

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ВСПЛЫТИЯ И ПОГРУЖЕНИЯ МОРСКИХ ДРИФТЕРОВ

А.В. Дологлонян, А.К. Сухов

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: dologlonyan@gmail.com

Разработаны уравнения движения дрейфера, позволяющие применять для расчетов уравнения только для одного из процессов всплытия/погружения, при условии равенства остальных коэффициентов в уравнениях, и использовать их результаты для другого. На основе полученной модели произведена оценка энергосберегающего режима всплытия/погружения дрейфера.

Ключевые слова: дрейфер, уравнение движения, подводный аппарат, энергопотребление.

Введение. Очевидно, что автономность морских дрейферов определяется надежностью и эффективностью устройств изменения плавучести, а также емкостью аккумуляторной батареи.

Повышение автономности достигается, обычно, за счет применения более совершенного оборудования для устройств изменения плавучести [1, 2] и/или большей плотности заряда в аккумуляторной батарее [3]. Однако, возможно добиться существенной экономии заряда аккумуляторной батареи путем изменения режима погружения / всплытия.

Данная статья посвящена вопросу оценки возможной экономии заряда аккумуляторной батареи при различных режимах погружения/всплытия.

Определение необходимого объема внешнего ресивера. Поскольку температура (T) и соленость (S) являются функциями координаты (z), то можно сказать, что и плотность в целом является функцией координаты, т.е.

$$\rho_f(T, S, z) = \rho_f(z). \quad (1)$$

Будем полагать, что

$$\rho_f(z) = \rho_{fm} + \Delta\rho(z), \quad (2)$$

$$\rho_{fm} = \frac{1}{2}[\rho_f(z_{\min}) + \rho_f(z_{\max})]. \quad (3)$$

где ρ_{fm} – средняя по глубине плотность, кг/м³; $\Delta\rho(z)$ – приращение плотности, кг/м³, может быть, как положительным, так и отрицательным; z_{\max} – максимальная глубина, м; z_{\min} – минимальная глубина, м.

Рассмотрим условие нулевой плавучести на максимальной глубине

$$mg = \rho_f(z_{\max})g(V_a - \Delta V_{f\min}), \quad (4)$$

где m – масса подводного аппарата, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; V_a – объем аппарата при нулевой плавучести при средней плотности ρ_{fm} , м³; $\Delta V_{f\min}$ – изменение объема внешнего ресивера на максимальной глубине, м³.

Базовую массу ПА можно представить следующим образом

$$m = \rho_{fm}V_a. \quad (5)$$

Подставим выражения (2) и (5) в уравнение (4) и выразим $\Delta V_{f\min}$.

$$\Delta V_{f\min} = V_a \left[\frac{\Delta\rho(z_{\max})}{\rho_{fm} + \Delta\rho(z_{\max})} \right]. \quad (6)$$

Учитывая, что порядок величины $\frac{\Delta\rho(z)}{\rho_{fm}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ мал, то (6) примет вид

$$\Delta V_{f\min} \cong \frac{\Delta\rho(z_{\max})}{\rho_{fm}} V_a. \quad (7)$$

Поскольку нулевая плавучесть должна достигаться как на максимальной, так и минимальной глубинах, необходимый объем внешнего ресивера с учетом (7) равен удвоенному изменению объема внешнего ресивера на максимальной глубине, или

$$\Delta V_f = 2\Delta V_{f\min} \cong 2 \frac{\Delta\rho(z_{\max})}{\rho_{fm}} V_a. \quad (8)$$

Оптимальный режим погружения/всплытия. Если предположить, что

время заполнения внешнего ресивера достаточно мало, чтобы считать этот процесс изобарным (подтверждение этого представлено результатами моделирования на рис. 1.), то в идеальном случае (если исключить потери электрогидравлического привода, потери на трение и пр.) затраты энергии на изменение объема внешнего ресивера равны [4, 5]

$$E_u = 10^4 z \Delta V_f, \quad (9)$$

где $P_o = 10^4 z$ – давление окружающей среды, Па.

Если предположить, что $\Delta\rho(z) \sim z$, а согласно (8) $\Delta V_f \sim \Delta\rho(z)$, следовательно $\Delta V_f \sim z$, то из выражения (9) следу-

ет, что уменьшение энергетических затрат на всплытие пропорционально квадрату уменьшения глубины погружения, т.е. $E_u \sim z^2$. Это значит, что автономность дрейфера резко снижается с ростом глубины погружения и конструкционные способы увеличения автономности имеют предел, поэтому задача снижения затрат энергии режимными способами является актуальной.

Предположим, глубина погружения z разбита на n участков и на каждом из участков происходит изменение объема внешнего ресивера равное $\frac{\Delta V_f}{n}$, тогда общие затраты энергии на всплытие можно представить в виде ряда

$$E_u(n) = 10^4 z_{\max} \frac{\Delta V_f}{n} + \sum_{i=1}^n \left[10^4 z_{\max} \left(1 - \frac{i}{n} \right) \frac{\Delta V_f}{n} \right], \quad \text{или}$$

$$E_u(n) = 10^4 z_{\max} \frac{\Delta V_f}{n} \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i}{n} \right) \right]. \quad (10)$$

Величина $\sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{i}{n} \right)$ представляет собой арифметическую прогрессию, сумма которой, как известно [5], определяется по формуле

$$S_n = \frac{a_1 + a_n}{2} n, \quad (11)$$

где a_1 – первый член арифметической прогрессии, a_n – n -й член арифметической прогрессии.

Из выражения (10) видно, что $a_1 = 1 - \frac{1}{n}$; $a_n = 0$, тогда, подставляя эти величины в формулу (11) получим значение суммы арифметической прогрессии

$$S_n = \frac{a_1 + a_n}{2} n = \frac{1 - \frac{1}{n}}{2} n = \frac{n-1}{2}. \quad (12)$$

Подставим результат (12) в выражение (10) получим

$$E_u(n) = 10^4 z_{\max} \frac{\Delta V_f}{2} \frac{n+1}{n}. \quad (13)$$

Снижение энергоемкости процесса всплытия рассчитывается из отношения уравнения (13) к уравнению (9), или

$$\frac{E_u(n)}{E_u} = \frac{1}{2} \frac{n+1}{n}. \quad (14)$$

При непрерывном изменении объема внешнего ресивера (при $n \rightarrow \infty$) снижение энергозатрат составит 100%, что видно из представленной ниже зависимости

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{E_u(n)}{E_u} = \frac{1}{2} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n+1}{n} = \frac{1}{2}. \quad (15)$$

Уравнения движения ПА в процессах погружения/всплытия. Уравнения движения ПА в вертикальной плоскости известны в литературе, на пример, в [7]. Рассмотрим процесс *всплытия*. Собственно, процесс всплытия делится на

две фазы:

- фаза движения в процессе наполнения внешнего ресивера;
- фаза дрейфа в вертикальной плоскости.

Рассмотрим уравнение движения ПА в процессе наполнения внешнего реси-

вера. Основные силы, действующие на ПА, рассмотрены в [7]. С учетом сделанных выше определений и полагая направление вверх положительным уравнение движения будет выглядеть следующим образом

$$m \frac{du(\tau)}{d\tau} = -mg - C_f \rho_f(z) S_a \frac{u(\tau)^2}{2} + \rho_f(z) g \left(V_a - \Delta V_{f \min} + \frac{v_f}{k_c} \tau \right), \quad (16)$$

где u – текущая скорость ПА, м/с; τ – текущее время, с; m – масса ПА, кг; C_f – коэффициент гидравлического сопротивления ПА; ρ_f – плотность жидкости, кг/м³; S_a – характерная площадь поперечного сечения, м²; v_f – скорость заполнения объема наружного ресивера, м³/с; k_c – коэффициент усиления гидроцилиндра (для систем не имеющих усилителей $k_c = 1$).

Начальные условия для (16), в общем случае, имеют вид

$$u(0) = 0; z(0) = 0. \quad (17)$$

Поскольку в уравнении порядок величины $\frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$ мал,

а величина $g \gg g \frac{\frac{v_f}{k_c} \tau - \Delta V_{f \min}}{V_a} - C_f S_a \frac{u(\tau)^2}{2V_a}$, то (16) можно упростить

$$\frac{du(\tau)}{d\tau} + C_f S_a \frac{u(\tau)^2}{2V_a} - g \left[\frac{v_f}{k_c V_a} \tau - \frac{\Delta V_{f \min}}{V_a} + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0, \quad (18)$$

или учитывая, что $\dot{z}(\tau) = u(\tau)$ (18) и (17) примут вид

$$\ddot{z}(\tau) + C_f S_a \frac{\dot{z}(\tau)^2}{2V_a} - g \left[\frac{v_f}{k_c V_a} \tau - \frac{\Delta V_{f \min}}{V_a} + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0; \quad (19)$$

$$z(0) = 0; \dot{z}(0) = 0. \quad (20)$$

Система уравнений (19) – (20) полностью описывает движение ПА в первой фазе всплытия.

Рассмотрим уравнение движения ПА во второй фазе – дрейфа в вертикальной

плоскости. Эта фаза характеризуется тем, что внешний ресивер полностью заполнился за период τ_0 . Следовательно уравнение (16) будет выглядеть следующим образом

$$m \frac{du(\tau)}{d\tau} = -mg - C_f \rho_f(z) S_a \frac{u(\tau)^2}{2} + \rho_f(z) g (V_a - \Delta V_{f \min} + \Delta V_f); \quad (21)$$

$$u(\tau_0) = u_0; z(\tau_0) = z_0. \quad (22)$$

В уравнении (22) величина τ_0 – это время наполнения объема внешнего ресивера, она по определению равна $\tau_0 = 2 \frac{\Delta V_{f \min}}{k_c v_f}$.

Проводя аналогичные уравнению движения в первой фазе рассуждения, можно показать, что $g \gg g \frac{\Delta V_f - \Delta V_{f \min}}{V_a} - C_f S_a \frac{u(\tau)^2}{2V_a}$ и переписать систему (21) – (22) в виде

$$\ddot{z}(\tau) + \frac{C_f S_a}{2V_a} \dot{z}(\tau)^2 - g \left[\frac{\Delta V_f - \Delta V_{f \min}}{V_a} + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0; \quad (23)$$

$$\dot{z}(\tau_0) = u_0; z(\tau_0) = z_0. \quad (24)$$

Система уравнений (23)–(24) полностью описывает движение ПА во второй фазе всплытия.

Рассмотрим процесс *погружения*. Собственно, процесс погружения делится также на две фазы:

– фаза движения в процессе опорожнения внешнего ресивера;

– фаза дрейфа в вертикальной плоскости.

Проводя аналогичные процессу всплытия рассуждения, и полагая направление вниз положительным, можно получить систему уравнений движения ПА для первой фазы

$$\ddot{z}(\tau) + C_f S_a \frac{\dot{z}(\tau)^2}{2V_a} - g \left[\frac{v_f}{k_c V_a} \tau - \frac{\Delta V_{f \min}}{V_a} - \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0; \quad (25)$$

$$\dot{z}(0) = 0; z(0) = 0. \quad (26)$$

и для второй фазы

$$\ddot{z}(\tau) + \frac{C_f S_a}{2V_a} \dot{z}(\tau)^2 - g \left[\frac{\Delta V_f - \Delta V_{f \min}}{V_a} - \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0; \quad (27)$$

$$\dot{z}(\tau_0) = u_0; z(\tau_0) = z_0. \quad (28)$$

Учитывая выражения (2) и (3) можно сказать с высокой степенью точности,

что величина $\frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}}$ для процессов

всплытия и погружения отличается только знаком. Это обстоятельство позволяет применять для расчетов уравнения только для одного из процессов, при условии равенства остальных коэффици-

ентов в уравнениях (19), (23) и (25), (27), и использовать их результаты для другого. Подтверждение этого представлено результатами моделирования на рис. 2.

Моделирование процессов погружения/всплытия дрефтера. При моделировании погружения дрефтера были приняты следующие численные значения параметров модели (табл. 1)

Таблица 1. Численные значения параметров модели

Наименование	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Объем аппарата при нулевой плавучести при средней плотности ρ_{fm} [8]	V_a	0,0382	м ³
Коэффициент гидродинамического сопротивления	C_f	1	–
Масса дрейфера	m	38	кг
Характерная площадь поперечного сечения	S_a	0,0254	м ²
Коэффициент усиления гидроцилиндра	k_c	4	–
Максимальное линейное перемещение штока	l_f	0,3	м
Диаметр поршня	D_1	0,13	м
Диаметр штока	D_2	0,065	м

Уравнения (19), (23) и (25), (27) являются нелинейными и неоднородными и не имеют решения в квадратурах. Для численного решения этих уравнений применялся метод Рунге-Кутты. Резуль-

таты моделирования фаз процесса всплытия на основе уравнений (19) с начальными условиями (20) и (23) с начальными условиями (24) представлены на рис. 1.

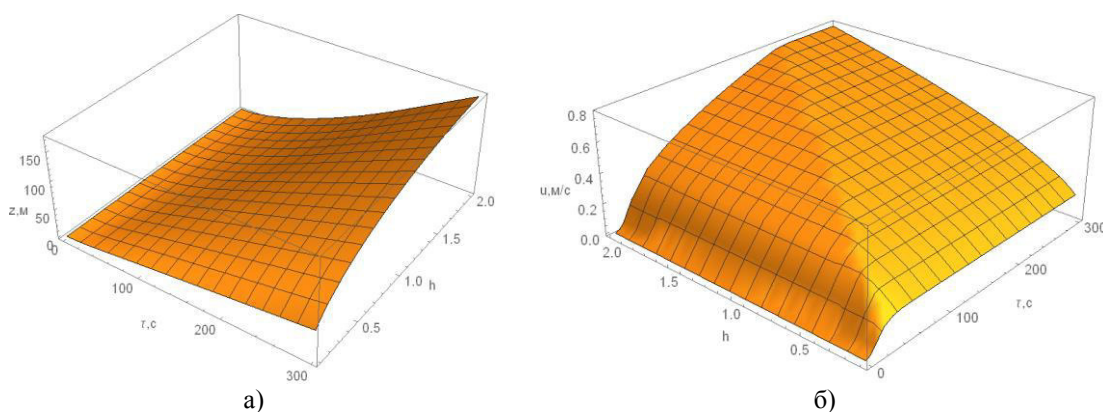


Рис. 1. Результаты моделирования фаз процесса всплытия: а) глубина всплытия; б) скорость всплытия

Результаты моделирования фаз процесса погружения на основе уравнений (25) с начальными условиями (26) и (27),

с начальными условиями (28) представлены на рис. 2.

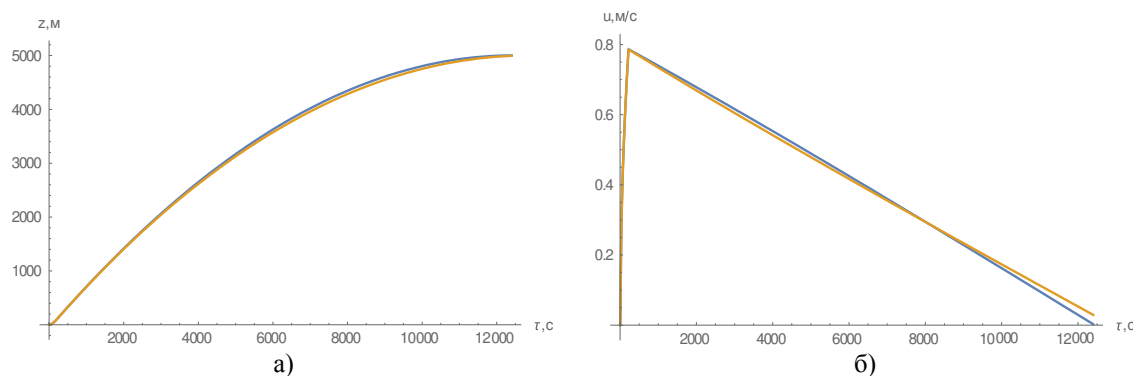


Рис. 2. Результаты моделирования процессов всплытия и погружения: а) глубина; б) скорость

Разница результатов моделирования процессов всплытия и погружения на основе уравнений (19), (23) и (25), (27), и

их начальных условий, представлена на рис. 3.

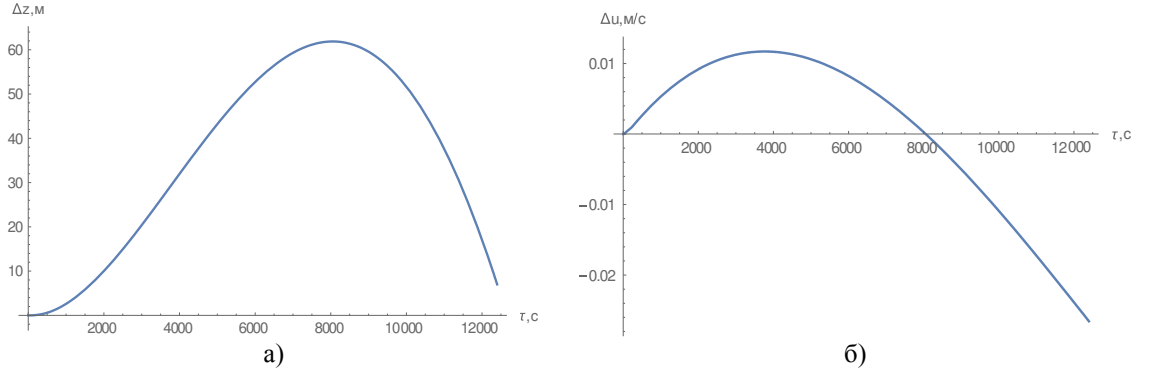


Рис. 3. Разница результатов моделирования процессов всплытия и погружения: а) глубина; б) скорость

Представленные на рис. 2 и 3 результаты наглядно демонстрируют возможность с приемлемой погрешностью применять для расчетов уравнения только для одного из процессов (погружения или всплытия), при условии равенства остальных коэффициентов в уравнениях обоих процессов и использовать их результаты для другого.

Изменения моделей при расчете энергосберегающего режима всплытия. Пусть количество участков всплытия будет равно n , а степень наполнения объема внешнего ресивера на i -м участке – $h(i)$. Тогда модель всплытия на i -м участке для фазы дрейфа для $i < j < n$ будет выглядеть следующим образом

$$m \frac{du(\tau)}{d\tau} = -mg - C_f \rho_f(z) S_a \frac{u(\tau)^2}{2} + \rho_f(z) g \left[V_a - \Delta V_{f \min} + \sum_{i=1}^j \Delta V_f(i) \right], \quad (29)$$

где $\Delta V_f(i)$ – приращение объема внешнего ресивера на i -м участке, м^3 .

Если полагать, что $h(i) = h = \text{idem}$, то

$$\Delta V_f(i) = \frac{\Delta V_f}{n} = \frac{h_{\max}}{n} \Delta V_{f \min}. \quad \text{При этом}$$

$$\Delta V_f = \sum_{i=1}^n \Delta V_f(i) = h_{\max} \Delta V_{f \min}.$$

Поскольку при $h(i) = \text{idem}$, $h = \frac{h_{\max}}{n}$,

$$\ddot{z}(\tau) + \frac{C_f S_a}{2V_a} \dot{z}(\tau)^2 - g \left[\frac{1}{V_a} \left(\sum_{i=1}^j \Delta V_f(i) - \Delta V_{f \min} \right) + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0. \quad (30)$$

При $h(i) = h = \text{idem}$ уравнение (30) упрощается

$$\ddot{z}(\tau) + \frac{C_f S_a}{2V_a} \dot{z}(\tau)^2 - g \left[\frac{\Delta V_{f \min}}{V_a} (jh - 1) + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0. \quad (31)$$

На i -м участке начальные условия как правило не равны нулю, т.е.

$$\dot{z}\left(\tau_s + \frac{\tau_0}{n}\right) = u_{0i}; z\left(\tau_s + \frac{\tau_0}{n}\right) = z_{0i}. \quad (32)$$

Модель всплытия на i -м участке для фазы наполнения объема внешнего ресивера будет выглядеть следующим образом

$$m \frac{du(\tau)}{d\tau} = -mg - C_f \rho_f(z) S_a \frac{u(\tau)^2}{2} + \rho_f(z) g \left[V_a - \Delta V_{f \min} + \sum_{i=1}^{j-1} \Delta V_f(i) + \frac{v_f}{k_c} (\tau - \tau_s) \right]. \quad (33)$$

При переходе к координатам уравнение (33) с учетом сделанных ранее допущениях примет вид

$$\ddot{z}(\tau) + C_f S_a \frac{\dot{z}(\tau)^2}{2V_a} - g \left[\frac{1}{V_a} \sum_{i=1}^{j-1} \Delta V_f(i) + \frac{v_f}{k_c V_a} (\tau - \tau_s) - \frac{\Delta V_{f \min}}{V_a} + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right] = 0. \quad (34)$$

Поскольку

$$\sum_{i=1}^{j-1} \Delta V_f(i) = (j-1) \frac{h_{\max}}{n} \Delta V_{f \min} = (j-1) h \Delta V_{f \min}. \quad (35)$$

Тогда подставим (35) в (34) получим

$$\ddot{z}(\tau) + C_f S_a \frac{\dot{z}(\tau)^2}{2V_a} - g \left\{ \frac{v_f}{k_c V_a} (\tau - \tau_s) - \frac{\Delta V_{f \min}}{V_a} [1 - (j-1)h] + \frac{\Delta \rho(z)}{\rho_{fm}} \right\} = 0; \quad (36)$$

$$\dot{z}(\tau_s) = u_{0(i-1)}; z(\tau_s) = z_{0(i-1)}. \quad (37)$$

Результаты моделирования фаз процесса всплытия на основе уравнений (36) с начальными условиями (37) и (31),

с начальными условиями (32) представлены на рис. 4. Параметры модели такие же, как и в табл. 1.

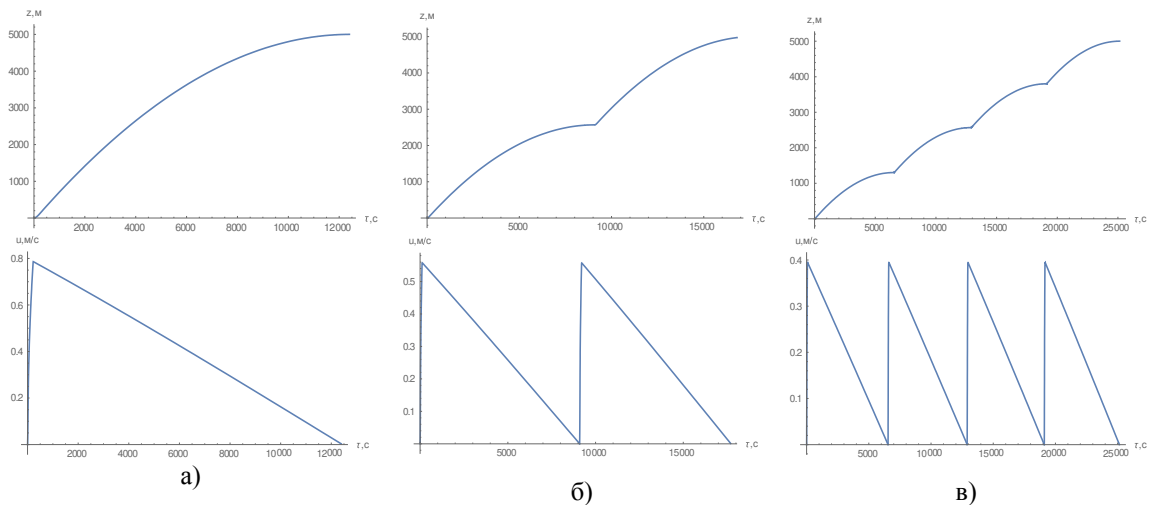


Рис. 4. Результаты моделирования фаз процесса всплытия: а) глубина и скорость всплытия при $n = 1$; б) глубина и скорость всплытия при $n = 2$; в) глубина и скорость всплытия при $n = 4$

Анализ рис. 4 показывает, что разбивка наполнения объема внешнего ресивера на несколько частей уменьшает среднюю скорость и соответственно увеличивает время всплытия/погружения. При этом затраты энергии на всплытие/погружение составят в соответствии с формулой (14) в случае б) – 75%, а в случае в) – 62,5% от случая а).

Заключение. Разработанная математическая модель динамики подводного аппарата, позволяет определять скорость и глубину погружения/всплытия, а также применять для расчетов уравнения только для одного из процессов, при условии равенства остальных коэффициентов в уравнениях обоих процессов и использовать их результаты для другого.

Проанализирован энергосберегающий режим всплытия, позволяющий потенциально снизить энергопотребление устройства изменения плавучести в 2 раза. Существующая производительность насосов слишком велика для длительного поддержания скорости дрейфера постоянной, поэтому целесообразно разбивать объем наполнения внешнего ресивера на несколько участков, однако при этом снижаются скорость и увеличивается время всплытия/погружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дологлонян А.В., Сухов А.К., Стаценко И.Н. Устройство изменения плавучести для глубоководных аппаратов // Системы контроля окружающей среды.

Севастополь: ИПТС, 2017. Вып. 9 (29). С. 27–35.

2. Buoyancy engine developed for underwater gliders. *Advanced Robotics*. Asakawa K., Wataria K., Ohuchib H., Nakamura M., Hyakudomea T., Ishiharaa Y. 2016 VO L. 30, NO. 1, pp. 41–49.

3. Михайлов Д.Н., Найденко Н.А., Борейко А.А. Опыт разработки и испытаний систем энергообеспечения АНПА // 5-я Всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана»: Материалы всеросс. науч.-техн. конфер., Владивосток, 2013 г. С. 118–124.

4. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972. 672 с.

5. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.

6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.

7. Краснодубец Л.А., Забурдаев В.И., Альчаков В.В. Управление морскими буями-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения // Морской гидрофизический журнал. 2012. № 4. С. 69–79.

8. Web ресурс:
<http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001881/188170e.pdf> (дата обращения: 06.09.2017).

ENERGY SAVING MODES OF EMERSION AND IMMERSION OF SEA DRIFT BOATS

A.V. Dologlonyan, A.K. Sukhov

Institute of Natural and Technical Systems, Russian Federation, Sevastopol, Lenin St., 28
E-mail: dologlonyan@gmail.com

The equations of the movement of the drift boat allowing to apply to calculations of the equation only for one of emersion/immersion processes on condition of equality of other coefficients in the equations and to use their results for another are developed. On the basis of the received model assessment of the energy saving mode of emersion/immersion of the drift boat is made.

Keywords: drift boat, equation of the movement, undersea vehicle, energy consumption.