

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАБОРУ ПРОБ ВОДИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ

Поліщук М.М., Ролік О.І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, 03056 м. Київ

borchiv@ukr.net, arolick@gmail.com

Серед операцій екологічного моніторингу водойм важливу роль має процес забору проб води для подальшого лабораторного аналізу. Вказаний процес реалізують за відповідними методиками та державними стандартами, основною метою яких є забезпечення об'єктивності взяття проб води, що передбачає виконання останньої операції на різних об'єктах глибин водойм з урахуванням швидкості течії, тиску та часу заповнення батометра – пристрою для забору проб води. У якості транспортних засобів використовують як надводні плаваючі засоби, так і безпілотні літальні апарати, останні більш привабливі з точки зору забезпечення екологічної чистоти. Однак жодна з відомих методик не надає можливість моделювання процесу забору проб води з визначенням основних технічних характеристик даного процесу. Вирішенню цього завдання й присвячена запропонована стаття, в якій надана не тільки принципова нова конструкція батометру, встановленого на квадрокоптері, а й аналітичні залежності точного розрахунку глибини його занурення завдяки встановленню на приводі спускання енкодера – пристрою для обчислення кількості обертів тросової лебідки, а також визначення часу заповнення батометра водою та траєкторії його переміщення з урахуванням швидкості течії та тиску на різних об'єктах глибин водойм. Також в статті наведені графоаналітичні залежності у вигляді діаграм взаємного зв'язку означених вище параметрів та аналіз результатів моделювання. Досліджено процеси занурення та наповнення пристрою для забору проб води з урахуванням співвідношення його ваги та сили Архімеда, що протидіє зануренню батометра, надані відповідні аналітичні залежності. Головною мотивацією проведених досліджень є підвищення об'єктивності забору проб води та забезпечення можливості прогнозування означеного процесу. В остаточному підсумку розроблена вперше аналітична модель процесу забору проб води надасть можливість науковцям та інженерам в сфері моніторингу екологічного стану різноманітних водойм створювати аналогічне обладнання залежно від інших виробничих завдань. *Ключові слова:* відбір проб води, моніторинг водойм, батометри, квадрокоптер, моделювання процесів.

Modeling the process of water sampling for ecological monitoring of water bodies. Polishchuk M., Rolik O.

Among the operations of ecological monitoring of water bodies, the process of taking water samples for subsequent laboratory analysis plays an important role. This process is implemented according to the relevant methods and state standards, the main purpose of which is to ensure the objectivity of water sampling, which involves performing the last operation at different depths of water bodies, taking into account the flow rate, pressure and filling time of the bathometer – a device for taking water samples. Both surface floating vehicles and unmanned aerial vehicles are used as vehicles, the latter being more attractive from the point of view of ensuring environmental cleanliness. However, none of the known methods provides the possibility of modeling the process of taking water samples with the determination of the main technical characteristics of this process. The proposed article is devoted to solving this problem, in which not only a fundamentally new design of a bathometer mounted on a quadcopter is provided, but also analytical dependencies for the accurate calculation of its immersion depth due to the installation of an encoder on the descent drive – a device for calculating the number of revolutions of a cable winch, as well as determining the time of filling the bathometer with water and the trajectory of its movement, taking into account the flow rate and pressure at different depths of water bodies. The article also presents graph-analytical dependencies in the form of diagrams of the mutual connection of the above-mentioned parameters and an analysis of the modeling results. The processes of immersion and filling of the device for taking water samples are investigated, taking into account the ratio of its weight and the Archimedes force that counteracts the immersion of the bathometer, and the corresponding analytical dependencies are provided. The main motivation for the conducted research is to increase the objectivity of water sampling and ensure the possibility of predicting the specified process. Ultimately, the first-ever developed analytical model of the water sampling process will enable scientists and engineers in the field of monitoring the ecological state of various water bodies to create similar equipment depending on other production tasks. *Key words:* water sampling, reservoir monitoring, bathometer, quadcopter, process modeling.

Постановка проблеми. Для забезпечення об'єктивності взяття проб води та можливості прогнозування даного процесу не достатньо застосування різноманітних транспортних засобів та ефективних конструкцій батометрів, необхідно мати у своєму розпорядженні аналітичну модель сукупності операцій, що складають процес забору проб води з метою екологічного моніторингу стану різноманітних водойм – річок, озер, водосховищ тощо. Відсутність аналітичної моделі, яка б пов'язувала технічні пара-

метри вказаного процесу, а саме: розрахунку глибини занурення батометра, часу заповнення водою та траєкторії його переміщення з урахуванням швидкості течії та тиску на різних об'єктах глибин водойм, перешкоджає прогнозуванню процесу забору проб води та забезпеченню його об'єктивності.

Актуальність дослідження. Не дивлячись на різноманіття методик взяття проб води, і навіть підкріплених відповідними стандартами, на сьогоднішній стан відсутня математична модель, яка б

об'єднувала всі технічні параметри означеного процесу. Причому, вказана аналітична модель повинна об'єднувати як технічні характеристики пристроїв для забору проб води, так і властивості тої чи іншої водойми, а саме глибин, швидкості течії та змінного тиску на різних об'єктах водойми. Необхідність вирішення означених завдань підтверджує актуальність досліджень в даній галузі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана відповідно до науково-технічної теми «Інтелектуальні високопродуктивні технології управління технічними системами». Державний реєстраційний номер роботи – 0121U110810, дата реєстрації 26.04.2021р. Дослідження проведені на базі лабораторії Інформаційних технологій та системи управління IT-інфраструктурами кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою уточнення напрямку досліджень та вибору інструментарію побудови аналітичної моделі слід розглянути найбільш суттєві досягнення в даній галузі. В роботах [1, 2] відмічено, що відбір проб води для аналізу (як хімічного, так і бактеріологічного) проводиться згідно з розробленими Державними стандартами. Викладено ряд вимог і рекомендацій, що мають загальний характер, інші стосуються конкретного виду аналізів та типу джерел. Але в даних роботах відсутнє моделювання процесу забору проб води. Власне методики відбору проб води для бактеріологічного і санітарно-хімічного дослідження достатньо ретельно викладені в роботах [3, 4], але також без надання аналітичної моделі вказаного процесу. Оригінальна конструкція пристрою для забору проб води – батометра, представлена в роботі [5], де для підвищення об'єктивності забору проб води пропонується використання безпілотного літального апарату, тобто дрону. Більш розлого відбір проб води, процедура, ціль, методи та опис обладнання надані в статті [6]. Кінематичний та динамічний аналіз руху батометра, встановленого на Кардановому підвісі, викладено в публікації [7], де надається можливість дослідити процес орієнтації пристрою для забору проб води. Дослідження [8] підтверджують доцільність застосування дронів для збору гідрохімічних даних із прісноводних середовищ для біологічного й фізико-хімічного відбору проб води.

Не аби який інтерес викликає застосування методу, так званої, ортогональної мозаїки, яка створюється безпілотним літальним апаратом [9] для оцінки кількості зібраної дощової води. З метою поліпшення якості води для землеробства в дослідженнях [10] запропоновано використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу якості води в зрошувальних каналах. Однак у розглянутих роботах відсутні аналітичні моделі власне про-

цесу забору проб води. На відміну від попередніх досліджень в роботі [11] наведені аналітичні залежності, що пов'язують такі параметри забору проб води як довжина, ширина і швидкість потоку води, а також температура та тиск водного потоку, але без дослідження процесу занурення пристрою для забору води, тобто батометра, та його наповнення. Методична робота [12] надає можливість систематизувати процеси збору, збереження зразків води та їх польовий аналіз. Таким чином, власне завдання моделювання процесу забору проб води для екологічного моніторингу стану різноманітних водойм залишається актуальною.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Серед різноманіття методик забору проб води відсутні пропозиції щодо побудови аналітичної моделі в сукупності технічних параметрів пристроїв для забору проб води та поточних характеристик на різних горизонтах глибин водойм. Також відсутні графоаналітичні залежності, наприклад, у вигляді графіків чи діаграм, глибини та швидкості занурення батометра від часу та траєкторії його руху на різних горизонтах глибин водойм, що вкрай необхідно для прогнозування та забезпечення об'єктивності взяття проб води.

Новизна. До аспекту інженерної новизни відноситься принципово нова конструкція батометра із сервоприводами заслінок отворів для забору проб води, а також спосіб точного вимірювання глибини занурення батометра у водойму. Наукову новизну досліджень складають вперше отриманні аналітичні залежності траєкторії руху, швидкості та часу заповнення батометра залежно від швидкості течії, тиску та глибини на різних об'єктах водойми, кінематична та динамічна моделі функціонування пристрою для забору проб води та графоаналітичні залежності, що отримані в результаті моделювання процесу відбору проб води.

Методологічне або загальнонаукове значення. Вперше запропонована математична модель у вигляді сукупності аналітичних та графічних залежностей параметрів пристрою для забору проб води та характеристик потоку водойми надає можливість дослідникам і інженерам здійснювати моделювання та прогнозування процесу забору проб води, а також реалізовувати синтез аналогічного технологічного оснащення дронів для екологічного моніторингу водойм відповідно до інших виробничих завдань.

Викладення основного матеріалу. Спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [5] та алгоритм функціонування пристрою для забору проб, що полегшить розуміння нижче наданої математичної моделі.

Конструкція пристрою для забору проб. На рис. 1 надано загальний вигляд дрону для забору проб води. На нижній частині квадрокоптера встанов-

лену лебідку, яка має привід у вигляді електричного двигуна з енкодером для обрахування кількості обертів лебідки, а значить і величини заглиблення у воду батометра для забору проб води. Принципово нова конструкція технологічного оснащення дрону, повздовжній переріз якого показано на рис. 2, містить дві коаксіальні циліндричні камери, що по торцям закриті кришками з ущільненням. В цих кришках виконані отвори для забору води, відкриття і закриття яких здійснюється 3-х пелюстковими заслінками з приводом від електродвигунів. На квадрокоптері встановлено лебідку з барабаном, що має привід від електродвигуна з енкодером – пристроєм для перетворення кута обороту барабана в електричний сигнал, наприклад, якщо розрядність енкодера складає 360 імпульсів на один оберт вала двигуна, то це означає, що будемо отримувати 1 імпульс на 1 градус обороту барабана лебідки.



Рис. 1. Дрон для забору проб води

На барабані лебідки в кілька шарів намотано трос, що з'єднаний з батометром – ємністю для забору порції води для подальшого лабораторного аналізу. Намотка троса на барабан в кілька шарів передбачає такі параметри (див. рис. 2): d – діаметр по осі витка троса на барабані; D_1 – діаметр вала барабана; s – крок намотки витків троса; n – кількість обертів барабану лебідки, що вимірюється енкодером.

Власне батометр має зовнішній циліндр та внутрішній герметичний циліндр, що закріплено на стійці. На торцях зовнішнього циліндра з обох боків виконано по три отвори діаметром d_2 для забору проб води. Ці отвори відкриваються і закриваються заслінками, що мають кутовий привід повороту на 45 град. від сервоприводів. Пробка служить для сливу води з батометра в лабораторії.

Дрон прилітає на точку водойми для забору проби води і після включення двигуна лебідки опускають батометр у воду. При цьому обчислення величини L

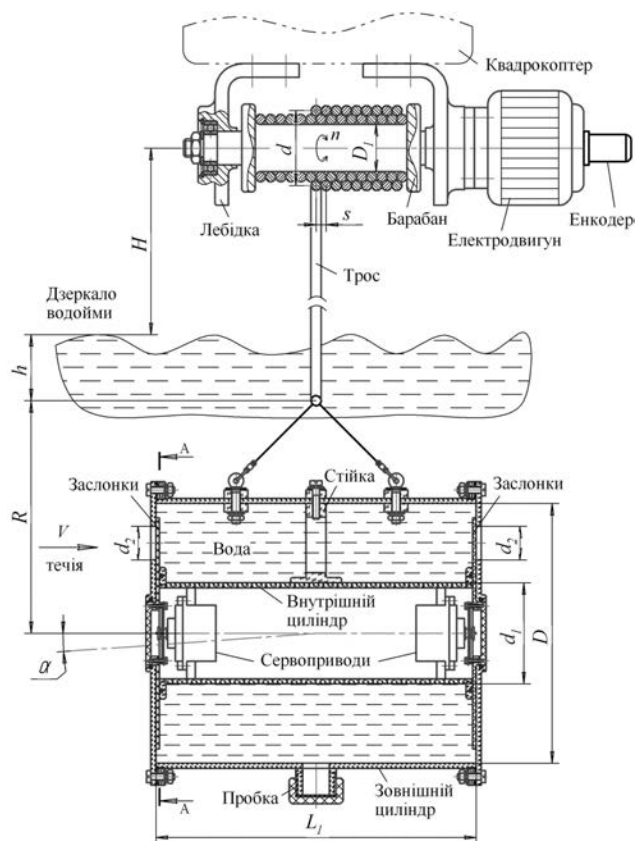


Рис. 2. Конструкція технологічного оснащення дрону (див. перетин А-А на рис. 1)

опускання батометру у воду здійснюють за формулою $L = H + h = H + n\sqrt{s^2 + (\pi d)^2} + R$, де H – висота зависання пристрою над поверхнею води (див. рис. 2); h – величина заглиблення батометра до відкриття його кришок; n – кількість обертів барабану лебідки; s – крок намотки витків троса; d – діаметр по осі витка троса на барабані; π – математична константа; R – відстань від осі симетрії батометра до точки його кріплення до троса.

Після досягнення заданої глибини, яку визначають за вказаною формулою, включають сервоприводи, які повертають заслінки на певний кут (наприклад, на 45 град.) і тим самим відкривають отвори d_2 (по три штуки з кожної сторони). За певний час t (який визначено далі) батометр заповнюється водою, після чого здійснюють реверс сервоприводів і заслінки закривають отвори d_2 , далі батометр підіймають у вихідне положення і доставляють в лабораторію.

Математична модель процесу забору проб води. Математична модель відображає параметричний синтез процесу занурення батометра у водойму і містить вперше отримані аналітичні залежності траєкторії руху, швидкості та часу заповнення батометра залежно від швидкості течії, тиску та глибини на різних об'єктах водойми.

Процес занурення батометра. Для занурення у рідину батометра масою m , що має форму круго-

вого циліндра діаметром D і довжиною L_1 , повинна виконуватись умова: вага батометра $G = mg$ має бути більшою за силу Архімеда, що виштовхує батометр, $G_A = \rho g \frac{\pi D^2}{4} L_1$ (де ρ – густина рідини, для води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння). Надалі, уважаємо, що умова виконується, тобто

$$G > G_A. \quad (1)$$

Батометр кріпиться до троса і, змінюючи натяг троса, можна регулювати процес занурення приладу до необхідної глибини, але при цьому час занурення буде значно більший, ніж при нульовому зусиллі у тросі, коли занурення відбувається під дією власної ваги батометра. Виберемо початок системи координат на поверхні водойми. Вісь Oy направимо вертикально вниз, а вісь Ox у напрямку течії водойми. Відлік ординати будемо проводити від поверхні водойми до нижнього краю циліндра (рис. 3, а).

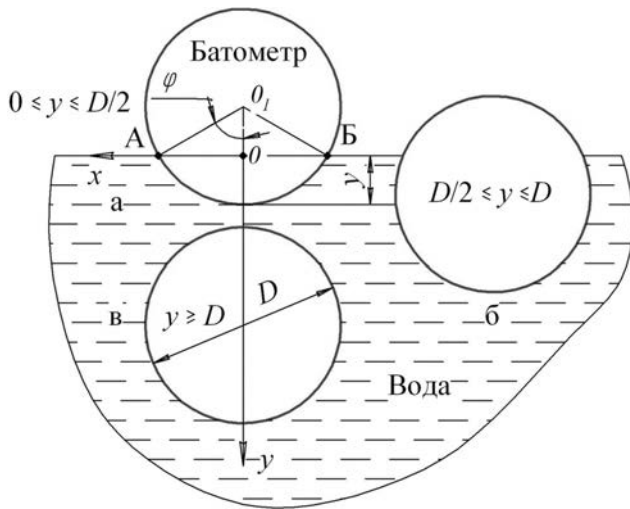


Рис. 3. Етапи занурення батометра у водойму

Під час руху на тіло (тобто батометр) будуть діяти три вертикальні сили: сила власної ваги батометра, сила Архімеда, що виштовхує батометр, і сила R_f опору середовища, яка залежить від квадрату швидкості u^2 занурення, густини рідини ρ і площі S_y характерного перерізу перпендикулярного до вісі Oy , а саме $R_f = k\rho S_y u^2$, де k – безрозмірний коефіцієнт, який визначається з експерименту.

Розглянемо три етапи занурення. Першому етапу руху відповідає положення батометра, що показано на рис.3 (а), коли $0 \leq y \leq D/2$. Диференціальне рівняння руху тіла, тобто батометра, матиме вигляд

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho g V_y - k\rho S_y u^2, \quad (2)$$

де V_y – об'єм витісненої рідини; S_y – площа характерного перерізу; k – безрозмірний коефіцієнт, який визначається з експерименту, $k = \frac{(mg - \rho g V)}{u^2 \rho S_y}$; $u = \frac{dy}{dt}$ – швидкість занурення тіла; ρ – густина рідини; об'єм батометра $V = \frac{\pi D^2}{4} L_1$. З рис.3 (а) видно, що $OO_1 = D/2 - y$,

$$\text{тоді } OA = OB = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - y\right)^2};$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{OO_1}{D/2}\right) = \arccos\left(\frac{D-2y}{D}\right), \text{ а також:}$$

$$V_y = \left(\varphi \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} 2OA \times OO_1\right) L_1, \quad (3)$$

$$S_y = 2OA \times L_1 = 2L_1 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - y\right)^2}. \quad (4)$$

Диференціальне рівняння (2) можна розв'язувати числовими методами при початкових умовах $t=0, u=0, y=0$. Наприкінці першого етапу $t=t_1, u=u_1, y=D/2$.

На другому етапі (рис. 3, б) ордината змінюється у межах $D/2 \leq y \leq D$. Запишемо диференціальне рівняння руху тіла на другому етапі

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho g V_y - k\rho S_o u^2, \quad (5)$$

де $S_o = DL_1$, а V_y обчислюється за тією ж формулою (3) тільки при інших значеннях y .

Диференціальне рівняння (5) також розв'язується числовими методами при початкових умовах $t=t_1, u=u_1, y=D/2$. Наприкінці другого етапу $t=t_2, u=u_2, y=D$.

На третьому етапі (рис. 3, в) ордината $y \geq D$, тобто батометр повністю занурений у рідину. Запишемо диференціальне рівняння руху тіла на третьому етапі

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho g V - k\rho S_o u^2, \quad (6)$$

$$\text{де } V = \frac{\pi D^2}{4} L_1.$$

Диференціальне рівняння (6) розв'яжемо аналітично при початкових умовах $t=t_2, u=u_2, y=D$. Ураховуємо, що $\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{du}{dt}$, підставляємо в рівняння (6), відокремлюємо змінні і інтегруємо

$$\int_{t_2}^t dt = \int_{u_2}^u \frac{m du}{mg - \rho g V - k\rho S_o u^2}. \quad (7)$$

Після інтегрування (7) одержимо рівність

$$t = t_2 + \frac{m}{2\sqrt{g(m - \rho V)k\rho S}} \ln\left(\frac{q_1(u)q_2(u_2)}{q_1(u_2)q_2(u)}\right), \quad (8)$$

де позначено:

$$q_1(u) = \sqrt{g(m - \rho V)} + \sqrt{k\rho S} u; \quad q_2(u) = \sqrt{g(m - \rho V)} - \sqrt{k\rho S} u.$$

З іншого боку $\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{du}{dt} = u \frac{du}{dy}$. Знову підставляємо в диференціальне рівняння (6), відокремлюємо змінні і інтегруємо

$$\int_D^y dy = \int_{u_2}^u \frac{m u du}{mg - \rho g V - k\rho S_o u^2}. \quad (9)$$

Після інтегрування отримаємо рівність

$$y - D = -\frac{m}{2k\rho S_o} \ln \left(\frac{mg - \rho gV - k\rho S_o u^2}{mg - \rho gV - k\rho S_o u_2^2} \right). \quad (10)$$

Потенціюємо рівність (10) і розв'яжемо її відносно швидкості

$$u = \sqrt{\frac{1}{k\rho S_o} (mg - \rho gV - (mg - \rho gV - k\rho S_o u_2^2)e^{-q(y)})}, \quad (11)$$

де $q(y) = 2k\rho S_o(y - D) / m$.

Водойма має швидкість течії v_1 , а тому батометр буде переміщатись і у напрямку вісі Ox , а саме $x = v_1 t$. Розрахунки проводились при таких значеннях величин: $m = 2 \text{ кг}$, $D = 0.12 \text{ м}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$, $L_1 = 0.1 \text{ м}$, $H = 1 \text{ м}$, $v_1 = 3 \text{ м/с}$, $d_1 = 0.4D$, $d_2 = 0.02 \text{ м}$.

Як видно з наведених нижче графіків безрозмірний коефіцієнт k , який враховує співвідношення густини рідини, швидкості занурення та об'єму батометра (див. формулу (2)), суттєво впливає на залежності глибини, швидкості занурення та переміщення батометра від часу. На графіках рис. 4, 5, 6 пунктирні лінії відповідають значенню $k = 0.001$, суцільні лінії – значенню $k = 0.2$, штрих-пунктирні – значенню $k = 0.3$.

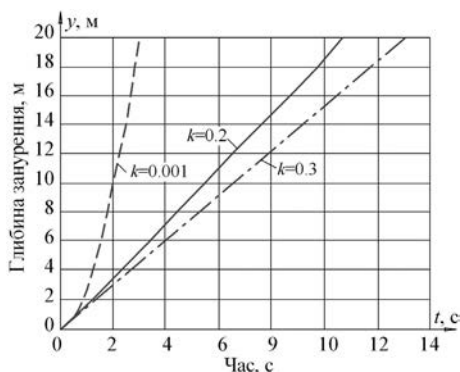


Рис. 4. Залежність глибини занурення батометру від часу

Так з графіку рис. 4 видно, що при досить малих значеннях вказаного коефіцієнту процес занурення батометру значно пришвидшується і, навпаки, при збільшенні – суттєво уповільнюється.

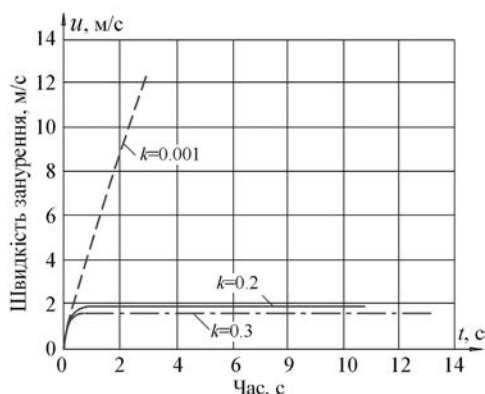


Рис. 5. Залежність швидкості занурення батометру від часу

На цьому графіку (рис. 5) видно, що при співвідношеннях густини рідини, швидкості занурення та об'єму батометра, коли $k = 0.2 \dots 0.3$, швидкість занурення батометра стабілізується, що вкрай важливо для програмування приводу лебідки, на тросі якої встановлено батометр.

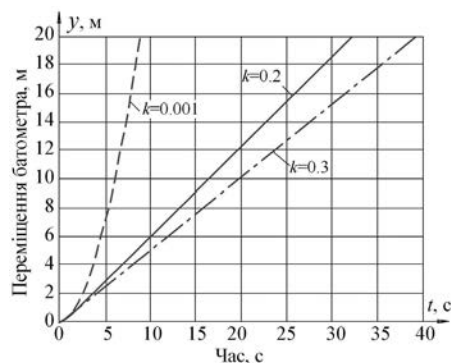


Рис. 6. Траєкторія руху батометра

І нарешті, графік рис. 6 ілюструє залежність переміщення батометра від часу, а саме: при малих значеннях вказаного коефіцієнту переміщення батометру значно пришвидшується і, навпаки, при збільшенні – суттєво уповільнюється.

Досить часто вважають, що сила опору рідини пропорційна першій степені швидкості тіла, тобто $R_1 = k_1 \rho S_o u$ (тільки тут коефіцієнт k_1 має розмірність м/с), причому $k_1 = \frac{(mg - \rho gV)}{u \rho S_o}$. Тоді диференціальне рівняння для третього етапу мало б вигляд

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u. \quad (12)$$

Розв'язавши рівняння (12), отримаємо залежності для часу t заповнення батометра та його переміщення y :

$$t = t_2 - \frac{m}{k_1 \rho S_o} \ln \left(\frac{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u}{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u_2} \right). \quad (13)$$

$$y = D + \frac{m}{(k_1 \rho S_o)} (u_2 - u) + \frac{mg - \rho gV}{(k_1 \rho S_o)^2} \ln \left(\frac{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u_2}{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u} \right). \quad (14)$$

З рівності (13) знаходимо швидкість руху батометра як функцію часу

$$u = \frac{1}{k_1 \rho S_o} (mg - \rho gV - (mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u_2) e^{-q_4}), \quad (15)$$

$$\text{де } q_4 = \frac{k_1 \rho S_o (t - t_2)}{m}.$$

На графіках (рис. 7, 8, 9) пунктирні лінії відповідають значенню $k_1 = 0.001 \text{ м/с}$, суцільні лінії – значенню $k_1 = 0.2 \text{ м/с}$, штрих-пунктирні – значенню $k_1 = 0.3 \text{ м/с}$. Аналогічно вказаним вище ефектам з цих графіків видно наскільки суттєво співвідношення густини рідини, швидкості занурення та об'єму батометра, що враховується означеним коефіцієнтом, впливає на зміни глибини та швидкості занурення батометра, а також на траєкторію його руху. Порівнюючи графіки рис. 4 та рис. 7, становиться очевидним, що при вико-

ристанні рівняння (12) загальний час занурення батометра скорочується з 14 с до 9 с, тобто майже 35%, що суттєво для економії ресурсу автономних енергетичних джерел безпілотних літальних апаратів.

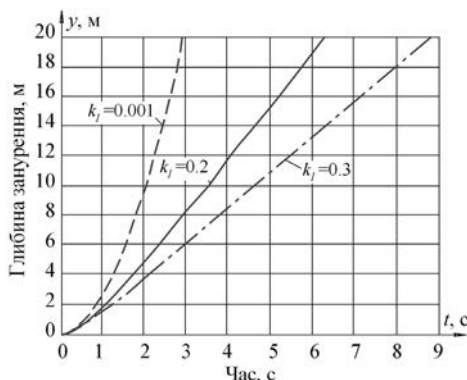


Рис. 7. Залежність глибини занурення батометру від часу

Але стабілізація швидкості занурення батометра, як це ілюструє графік рис. 8, настає значно пізніше, що також слід враховувати при програмуванні приладу лебідки, що опускає батометр у воду.

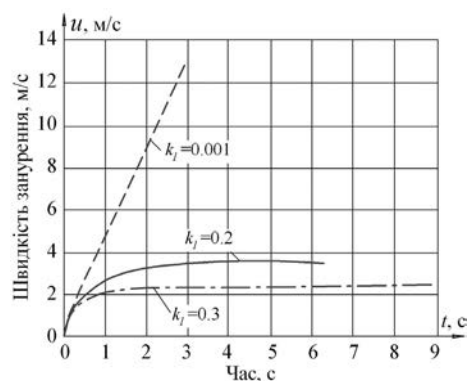


Рис. 8. Залежність швидкості занурення батометра від часу

Аналогічні ефекти спостерігаються на траєкторії руху батометра (рис. 9), тобто при малих значеннях коефіцієнта $k=0.001$ переміщення батометра пришвидшується, а при суттєво більших значеннях $k=0.2 \dots 0.3$ – уповільнюється.

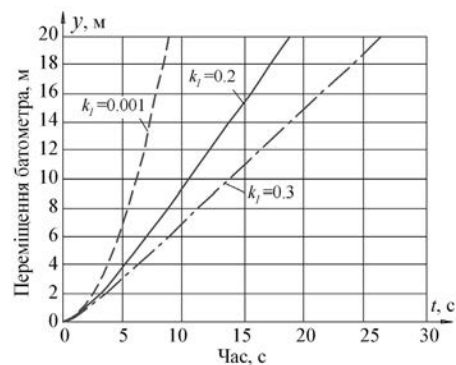


Рис. 9. Траєкторія руху батометра

Необхідна довжина троса, на якому встановлено батометр, залежить і від глибини занурення батометра, і від швидкості течії, а саме:

$$L_{TP} \geq \sqrt{(H + y_{\max})^2 + (v_1 t_{\max})^2}. \quad (16)$$

Час підйому приладу залежить від кутової швидкості ω (рад / с) барабана лебідки (див. рис. 2)

$$t_4 = \frac{2\sqrt{(H + y_{\text{зан.}})^2 + (v_1 t_{\text{зан.}})^2}}{\omega d}. \quad (17)$$

Процес наповнення батометра рідиною. Уважимо, що після досягнення приладом запланованої глибини трос стопориться, щоб течія не зносила прилад далі. Як відомо з гідравліки, розхід Q рідини за одиницю часу через отвір площею S виражається формулою

$$Q = \mu S \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}}, \quad (18)$$

де коефіцієнт тертя $\mu = 0.6$, p_1 , p_2 – значення тисків, ρ – густина рідини.

В даному випадку для трьох отворів потрібно врахувати ще тиск течії, тобто $p_1 = v_1^2 \rho + p_a + \gamma p g$, а для інших трьох отворів $p_1 = p_a + \gamma p g$ (p_a – атмосферний тиск). Уважимо, що тиск p_2 зростає від p_a пропорційно заповненому об'єму, а саме:

$$p_2 = p_a + \rho g y \frac{V_1}{V_o}, \quad (19)$$

де V_1 – змінне значення об'єму рідини ($0 \leq V_1 \leq V_o$), $V_o = \frac{\pi(D^2 - d_1^2)}{4} L_1$.

Підставимо вирази для тисків у вираз (18)

$$Q = 3\mu S_1 \sqrt{2} (\sqrt{v_1^2 + \gamma g(1 - V_1/V_o)} + \sqrt{\gamma g(1 - V_1/V_o)}), \quad (20)$$

де $S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ – площа одного отвору.

Тоді процес наповнення батометра можна описати диференціальним рівнянням

$$\frac{dV_1}{dt} = 3\mu S_1 \sqrt{2} (\sqrt{v_1^2 + \gamma g(1 - V_1/V_o)} + \sqrt{\gamma g(1 - V_1/V_o)}). \quad (21)$$

Відокремлюємо змінні і інтегруємо

$$\int_0^{V_o} dt = \frac{1}{3\mu S_1 \sqrt{2}} \int_0^{V_o} \frac{dV_1}{\sqrt{v_1^2 + \gamma g(1 - V_1/V_o)} + \sqrt{\gamma g(1 - V_1/V_o)}}. \quad (22)$$

Після інтегрування одержимо час наповнення батометра залежно від швидкості течії і глибини занурення

$$t = \frac{V_o \sqrt{2}}{9\mu S_1 g v_1^2} (\sqrt{(v_1^2 + \gamma g)^3} - v_1^3 - \sqrt{(\gamma g)^3}). \quad (23)$$

На основі формули (23) побудовані графіки на рис. 10, де пунктирна лінія відповідає швидкості течії $v_1 = 1$ м/с; суцільна лінія – $v_1 = 3$ м/с; штрих-пунктирна лінія – $v_1 = 5$ м/с, суцільна чорна – $v_1 = 0.01$ м/с. Як видно з рис. 10 при збільшенні глибини занурення батометра час його наповнення значно зменшується, що пояснюється значно більшим тиском на великих глибинах водою.

У разі наближення швидкості течії до нуля, тобто коли у формулі (23) при $v_1 \rightarrow 0$ і чисельник, і знаменник прямують до нуля, а тому потрібно знаходити границю

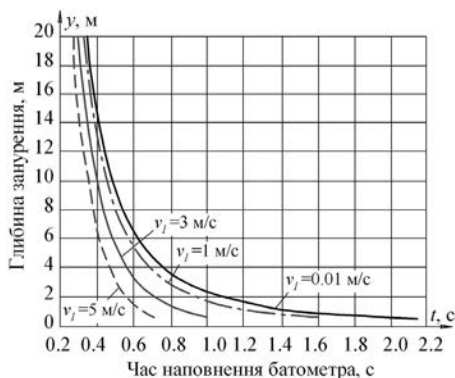


Рис. 10. Залежність часу наповнення батометра від глибини занурення і швидкості течії у водоймі

$$t = \frac{V_0 \sqrt{2}}{9\mu S_1 g y} \lim_{v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\sqrt{(v_1^2 + yg)^3} - v_1^3 - \sqrt{(yg)^3}}{v_1^2} \right).$$

Для знаходження границі використаємо правило Лопітала, згідно якому потрібно взяти похідні по змінній v_i окремо від чисельника і знаменника, тобто

$$t = \frac{V_0 \sqrt{2}}{9\mu S_1 g y} \lim_{v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{3}{2} \sqrt{(v_1^2 + yg)} 2v_1 - 3v_1^2}{2v_1} \right).$$

Після скорочення на v_i і підстановки $v_i = 0$ отримаємо формулу для часу заповнення батометра при відсутності течії у водоймі

$$t = \frac{V_0 \sqrt{2}}{6\mu S_1 \sqrt{gy}}.$$

Отже, при заданій глибині занурення сумарний час взяття проб води складається з часу занурення (визначається за графіком рис. 4), часу наповнення (визначається за графіком рис. 10) і часу підйому, що визначається за формулою (17).

Головні висновки. Оснащення батометра заслінками із сервоприводом дозволяє, не тільки здійснювати дистанційне керування відкриттям і закриттям отворів для забору води, а ще й уникнути турбулентності потоку заходу води в батометр і наблизити режим потоку води, що забирається в батометр, до стану близького до ламінарного потоку.

Розроблена математична модель дозволяє здійснювати аналіз і прогнозування процесу забору проб води в сукупності технічних параметрів батометрів та поточних характеристик потоку на різних об'єктах глибини водойм.

Надані графоаналітичні залежності глибини занурення батометра, часу заповнення його водою та траєкторії переміщення з урахуванням швидкості течії та тиску на різних об'єктах глибини водойм забезпечують можливість прогнозування процесу забору проб води та сприяють підвищенню об'єктивності означеного процесу.

Досліджено процеси занурення та наповнення пристрою для забору проб води з урахуванням співвідношення його ваги та сили Архімеда, що протидіє зануренню батометра, надані відповідні аналітичні залежності.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання безпілотних літальних апаратів у вигляді квадрокоптерів чи мультикоптерів для виконання операцій екологічного моніторингу є перспективним напрямком, оскільки запобігає забрудненню навколишнього середовища. В остаточному підсумку розроблена вперше аналітична модель процесу забору проб води дозволяє не тільки здійснювати імітаційне моделювання означеного процесу, що сприяє зменшенню собівартості технологічних операцій моніторингу водойм, але й надасть можливість науковцям та інженерам в сфері моніторингу екологічного стану різноманітних водойм створювати аналогічне обладнання залежно від інших виробничих завдань.

Дослідження виконувались у межах проекту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

Література

1. Кримець Г. Відбір проб води для аналізу. УкрХімАналіз. Київ, 2018. URL: <https://himanaliz.ua/uk/vidbir-prob-vodi-dlya-analizu/> (дата звернення: 25.01.2025).
2. Опис відбору зразків. Osnova. Дніпро, 2025. URL: <https://chemosnova.com.ua/ua/poslugi/opis-vidbiru-zrazkiv/>
3. Методичні вказівки до самостійної роботи та практичних занять з дисципліни «Санітарно-гігієнічні основи водопостачання та водовідведення» (для студентів 6 курсу денної форми навчання спеціальності 8.17020201 – Охорона праці (за галузями)) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова; уклад.: О. О. Ковальова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 55 с.
4. Quick Guide to Drinking Water Sample Collection. United States Region 8 Laboratory September 2016. Environmental 16194 W. 45th Dr. Protection Agency Golden, CO 80403. 2016, p. 20.
5. Ролік О.І., Поліщук М.М. Дрон для забору проб води. Заявка на видачу патенту України на винахід; МПК В64С 39/02, № а202304700. Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. Дата реєстрації 05.10.2023, 12 с.
6. Mir Zafarullah. Water sampling, procedure, purpose, techniques and equipments. Pakistan, Aug. 20, 2017, p. 26.
7. Polishchuk M., Rolik O. Improvement of Technological Equipment Drone for Water Sampling: Design and Modeling. FME Transactions, Volume 52, No 2, 2024, pp. 237-245. doi: 10.5937/fme2402237P
8. Heather Lally, Ian O'Connor, Liam Broderick, Mark Broderick, Olaf Jensen and Conor Graham. Assessing the Potential of Drones to Take Water Samples and Physico-chemical Data from Open Lakes. EPA RESEARCH PROGRAMME 2014–2020. Published by the Environmental Protection Agency, Ireland ISBN: 978-1-84095-942-0. P. 40.
9. Harish Puppala; Pranav R. T. Peddinti; Byungmin Kim; Manoj Kumar Arora. Unmanned aerial vehicles for planning rooftop rainwater harvesting systems: a case study from Gurgaon, India. Water Supply (2023) 23 (5): 2014–2030 <https://doi.org/10.2166/ws.2023.105>
10. Tafadzwanashe Mabhaudhi, Tsitsi Bangira, Mbulisi Sibanda, and Olufunke Cofie. Use of drones to monitor water availability and quality in irrigation canals and reservoirs for improving water productivity and enhancing precision agriculture in smallholder farms. Methodological protocol for monitoring water quality and quantity December 2022, <https://www.iwmi.cgiar.org/>
11. Gnanavelu A. Water sampling and preservation techniques. CPCB, Bangalore, 2024, p. 23–25.
12. G.K. Khadse. Collection and Preservation of Samples and Field Analysis Presented at: Training Programme on QAQC in Water Quality Monitoring and Assessment, Oct. 21-22, 2010, 32 p.