

Автоматизация научных исследований морей и океанов

УДК 551.46:681.51

Л.А. Краснодубец*, В.И. Забурдаев**, В.В. Альчаков*

Управление морскими буйами-профилемерами как метод повышения репрезентативности термохалинных измерений. Модели движения

На основе анализа полученных характеристик режимов движения морских буйев-профилемеров при регистрации вертикальных термохалинных структур (распределений температуры и солености) морской воды показана целесообразность автоматического управления их движением. Предложены модели движения поплавкового устройства с регулируемой плавучестью, на основе которых возможно построение управляемых автоматических буйев-профилемеров.

Ключевые слова: буй-профилемер, профильные измерения, управление движением, регулятор плавучести, моделирование движения.

Введение. Дрейфующие буи с регулируемой плавучестью типа *PALACE*, *APEX*, *PROVOR* [1] широко применяются для изучения структуры глубоководных течений (до 2000 м) в Мировом океане. Первоначально в 1990-х годах они использовались в программе *WOCE* [2], с 2000 года – в программе *ARGO* [1, 3, 4]. С помощью указанного типа буйев, выступающих в роли профилемеров, возможно исследование вертикальной структуры полей температуры, солености, концентрации растворенного кислорода, прозрачности и других параметров вод. Установленная на этих буйах система автоматического управления состоит из регулятора, датчика глубины и исполнительного электромеханического устройства, меняющего плавучесть буя за счет изменения выталкивающей силы. Такая система управления обеспечивает многократное погружение и всплытие, а также стабилизацию относительно заданной глубины, достижение которой осуществляется с постоянной скоростью ~10 см/с. Это позволяет использовать буи *ARGO* в качестве автономных профилемеров и подводных дрейфтеров. В последнем случае горизонт дрейфа устанавливается при запуске и остается неизменным в течение всего времени существования буя. Оснащаются такие буи спутниковой системой связи *ARGOS*, которая, работая в одностороннем режиме, обеспечивает их позиционирование на морской поверхности, а также сбор и распространение потребителям накопленных в ходе измерений данных.

Можно отметить следующие факторы, влияющие на репрезентативность измерительной информации этих буйев:

– возможность возникновения существенных динамических погрешностей при измерении термохалинных профилей с большими градиентами и при постоянной скорости погружения – всплытия;

© Л.А. Краснодубец, В.И. Забурдаев, В.В. Альчаков, 2012

- отклонение траектории зондирования от вертикали при наличии горизонтальных течений;
- несинхронность и неодновременность измерений по глубине разными буйми-профилемерами.

Влияние отмеченных факторов на качество данных можно существенно уменьшить, если управлять движением буя-профилемера в процессе измерений.

Управляемый буй, предназначенный для профильных измерений, должен быть оснащен перспективной двусторонней космической связью и системой автоматического управления, обеспечивающей с высокой точностью достижение заданной глубины за требуемое время, а также движение с заданной скоростью при регистрации данных измерений в режиме всплытия. Использование двусторонней спутниковой связи обеспечит передачу на борт профилемеров сообщений с параметрами необходимого программного движения в ходе планируемых профильных измерений. Передача таких сообщений позволит выполнить загрузку бортовых компьютеров для группы однотипных профилемеров, распределенных в заданном морском регионе, одинаковыми программами требуемого движения. Одновременный запуск загруженных программ даст возможность синхронного измерения параметров горизонтальных слоев воды на больших площадях. Поскольку начальные условия для управления носят случайный характер и гидродинамические характеристики буюв-профилемеров зависят от плотности воды и изменяются, необходима разработка законов и алгоритмов адаптивного управления процессами измерений.

В работе получены оценки вертикальных скоростей буюв-профилемеров, при которых гарантируется высокое качество регистрации вертикальных распределений температуры и солености. На этой основе ставится и решается задача разработки адаптивного закона управления для автоматического регулятора плавучести морского буя-профилемера. Решение задачи выполнено с использованием современных технологий аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением [3], основанных на применении концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации. Показано, что управляющее воздействие подстраивается в процессе работы регулятора, который реагирует на возмущения и подавляет их. Приведены результаты моделирования для различных режимов функционирования синтезированной системы с учетом ограничений хода поршня электрогидравлического регулятора плавучести, а также скачкообразного изменения параметров морской воды.

Оценка характеристик режимов движения буюв-профилемеров при регистрации вертикальных распределений температуры и солености морской воды. Поскольку в буюв-профилемерах непосредственно измеряются температура T , удельная (относительная) электрическая проводимость $\chi(R)$ и гидростатическое давление морской воды p , по которым вычисляется практическая соленость S_p в соответствии со шкалой практической соле-

ности 1978 г. (ШПС-78) [5], то, естественно, погрешность вычисления S_p будет зависеть от метрологических характеристик этих измерителей.

Программой *WOCE* [2] установлено, что погрешности измерения практической солености, температуры и давления не должны превышать $\Delta S_p = 0,002$, $\Delta T = 0,002^\circ\text{C}$, $\Delta p = 3$ дбар ($\Delta z = 3$ м) соответственно. Столь жесткое условие измерения практической солености по электрической проводимости накладывает еще более жесткие требования к метрологическим характеристикам измерителей температуры, удельной электропроводимости и давления. При этом допустимые значения статических погрешностей измерения температуры ΔT , электрической проводимости $\Delta \chi$ и давления Δp при условии их равного вклада в погрешность практической солености $(\Delta S_p)_{\text{доп}}$ [6] можно оценить из условия

$$\left(\frac{\partial S}{\partial \chi}\right)_{\text{max}} \Delta \chi = \left(\frac{\partial S}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial T}\right)_{\text{max}} \Delta T = \left(\frac{\partial S}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial p}\right)_{\text{max}} \Delta p = \frac{(\Delta S_p)_{\text{доп}}}{\sqrt{3}} = 0,0012,$$

где $\left(\frac{\partial S}{\partial \chi}\right)_{\text{max}} = 13,3 \text{ (См} \cdot \text{м)}^{-1}$; $\left(\frac{\partial S}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial T}\right)_{\text{max}} = 1,52 \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$;

$$\left(\frac{\partial S}{\partial \chi} \frac{\partial \chi}{\partial p}\right)_{\text{max}} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ (дбар)}^{-1};$$

$$(\Delta \chi)_{\text{max}} = \frac{0,0012}{13,3} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ См} \cdot \text{м}; (\Delta T)_{\text{max}} = \frac{0,0012}{1,52} = 0,0008^\circ\text{C};$$

$$(\Delta p)_{\text{max}} = \frac{0,0012}{0,00033} = 3,6 \text{ дбар}.$$

Допуская равенство максимальной динамической погрешности измерения температуры допустимой статической погрешности $(\Delta T)_{\text{дин}} = (\Delta T)_{\text{стат}} = 0,0008^\circ\text{C}$, можно найти предельно допустимую скорость подъема буя-профилемера на участке максимального градиента по глубине z (в верхнем слое океана):

$$(\Delta T)_{\text{дин}} = \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{max}} \frac{\partial z}{\partial t} \theta = \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{max}} v_{\text{доп}} \theta, \quad (1)$$

где $\frac{\partial T}{\partial z}$ – максимальный градиент температуры по глубине; t – время; θ – показатель тепловой инерции датчика температуры; $v_{\text{доп}}$ – допустимая скорость подъема профилемера.

При использовании на буе-профилемере датчика температуры фирмы *SBE* [1] его постоянная времени оценивается как $\theta = 0,065$ с. Чтобы динамическая погрешность измерения не превышала $(\Delta T)_{\text{дин}} \leq (\Delta T)_{\text{стат}}$ в слое макси-

мального градиента температуры, скорость подъема профилемера не должна превышать

$$v_{\text{доп}} \leq \frac{(\Delta T)_{\text{дин}}}{\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\text{max}} \theta}, \quad (2)$$

при этом она должна определяться по скорости изменения давления (дбар), а текущий градиент температуры – по данным получаемой информации непосредственно с помощью микропроцессора в электронном блоке буя-профилемера.

Согласно [7], характерный максимальный градиент осредненных профилей температуры оценивается значением $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) \approx 0,1^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$. Однако в зависимости от сезона он может изменяться в пределах $(0,1 - 0,5)^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$, следовательно, допустимая скорость подъема профилемера в области большого градиента температуры не должна превышать

$$v_{\text{доп}} \leq \frac{0,0008}{(0,1 - 0,5)0,065} = (0,12 - 0,025) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}. \quad (3)$$

Эти требования на допустимую скорость подъема буя-профилемера получены на основании использования уравнения состояния морской воды 1980 г. и ШПС-78.

В связи с тем что с 2012 г. вводятся в действие новое термодинамическое уравнение состояния морской воды *TEOS-10* [8] и новая шкала абсолютной солёности S_A вместо практической солёности S_p , стандартная неопределенность (среднеквадратическое отклонение среднего значения) составляет $\Delta S_A = 0,0045 \text{ г}\cdot\text{кг}^{-1}$, т. е. неопределенность самой шкалы абсолютной солёности морской воды пока оказывается в два раза больше допустимой погрешности определения практической солёности. Это говорит о том, что диапазон минимальных скоростей подъема буя-профилемера в области максимальных градиентов температуры может быть увеличен в два раза и составлять

$$v_{\text{доп}} \leq (0,24 - 0,05) \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}. \quad (4)$$

Модель морского профилемера как объекта управления. Изменение плавучести буя-профилемера может выполняться как за счет динамического изменения объема корпусной части (водоизмещения) при постоянной массе, так и за счет изменения его веса при постоянном объеме. В первом случае изменение этой выталкивающей силы происходит при помощи электрогидравлического устройства, перемещающего гидравлическую жидкость из внутреннего резервуара в камеру плавучести или наоборот.

Во втором случае изменение плавучести ныряющего буя основано на изменении соотношения между его весом и водоизмещением путем приема или вытеснения водяного балласта. При этом вынуждающая сила зависит от ско-

рости и времени изменения водяного балласта, а также от изменения результирующей силы, направленной вверх или вниз, вследствие изменения веса корпусной части буя за время одного цикла приема – вытеснения балластной воды.

Для конструирования закона управления необходимо знание математической модели, характеризующей процесс движения в водной среде поплавок-ового устройства цилиндрической формы под действием вынуждающих сил, возникающих в результате изменения его плавучести.

Выполним построение этой модели. Исследуемое движение буя в водной среде будем рассматривать в вертикальной плоскости без учета его горизонтальной составляющей. Это оправдано тем, что буй при погружении или всплытии свободно смещается (дрейфует) в горизонтальном направлении, параллельном поверхности, вместе с массами окружающей его воды.

Вертикальное движение ныряющего буя, например при погружении вдоль оси z , происходит под действием трех основных сил – силы тяжести P , силы гидродинамического сопротивления F_c и суммарного давления со стороны окружающей среды, основная составляющая которого порождает выталкивающую (архимедову) силу F_b , включающую в себя и управляющую силу F_y . Другие составляющие окружающего давления вызваны различными гидродинамическими процессами, например прохождением волн, а также неоднородным распределением физических характеристик водной среды по глубине. Последние существенно влияют на плотность морской воды ρ_b , от которой зависит выталкивающая сила

$$F_b = \rho_b V_6(t) g_3, \quad (5)$$

где $V_6(t)$ – объем погруженной в воду корпусной части буя в момент времени t ; g_3 – эффективное ускорение свободного падения.

Плотность морской воды в зависимости от времени, региона и глубины может изменяться. Изменения ρ_b во времени носят чаще всего сезонный характер, однако в зависимости от глубины они могут происходить быстро и многократно за время одного погружения или всплытия. Поэтому представим плотность морской воды в виде

$$\rho_b(z) = \rho_b^0 + \Delta\rho_b(z), \quad (6)$$

где ρ_b^0 – ее среднее значение для конкретного региона; $\Delta\rho_b(z)$ – приращение (знакопеременная величина), зависящее от распределения этой характеристики по глубине z .

Объем погруженной в воду корпусной части буя $V_6(t)$ включает в себя и объем камеры плавучести $V_{кп}(t)$, который может целенаправленно изменяться. Поэтому введем соотношение

$$V_6(t) = V_6^0 + V_{кп}(t), \quad (7)$$

где $V_6^0 = L_0 S_c$ – номинальный объем корпусной части буя, L_0 и S_c – номинальная длина и площадь поперечного сечения соответственно.

Следует отметить, что эффективное ускорение свободного падения изменяется локально на величину, равную ускорению частиц воды g_b , которое практически всегда ничтожно мало по сравнению с ускорением свободного падения g . Поэтому можно считать, что $g_b = g$.

Учитывая (6) и (7), выражение (5) перепишем в виде

$$F_b = \rho_b^0 V_6^0 g + \rho_b^0 V_{\text{кп}}(t)g + \Delta\rho_b(z)V_6^0 g + \Delta\rho_b(z)V_{\text{кп}}(t)g = F_b^0 + \Delta F_b, \quad (8)$$

где $F_b^0 = \rho_b^0 V_6^0 g + \rho_b^0 V_{\text{кп}}(t)g$ – невозмущенная (изменением плотности морской воды) выталкивающая сила; $\Delta F_b = \Delta\rho_b(z)V_6^0 g + \Delta\rho_b(z)V_{\text{кп}}(t)g$ – приращение выталкивающей силы, вызванное влиянием изменения плотности воды и локального ускорения ее частиц, ΔF_b можно назвать суммарной поправкой к архимедовой силе. В свою очередь, как следует из (8),

$$F_b^0 = \rho_b^0 V_6^0 g + \rho_b^0 V_{\text{кп}}(t)g = F_{\text{вк}}^0 + F_y^0(t), \quad (9)$$

где $F_{\text{вк}}^0 = \rho_b^0 V_6^0 g$ – невозмущенная изменением плотности воды выталкивающая сила, создаваемая корпусной частью буя без учета влияния камеры плавучести; $F_y^0(t) = \rho_b^0 V_{\text{кп}}(t)g$ – невозмущенная изменением плотности воды управляющая сила, создаваемая камерой плавучести в момент времени t . Из (8) также следует выражение

$$\Delta F_b = \Delta\rho_b(z)V_6^0 g + \Delta\rho_b(z)V_{\text{кп}}(t)g = \Delta F_{\text{вк}}^\rho + \Delta F_y^\rho, \quad (10)$$

где $\Delta F_{\text{вк}}^\rho = \Delta\rho_b(z)V_6^0 g$ – приращение выталкивающей силы, создаваемой корпусной частью при изменении плотности морской воды; $\Delta F_y^\rho = \Delta\rho_b(z)V_{\text{кп}}(t)g$ – приращение управляющей силы, создаваемой камерой плавучести при изменении плотности морской воды.

Сила гидродинамического сопротивления F_c является результатом возмущений давления, вызванных движением буя в водной среде с различной плотностью, а также напряжений трения. При известном допущении [9], что сила гидродинамического сопротивления пропорциональна по величине квадрату скорости движения ныряющего буя в водной среде и имеет знак, противоположный направлению вектора этой скорости, выражение для вычисления этой силы имеет вид

$$F_c = \frac{C_x S_m w_b}{2g_b} (v - v_{\text{л}}) |v - v_{\text{л}}|, \quad (11)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления; S_m – площадь максимального поперечного сечения корпуса ныряющего буя; v – скорость движения ны-

ряющего буйа в морской воде; v_d – локальная скорость воды; w_B – удельный вес морской воды.

Принимая во внимание, что горизонтальная составляющая скорости морских течений значительно превосходит вертикальную, а также тот факт, что горизонтальное движение ныряющий буй осуществляет вместе с массой окружающей воды, можно пренебречь v_d и g_B , а выражение (11) переписать в виде

$$F_c = \pm \frac{C_x S_m w_B}{2g} v^2(t) = \pm \frac{C_x S_m \rho_B}{2} v^2(t), \quad (12)$$

где $\frac{w_B}{g} = \rho_B$ – плотность морской воды. Здесь знак выбирается в зависимости

от принятой ориентации системы координат. Если направление вниз считать положительным, то при погружении буйа сила гидродинамического сопротивления будет иметь отрицательный знак, так как сила сопротивления противоположна направлению движения. Учитывая зависимость плотности морской воды от глубины, выражение (12) представим в виде

$$F_c^0 + \Delta F_c = \frac{\rho_B^0 C_x S_m}{2} v^2(t) + \frac{\Delta \rho_B(z) C_x S_m}{2} v^2(t). \quad (13)$$

Таким образом, изменение плотности приводит к изменению силы сопротивления, а также к возникновению возмущения в виде поправки к архимедовой силе, состоящей из двух составляющих, одна из которых влияет на характеристики (параметры) объекта управления, а другая – на управляющую силу.

Управляющая сила возникает в результате приращения объема корпусной части за счет изменения объема камеры плавучести $V_{кп}(t)$ в пределах $0 - V_{кп}^{\max}$. Выполненная из эластичного материала, эта камера наполняется гидравлической жидкостью, подаваемой поршневым насосом из внутреннего резервуара, и расширяется в длину, принимая форму цилиндра с диаметром, приблизительно равным диаметру основного корпуса буйа. Поэтому можно считать, что площадь основания этого цилиндра равна площади сечения корпуса буйа S_c , а его текущая длина $l_c(t)$ равна линейному перемещению поршня насоса $l(t)$, так как перекачиваемая гидравлическая жидкость практически не сжимается. В таком случае текущее значение объема камеры плавучести равно

$$V_{кп}(t) = l(t) S_c, \quad (14)$$

где $0 \leq l(t) \leq l^{\max}$ и соответственно $0 \leq V_{кп}(t) \leq V_{кп}^{\max}$. Принимая во внимание (14), сделаем допущение, что конструкция буйа такова, что он будет обладать

нейтральной плавучестью, если $V_{кп}(t) = \frac{V_{кп}^{\max}}{2}$. В таком случае неравенство

для $l(t)$ из (14) примет вид

$$-\frac{l^{\max}}{2} \leq l(t) \leq \frac{l^{\max}}{2}. \quad (15)$$

Далее будем считать, что изменение объема камеры плавучести осуществляется специальным электрогидроприводом с обратной связью. При этом перемещение поршня насоса происходит при помощи винтового (резьбового) вала, приводимого в движение электродвигателем постоянного тока вместе с редуктором, и контролируется отрицательной обратной связью. Если пренебречь постоянной времени электрогидропривода, то уравнение для электрогидравлического устройства, изменяющего плавучесть буйа и тем самым создающего управляющую силу F_y , можно записать в виде

$$l(t) = k_p u(t), \quad (16)$$

где k_p – коэффициент передачи электрогидравлического устройства; $u(t)$ – управляющее напряжение.

Составим уравнение баланса сил, описывающее действующие на буй силы в режиме погружения, в соответствии со вторым законом Ньютона:

$$m\ddot{z}(t) = -F_{\text{вк}}^0 + P - F_c^0 - F_y^0(t) - \Delta F_B - \Delta F_c, \quad (17)$$

где m и P – масса и вес ныряющего буйа; $z(t)$ – глубина погружения; $F_{\text{вк}}^0, F_y^0(t), F_c^0$ – невозмущенные изменением плотности морской воды составляющие сил, действующих на буй; ΔF_c – приращение силы сопротивления при изменении плотности морской воды.

Учитывая (8) – (10), (13) и (16), уравнение (17) приведем к виду

$$\begin{aligned} \ddot{z}(t) = & -\frac{\rho_B^0 V_6^0 g}{m} + \frac{P}{m} - \frac{\rho_B^0 C_x S}{2m} \dot{z}(t)^2 - \frac{\rho_B^0 S g k_p}{m} u(t) - \\ & - \frac{\Delta \rho_B(z) C_x S}{2m} \dot{z}(t)^2 - \frac{\Delta \rho_B(z) V_6^0 g}{m} - \frac{\Delta \rho_B(z) S g k_p}{m} u(t), \end{aligned}$$

или

$$\ddot{z}(t) + \frac{[\rho_B^0 + \Delta \rho_B(z)] C_x S}{2m} \dot{z}(t)^2 = -\frac{[\rho_B^0 + \Delta \rho_B(z)] S g k_p}{m} u(t) - \frac{\Delta \rho_B(z) V_6^0 g}{m} + \frac{P}{m}. \quad (18)$$

Уравнение (18) преобразуем далее следующим образом. Будем считать, что погруженная в воду корпусная часть ныряющего буйа имеет плавучесть, близкую к нулевой (нейтральной). При этом объем подводной части будет равен V_6^0 . В таком случае в соответствии с основным уравнением плавучести масса буйа определится соотношением

$$m = \rho_B V_6^0. \quad (19)$$

Принимая во внимание (19), а также соотношение для силы тяжести $P = mg$, перепишем уравнение (18) в виде

$$\ddot{z}(t) + \frac{[\rho_B^0 + \Delta \rho_B(z)] C_x S}{2\rho_B V_6^0} \dot{z}(t)^2 = -\frac{[\rho_B^0 + \Delta \rho_B(z)] S g k_p}{\rho_B V_6^0} u(t) - \frac{\Delta \rho_B(z) V_6^0 g}{\rho_B V_6^0} + g.$$

Учитывая (16), преобразуем полученный результат:

$$\ddot{z}(t) = -\frac{C_x S}{2V_6^0} \dot{z}(t)^2 - \frac{Sgk_p}{V_6^0} u(t) + \left[1 - \frac{\Delta\rho_B(z)}{\rho_B(z)} \right] g,$$

или

$$\ddot{z}(t) = -a\dot{z}(t)^2 - bu(t) + f_p(z), \quad t \in [t_0, t_f], \quad (20)$$

где

$$a = \frac{C_x S}{2V_6^0}, \quad b = \frac{Sgk_p}{V_6^0}, \quad f_p(z) = \left[1 - \frac{\Delta\rho_B(z)}{\rho_B(z)} \right] g. \quad (21)$$

Нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение (20) с начальными условиями

$$t_0 = 0, \quad z(t_0) = z_0, \quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0, \quad u(t_0) < 0 \quad (22)$$

описывает процесс погружения – всплытия ныряющего буя, который находится под воздействием трех основных сил:

- силы сопротивления движению, представленной первым слагаемым в правой части уравнения (20);
- выталкивающей силы, представленной вторым слагаемым в правой части уравнения (20), выполняющей функцию управления;
- силы, представленной третьим слагаемым в правой части уравнения (20), которая является равнодействующей силы тяжести и составляющей выталкивающей силы, возникающей в результате изменения плотности морской воды. Во время погружения эта равнодействующая играет роль движущей силы.

В уравнении (20) равнодействующая сила $f_p(z)$ зависит от стратификации (вертикального профиля плотности) морской среды и, строго говоря, от времени. Однако, учитывая малую изменчивость во времени этой характеристики, силу $f_p(z)$ можно рассматривать как функцию только глубины z .

Для стадии всплытия уравнение (20) принимает вид

$$\ddot{z}(t) = a\dot{z}(t)^2 - bu(t) + f_p(z), \quad t \in [t_0, t_f] \quad (23)$$

с начальными условиями

$$t_0 = 0, \quad z(t_0) = z_0, \quad \dot{z}(t_0) = \dot{z}_0, \quad u(t_0) > 0. \quad (24)$$

При этом в роли движущей силы выступает выталкивающая сила, которая полностью компенсирует силу тяжести и обеспечивает управляющее воздействие.

Следует отметить, что для уравнений (20) и (23) наряду с начальными условиями и в соответствии с (15) и (16) следует также учитывать неравенство, определяющее ограничения на управляющую функцию:

$$-\frac{u^{\max}}{2} \leq u(t) \leq \frac{u^{\max}}{2}, \quad (25)$$

где $u^{\max} = \frac{l^{\max}}{k_p}$.

Нелинейные дифференциальные уравнения (20) и (23) можно преобразовать к линейным, вводя приближенный параметр v_{cp} – среднюю скорость погружения (всплытия) ныряющего буя – и выполняя замену $\dot{z}(t) = v_{cp}$. В таком случае эти уравнения приводятся к линейным соответственно:

$$\ddot{z}(t) = -a_1 \dot{z}(t) - bu(t) + f_p(z), \quad t \in [t_0, t_f], \quad (26)$$

$$\ddot{z}(t) = a_1 \dot{z}(t) - bu(t) + f_p(z), \quad t \in [t_0, t_f], \quad (27)$$

где $a_1 = \frac{C_x S}{2V_0^0} v_{cp}$, или $a_1 = av_{cp}$.

Линейные неоднородные дифференциальные уравнения (26) и (27) с начальными условиями (22) и (24) соответственно описывают динамику погружения (всплытия) ныряющего буя с регулируемой плавучестью при задании функции $\frac{\Delta\rho_B(z)}{\rho_B(z)}$, характеризующей распределение относительной плотности морской воды по глубине, а также управляющей функции $u(t)$. При этом предполагается, что управление плавучестью происходит за счет малых отклонений поршня насоса, перекачивающего гидравлическую жидкость, от положения, соответствующего нейтральной плавучести. Если плотность морской воды $\rho_B(z) = \rho_B$ величина постоянная, то в уравнениях (26) и (27) функция $f_p(z)$ принимает постоянные значения.

Можно описать процесс погружения ныряющего буя в терминах пространства состояний. Введем вектор состояния $x(t) = [x_1 \ x_2]^T$, где

$$x_1 = z(t), \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{z}(t), \quad t \in [t_0, t_f]. \quad (28)$$

В этом случае уравнение (26) примет вид

$$\dot{x}_2 = -a_1 x_2 - bu(t) + f_p. \quad (29)$$

Принимая $x_1 = z(t)$ за выход системы и объединяя (28), (29), получим искомую модель в пространстве состояний для ныряющего буя с регулируемой плавучестью:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + f \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \right\}, \quad t \in [t_0, t_f], \quad x(t_0) = x_0, \quad (30)$$

где $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a_1 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -b \end{bmatrix}$; $C = [1 \ 0]$; $D = [0]$; $f = \begin{bmatrix} 0 \\ f_p \end{bmatrix}$.

Один из вариантов исполнения корпусной части ныряющего буя имеет следующие размеры:

$$\begin{aligned} L &= 1,2 \text{ м}, \quad L_0 = 1 \text{ м}, \quad l_{\max}(t) = 0,1 \text{ м}, \quad d_{\max} = 0,26 \text{ м}, \\ d_c &= 0,12 \text{ м}, \quad S_m = 0,053 \text{ м}^2, \quad S_c = 0,011 \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (31)$$

Соответствующие коэффициенты для модели (20) определены по формулам (21) и (31):

$$a = 2,042 \text{ м}^{-1}, b = 982,1 \text{ м} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-2} \quad (32)$$

при $k_p = 100 \text{ м} \cdot \text{В}^{-1}$, $C_x = 0,87$. Собственные числа матрицы A линейной модели (30) при $a_1 = av_{\text{ср}}$ ($v_{\text{ср}} = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$) равны:

$$s_1 = 0, s_2 = -2,042.$$

Полученные модели движения буй-профилемера используются во второй части работы для синтеза и моделирования системы управления движением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д. и др.* Океанология. Средства и методы океанологических исследований. – М.: Наука, 2005. – 795 с.
2. *World ocean circulation experiment. Requirements for WOCE hydrographic programme data reporting // WHP office report WHP0 90-1. WOCE report 67/91. Rev. 1.* – Woods Holl, Mass., USA, 1991. – 71 p. (unpublished manuscript).
3. *Global Drifting Buoy Observation. A DBCP Implementation Strategy // UNESCO DBCP Technical Document Series.* – 2000. – № 15. – 35 p.
4. *Данченков М.А., Волков Ю.Н.* Проект *ARGO* – создание Глобальной сети океанографических станций // *Подводные технологии и мир океана.* – 2005. – № 1. – www.maik.online.hog.
5. *ГОСТ ГСССД77-84.* Морская вода. Шкала практической солености 1978 г. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 41 с.
6. *Океанографические таблицы.* – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 477 с.
7. *Степанов В.Н.* Океаносфера. – М.: Мысль, 1983. – 270 с.
8. *IOC, SCOR and IAPSO, 2010: The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties.* Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides, No. 56, UNESCO (English), 196 pp.
9. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.

*Севастопольский национальный технический университет
E-mail: lakrasno@gmail.com,
alchakov@gmail.com

Материал поступил
в редакцию 16.02.11
После доработки 04.04.11

**Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: oaoimhi@inbox.ru

АНОТАЦІЯ На основі аналізу отриманих характеристик режимів руху морських буй-профилемірів при реєстрації вертикальних термохалінних структур (розподілів температури і солоності) морської води показана доцільність автоматичного управління їх рухом. Запропоновані моделі руху поплавкового пристрою з регульованою плавучістю, на основі яких можлива побудова керованих автоматичних буй-профилемірів.

Ключові слова: буй-профилемір, профільні вимірювання, управління рухом, регулятор плавучості, моделювання руху.

ABSTRACT Based on the analysis of the obtained characteristics of the modes of sea buoys-profilemeters' motion during registration of vertical thermohaline structures (temperature and salinity distributions) of seawater, shown is the expediency of automatic control of their movement. The models of movement of a float device with regulated buoyancy are proposed; they permit to construct controlled automatic buoys-profilemeters.

Keywords: buoy-profilemeter, profile measurements, control of movement, buoyancy regulator, modeling of movement.