

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПОГРУЖЕНИЯ-ВСПЛЫТИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ВСПЛЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА МНОГОКРАТНОГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

А.Ф. Тарабан

Севастопольский военно-морской  
ордена Красной Звезды  
институт им. П.С.Нахимова  
г. Севастополь, ул. Дыбенко, 1-а

Рассматривается принципиальная схема системы погружения-всплытия малогабаритного всплывающего устройства многократного действия, обеспечивающая необходимые параметры движения при заданном числе циклов погружения-всплытия. Представлена математическая модель, описывающая динамику движения устройства и работу системы. С использованием методов оптимизации определены параметры элементов системы погружения-всплытия.

**Введение.** Проблема изучения и освоения Мирового океана является в настоящее время одной из приоритетных задач науки и техники. Для практического решения данной задачи необходимо создание специальных технических средств, способных надежно, длительно и эффективно действовать в условиях водной среды при больших гидростатических давлениях. Одним из направлений исследования Мирового океана является установление взаимосвязи между физико-химическими процессами, происходящими в нем, с атмосферными явлениями и погодой. Экономически целесообразно использовать для этой цели малогабаритные всплывающие устройства (МВУ) многократного действия низкой стоимости, что позволяет использовать большое число таких устройств и эффективно изучать динамику физико-химических процессов, протекающих в океане.

При проектировании данных устройств необходимо исходить из следующих соображений:

- конструкция устройства должна быть простой;
- необходимо обеспечить надежность каждого элемента и устройства в целом;
- необходимо обеспечить погружение на заданную глубину и всплытие в заданное положение равновесия;
- обеспечение (по необходимости) многократного использования устройства;

- низкая стоимость изделия при серийном изготовлении.

Для МВУ, имеющих определенное число рабочих циклограмм (т.е. заданное число циклов погружения-всплытия), особое значение имеет разработка системы погружения-всплытия. Принципиально системы погружения-всплытия МВУ могут быть основаны на приеме-осушении жидкого балласта или на создании топящей и всплывающей силы за счет тяги винтов или иных движителей.

Общими элементами системы погружения-всплытия, основанной на приеме-осушении жидкого балласта, являются:

- балластная емкость для жидкого балласта;
- система вентиляции балластной емкости;
- система заполнения балластной емкости;
- источник избыточной энергии для осушки жидкого балласта.

В качестве источника избыточной энергии для осушки жидкого балласта могут использоваться:

- насосы (центробежные, роторные, поршневые, роторно-поршневые) с различными приводами (электродвигателями, гидротурбинами, гидромоторами и др.);

- сжатый воздух.

Использование насосов в системах осушки балласта практикуется давно, но использование их в МВУ является неприменимым по следующим причинам:

- низкий КПД насосных агрегатов приводит к существенным разрядам источников электрического тока;

- снижение подачи центробежных насосов от глубины погружения МВУ и необходимость использования многоступенчатых центробежных насосов при осушении балластной емкости на больших глубинах;

- использование насосов объемного типа вследствие больших выходных давлений требует повышенной прочности системы осушки, что приводит к увеличению массогабаритных показателей системы погружения-всплытия МВУ;

- большие массогабаритные показатели приводных двигателей насосов.

Отмеченные причины не позволяют использовать насосы в системах осушки МВУ многократного погружения при ограниченной емкости аккумуляторных батарей (АБ).

Использование гидрореактивных движителей для создания топящей или всплывающей

силы приводит к быстрому разряду АБ и в МВУ нецелесообразно.

Следовательно, в МВУ целесообразно использовать систему погружения-всплытия, основанную на приеме-осушении жидкого балласта, где в качестве источника избыточной энергии для осушения балластной емкости используется воздух высокого давления (ВВД) из баллона через понижающий редуктор.

Принципиальная схема системы погружения-всплытия МВУ и принцип ее работы.



Рис. 1 – Принципиальная схема системы погружения-всплытия МВУ

Система погружения-всплытия, принципиальная схема которой представлена на рис. 1, включает:

- вентиляционную трубу с электромагнитным клапаном вентиляции (1);
- балластную емкость (2);
- баллон ВВД (3);
- редуктор ВВД (4);
- пускатель (5).

Баллон ВВД связан с балластной емкостью через редуктор (4) и пускатель (5) с помощью трубопровода ВВД (6). Балластная емкость (БЕ) предназначена для создания отрицательной (при погружении) или положительной (при всплытии) плавучести МВУ путем приема или осушения морской воды. Вентиляционная труба с клапаном вентиляции предназначена для сообщения воздушной полости балластной емкости с окружающей средой (атмосферным воздухом или водой) и удаления воздуха из воздушной

полости балластной емкости при заполнении ее водой. Баллон ВВД предназначен для хранения сжатого воздуха высокого давления. Редуктор ВВД предназначен для понижения давления воздуха. Пускатель предназначен для автоматической подачи или прекращения подачи воздуха в балластную емкость при достижении заданной глубины погружения. В верхней части балластной емкости размещается сигнализатор уровня, выдающий сигнал в систему управления электромагнитным клапаном вентиляции о заполнении балластной емкости. Перед началом цикла погружения-всплытия балластная емкость осушена (или заполнена определенным объемом балласта после очередного погружения-всплытия), клапан вентиляции закрыт, баллон заполнен воздухом, вентиль баллона открыт, редуктор ВВД нагружен воздухом и пускатель закрыт.

Система погружения всплытия работает следующим образом:

1. По команде от микропроцессора открывается электромагнитный клапан вентиляции и сообщает воздушную полость балластной емкости с атмосферой и вода под действием избыточного гидростатического давления на глубине размещения приемно-отливных отверстий (рис. 3)  $H = H_{\text{от}}$  самотеком заполняет балластную емкость.

2. После заполнения балластной емкости сигнализатор уровня выдает сигнал на закрытие клапана вентиляции и МВУ под действием полученной вследствие заполнения балластной емкости отрицательной плавучести начинает погружаться с возрастающей до установившейся величины скоростью.

3. По достижении установившейся скорости погружения через определенное время МВУ достигает величины  $H_{\text{prod}}$ , на которой срабатывает пускатель и воздух из баллона ВВД через редуктор и пускатель по трубопроводу ВВД подается в балластную емкость на продувку балласта.

4. В процессе продувки жидкого балласта МВУ в начале продувки продолжает погружаться, а далее, по мере осушки балластной емкости и приобретения положительной плавучести, начинает всплывать. При всплытии по достижении глубины  $H_{\text{prod}}$  пускатель закрывается и прекращает подачу воздуха в балластную емкость и осушение емкости прекращается. МВУ под действием полученной положительной плавучести всплывает в надводное положение. Посадка МВУ после всплытия определяется величиной остаточного жидкого балласта в емкости.

Циклограмма процесса погружения-всплытия МВУ представлена на рис. 2, где:

- Рб – давление в баллоне;
- $\Delta P_b$  – снижение давления в баллоне при продувании балласта;
- Н – текущая глубина;
- Нзад – заданная глубина;
- $\Delta H_p$  – перезаглубление МВУ при погружении;
- $V_{бал}$  – объем балласта;
- $\Delta V_{бал}$  – остаток балласта после всплытия;
- $U$  – скорость погружения (всплытия) МВУ;
- $T_3$  – время приема балласта;
- $T_p$  – время погружения от момента заполнения балласта до начала его продувки;
- $T_{пр}$  – время продувки балласта;
- $T_{вс}$  – время всплытия;
- $T_{цикла}$  – общее время одного цикла погружения-всплытия;
- $H_{prod}$  – установочная глубина открытия пускателя.

Постановка задачи и ее цели. Решается задача по определению основных технических параметров системы погружения-всплытия МВУ, представленной на рис. 1:

- объема балластной емкости  $V_{be}$ ;
- глубины начала и окончания продувания балласта  $H_{prod}$ ;
- диаметра приемно-отливного отверстия балластной емкости  $d_0$ ;

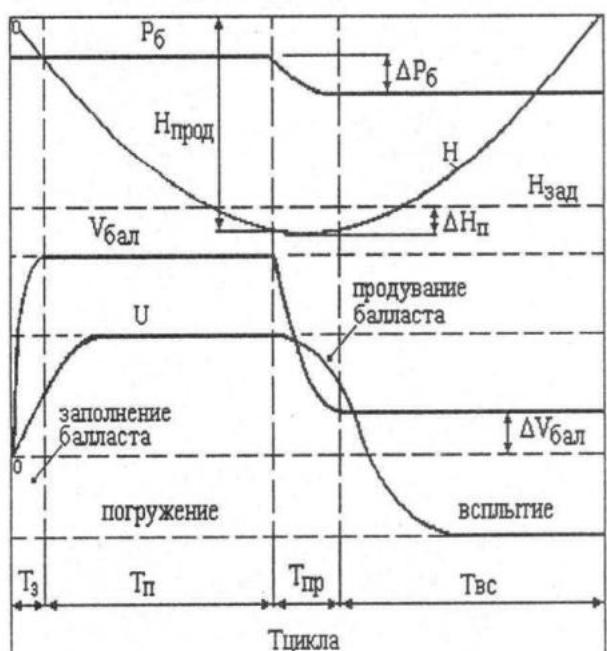


Рис. 2 – Циклограмма погружения-всплытия

- установочного давления редуктора Реду обеспечивающих:

- скорость погружения МВУ в установившемся режиме  $0,3 \leq U \leq 0,5 \text{ м/с}$ ;
- заданную глубину погружения МВУ  $H_{зад} = 200 \text{ м}$ ;
- высоту надводной части корпуса МВУ после всплытия в пределах  $0,1 \leq h_n \leq 0,15 \text{ м}$ ;
- число циклов погружения-всплытия при использовании одного баллона ВВД  $N \geq 20$

для МВУ, имеющего длину  $L = 1,55 \text{ м}$ , диаметр  $D = 0,22 \text{ м}$ , толщину корпуса  $\delta = 0,005 \text{ м}$  и массу в воздухе  $m_0 = 55 \text{ кг}$ .

Число приемно-отливных отверстий задавалось равным  $n = 1,2,3$ . В качестве баллонов ВВД рассматривались стандартные баллоны емкостью 7, 10 и 12 литров от серийных образцов легководолазного снаряжения. В качестве редукторов рассматривались кислородный (абсолютного давления) и азотногелиевокислородный (избыточного давления) редукторы от изолирующего дыхательного аппарата ИДА-59 [1]. В качестве пускателя использован пускатель дополнительного гелиевого баллона (ДГБ) аппарата ИДА-59 [1]. Выбор данных устройств в качестве элементов системы погружения-всплытия МВУ определяется надежностью работы, серийным производством, малыми массогабаритными характеристиками. Необходимую подачу ВВД на продувку можно обеспечить изменением диаметра проходного сечения дюз редукторов. Выбор пускателя ДГБ в качестве устройства для автоматической подачи ВВД на продувку балластной емкости при погружении и прекращения подачи ВВД при всплытии обусловлен принципом работы пускителя ДГБ: пускатель ДГБ открывается и работает (пропускает через себя воздух) при условии  $H_{prod} \geq H_{пдгб}$  ( $H_{пдгб}$  – установочная глубина открытия пускителя ДГБ). Если текущая глубина погружения (всплытия) МВУ меньше установочной глубины пускителя ДГБ, то последний закрыт и воздух на продувку балластной емкости не пропускает. Так как обычно рабочее давление в рассматриваемых типах баллонов не превышает  $250 \text{ кгс/см}^2$ , то с учетом неиспользуемого запаса воздуха, определяемого остаточным давлением в баллоне порядка  $30-50 \text{ кгс/см}^2$ , среднее понижение давления в баллоне за один цикл погружения-всплытия не должно превышать  $8,5 \text{ кгс/см}^2$ . Для обеспечения 20-ти гарантированных циклов погружения-всплытия максимальное понижение давления за один цикл принято равным  $8 \text{ кг/см}^2$ .

Математически поставленную задачу можно сформулировать следующим образом: минимизировать неявно заданную функцию  $f(H_{\text{пред}}, d_0, P_{\text{ред}})$  при следующих условиях:

- числе приемно-отливных отверстий потв = 1,2,3;
- объеме баллона  $V_{\text{бал}}$  ВВД 7, 10, 15 литров;
- типах редукторов – абсолютного и избыточного давления

с ограничениями:

- скоростью погружения МВУ в установившемся режиме  $0,3 \leq U \leq 0,5 \text{ м/с}$ ;
- заданной глубиной погружения МВУ  $H_{\text{зад}} = 200 \text{ м}$ ;
- высотой надводной части корпуса МВУ после всплытия в пределах  $0,1 \leq h_n \leq 0,15 \text{ м}$ ;
- числом циклов погружения–всплытия при использовании одного баллона ВВД  $N \geq 20$ .

В данной постановке задача решается методами нелинейного программирования с ограничениями. В качестве расчетного алгоритма минимизации выбран метод прямого поиска Хука-Джанса с ограничениями [2].

Математическая модель движения МВУ и работы системы погружения - всплытия. Движение МВУ в вертикальной плоскости вдоль оси ОН (рис.3) описывается двумя системами дифференциальных уравнений: для погружения и для всплытия. Общими уравнениями, описывающими вертикальное движение МВУ и работу системы погружения-всплытия, являются:

- уравнение движения МВУ при погружении-всплытии:

$$m \cdot (1+k_1) \frac{dU}{dt} = F_G - F_\Pi \mp F_D, \quad (1)$$

где знак “-” перед  $F_D$  соответствует погружению, а “+” – всплытию МВУ;

- уравнение изменения глубины погружения МВУ:

$$\frac{dH}{dt} = U, \quad (2)$$

- алгебраические уравнения, определяющие изменения силы плавучести, сопротивления и тяжести:

$$F_\Pi = \begin{cases} \rho \cdot g \cdot S \cdot H \rightarrow H < L \\ \rho \cdot g \cdot V_\Pi \rightarrow H \geq L \end{cases}, \quad (3)$$

$$F_D = \rho \cdot C_D \cdot \frac{U^2}{2} S, \quad (4)$$

$$F_G = g \cdot (m_o + \rho \cdot V_b), \quad (5)$$

Дополнительными уравнениями являются:

- а) при погружении МВУ:

- уравнение изменения объема воды в балластной емкости МВУ:

$$\frac{dV_b}{dt} = \begin{cases} \text{Потв.} \cdot \mu_0 \cdot S_0 \sqrt{2g \cdot \left( H - \frac{V_b}{S_b} + \frac{P_{\text{атм}} - P_{\text{бэ}}}{\rho g} \right)} \rightarrow \\ \text{при } (V_b < V_{\text{бэ}}) \\ 0 \rightarrow \text{при } (V_b = V_{\text{бэ}}) \end{cases} \quad (6)$$

- уравнение изменения давления в балластной емкости МВУ:

$$P_{\text{бэ}} = \begin{cases} P_{\text{атм}} \rightarrow H < L \\ P_{\text{атм}} + \rho \cdot g \cdot (H - L) \rightarrow H \geq L \end{cases}, \quad (7)$$

б) при всплытии:

- уравнения изменения объема воды в балластной емкости МВУ:

$$\frac{dV_b}{dt} = \begin{cases} -\text{Потв.} \cdot \mu_0 \cdot S_0 \sqrt{2g \cdot \left( \frac{V_b}{S_b} - K_{\text{ред}} \cdot H + \frac{P_{\text{ред}}}{\rho g} \right)} \rightarrow \\ \text{при } (H \geq H_{\text{зад}}) \\ 0 \rightarrow \text{при } (H < H_{\text{зад}}) \end{cases} \quad (8)$$

- уравнения изменения давления в баллоне ВВД при продувании балластной емкости в зависимости от типа редуктора (абсолютного (АД) или избыточного (ИД) давления):

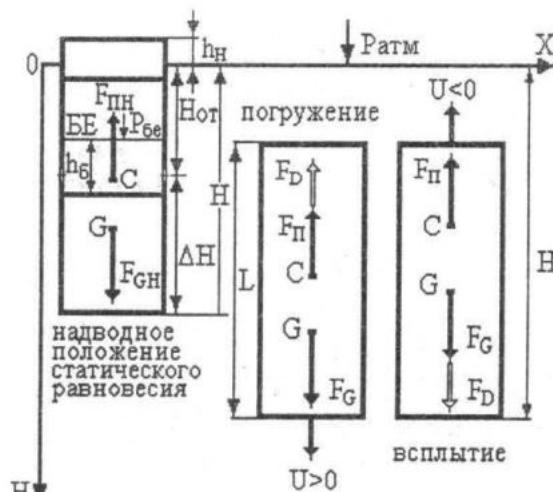


Рис. 3 – Силы, действующие на МВУ при статическом равновесии в надводном положении и погружении-всплытии

$$\frac{dP_{\text{бал}}}{dt} = \begin{cases} \frac{P_{\text{ред}}}{V_{\text{бал}}} \cdot \frac{dV_b}{dt} & \rightarrow \text{редуктор-АД} \\ \frac{P_{\text{ред}}}{V_{\text{бал}}} \cdot \frac{dV_b}{dt} - \rho \cdot g \frac{V_{\text{бэ}} - V_b}{V_{\text{бал}}} \cdot \frac{dH}{dt} & \rightarrow \text{редуктор-ИД} \end{cases}, \quad (9)$$

- уравнения изменения объема сглаживаемого через систему осушения воздуха (если вода в емкости отсутствует, а МВУ не достиг установленной глубины окончания продувания):

$$\frac{dV_b}{dt} = S_0 \cdot \sqrt{2 \left( \frac{P_{\text{ред}} - P_{\text{атм}} - \rho g H}{\rho_b \cdot \xi_0} \right)}, \quad (10)$$

и уравнения изменения давления воздуха в баллоне при использовании редуктора абсолютного и избыточного давления при сглаживании воздуха через систему осушения в воде:

- для редуктора абсолютного давления:  

$$\frac{dP_{\text{бал}}}{dt} = \frac{P_{\text{ред}}}{V_{\text{бал}}} \cdot \frac{dV_b}{dt}, \quad (11)$$

- для редуктора избыточного давления:  

$$\frac{dP_{\text{бал}}}{dt} = \frac{P_{\text{ред}}}{V_{\text{бал}}} \cdot \frac{dV_b}{dt} - \rho \cdot g \frac{V_b}{V_{\text{бал}}} \cdot \frac{dH}{dt}, \quad (12)$$

- уравнение Менделеева-Клапейрона [3] для произвольной массы воздуха:

$$P \cdot \mu = \rho_b \cdot R \cdot T, \quad (13)$$

В уравнениях (1)-(10):

$m = m_0 + \rho \cdot V_b$  - суммарная масса МВУ, кг;

$m_0$  - масса МВУ с осушенней БЕ, кг;

$\rho = 1030 \text{ кг}/\text{м}^3$  - плотность воды;

$k_1 = 0,03$  - коэффициент присоединенной массы цилиндра при вертикальном движении [4];

$D = 0,22 \text{ м}$  - диаметр МВУ;

$S = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 = 3,801 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  - площадь поперечного сечения МВУ;

$V_\Pi = LS = 58,92 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  - объем МВУ;

$V_b$  - объем воды в БЕ,  $\text{м}^3$ ;

$C_D = 1$  - коэффициент лобового сопротивления МВУ при вертикальном движении, определяемый по рис. 4 для  $L/D = 7,04$ .

$\mu_o = 0,62$  - коэффициент расхода жидкости (газа) через отверстие;

$S_0 = 0,25 \cdot \pi \cdot d_0^2$  - площадь приемно-отливного отверстия БЕ,  $\text{м}^2$ ;

$S_b = 0,25 \cdot \pi \cdot (D - 2d)^2$  - площадь поперечного сечения БЕ,  $\text{м}^2$ ;

$P_{\text{атм}}$  - давление на свободной поверхности воды, Па;

$d$  - толщина стенки МВУ, м;

$K_{\text{ред}}$  - коэффициент, учитывающий тип редуктора:  $K_{\text{ред}} = 1$  - для редуктора абсолютного давления;  $K_{\text{ред}} = 0$  - для редуктора

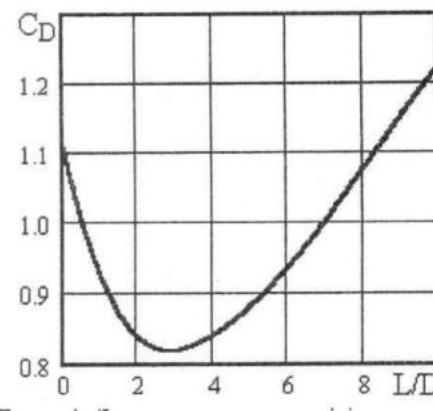


Рис. 4 - Зависимость коэффициента лобового сопротивления цилиндра от относительной длины [4]

избыточного давления;

$\rho_b$  - плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$T$  - температура воздуха, К;

$\mu = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль - молярная масса воздуха;

$R = 8,31 \text{ Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}$  - универсальная газовая постоянная.

$\xi_0 = 0,06$  - коэффициент местного сопротивления отверстия системы осушки балластной емкости.

Начальные условия. Для решения системы дифференциальных уравнений задавались следующие начальные условия:

- начальная скорость движения МВУ:  $U = U_0 = 0$ ;

- начальное давление в баллоне:  $P_{\text{бал}} = P_{\text{бало}} = 1,962 \cdot 10^7 - 2,4525 \cdot 10^7 \text{ Па}$  ( $200-250 \text{ кг}/\text{см}^2$ );

- начальный объем сглаживаемого воздуха через систему осушки:  $V_b = V_{b0} = 0$ .

При выборе объема балластной емкости исходили из условия обеспечения заданной максимальной величины скорости погружения МВУ  $U = 0,3 \text{ м}/\text{с}$ . При установленном движении МВУ при погружении уравнение равновесия принимает вид

$$F_G - F_\Pi - F_D = 0, \quad (14)$$

и, с учетом весовых, геометрических и кинематических характеристик МВУ после преобразования уравнения (14), имеем уравнение для определения потребного объема балластной

$$V_{b0} = V_\Pi + \frac{C_D S U^2}{2g} - \frac{m_0}{\rho}, \quad (15)$$

На основании (15) объем балластной емкости оценивается величиной  $V_{бe} = 5,697 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , а высота балластной емкости должна составлять  $H_{бe} = 0,164 \text{ м}$ .

Для определения значения  $V_b$  перед первым погружением МВУ с предположением о наличии воды, поступившей в БЕ вследствие бескингстонности емкости, использовано уравнение:

$$\frac{\rho g}{\rho g} \cdot \frac{V_b}{V_{бe} - V_b} + \frac{V_b}{S_6} - \frac{d_o}{2} - \frac{\frac{m_o}{\rho} + V_b}{S} + \Delta H = 0 \quad (16)$$

где  $\Delta H = 0,91 \text{ м}$  – отстояние приемно-отливного отверстия от нижней кромки МВУ (рис. 3). Величина начального объема воды в БЕ перед первым циклом погружения-всплытия на основании (16) оценивается значением  $V_b = 3,525 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , а начальная глубина погружения днища МВУ определялась из уравнения

$$\rho g \left( \frac{m_o}{\rho} + V_b \right) = \rho g S H \quad (17)$$

и оценивается величиной  $H = 1,414 \text{ м}$ . Данные величины  $V_b$  и  $H$  отличаются от их значений без учета остаточного объема воды в БЕ на величину не более 6,2 % и в расчетах динамики погружения-всплытия МВУ

начальные значения данных величин приняты равными  $V_b = 0$  и  $H = 1,4 \text{ м}$ .

На основании представленных уравнений динамики погружения-всплытия МВУ минимизировалась неявная функция, используемая для нахождения параметров системы погружения-всплытия. Данная функция имела вид

$$F_{min} = \text{abs}(\Delta P_{бал} - 8), \quad (18)$$

при ограничениях  $0,1 \leq h_n \leq 0,15$  и  $\text{abs}(200 - H_{max}) \leq 1$ .

Анализ результатов расчета оптимальных параметров системы погружения-всплытия МВУ. Результаты поиска оптимальных параметров системы погружения-всплытия МВУ представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что при начальном давлении воздуха в баллоне  $P_{бало} = 200 \text{ кг/см}^2$  требуемое число циклов погружения-всплытия обеспечивается системой, в составе которой используется баллон ВВД объемом 12 литров, балластная емкость с 2-мя приемно-отливными отверстиями диаметром 10 мм, редуктора избыточного давления с установочным давлением  $P_{реду} = 0,98 \text{ кг/см}^2$  и пускателя с установочной глубиной срабатывания  $H_{prod} = 199,6 \text{ м}$ . Снижение давления в баллоне при этом оценивается величиной

Таблица 1 - Оптимальные расчетные параметры системы погружения-всплытия МВУ

Параметры системы погружения-всплытия	Тип редуктора ВВД					
	избыточного давления			абсолютного давления		
Объем баллона ВВД $V_{бал}$ , м <sup>3</sup>	0,012	0,010	0,007	0,012	0,010	0,007
Начальное давление в баллоне $P_{бало}$ , кг/см <sup>2</sup>	200			200		
Установочная глубина продувания БЕ $H_{prod}$ , м	199,6	199,5	199,3	199,6	199,5	199,3
Диаметр приемного отверстия БЕ $d_o$ , мм	11,2	10,2	9,3	10,9	10,4	9,8
Установочное давление редуктора $P_{реду}$ , кг/см <sup>2</sup>	1,6	1,1	0,4	21,9	21,5	20,8
Снижение давления за одно продувание $\Delta P_{бал}$ , кг/см <sup>2</sup>	6,99	7,00	7,00	6,96	7,00	7,00
Остаток воды в БЕ после всплытия $\Delta V_b \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup>	2,25	2,78	3,643	2,24	2,78	3,64
Надводная высота корпуса МВУ после всплытия $h_n$ , м	0,09	0,08	0,05	0,09	0,08	0,05
	$n_{отв} = 2$			$n_{отв} = 2$		
Установочная глубина продувания БЕ $H_{prod}$ , м	199,6	199,6	199,6	199,6	199,3	200,2
Диаметр приемного отверстия БЕ $d_o$ , мм	10,0	10,6	10,0	9,9	10,1	9,9
Установочное давление редуктора $P_{реду}$ , кг/см <sup>2</sup>	0,98	0,98	0,98	21,2	20,8	20,9
Снижение давления за одно продувание $\Delta P_{бал}$ , кг/см <sup>2</sup>	7,60	9,12	13,03	7,06	7,00	9,80
Остаток воды в БЕ после всплытия $\Delta V_b \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup>	1,83	1,83	1,83	2,10	2,68	2,76
Надводная высота корпуса МВУ после всплытия $h_n$ , м	0,1	0,1	0,1	0,09	0,08	0,08
	$n_{отв} = 3$			$n_{отв} = 3$		
Установочная глубина продувания БЕ $H_{prod}$ , м	199,7	199,7	199,7	199,6	199,8	200,1
Диаметр приемного отверстия БЕ $d_o$ , мм	10,1	10,1	10,1	9,6	9,8	9,9
Установочное давление редуктора $P_{реду}$ , кг/см <sup>2</sup>	1,00	1,00	1,00	20,9	20,8	20,9
Снижение давления за одно продувание $\Delta P_{бал}$ , кг/см <sup>2</sup>	9,3	11,15	15,93	7,00	7,85	11,9
Остаток воды в БЕ после всплытия $\Delta V_b \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup>	0,93	0,93	0,93	2,05	2,29	2,08
Надводная высота корпуса МВУ после всплытия $h_n$ , м	0,126	0,126	0,126	0,096	0,090	0,095

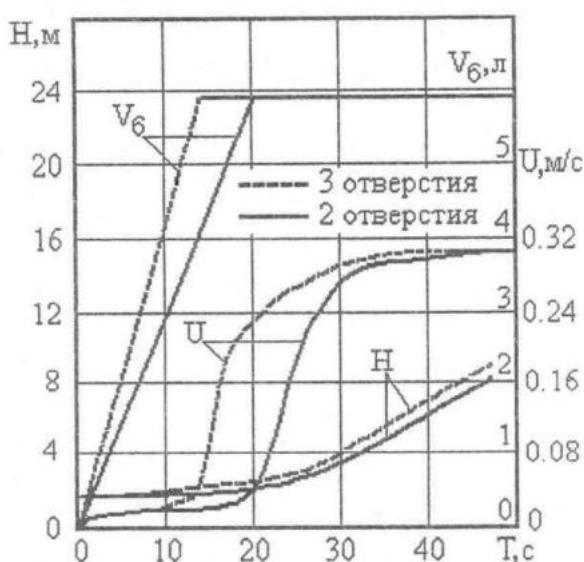


Рис. 5 – Динамика начального периода погружения

$\Delta P_{бал} = 7,6 \text{ кг}/\text{см}^2$ . При повышении начального давления в 12-ти литровом баллоне до  $P_{бало} = 220 \text{ кг}/\text{см}^2$  требуемое число циклов погружения-всплытия обеспечивается системой с 3-мя приемно-отливными отверстиями диаметром 10 мм, редуктора избыточного давления с установочным давлением  $P_{реду} = 1,0 \text{ кг}/\text{см}^2$  и установочной глубиной срабатывания пускателя  $H_{prod} = 200 \text{ м}$ . Увеличение числа приемно-отливных

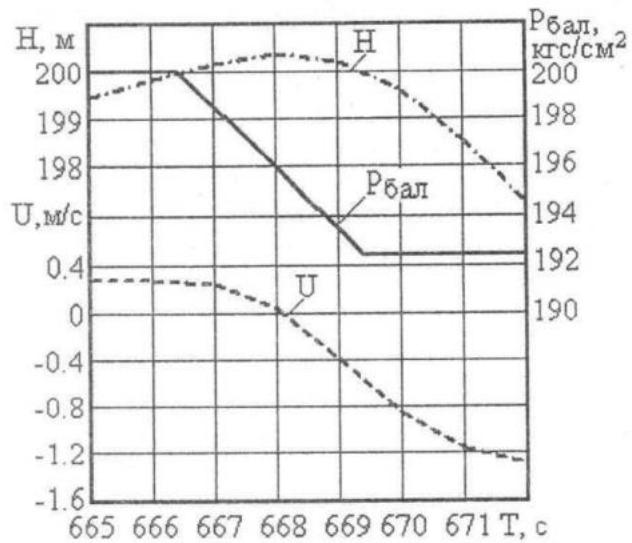


Рис. 6 – Динамика изменения параметров движения МВУ и давления в баллоне на начальном этапе всплытия. Число приемно-отливных отверстий - 2

отверстий уменьшает время работы электромагнитного клапана вентиляции БЕ при ее заполнении водой при погружении в среднем на 6 секунд (рис. 5).

На рис. 6 и 7 представлены динамика начального периода всплытия МВУ с 12-литровым баллоном ВВД и числом отверстий 2 и 3, причем в последнем случае начальное давление в баллоне принималось равным  $P_{бало} = 220 \text{ кг}/\text{см}^2$ . Из рис. 6 и 7 следует, что в обеих случаях максимальное перезаглубление МРУ не превышает 0,3 метров от заданной глубины погружения, а изменение давления в баллоне за одно продувание БЕ соответствует отмеченным выше значениям. Из рис. 6 и 7 следует, что скорость всплытия МВУ при осушении БЕ превышает скорость погружения после ее заполнения. Предельная скорость всплытия МВУ оценивается по уравнению установившегося движения

$$g \cdot m_0 - \rho g V_{\Pi} + C_D \frac{\rho U^2}{2} S = 0 \quad , \quad (19)$$

из которого следует

$$U = \sqrt{\frac{2(\rho \cdot g \cdot V_{\Pi} - m_0 \cdot g)}{C_D \cdot \rho \cdot S}} = 1,67(\text{м}/\text{с}) \quad , \quad (20)$$

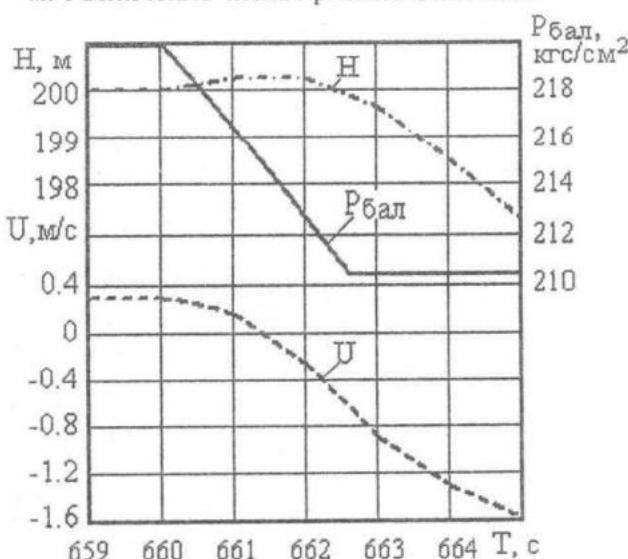


Рис. 7 – Динамика изменения параметров движения МВУ и давления в баллоне на начальном этапе всплытия. Число приемно-отливных отверстий - 3

## ВЫВОДЫ

1. Разработана простая система погружения-всплытия малогабаритного всплывающего устройства многократного действия, обеспечивающая автоматическое продувание балластной емкости при достижении заданной глубины. Достоинство предлагаемой системы заключается в использовании надежных, простых, малогабаритных и выпускаемых серийно элементов водолазного снаряжения.

2. Разработана математическая модель работы системы погружения-всплытия.

3. Разработана методика по определению оптимальных параметров данной системы в зависимости от ограничений, накладываемых на использование МВУ. Обоснован вид неявной минимизируемой функции. Выбран метод расчета данной функции.

4. На основании проведенных расчетов для заданного числа циклов погружения-всплытия  $N \geq 20$  МВУ рекомендуется использовать в качестве элементов системы погружения-всплытия следующие серийные изделия водолазного снаряжения: баллон ВВД на 12 литров с давлением 200 - 220 кг/см<sup>2</sup>, редуктор

избыточного давления с установочным давлением  $P_{реду} \approx 1,0$  кг/см<sup>2</sup>, пускателей ДГБ с установочной глубиной открытия  $H_{prod} \approx 200$  м. Число приемно-отливных отверстий БЕ рекомендуется выбрать 2 или 3 с диаметром 10 мм.

5. Разработанная система погружения-всплытия и ее элементы могут быть использованы в технике исследования океана и как элементы системы безопасности малогабаритных подводных аппаратов индивидуального использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Комплект аппарата изолирующего ИДА-59М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1975. – 167 с.
2. Банди Б. Методы оптимизации. – М. Радио и связь. – 1988. – 128 с.
3. Яворский Б.М., Селезнев Ю.А. Справочное руководство по физике. – М. Наука. – 1989. – С. 132.
4. Справочник специалиста аварийно-спасательной службы ВМФ. Ч. 3. Под ред. Чикера Н.П. / М.Воениздат. – 1968. – 354 с.