

УДК 626.83:532

<https://doi.org/10.31713/vt420253>

**Богуш О. О.** [1; ORCID ID: 0009-0007-3268-5437],

аспірант,

**Хлапук М. М.** [1; ORCID ID: 0000-0001-5469-4181],

д.т.н., професор

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДКРИТТЯ ЗАТВОРА В ГІДРОАВТОМАТИЧНОМУ РЕГУЛЯТОРІ РІВНЯ ВОДИ

У статті представлено результати теоретичних досліджень процесу відкриття поплавка-затвора гідроавтоматичного регулятора рівня води. Розроблено математичну модель, що описує зміну об'єму води у поплавку-затворі у часі та дозволяє визначити час процесу відкриття. Основну увагу приділено впливу діаметра вхідного патрубку, початкової глибини занурення поплавка та матеріалу його виготовлення. За результатами моделювання Виведено аналітичне рівняння для визначення часу відкриття затвора  $t_1$ , що показує інтервал від моменту спрацювання датчика-прискорювача до початку підйому поплавка-затвора. Проведено порівняльний аналіз характеристик пластикового та металевго поплавків-затворів при різних глибинах початкового занурення  $h_2$  і діаметрах вхідного патрубку  $d_1$ . У ході проведення дослідження встановлено закономірності впливу діаметра вхідного патрубку та глибини занурення на швидкодію регулятора. Порівняння металевго та пластикового поплавків показало, що пластиковий має менший час спрацювання, що зумовлено меншою масою та більшою плавучістю. Отримані залежності можуть бути використані для вдосконалення конструкцій регуляторів рівня води та підвищення ефективності їх роботи в осушувально-зволожувальних системах.

**Ключові слова:** гідроавтоматичний регулятор рівня; поплавок-затвор; час відкриття; математична модель; діаметр патрубка; осушувально-зволожувальна система; датчик-прискорювач; швидкодія.

**Вступ.** Сучасні світові тенденції диктують вимоги до впровадження автоматизованих систем та мають на меті покращувати вже наявні наукові рішення задля підвищення ефективності та зменшення рівня витрат. Не винятком є і гідравлічні моделі регулятора [1].

Досліджували, і, свого часу працювали над розробкою гідроавтоматичних регулюючих пристроїв, які використовуються на



осушувально-зволожувальних системах, та вивчали проблеми прийняття рішень в задачах управління зрошенням вітчизняні вчені, а саме: М.М. Хлапук, А.В. Яцик, О. М. Ніколайчук, П.І. Коваленко, М.О. Лазарчук, В.Й. Пастушенко, В.В. Чернюк, А.М. Рокочинський, С.К. Матус, Б.О. Баховець, О.І. Жовтоног та Філіпенко Л.А., П.І. Ковальчук, О.М. Наумчук, О.Я. Олійник, А.Ф. Рубан, Б.І. Чалий, О.І. Тищенко, та інші [2–6].

Принцип дії ґрунтується на використанні енергії самого потоку води, сили тяжіння, тиску та плавучості, що забезпечує автономність, надійність і енергоефективність у роботі [7].

**Метою досліджень:** є визначення і порівняння часу відкриття затвора регулятора рівня води час  $t_1$  – це проміжок від моменту спрацювання датчика-прискорювача до того коли поплавко-затвор регулятора почав спливати і відкривати водозливний лоток. Основну увагу приділяють діаметру вхідного патрубку  $d_1$  тому що він напряду впливає на тривалість цього процесу.

Для дослідження було вибрано чотири значення вхідного діаметра 6,2–21,2 мм. Шість рівнів початкового занурення від 0,25–0,35 м. А також два матеріали виготовлення метал і ПВХ-пластик.

При закритому датчику-прискорювачу, ми маємо довільний рівень води в поплавку – затворі  $h_6$ . Тому відлік часу  $t_1$  починається саме з моменту спрацювання датчика і до моменту поки поплавко-затвор не відкрив водозливний лоток при рівні води  $h_3$ .

Для визначення впливу глибини занурення на час закриття поплавко-затвора було проведено розрахунки для різними рівнями початкового занурення  $h_2$ , які були прийняті 0,25–0,35 м.

Для кожного рівня занурення було визначено час закриття  $t_1$ , у залежності від діаметра вхідного патрубку  $d_1$ .

Дослідження проводились для двох типів матеріалів поплавко-затвора металевого і з ПВХ-пластику.

У результаті ми отримали серію даних і на основі цих даних було побудовані графіки залежності часу відкриття  $t_1$  від діаметра патрубку  $d_1$  для різних  $h_2$  (рис. 2, рис. 3).

**Результати досліджень.** Одними із основних технічних характеристик є швидкодія регулятора та діаметри вхідних патрубків від яких залежить безпосередньо ефективність роботи і час спрацювання системи.

Час відкриття поплавко-затвора наведено на рис. 1. У цей період рівень води в поплавку-затворі знижується від величини  $h_2$  яка відповідає стану рівності рівнів у поплавку та водоприймальному

колодязі, до значення  $h_3$ , при якому виконується умова рівноваги поплавка-затвора. Таким чином, час відкриття  $t_1$  визначається як інтервал, протягом якого глибина води в поплавку зменшується від  $h_6$  до  $h_3$ .

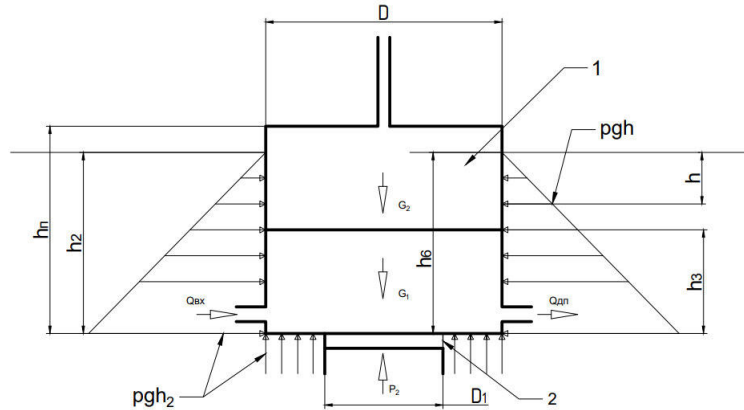


Рис. 1. Схема сил, що діють на незатоплений поплавок затвора в закритому положенні: 1 – поплавок затвор; 2 – кільцевий водозлив

Баланс об'єму поплавка дає диференціальне рівняння, яке інтегрується від  $h_6$  до  $h_3$  [8].

Надходження води у поплавок-затвор відбувається через вхідний патрубок [9]. Він з'єднаний з зовнішнім рівнем води в водоприймальному колодязі, тому гідростатичний напір для надходження води визначається різницею рівнів між зовнішньою вільною поверхнею ( $z=0$ ) та відповідним положенням входу у поплавок, у будь-якому випадку напір дорівнює  $h_2-h$

$$Q_{вх} = \mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)}, \quad (1)$$

де  $\mu_1$  – коефіцієнт витрати вхідного патрубку;

$s_1$  – площа поперечного перерізу вхідного патрубку;

$h_2$  – глибина занурення дна поплавка під вільну поверхню води;

$h$  – довільна глибина води у поплавку;

Об'єм води що витікає із поплавка-затвора,

$$Q_{вих} = \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{дп})}, \quad (2)$$

де  $\mu_2$  – коефіцієнт витрати вихідного трубопроводу разом з датчиком-прискорювачем;

$s_2$  – площа поперечного перерізу вихідного патрубку;

$h_{дп}$  – відстань по вертикалі від дна поплавка-затвора, до вихідних отворів датчика-прискорювача.

Зміна об'єму води у поплавку буде рівною



$$S \frac{dh}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вих}}. \quad (3)$$

Підставляємо вирази:

$$S \frac{dh}{dt} = \mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)} - \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{\text{дп}})} \quad (4)$$

При  $h > h_3$ .

Розв'яжемо рівня відносно часу  $dt$ , отримаємо,

$$dt = \frac{S}{\sqrt{2g}} \cdot \frac{dh}{\mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)} - \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{\text{дп}})}}. \quad (5)$$

Позначимо момент часу коли починає працювати датчик-прискорювач через  $t_4$ , а момент часу початку спливання поплавка-затвора через  $t_5$ .

Інтегруємо праву та ліву частину рівняння в межах по часу від  $t_4$  до  $t_5$ , та в межах по глибині води у поплавку від  $h_6$  до  $h_3$ , отримаємо

$$\int_{t_4}^{t_5} dt = \frac{S}{\sqrt{2g}} \cdot \int_{h_3}^{h_6} \frac{dh}{\mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)} - \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{\text{дп}})}}. \quad (6)$$

У правій частині рівняння поміняємо місцями межі інтегрування, отримаємо

$$t_5 - t_4 = \frac{S}{\sqrt{2g}} \cdot \int_{h_6}^{h_3} \frac{dh}{\mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)} - \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{\text{дп}})}}. \quad (7)$$

Позначимо час відкриття регулятора через,

$$t_1 = t_5 - t_4. \quad (8)$$

Тоді інтеграл матиме вигляд,

$$t_1 = \frac{S}{\sqrt{2g}} \cdot \int_{h_6}^{h_3} \frac{dh}{\mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)} - \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{\text{дп}})}}. \quad (9)$$

Якщо виконується умова  $h_3 < h_6$ , в цьому випадку інтегрування виконується на проміжку  $[h_6; h_3]$ .

Побудуємо розрахункову сітку з кроком 1 мм по рівню води  $h$ ,  $\Delta h = 10^{-3}$  м.

Кількість інтервалів повинна бути цілою; для Сімпсона – парне число інтервалів і визначається наступною формулою.

$$N = \frac{h_6 - h_3}{\Delta h}. \quad (10)$$

Точки  $h_i = h_6 - i \Delta h$ ,  $i = 0..N$  (тобто  $h_0 = h_6$ ,  $h_n = h_3$ )

$h_i$  – це дискретні точки рівня води всередині поплавка на інтервалі від  $h_6$  до  $h_3$ .

Для кожного рівня води  $h_i$  визначаємо підінтегральну функцію

$$f(h) = \mu_1 s_1 \sqrt{2g(h_2 - h)} - \mu_2 s_2 \sqrt{2g(h + h_{\text{дп}})}. \quad (11)$$

У всіх точках повинна виконуватись умова  $Q_{\text{визк}} > Q_{\text{вж}}$ .

Тоді інтеграл матиме вигляд

$$t_1 = \frac{S}{\sqrt{2g}} \cdot \int_{h_3}^{h_6} \frac{dh}{f(h)}, \quad (12)$$

де  $\Delta h$  – це різниця рівнів води між двома сусідніми вузлами сітки при чисельному інтегруванні;

$S$  – площа поперечного перерізу поплавка затвора;

$f(h)$  – знаменник інтегральної функції, який визначає швидкість спорожнення поплавка;

$g$  – прискорення вільного падіння 9,81 м/с<sup>2</sup>.

Результати статистичної обробки даних дослідження були сформовані в таблиці.

Таблиця

Дані та результати статистичної обробки даних при визначенні часу відкриття затвора

$h_2$	$h_3$ метал	$h_3$ пластик	$d_1$ , мм	$t_{1i}$ , для металу	$t_{1i}$ , для пластику
0,25	0,068	0,148	6,2	47,18	22,31
			9,1	50,48	23,15
			12,6	57,76	24,79
			15,7	70,91	27,07
			21,2		35,07
$h_2$	$h_3$ метал	$h_3$ пластик	$d_1$ , мм	$t_{1i}$ , для металу	$t_{1i}$ , для пластику
0,27	0,084	0,164	6,2	45,14	22,16
			9,1	48,04	22,97
			12,6	54,30	24,54
			15,7	64,94	26,71
			21,2		34,18
$h_2$	$h_3$ метал	$h_3$ пластик	$d_1$ , мм	$t_{1i}$ , для металу	$t_{1i}$ , для пластику



продовження таблиці

0,29	0,098	0,178	6,2	44,18	22,52
			9,1	46,87	23,33
			12,6	52,59	24,91
			15,7	62,05	27,07
			21,2		34,48
$h_2$	$h_3$ метал	$h_3$ пластик	$d_1$ , мм	$t_{1i}$ , для металу	$t_{1i}$ , для пластику
0,31	0,114	0,194	6,2	42,83	22,44
			9,1	45,29	23,23
			12,6	50,45	24,76
			15,7	58,68	26,85
			21,2		33,89
$h_2$	$h_3$ метал	$h_3$ пластик	$d_1$ , мм	$t_{1i}$ , для металу	$t_{1i}$ , для пластику
0,33	0,128	0,208	6,2	42,28	22,82
			9,1	44,62	23,62
			12,6	49,47	25,16
			15,7	57,09	27,26
			21,2		34,30
$h_2$	$h_3$ метал	$h_3$ пластик	$d_1$ , мм	$t_{1i}$ , для металу	$t_{1i}$ , для пластику
0,35	0,144	0,224	6,2	41,32	22,79
			9,1	43,50	23,57
			12,6	48,00	25,07
			15,7	54,92	27,12
			21,2		33,89

За отриманими результатами побудовано два графіки залежності часу відкриття затвора  $t_1$  від діаметра вхідного патрубку  $d_1$ , який має конструктивне значення, оскільки дозволяє визначити оптимальний розмір вхідного патрубку для поплавка затвора з пластику (рис. 3) та металу (рис. 2) при різних рівнях занурення.

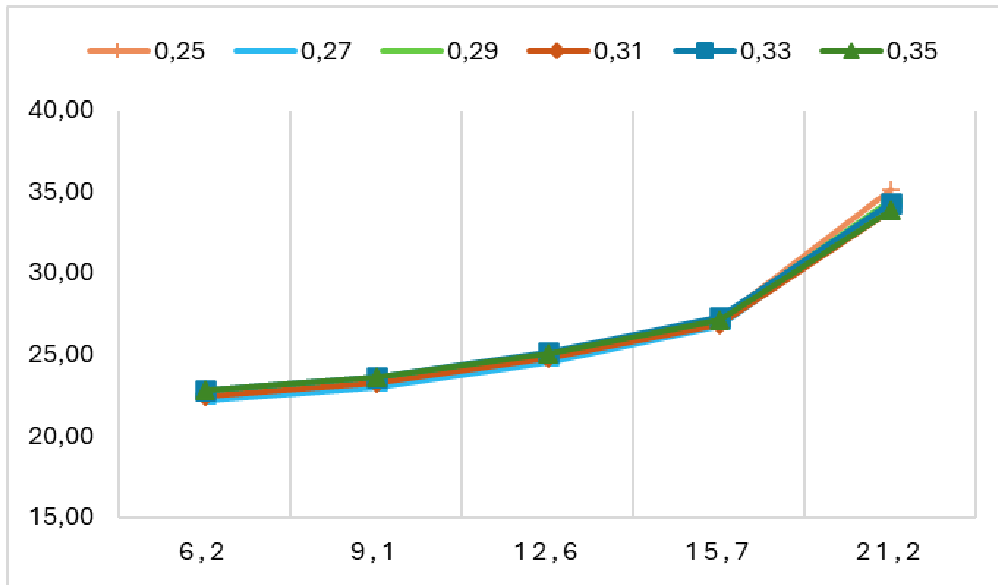


Рис. 2. Графік залежності  $t_1 = f(d_1, h_2)$  для металевого поплавка-затвора

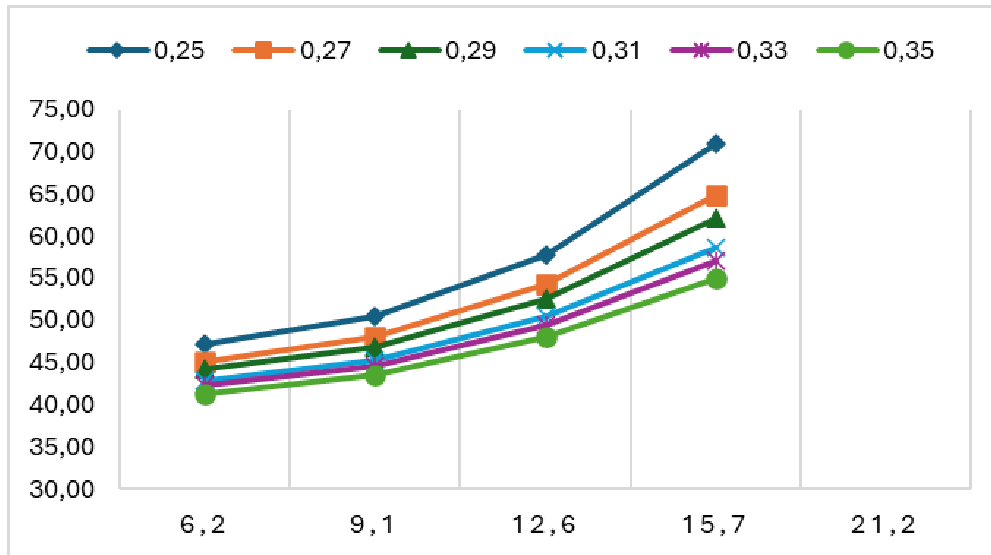


Рис. 3. Графік залежності  $t_1 = f(d_1, h_2)$  для пластикового поплавка-затвора

З таблиці і графіків отримуємо, що для пластикового поплавка час відкриття є меншим, що свідчить про його кращу динамічну чутливість. Додатково було виконано дослідження при різних рівнях занурення поплавка  $h_2$ , що дозволило оцінити вплив глибини роботи на швидкодію регулятора [10–11].

Встановлено, що пластиковий має кращу плавучість як характеристика матеріалу з якого він виготовлений, тому швидко реагує на зміну рівня води, отож при різній глибині занурення  $h_2$ , підйомна сила що діє на поплавок затвор є більш пропорційною і різниця в часі при різній глибині занурення майже однакова. На



відміну від пластикового поплавка затвора, металевий важчий і тому при збільшенні глибини занурення  $h_2$ , час  $t_1$  поступово зменшується це обумовлено що на нього діє більша підйомна сила, що прискорює час спрацювання після спрацювання датчика прискорювача.

**Висновки.** Таким чином, результати досліджень показали, що час відкриття затвора  $t_1$  суттєво залежить від діаметра вхідного патрубку  $d_1$  та співвідношення пропускних здатностей вхідного і вихідного елементів гідросистеми. Встановлено, що оптимальний вибір діаметра вхідного патрубку забезпечує конструктивну надійність і швидкодію регулятора.

Дослідження також підтвердили перевагу пластикового поплавка-затвора над металевим, оскільки час його спрацювання є меншим, що підвищує ефективність роботи гідроавтомата. Додаткові експерименти для різних рівнів занурення поплавка  $h_2$  дозволили встановити закономірності впливу глибини на швидкодію системи, що має практичне значення при виборі режимів експлуатації осушувально-зволожувальних систем.

Крім того, для подальших досліджень за аналогічною методикою можливо визначити час закривання  $t_2$  за тих самих вхідних параметрів – діаметра вхідного патрубку  $d_1$  і рівня занурення поплавка  $h_2$ . Наклавши графіки залежностей для  $t_1$  і  $t_2$ , можна отримати узагальнені дані для модернізації регулятора рівня води та підібрати оптимальну конструкцію й глибину занурення для забезпечення його високоефективної роботи.

1. Наумчук О. М. Удосконалення процесів водорегулювання на осушувально-зволожувальних системах засобами гідравлічної автоматизації : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Рівне, 2007. 218 с. 2. Ніколайчук О. М. Дослідження рівноваги сил, що діють на відкритий поплавок затвора гідроавтоматичного регулятора рівня АРУ-200Ц. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування* : зб. наук. праць. Рівне, 2009. Вип. 3 (47), ч. 1. С. 407–413. 3. Ніколайчук О. М. Математична модель динаміки зміни рівнів води в колодязях осушувально-зволожувальної системи при регулюванні норми осушення. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування* : зб. наук. праць. Рівне, 2007. Вип. 3 (39), ч. 2. С. 107–117. 4. Науменко І. І., Мороз С. М., Волощук В. А. Пропускна здатність насадків та отворів, влаштованих у трубопроводах-збирачах. *Вісник Української державної академії водного господарства* : зб. наук. пр. Рівне, 1999. Вип. 2(6), ч. 1. С. 182–185. 5. Матус С. К. Удосконалення водорегулювання на автоматизованих осушувально-зволожувальних системах з урахуванням рельєфної диференціації території : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02. Рівне, 2013. 208 с. 6. Яцик А. В. Моделювання та автоматизація гідротехнічних процесів : монографія. Рівне : НУВГП, 2014. 260 с. 7. Яцик А. В. Сучасні технології управління водними режимами в меліоративних системах : монографія. Рівне : НУВГП, 2018. 268 с. 8. Чернюк В. В. Диференціальне

рівняння руху рідини зі змінною масою з урахуванням реакції на зміну витрати. *Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування*. Рівне : УДУВГП, 2002. Вип. 5 (18). С. 196–201. **9.** Чалий Б., Мозоль Н. Проектування осушувально-зволожувальних систем блочно-модульного типу. *Водне господарство України*. 2009. № 6. С. 55–58.

## REFERENCES:

1. Naumchuk O. M. Udoskonalennia protsesiv vodrehuliuvannia na osushivalno-zvolozhivalnykh systemakh zasobamy hidravlichnoi avtomatyzatsii : dys. ... kand. tekhn. nauk : 06.01.02. Rivne, 2007. 218 s.
2. Nikolaichuk O. M. Doslidzhennia rivnovahy syl, shcho diiut na vidkryti poplavok zatvora hidroavtomatychnoho rehuliatora rivnia ARU-200Ts. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia* : zb. nauk. prats. Rivne, 2009. Vyp. 3 (47), ch. 1. S. 407–413.
3. Nikolaichuk O. M. Matematychna model dynamiky zminy rivniv vody v kolodiaziaxh osushivalno-zvolozhivalnoi systemy pry rehuliuvanni normy osushennia. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia* : zb. nauk. prats. Rivne, 2007. Vyp. 3 (39), ch. 2. S. 107–117.
4. Naumenko I. I., Moroz S. M., Voloshchuk V. A. Propuskna zdattist nasadkiv ta otvoriv, vlashtovanykh u truboprovodakh-zbyrachakh. *Visnyk Ukrainiskoi derzhavnoi akademii vodnoho hospodarstva* : zb. nauk. pr. Rivne, 1999. Vyp. 2(6), ch. 1. S. 182–185.
5. Matus S. K. Udoskonalennia vodrehuliuvannia na avtomatyzovanykh osushivalno-zvolozhivalnykh systemakh z urakhuvanniam reliefnoi dyferentsiatsii terytorii : dys. ... kand. tekhn. nauk : 06.01.02. Rivne, 2013. 208 s.
6. Yatsyk A. V. Modeliuvannia ta avtomatyzatsiia hidrotekhnichnykh protsesiv : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2014. 260 s.
7. Yatsyk A. V. Suchasni tekhnolohii upravlinnia vodnymy rezhymamy v melioratyvnykh systemakh : monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2018. 268 s.
8. Cherniuk V. V. Dyferentsialne rivniannia rukhu ridyny zi zminnoiu masoiu z urakhuvanniam reaktsii na zminu vytraty. *Visnyk Ukrainiskoho derzhavnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*. Rivne : UDUVHP, 2002. Vyp. 5 (18). S. 196–201.
9. Chalyi B., Mozol N. Proiektuvannia osushivalno-zvolozhivalnykh system blochno-modulnoho typu. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*. 2009. № 6. S. 55–58.

---

**Bohush O. O.** [1; ORCID ID: 0009-0007-3268-5437],

Post-graduate Student,

**Khlapuk M. M.** [1; ORCID ID: 0000-0001-5469-4181],

Doctor of Engineering, Professor,

<sup>1</sup>*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

## THEORETICAL STUDIES AND MATHEMATICAL MODELLING OF THE GATE OPENING PROCESS IN A HYDRO-AUTOMATIC WATER LEVEL REGULATOR

The article presents the results of theoretical studies on the opening process of a float-gate of a hydro-automatic water level regulator. A



mathematical model has been developed that describes the change in the volume of water in the float-gate over time and makes it possible to determine the duration of the opening process. The main attention is focused on the influence of the inlet pipe diameter, the initial immersion depth of the float, and the material of its manufacture. Based on the simulation results, an analytical equation was derived to determine the gate opening time  $t_1$ , which represents the interval from the moment the acceleration sensor is triggered to the beginning of the float-gate's rise. A comparative analysis of the characteristics of plastic and metal float-gates was carried out for different initial immersion depths ( $h_2$ ) and inlet pipe diameters ( $d_1$ ). The study established patterns of how the inlet pipe diameter and immersion depth affect the regulator's response speed. The comparison between metal and plastic floats showed that the plastic one has a shorter response time due to its lower weight and greater buoyancy. The obtained dependencies can be used to improve the design of water level regulators and increase their efficiency in drainage–irrigation systems.

**Keywords:** hydro-automatic water level regulator; float-gate; opening time; mathematical model; pipe diameter; drainage–irrigation system, acceleration sensor, response speed.

Отримано: 08 жовтня 2025 року  
Прорецензовано: 10 жовтня 2025 року  
Прийнято до друку: 18 грудня 2025 року