

ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЛОКОВ ПЛАВУЧЕСТИ НА МОРЕХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

В. В. Зайцев, д-р техн. наук, проф.;
С. В. Копийка, канд. техн. наук, доц. НУК

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Исследовано влияние повреждения блоков плавучести водопоглощением при использовании на глубине и во времени их на эксплуатационные характеристики подводного судна в зависимости от формы, размеров и расположения блоков на аппарате.

Ключевые слова: блок плавучести, подводный аппарат, водопоглощение, дифферент, крен, остойчивость, управляемость.

Анотація. Досліджено вплив пошкоджень блоків плавучості водопоглинанням при використанні їх на глибині та в часі на експлуатаційні характеристики підводного судна в залежності від форми, розмірів та розташування блоків на апараті.

Ключові слова: блок плавучості, підводний апарат, водопоглинання, диферент, крен, остійність, керованість.

Abstract. The influence of buoyancy blocks' damages is determined by water absorption during operation at a depth and in time on operational characteristics of a submarine depending on its shape, geometry and blocks location on the device.

Keywords: buoyancy block, submarine, water absorption, trim, heeling, stability, controllability.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Существующие и проектируемые подводные аппараты предназначены для выполнения работ в подводной части водных частей планеты. Среди таких работ можно выделить научно-исследовательские, инспекционные, поисковые, аварийно-спасательные, работы по добыче полезных ископаемых, различного типа экологические мероприятия. Даже неполный перечень функций глубоководных технических средств может показать их разнообразие по размерам, оснащению и конструк-

ции. Объединяет устройство подводных аппаратов наличие блоков дополнительной плавучести для создания нулевой или положительной плавучести.

Используемые для изготовления блоков плавучести материалы (сферопластики, различные неорганические и полимерные пены) имеют особенность, связанную с резким (или постепенным) изменением кажущейся плотности из-за проникновения воды в массив материала, — водопоглощение. Увеличение плотности, а следовательно, уменьшение подъемной силы блоков плавучести влияет на мореходные

качества всего подводного судна (крен, дифферент, остойчивость). В настоящее время не существует механизмов учета вариативной составляющей характеристик блоков плавучести при эксплуатации подводных аппаратов.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Нарушение характеристик блоков плавучести (потеря гидростатической прочности, поверхностное и объемное водопоглощение при длительном или циклическом воздействии гидростатического давления воды) достаточно исследовано для некоторых материалов плавучести как экспериментально [1, 5, 12], так и теоретически [4, 8, 9]. В работе [7] получены зависимости, позволяющие на этапе проектирования прогнозировать гидростатическую прочность и водопоглощение блока плавучести из сферопластика в зависимости от конструкции блока, глубины и времени эксплуатации.

В работе [6] приведены механизмы влияния на ходкость и управляемость подводных аппаратов таких характеристик, как их метацентрическая высота, крен, дифферент, форма корпуса. Данные характеристики могут быть приняты переменными во времени при эксплуатации аппарата. Однако методики учета постепенного повреждения блоков плавучести водопоглощением отсутствует.

ЦЕЛЬЮ РАБОТЫ является разработка зависимостей, позволяющих корректировать значения крена, дифферента, остойчивости судна непосредственно в процессе эксплуатации подводного аппарата (в подводном положении) в зависимости от глубины погружения и времени эксплуатации.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При эксплуатации подводного аппарата блок плавучести может получить

значительные повреждения при потере гидростатической прочности. Такие повреждения происходят в очень короткий промежуток времени (доли секунды) и приводят, практически, к полной потере подъемной силы блока. Их можно отнести к катастрофическим, так как они приводят к превышению допустимой глубины погружения аппарата. В связи с этим представляется нецелесообразным включать потерю гидростатической прочности блока плавучести в перечень эксплуатационных повреждений, которые следует учитывать при управлении подводным аппаратом.

Водопоглощением называют постепенное проникновение воды в состав материала блока плавучести, которое происходит на протяжении всего периода эксплуатации и зависит от глубины и времени погружения подводного аппарата. На глубинах, значительно меньших допустимой для эксплуатации аппарата, водопоглощение происходит очень медленно (0,001...0,01% подъемной силы блока плавучести в час) и может быть скомпенсировано снятием и перемещением балласта при обслуживании аппарата между погружениями.

Эксплуатация аппарата на глубинах, близких к допустимой, а также длительная непрерывная эксплуатация приводят к интенсивному водопоглощению, которое проявляется существенным перераспределением масс в конструкциях подводного судна. Именно такие режимы погружения подводного аппарата, как основные, будут учтены в настоящем исследовании.

Водопоглощение (г/см^2) при гидростатическом давлении p за время t может быть рассчитано согласно Методике УКФА 36.02.09.001 М для конкретного состава материала блока плавучести.

Исходные данные для расчета учитывают: диаметр микросфер легкого заполнителя (ЛЗ) d_s , мкм; толщину

стенки оболочки ЛЗ (среднюю) δ_s , мкм; механические свойства материала ЛЗ — предел прочности при сжатии σ_s , модуль упругости E_s , коэффициент Пуассона ν_s ; кажущуюся плотность оболочек ЛЗ ρ_s , г/см³; механические свойства связующего — предел прочности при сжатии σ_m , модуль упругости E_m , коэффициент Пуассона ν_m ; коэффициент заполнения ЛЗ — КЗО; плотность воды в районе эксплуатации ρ_6 , г/см³.

Расчет выполняется в следующем порядке.

Степень влияния среды на материал

$$k = \xi \frac{1 + \gamma}{\xi \gamma + 1}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{1 + \nu}{2(1 - 2\nu)}$; $\xi = \frac{K_s}{K_m}$;

$$K_s = \frac{4E_s \delta_s}{3d_s(1 - \nu_s)}; K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)}.$$

Аппроксимация распределения размеров частиц ЛЗ функцией

$$f(d_s) = a_{lc} \frac{\exp\left(\frac{b_{lc} - d_s}{c_{lc}}\right)}{\left[1 + \exp\left(\frac{b_{lc} - d_s}{c_{lc}}\right)\right]^2} \Rightarrow a_{lc}, b_{lc}, c_{lc}. \quad (2)$$

Частота повреждений материала блока плавучести

$$f(p) = a_{lc} \cdot \frac{\exp\left(\frac{b_{lc} - X}{pc_{lc}}\right)}{\left[1 + \exp\left(\frac{b_{lc} - X}{pc_{lc}}\right)\right]^2} \cdot \frac{X}{p^2}, \quad (3)$$

где $X = 4 \cdot [\sigma_s] \cdot \delta_s / k$

Коэффициент влияния времени эксплуатации блока плавучести на частоту повреждений

$$q = 8 \cdot 10^{-4} \cdot \rho_6 d_s \text{КЗО}^{2/3} \left(1 - \frac{2\delta_s}{d_s}\right)^3. \quad (4)$$

Относительная повреждаемость i -го слоя при гидростатическом давлении p за время t :

$$\mathfrak{G}_i(p, t) = 1 - e^{-\mathfrak{G}_{i-1}(h, t) f(p, t)}. \quad (5)$$

Поверхностное водопоглощение, г/см²,

$$W(p, t) = \alpha \sum_{i=1}^n \mathfrak{G}_i(p, t). \quad (6)$$

Все расчеты согласно формулам (1)–(4) требуют только проектировочных данных и могут быть выполнены до начала эксплуатации подводного аппарата. Результаты используются как

корректировочные параметры. Определение водопоглощения по (5), (6) проводится во время эксплуатации аппарата на конкретной глубине с конкретной длительностью погружения.

Вода, проникшая в массив материала блока плавучести, распределяется в нем неравномерно, что экспериментально показано в работе [7]. Большая ее часть находится в поверхностных слоях с уменьшением концентрации вглубь материала. В работе [2] показана возможность применения теории диффузии к процессам проникновения воды при глубоководном применении блоков плавучести.

Учитывая малую глубину проникновения воды по сравнению с площадью поверхности блока плавучести, согласно уравнению Фика I, интенсивность

водопоглощения, $\text{г}/(\text{см}^2\cdot\text{с})$, в направлении нормали к поверхности блока x можно получить по формуле

$$\frac{dW(p, t)}{dt} = -D(p) \left(\frac{dC_x}{dx} \right), \quad (7)$$

где $D(p)$ — коэффициент проницаемости материала, зависящий от глубины погружения, подлежащий определению; C_x — концентрация воды в материале, основная определяемая величина; dW/dt — скорость водопоглощения, может быть найдена с учетом зависимости (6).

Нестационарный процесс проникновения воды в формуле (7) может быть описан дифференциальным уравнением Фика II:

$$\frac{dC_x}{dt} = D(p) \nabla^2 C_x,$$

его решение для полубесконечного пространства (которым можно представить блок материала плавучести) известно из работы [4]:

$$\begin{aligned} \frac{C_x}{C_s} &= 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D(p)t}} \right) = \\ &= \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D(p)t}} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ — функция ошибок Гаусса; C_s — максимально возможная концентрация воды в материале блока.

На основании этого решения для полубесконечного тела можно получить на его границе значение интенсивности водопоглощения

$$\frac{dW(p, t)_{x=0}}{dt} = \frac{2C_s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D(p)}{t}}. \quad (9)$$

Максимальная концентрация воды в материале блока плавучести определяется его пористостью и КЗО легким наполнителем (для сферопластика с дополнительной пористостью) или только КЗО легким наполнителем (для сплошного сферопластика). Можно утверждать, что в формуле (4) $C_s = \text{КЗО}$. С учетом этого значения скорость водопоглощения dW/dt определена с по-

мощью зависимости (6). Формула (9) позволяет рассчитать коэффициент проницаемости материала плавучести для воды $D(p)$.

Распределение воды в поврежденном слое материала гипотетически можно представить в виде решения (8). Функция ошибок Гаусса не ограничена по оси x , однако, учитывая ее свойства [10], можем воспользоваться, из теории диффузии, понятием фронта диффузионного процесса, ограниченного координатой $x = 5,6\sqrt{D(p)t}$. Для упрощения расчетов введем линейное распределение массы воды в толщине слоя материала. Тогда центр тяжести проникшей в материал воды будет находиться на расстоянии $\Delta x = 1,83\sqrt{D(p)t}$ от поверхности блока плавучести. Данное предположение, впрочем, требует дальнейшего уточнения и экспериментальной проверки.

Блоки плавучести, даже получившие повреждения при эксплуатации, сохраняют свою форму и размеры. Поэтому можно считать неизменными в процессе эксплуатации на глубине величину создаваемой ими плавучести, центр тяжести и центр плавучести. Учсть воду, проникшую в состав материала, можно, считая ее дополнительной массой, вновь появившейся в конструкции подводного аппарата, распределенной в определенном объеме с центром тяжести в определенных координатах объекта. Конфигурация и дислокация дополнительной массы зависят от формы и расположения блока плавучести в составе аппарата.

В соответствии с функциональными назначением и конструкцией подводного аппарата блоки плавучести можно классифицировать по форме и размерам: оболочки и пластины с достаточно большим отношением размеров в плане к толщине (рис. 1, *a, б*); массивные блоки с возможностью их математического

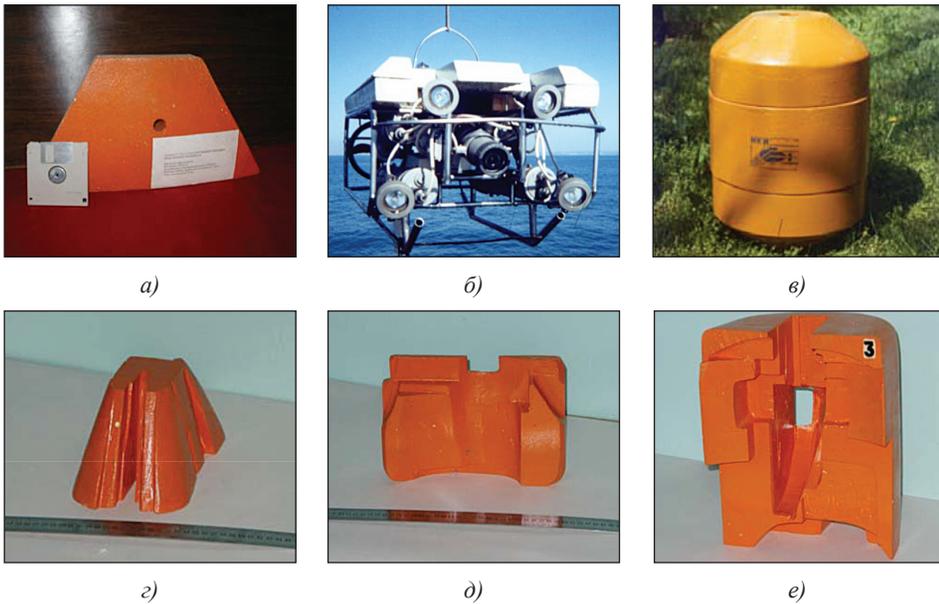


Рис. 1. Блоки плавучести глубоководных технических средств с различным назначением, формы, размеров

описания (сферы, параллелепипеды, цилиндры, кубы, как показано на рис. 1, в); блоки, заполняющие все свободное пространство аппарата, произвольной конфигурации (с сосредоточенным материалом — рис. 1, з, е и с распределенным в пространстве материалом (рис. 1, д).

В данном исследовании массивные блоки плавучести и блоки в виде больших пластин или оболочек могут быть отнесены к одной группе, так как для определения дислокации добавочных масс поглощенной воды достаточно информации о форме и расположении наружной поверхности блока, контактирующей с водой. Наружные поверхности таких блоков плавучести для выполнения задачи исследования задаются в параметрической или векторной форме в глобальной системе координат конструкции подводного аппарата, как это показано в [11]:

$$X = X(u, v); Y = Y(u, v); Z = Z(u, v);$$

или

$$r(u, v) = X(u, v)i + Y(u, v)j + Z(u, v)k.$$

В этом случае задача учета влияния поглощенной материалом воды сводится к интегрированию и нахождению распределенной по каждой из координат массы оболочки с заданной конфигурацией и толщиной, равной удвоенному расстоянию до центра тяжести добавочной массы поглощенной воды:

$$h = 2\Delta x = 3,66\sqrt{D(p)t}.$$

Сама поверхностная масса рассчитывается, как $W(p, t)$, согласно формулам в [7].

Блоки, заполняющие все свободное пространство аппарата, произвольной конфигурации с сосредоточенным материалом плавучести, в связи со сложностью математического описания рекомендуется сводить к материальной точке с координатами центра величины (не центра масс). Дополнительная масса поглощенной воды рассчитывается с учетом зависимостей в работе [7]:

$$M(p, t) = W(p, t)S_{н.п},$$

где $S_{н.п}$ — площадь наружной поверхности блока плавучести.

Воду, поглощенную блоками произвольной конфигурации с распределенным материалом, рекомендуется не учитывать как фактор изменения эксплуатационных характеристик судна. Подобные блоки представляются как тонкостенные оболочки, у которых очень быстро происходит начальное насыщение водой, после чего интенсивность водопоглощения замедляется.

Следует учитывать, что в конструкции подводного аппарата изменяется только распределение масс, центр величины (центр плавучести) остается неизменным. Статический момент массы относительно основных осей аппарата определяет изменение его эксплуатационных характеристик. Так, несбалансированный статический момент относительно продольной оси аппарата определяет крен судна, несбалансированный статический момент относительно поперечной оси аппарата — дифферент судна, а наличие статического момента относительно вертикальной оси аппарата — уменьшение метацентрической высоты судна, т. е. уменьшение его остойчивости.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали возможность применения теории

диффузии к процессам повреждения блоков плавучести водопоглощением, что связано с поверхностной локализацией проникшей в материал воды.

2. В соответствии с теорией диффузии интенсивность водопоглощения определяется по зависимости (9); эта же формула с учетом (6) позволяет вычислить коэффициент проницаемости материала плавучести для воды $D(p)$ по экспериментальным или прогнозируемым по соответствующим методикам данным. Распределение поглощенной воды в приповерхностном слое толщиной предлагается принять линейным с градиентом, направленным по нормали к наружной поверхности.

3. Для определения распределения добавочной массы в координатах подводного аппарата возможно интегрирование по поверхности блока плавучести с использованием инструментов дифференциальной геометрии.

4. Проецирование распределенной массы на соответствующие оси аппарата позволяет рассчитать образовавшиеся в результате водопоглощения блоками плавучести крен, дифферент и изменение метацентрической высоты подводного судна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бурдун, Е. Т.** Пути совершенствования сферопластиков [Текст] / Е. Т. Бурдун, М. И. Радомысльский // Композиционные материалы в конструкциях глубоководных технических сред : тез. докл. межвуз. науч.-техн. конф. — Николаев : НКИ, 1989. — С. 8–10.
- [2] **Бурдун, Е. Т.** Применение теории диффузии для прогнозирования водопоглощения конструкций подводных аппаратов на основе сферопластика [Текст] / Е. Т. Бурдун, В. Ю. Кочанов, Т. А. Юреско // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2010. — №1 (428). — С. 61–67.
- [3] **Бурдун, Е. Т.** Напряженно-деформированное состояние дисперсно-наполненных композитов с учетом взаимодействия на границе раздела [Текст] / Е. Т. Бурдун, Ю. Б. Головченко, М. И. Радомысльский // Судовое энергомашиностроение : сб. науч. трудов. — Николаев : НКИ, 1987. — С. 75–82.

- [4] **Ван Флек, Л.** Теоретическое и прикладное материаловедение [Текст] : [пер. с англ.] /Л. Ван Флек. — М. : Атомиздат, 1975. — 472 с.
- [5] Влияние длительного гидростатического давления на физико-механические характеристики сферопластиков [Текст] / В. А. Никитин, И. А. Сазонов, В. Ю. Субботин, Н. Н. Федонюк // Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. — Николаев : НКИ, 1991. — С. 111–112.
- [6] **Егоров, В.И.** Подводные буксируемые системы [Текст] / В. И. Егоров. — Л. : Судостроение, 1981. — 304 с.
- [7] **Копійка, С.В.** Прогнозування міцності та ресурсу роботи конструкцій плавучості підводних апаратів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук С. В. Копійка. — Миколаїв : НУК, 2008.
- [8] **Кржечковский, П.Г.** К механике разрушения сферопластиков [Текст] / П. Г. Кржечковский // Проблемы прочности. — 1982. — № 11. — С. 110–115.
- [9] **Кржечковский, П.Г.** Микромеханика разрушения сферопластика при всестороннем сжатии с учетом граничного эффекта [Текст] / П. Г. Кржечковский, В. А. Науменко // Строительная механика корабля : сб. науч. трудов. — Николаев : НКИ, 1990. — С. 91–98.
- [10] **Кузнецов, Д.С.** Специальные функции [Текст] / Д. С. Кузнецов. — М. : Высшая школа, 1965. — 423 с.
- [11] Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / под ред. И. Н. Бронштейна, К. А. Семендяева. — М. : Наука, 1981. — 718 с.
- [12] **Титов, Г.В.** Экспериментальное определение ресурса сферопластика ЭДС-7А [Текст] / Г. В. Титов, Е. Т. Бурдун // Композиционные материалы в конструкциях глубоководной техники : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. — Николаев : НКИ, 1991. — С. 142–143.