а также специфичные требования по ориентации (см. рис. 1).

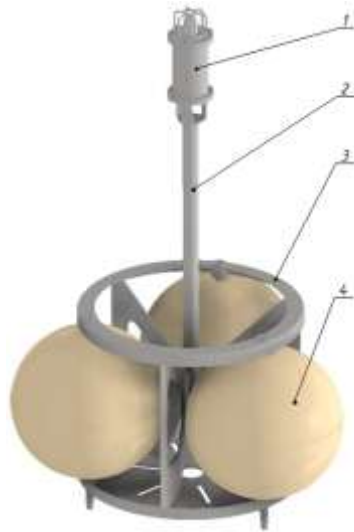


Рис. 1. Система всплывающего буя:
 1 – корпус маяка с электронной аппаратурой; 2 – опорная труба;
 3 – несущая конструкция; 4 – кухтыль 150Н глубоководный

1. Исследование устойчивости всплывающего буя

Традиционно, при проектировании всплывающего буя необходимо выполнить только расчет плавучести [2]. Однако для обеспечения безопасности и выполнения требований по ориентации устройства и расположению аппаратуры также возникла необходимость в детальном исследовании устойчивости.

Под устойчивостью [3] понимается способность плавучего средства возвращаться в исходное положение равновесия, после прекращения действия сил, вызывающие его отклонения.

В упрощенном изложении задача об устойчивости всплывающего маяка была сведена к её рассмотрению на больших углах крена буя. При таких углах площадь действующей ватерлинии буя и ее момент инерции значительно изменяются. Следовательно, величина метацентрического радиуса будет меняться во время наклонения, а также изменяется положение метацентра [4]. Исходя из этих факторов, метацентрическая высота уже не может служить надежным критерием устойчивости буя (как в случае рассмотрения начальной устойчивости). Критерием статической устойчивости при больших углах крена буя может быть восстанавливающий момент [5], который и был принят таковым в рамках настоящего исследования. Он представляет собой разность моментов силы плавучести γV и силы веса D относительно первоначального положения центра величины C [6]:

$$M_{\phi} = D \cdot (l_{\phi} - l_{\epsilon}) \quad (1)$$

Плечо статической устойчивости l [7] определяется длиной перпендикуляра, опущенного из центра тяжести (ЦТ) всплывающего маяка на линию действия силы поддержания его в наклонном положении [6]:

$$l = l_{\phi} - l_{\epsilon} \quad (2)$$

где $l_{\phi} = r(\theta) \cdot \sin \theta$ – плечо устойчивости формы (длина перпендикуляра, опущенного из центра величины (ЦВ) всплывающего маяка, находящегося в прямом положении, на линию действия силы поддержания при наличии крена), м;

$l_{\epsilon} = a \cdot \sin \theta$ – плечо силы тяжести, м.

Условие равновесия маяка в наклонном положении состоит в равенстве статического кренящего (дифференцирующего) и восстанавливающего моментов [6]:

$$M_{кр} = M_{\phi} \quad (3)$$

Рассматриваемые внешние моменты, наклоняющие разрабатываемый маяк, совершают работу, которую должна уравновесить работа восстанавливающих сил, т.е. в расчетах рассматривается не только статическая устойчивость, но и динамическая.

При крене буя его центр величины перемещается в сторону наклонения. Для определения центра величины находим бесконечно малые перемещения Центра величины (ЦВ) (рис. 2) [8]:

$$\begin{cases} dy = C_{\theta} C_{\theta_1} \cdot \cos \theta = r_{\theta} \cdot d\theta \cdot \cos \theta \\ dz = C_{\theta} C_{\theta_1} \cdot \sin \theta = r_{\theta} \cdot d\theta \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

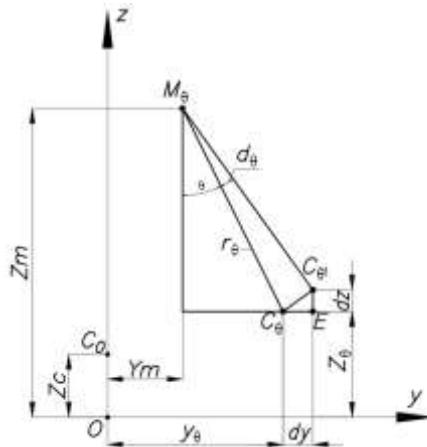


Рис. 2. Определение координат метацентра

Интегрируя координаты ЦВ при крене по формуле (4), получаем следующие выражения [8]:

$$\begin{cases} y_{\theta} = \int_0^{\theta} r_{\varphi} \cos \varphi d\varphi \\ z_{\theta} = z_c + \int_0^{\theta} r_{\varphi} \sin \varphi d\varphi \end{cases} \quad (5)$$

где r_{φ} – метацентрический радиус всплывающего буя с установленным проблесковым маяком, наклоненного на угол φ , равный [9]:

$$r_{\varphi} = \frac{I_{\varphi}}{V} \quad (6)$$

I_{φ} – поперечный момент инерции площади наклонной ватерлинии указанного буя относительно его центральной продольной оси;
 V – водоизмещение.

Для любого малого наклона (крена, дифферента), согласно теореме Эйлера, объем погруженной части буя не изменится.

Координаты метацентра M_{θ} при крене θ , представляющего собой центр кривизны кривой центров величины в точке C_{θ} (используя рис. 2) [8]:

$$\begin{cases} y_m = y_{\theta} - r_{\theta} \sin \theta \\ z_m = z_{\theta} + r_{\theta} \cos \theta \end{cases} \quad (7)$$

Для оценки характеристик устойчивости необходимо построить диаграмму статической устойчивости (далее ДСО) (рис. 3).

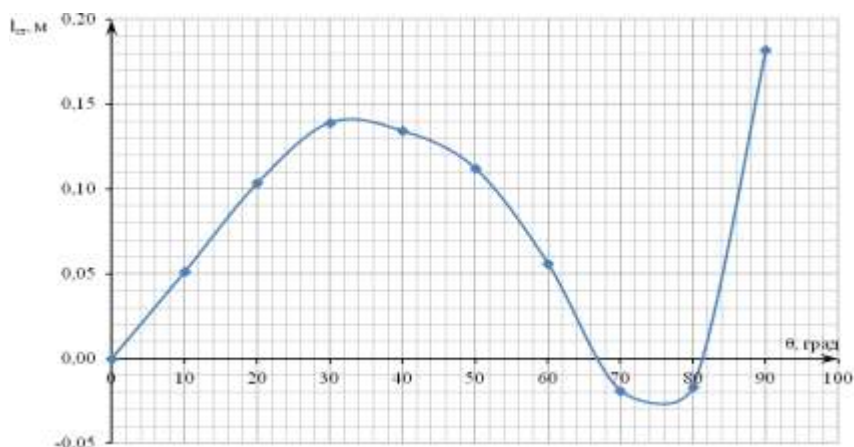


Рис. 3. Диаграмма статической остойчивости всплывающего буя (графическая зависимость плеча восстанавливающего момента от угла крена)

Как известно, восходящая часть кривой ДСО соответствует устойчивому положению равновесия всплывающего буя, а нисходящая – неустойчивому. Отметим на диаграмме несколько ключевых точек:

- точка О (начало координат): положение устойчивого равновесия буя;
- точка $\theta_{\max 1} = 33,5^\circ$: угол максимального значения восстанавливающего момента (рассматривается положение системы всплывающего буя согласно рис. 1), поскольку плечо остойчивости также принимает максимальное значение;
- точка $\theta_3 = 66,5^\circ$: определяет угол заката ДСО (т.е. при угле крена большем или равном $66,5^\circ$ маяк потеряет остойчивость и опрокинется).

При дальнейшем анализе ДСО видно, что при угле наклона большем или равном $81,5^\circ$ маяк вернется в остойчивое положение, но проблесковый маячок будет под водой. Такое положение недопустимо, следовательно, максимальный восстанавливающий момент принимается при $\theta_{\max 1} = 33,5^\circ$.

На рассматриваемый буй действует не только статический кренящий момент, но и динамический (например, при качке или шквале ветра). Диаграмма динамической остойчивости (далее ДДО) представлена на рис. 4.

Анализируя ДДО, до угла 25° (угол статического равновесия) конструкция наклоняется с ускорением, а после него, продолжает наклоняться по инерции. Динамическое равновесие наступает при условии равенства работ кренящего и восстанавливающего моментов – при угле $66,5^\circ$.

На основании диаграмм (рис. 3 и рис. 4) можно утверждать, что полученные максимальные статические и динамические моменты не превышают восстанавливающего момента. Следовательно, разрабатываемая конструкция является остойчивой.

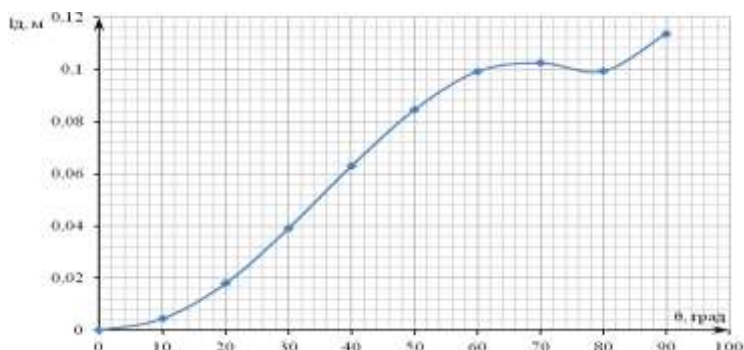


Рис. 4. Диаграмма динамической остойчивости всплывающего буя

Практическая проверка полученных при расчете диаграмм осуществлялась при моделировании буя в CAD/CAM системе – Autodesk Inventor Professional 2020, а также путем натуральных испытаний изготовленной в соответствии с расчетами аппаратуры.

2. Всплытие системы «буй-полезная нагрузка» на поверхность

При всплытии буя необходимым является условие ориентации на поверхности воды согласно рис. 1. Определение новых плеч остойчивости при добавлении груза (для уравнивания конструкции) осуществляется с помощью формулы [9]:

$$l_1 = l + \frac{m}{m + D} \left[\left(T + \frac{m}{200q} - z_p \right) \sin \theta - l \right] \quad (8)$$

где l – плечо статической остойчивости при первоначальном положении ЦТ конструкции;

m – масса добавочного груза;

D – водоизмещение без добавочного груза;

T – первоначальная осадка;

z_p – отстояние ЦТ груза от нижней панели системы всплывающего буйа;

q – число тонн на 1 см осадки.

При закреплении противовеса увеличивается остойчивость всей конструкции. На рис. 5 представлено изменение ДСО при добавлении груза.

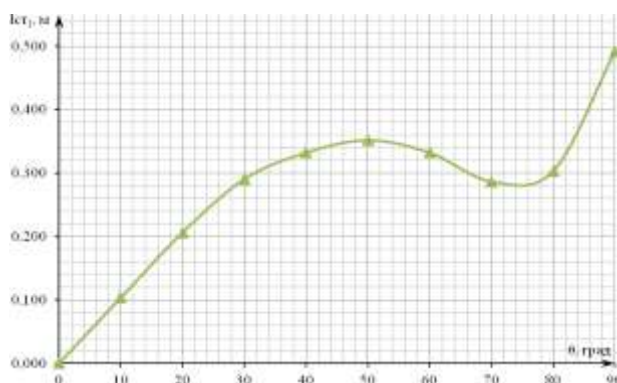


Рис. 5 ДСО с учетом добавочного груза (противовеса)

Исходя из рис. 5, делаем вывод, что система всплывающего буйа остойчива за счет добавочного груза, который противодействует опрокидыванию.

3. Определение пространственной конфигурации всплывающей системы на стационарном течении

Для обеспечения равновесия буйа, после всплытия, необходимо найти минимальную длину удерживающего его троса, а расстояние, на которое переместится буй под действием постоянного течения и силы натяжения троса.

Ниже приведены допущения, используемые при анализе системы всплывающего буйа.

Поскольку рассматривается система при действии стационарного течения, то пренебрегаем следующими параметрами [10]:

1. Трос не растягивается при нагрузке (т.е. пренебрегаем относительным удлинением);

2. Направление течения не имеет вертикальной составляющей (рассматривается только нормальная составляющая сопротивления), трос и вектор течения находятся в одной плоскости;

3. Скорость течения постоянна с изменением глубины. (При расчете принята скорость течения – 1 уз).

Применяемый трос обладает нулевой плавучестью, следовательно, пренебрегаем силой тяжести и касательной составляющей сопротивления. В дополнение к этому, трос обладает идеальной гибкостью, т.е. не передает изгибающих моментов.

При исследовании учитываются силы плавучести, гидродинамическое сопротивление и натяжение троса (рис. 6).

Сила сопротивления элементарного участка троса диаметром d и длиной ds (см. рис. 6, как отмечалось ранее, рассматривается только нормальная составляющая сопротивления) может быть вычислена по формуле [10]:

$$Dds = \frac{1}{2} \rho C_n d V_n^2 ds, \quad (9)$$

где C_n – коэффициент нормального сопротивления;

ρ – плотность морской воды;

V_n – нормальная составляющая скорости течения.

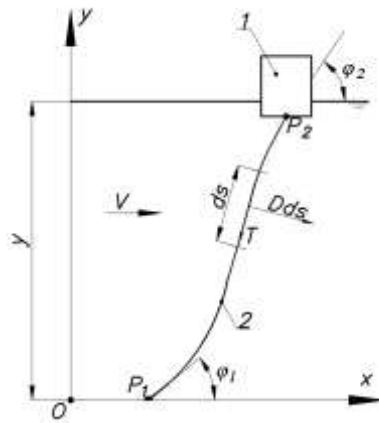


Рис. 6. Схема системы всплывающего буй: 1 – всплывающий буй;
2 – трос; ds – длина элементарного участка троса;
 Dds – нормальная составляющая сопротивления;
 T – натяжение троса; φ_1 – угол между осью троса и поверхностью дна;
 φ_2 – угол между осью троса и поверхностью воды; y – глубина погружения)

Горизонтальную составляющую натяжения у буй находим из нижеприведенной формулы [10]:

$$T d\varphi = Dds \quad (10)$$

Если известно натяжение в какой-либо точке троса, то его можно определить и для любой другой его точки [10]:

$$T = T_0 = const \quad (11)$$

Из формул (9) и (10) получаем:

$$ds = \frac{T_0 d\varphi}{R \sin^2 \varphi} \quad (12)$$

Горизонтальная и вертикальная проекции элементарного участка троса [10]:

$$dx = ds \cos \varphi = \frac{T_0 \cdot \cos \varphi}{R \sin^2 \varphi} d\varphi \quad (13)$$

$$dy = ds \sin \varphi = \frac{T_0}{R \sin \varphi} d\varphi \quad (14)$$

Интегралы дифференциальных уравнений (12), (13) и (14), вычисленные от точки крепления троса на дне $P_1(\varphi)$ до точки крепления троса на буйе $P_2(\varphi)$, дают длину троса, а также горизонтальное и вертикальное расстояния между этими точками.

Длина троса определяется по формуле [10]:

$$s = \frac{T_0}{R} [\operatorname{ctg} \varphi_1 - \operatorname{ctg} \varphi_2] \quad (15)$$

Координаты сдвига буй при действии стационарного течения в 1 узел рассчитываются, исходя из следующих зависимостей [10]:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{T_0}{R} [\cos \operatorname{ec} \varphi_2 - \cos \operatorname{ec} \varphi_1] \\ y &= \frac{T_0}{R} \left[\ln \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2} \right) - \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

где φ_1 – угол между поверхностью дна и тросом;

φ_2 – угол между поверхностью воды и креплением троса у основания маяка;

T_0 – натяжение троса;

R – гидродинамическое сопротивление единицы его длины.

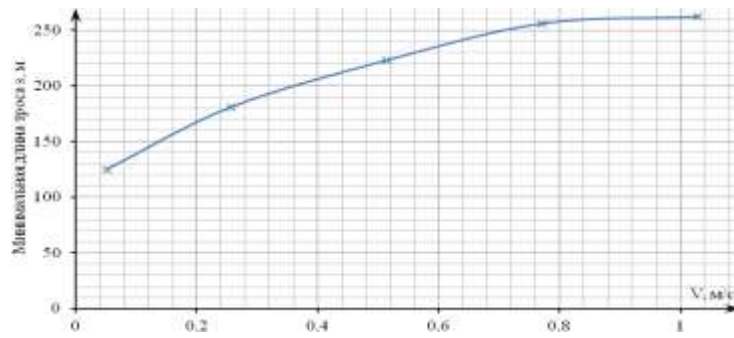


Рис. 7. Зависимость минимальной длины троса s от скорости стационарного течения V

На рис. 7 приведен результат расчета зависимости минимальной длины троса от скорости стационарного течения.

4. Результаты проектирования и исследования

Характеристики и размеры спроектированного буя приведены в табл. 1. Изготовленные элементы конструкции системы всплывающего буя показаны на рис. 8.

Таблица 1

Основные характеристики и размеры буя

Характеристики	Размерность	Величины
Габаритная высота буя, H_{Γ}	м	1,17
Габаритный диаметр буя, D	м	0,835
Масса системы всплывающего буя, M	кг	48
Осадка, T	м	0,17
Аппликата центра тяжести конструкции без учета добавочного груза, Z_{Γ}	м	0,218
Аппликата центра величины конструкции без учета добавочного груза, Z_c	м	0,143
Момент инерции площади ватерлинии, I_x	м ⁴	0,0105
Метацентрический радиус, r	м	0,409
Метацентрическая высота, h	м	0,334
Положительная плавучесть	кгс	30,6
Эксплуатационная глубина буя в подводном положении, $h_{\text{эспл}}$	м	250
Материал конструкции	-	сталь 12X18H10T ГОСТ 5949-75



а)



б)

Рис. 8. Изготовленные элементы конструкции системы всплывающего буйа: а – несущая конструкция с глубоководными кухтылями 150Н; б – несущая конструкция

Заключение

Полученные результаты позволили утвердить разработанную конструкцию для применения в научно-исследовательских работах в качестве составной части программно-аппаратного исследовательского комплекса.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН по теме «Разработка физических основ акустических систем нового поколения» (Соглашение № 075-03-2020-664 (внутренний номер 075-ГЗ/Ц3541/030)).

Список литературы:

1. Urlick R.J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, 1967 – 342 p.
2. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Остойчивость понтонов в зумпфах угольных разрезов на больших углах крена// Вестник КузГТУ. 2013. №4. – с. 32–37.
3. Rawson K.J. Stability. Basic Ship Theory / K.J. Rawson, E.C. Tupper. – Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001. – 784p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5398-5.X5000-6
4. Сизов В.Г. Теория корабля: Учебн. пособие. – Одесса: Феникс, 2008. – 459 с.
5. Biran A., Ship hydrostatics and stability /1st ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford 2003, – 344 p.
6. Борисов Р.В. Статика корабля / Р.В. Борисов, В.В. Луговский, Б.М. Мирохин, В.В. Рождественский. – СПб. : Судостроение, 2005. – 256 с.
7. Megel, J. Metacenter and ship stability / J. Megel, J. Kliava / American Journal of Physics. – 2010. – Vol. 78, Issue 7. – p. 738-747. DOI: 10.1119/1.3285975
8. Благовещенский С.Н. Справочник по статике и динамике корабля: в 2-х т. / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1976 – 1976. Т. 1 : Статика корабля. – 1976. – 336 с.
9. Бекенский Б.В. Практические расчеты мореходных качеств судна/ Б.В. Бекенский. – М. : Транспорт, 1974. – 264 с.
10. Berteaux H.O. Buoy Engineering. John Wiley and Sons, 1976 – 334p.

THE DEPLOYING BUOYING SYSTEM DESIGN IN A STATIONARY FLOW AS A PART OF A MEDIUM-FREQUENCY HYDRO-ACOUSTIC COMPLEX AND ITS CHARACTERISTICS RESEARCH

Maria N. Mozgovaya,

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Sergey N. Bychkov,

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Konstantin A. Kostylev,

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The present study provides a designing the floating buoy system. The floating buoy is designed to determine the mid-frequency hydroacoustic set location, located in the underwater position, using sonar communication signals. The approach considers the stability at large angles of inclination analysis. For this reason, the main stability criteria is recovery moment. As a result, the following diagrams are plotted – statical stability curve and dynamical stability curve to estimate the research. Moreover, the study includes defining spatial configuration at steady flow. It is also important to mention the basic requirements for the construction of the buoy are ensuring positive buoyancy according to the terms of reference, lack of sea water absorption, sustainability to hydrostatic pressure and corrosion resistance. The study reveals designing the construction, which is able to prevent capsizing. Consequently, the buoy has positive stability, sufficient recovery moment enable to return the structure to its original position and meet the claimed buoyancy requirements.

The work was performed within the framework Of the state task of the IAP RAS on the topic «Development of the physical foundations of new generation acoustic systems» (Agreement no. 075-03-2020-664 (internal number 075-GZ / C3541 / 030)).

Keywords: stability, buoyancy, righting arm, stability moment, heeling moment, dynamical stability, metacentric height, stability at large angles of inclination, hydroacoustic station, neutrally buoyant cable, constant current.

References:

1. Urlick R.J. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, 1967. 342 p.
2. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. «Stability of pontoons in sumps of coal mines at large angles of inclination» Bulletin of KuzGTU. -4 (2013): 32–37.
3. Rawson K.J. Tupper E.C. Stability. Basic Ship Theory. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2001. – 784 p. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5398-5.X5000-6

4. Sizov V.G. The theory of the ship: Textbook. allowance. Odessa: Phoenix, 2008 . 459 p.
5. Biran A., Ship hydrostatics and stability. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford 2003, 344p.
6. Borisov, R.V. Static of the ship. SPb: Shipbuilding, 2005. 256 p.
7. Megel, J. «Metacenter and ship stability». American Journal of Physics. 78 (2010): 738-747. DOI: 10.1119/1.3285975
8. Blagoveshchensky, S. N. Handbook on the statics and dynamics of the ship: in 2 volumes. L.: Shipbuilding, V. 1: Statics of the ship. 1976. 336 p.
9. Bekensky, B.V. Practical calculations of seaworthiness of a vessel. M.:Transport, 1974. 264 p.
10. Berteaux H.O. Buoy Engineering. John Wiley and Sons, 1976. 334p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мозговая Мария Николаевна, старший лаборант-исследователь отдела физической акустики, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120,
ул. Ульянова, 46, e-mail: mariya@ipfran.ru

Бычков Сергей Николаевич, ведущий инженер отдела физической акустики, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120,
ул. Ульянова, 46, e-mail: bychkov@ipfran.ru

Костылев Константин Андреевич, к.т.н, зав.сектором гидроакустического инжиниринга, Институт прикладной физики Российской академии наук (ФГБНУ «ИПФ РАН»),

603950, г. Нижний Новгород, БОКС -120,
ул. Ульянова, 46, e-mail: kostylev@ipfran.ru

Maria N. Mozgovaya, senior research assistant of the Department of Physical Acoustics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950

Sergey N. Bychkov, principal engineer of the Department of Physical Acoustics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950

Konstantin A. Kostylev, Candidate of Technical Sciences, Head of Hydroacoustic Engineering Sector, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,

46, Ulyanov st, Nizhny Novgorod, 603950