

**Elżbieta Kubrak**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,  
Centrum Wodne  
e-mail: elzbieta\_kubrak@sggw.edu.pl  
**ORCID:** 0000-0001-5318-2256

**Janusz Kubrak**

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,  
Instytut Inżynierii Środowiska  
e-mail: janusz\_kubrak@sggw.edu.pl  
**ORCID:** 0000-0001-7322-4951

## **NUMERYCZNA PROGNOZA DZIAŁANIA KLAPOWEGO REGULATORA STANÓW WODY W ROWACH NAWADNIAJĄCYCH**

### **Abstrakt**

W artykule przedstawiono wyniki numerycznej prognozy działania klapowego regulatora stanów wody w rowie nawadniającym. Obliczenia numeryczne wykonano przy zmiennych wartościach dopływu wody do rowu oraz oporów przepływu w rowie charakteryzowanych współczynnikiem szorstkości Manninga. Sformułowano ogólne relacje pomiędzy czasem otwarcia kłapy regulatora a wielkością natężenia przepływu w rowie i oporami przepływu. Wyznaczono wartość natężenia dopływu wody do rowu nawadniającego, przy której kłapa regulatora pozostaje cały czas uchylona.

**Słowa kluczowe:** klapowy regulator stanów z kołową kłapą, automatyczna regulacja poziomu piętrzenia

## **NUMERICAL PREDICTION OF PERFORMANCE OF A FLAP GATE UPSTREAM WATER LEVEL REGULATOR IN IRRIGATION DITCHES**

### **Abstract**

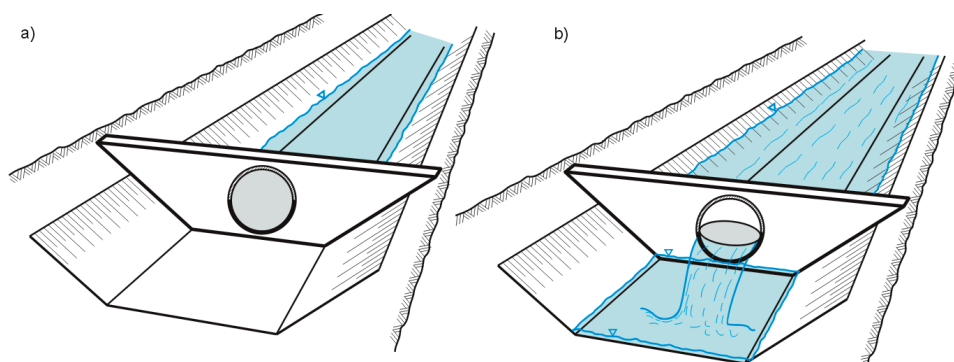
This paper presents the results of a numerical prediction of the performance of a circular flap gate upstream water level regulator in an irrigation ditch. Numerical calculations were performed assuming variable values of the volumetric flow rate. In order to take into account the channel resistance, the Manning roughness coefficient was used. General relations between the opening time of the regulator flap and the flow rate and channel resistance were formulated. The value of a flow rate in the irrigation canal was determined, at which the regulator flap remains open.

**Keywords:** circular flap gate, automatic upstream water level control

## 1. Wstęp

Do automatycznego regulowania stanów wody w kanałach nawadniających i odwadniających stosowane są w różnych krajach różne budowle i urządzenia. Większość regulatorów stosowanych do sterowania piętrzeniem wykorzystuje powiązanie położenia pływającego pływaką z regulowanym stanem wody. Pływak przy osiągnięciu pewnego stanu wody włącza/wyłącza mechanizmy zamknięć [12]. Z istniejących rodzajów automatycznych zamknięć za najwygodniejsze i najpewniejsze uważa się zamknięcia klapowe sterowane bezpośrednio przez zmianę wielkości parcia hydrostatycznego wody przed i za zamknięciem. W literaturze można znaleźć opisy modeli zamknięć klapowych z poziomą osią [1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 12]. Zasada ich działania wykorzystuje zależność, że wzrost głębokości wody w kanale przed klapą powoduje wzrost parcia na klapę i odchylenie (otwarcie klap). Wskutek wypływu wody przez otwór następuje obniżenie poziomu wody, zmniejsza się parcie wody, a umieszczony na szczycie klap przeciwcieżar powoduje jej przyknięcie. Klapa musi być zaprojektowana tak, aby otwarcie i zamknięcie następowało zawsze przy tym samym poziomie wody w kanale przed klapą. Po zrównoważeniu momentu otwierającego i zamykającego klap są w stanie utrzymywać stały poziom piętrzenia wody przy różnych natężeniach przepływu z dokładnością do kilku centymetrów.

W pracy opisano warunki działania klapowego regulatora piętrzenia, składającego się z kołowej klap, obracającej się wokół poziomej osi obrotu położonej poniżej geometrycznego środka ciężkości klap do utrzymywania piętrzenia w rowie nawadniającym [8, 9, 11]. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność regulatora klapowego umieszczonego w zamknięciu budowli upustowej lub w przepustach rurowych na rowach do utrzymywania stałego poziomu piętrzenia (rys. 1). Przykład zainstalowania regulatora klapowego w przepuście opisano w pracy [8].

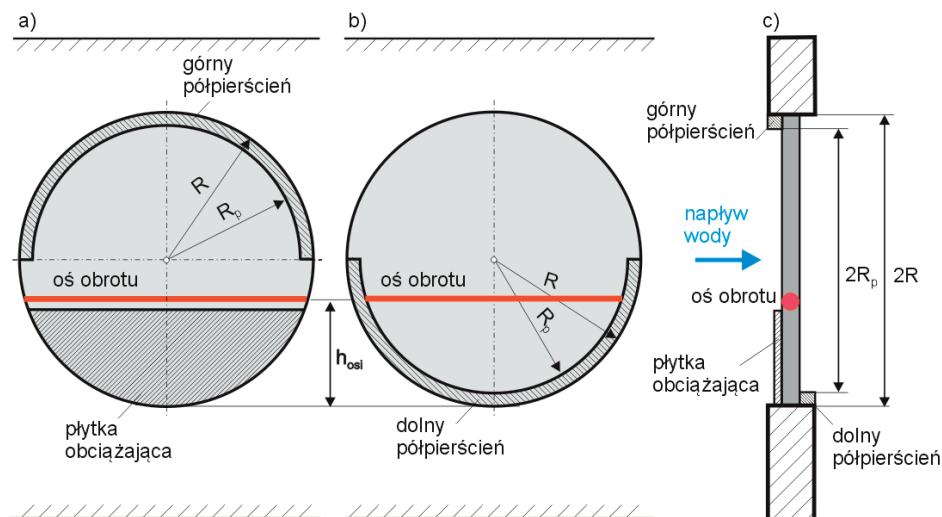


Rys. 1. Widok od strony wody dolnej na zamknięcie z klapowym regulatorem stanów  
a) kołowa klapa zamknięta b) kołowa klapa uchylona

Źródło: opracowanie własne

## 2. Opis działania klapowego regulatora stanów

Opisywany regulator klapowy stanów składa się z ruchomej, kołowej, metalowej kłapy zamocowanej na poziomej osi obrotu umieszczonej w zamknięciu budowli upustowej lub przepięcie (rys. 2).



Rys. 2. Schemat mocowania kłapy w zamknięciu, gdzie:  $R_p$  – promień wewnętrzny półpiersieci oporowych,  $R$  – promień kołowej kłapy,  $h_{osi}$  – wzniesienie osi obrotu nad spodem kłapy: a) widok od strony wody górnej, b) widok od strony wody dolnej, c) przekrój poprzeczny regulatora klapowego

Źródło: opracowanie własne

Otwarcie kłapy przy braku wody poniżej kłapy następuje, gdy moment otwierający wywołany parciem wody na powierzchnię kłapy powyżej jej osi obrotu przekroczy wartość momentu zamykającego, wywołanego parciem wody na powierzchnię kłapy poniżej jej osi obrotu. Ustalając wzniesienie osi obrotu nad spodem kłapy, uzyskać można wychylenie kłapy przy przepływie bezciśnieniowym przy głębokościach wody mniejszych od średnicy kołowej kłapy. Maksymalne wychylenie kłapy ustala zamontowany ogranicznik. Ponieważ oś obrotu kołowej kłapy w regulatorze leży zawsze poniżej jej środka ciężkości, do samoczynnego zamknięcia kłapy po jej wychyleniu konieczne jest zwiększenie ciężaru dolnej części kłapy. Uzyskano to, mocując dodatkową masę w postaci metalowych płytek wyciętych z koła o średnicy równej średnicy kłapy. Aby zmniejszyć przepływ wody między ściankami przewodu a klapą, zaprojektowano umieszczenie w przewodzie dwóch półpiersieci, pełniących jednocześnie funkcje uszczelniającą i oporową. Półpiersieć górny jest przesunięty względem dolnego o grubość kłapy i zachodzi

na nią na wysokość  $R-R_p$  (rys. 2). Teoretyczną analizę warunków pracy kołowego regulatora stanów, jak i ich hydrauliczną weryfikację w laboratorium hydraulicznym przedstawiono w pracy [9].

### 3. Numeryczne modelowanie przepływu wody i działania klapowego regulatora stanów w rowie nawadniającym

Przepływ wody w rowie nawadniającym podczas pracy regulatora stanów ma charakter nieustalony. Do jego opisu wykorzystano jednowymiarowe równania Saint Venanta:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gAJ = 0 \quad (2)$$

gdzie:

$z$  – rzędna zwierciadła wody w przekroju poprzecznym rowu,  $A$  – powierzchnia przekroju poprzecznego,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $J$  – spadek linii energii,  $Q$  – natężenie przepływu wody,  $x$  – odległość,  $t$  – czas.

Spadek linii energii wyrażano wzorem Manninga:

$$J = \frac{n^2 Q^2}{R_h^{4/3} A^2} \quad (3)$$

gdzie:

$n$  – współczynnik szorstkości,  $R_h$  – promień hydrauliczny przekroju strumienia.

Do rozwiązywania równań nieustalonego ruchu wody (1), (2) zastosowano metodę różnic skończonych i niejawną schemat różnicowy 4-punktowy ze współczynnikiem wagowym Preismanna [6]. Schemat ten pozwala na przyjmowanie w rozwiązaniu zmiennego w szerokich granicach kroku czasowego, co jest niezwykle istotne.

Lewy warunek brzegowy rozwiązania równań nieustalonego przepływu wody (1), (2) stanowi stałe natężenie dopływu do rowu ( $Q = \text{const}$ ), zaś prawy warunek brzegowy jest uzależniony od położenia kłapy regulatora. Przy zamkniętej kłapie prawy warunek brzegowy miał postać  $Q = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Przy kłapie uchylonej prawy warunek brzegowy stanowiło równanie określające natężenie przepływu wody przez niezatopiony przelew kołowy w funkcji położenia zwierciadła wody nad spodnią krawędzią kołowego przelewu [4]:

$$Q = C_e \omega \frac{4}{15} \sqrt{2g} d^{2.5} = C_e \varphi_i d^{2.5} \quad (4)$$

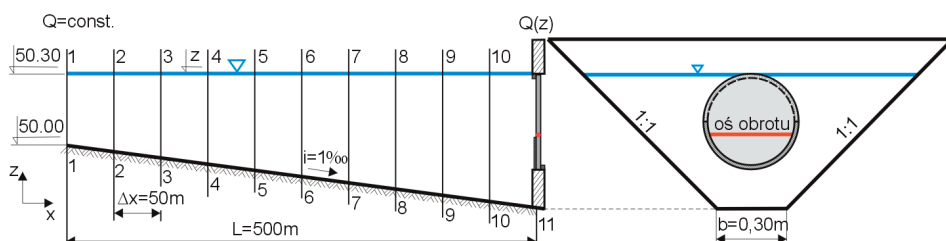
gdzie:

$C_e$  – współczynnik wydatku kołowego przelewu,  $\omega$  – bezwymiarowy parametr przekroju kołowego,  $\varphi_i$  – bezwymiarowy parametr uzależniony od stosunku wysokości warstwy przelewowej wody do średnicy kołowego otworu –  $d$ . Wartości liczbowe obu parametrów w zależności (4) podane są w monografii [4].

Warunek początkowy obliczeń stanowiło poziome położenie zwierciadła wody w rowie przy zamkniętej klapie o głębokości niższej od uchylającej klapę regulatora i stałe natężenie przepływu w każdym przekroju, zaś w przekroju regulatora przyjęto  $Q = 0,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4. Wyniki obliczeń

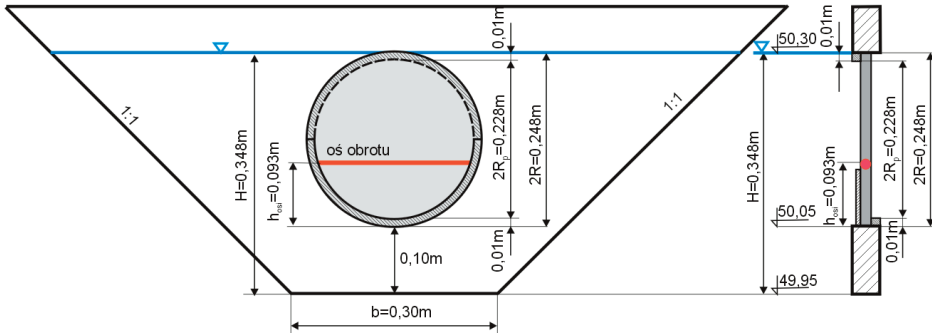
Opisany klapowy regulator stanów wody zainstalowano w niewielkim rowie nawadniającym. Rów o długości  $L = 500 \text{ m}$  ma przekrój trapezowy i spadek dna równy  $i = 1\text{‰}$ . Nachylenie skarp rowu wynosi  $1: m = 1:1$ , zaś szerokość w dnie  $b = 0,30 \text{ m}$ . Rów opisano 11 przekrojami oddalonymi od siebie o  $\Delta x = 50 \text{ m}$  (rys. 3).



Rys. 3. Schemat dyskretyzacji rowu nawadniającego z klapowym regulatorem stanów

Źródło: opracowanie własne

Średnica kłapy kołowego regulatora stanów równa jest  $2R = 0,248 \text{ m}$ . Oś kłapy jest na wysokości  $h_{osi} = 0,093 \text{ m}$  nad spodem kłapy, który jest na wysokości  $0,10 \text{ m}$  nad dnem rowu (rys. 4). Położenie osi kłapy ustalone na podstawie obliczeń zapewnia jej uchYLENIE już przy głębokości wody w rowie przed klapą równą  $0,348 \text{ m}$ . Zamknięcie kłapy następuje przy głębokości wody w rowie równej  $0,193 \text{ m}$ . Zakładano stały dopływ wody w czasie do przekroju początkowego rowu. Prognozę pracy regulatora prowadzono dla 24 godzin. W obliczeniach przyjęto krok czasowy równy  $60 \text{ s}$ .

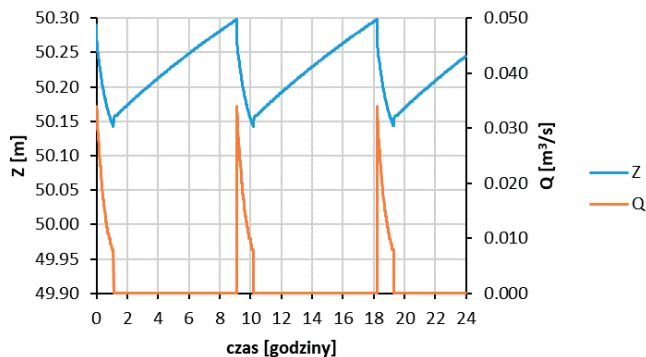


Rys. 4. Położenie klapowego regulatora stanów w przekroju rowu nawadniającego

Źródło: opracowanie własne

Obliczenia prognostyczne wykonano przy założonych wartościach dopływu do rowu równych  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$ . Opory przepływu w rowie nawadniającym scharakteryzowano współczynnikiem szorstkości Manninga, przyjmując jego wartości równe  $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  oraz  $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

Obliczone hydrogramy stanów i natężenia przepływu wody w przekroju klapowego regulatora stanów pokazano na rys. 5.

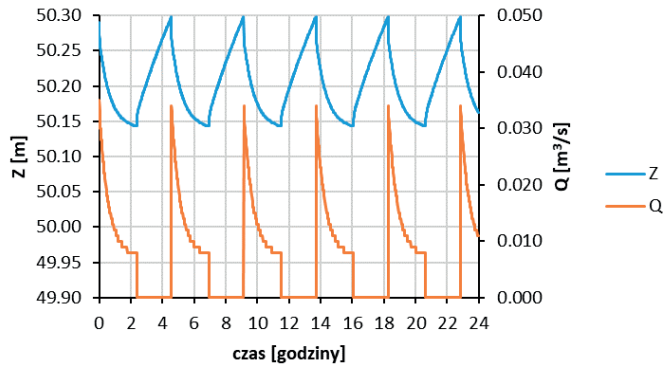


Rys. 5. Hydrogram stanów wody (u góry) i natężenia wypływu wody w przekroju klapowego regulatora stanów przy stałym dopływie do rowu równym  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  i współczynnikiem szorstkości rowu nawadniającego  $n=0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Źródło: opracowanie własne

Z rys. 5 wynika, że kołowy regulator stanów przy dopływie do rowu równym  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  otwierał się trzykrotnie w ciągu doby. Woda przez kołowy otwór regulatora wypływała przez 1,1 godziny (65 minut). Okres piętrzenia i retencjonowania wody w rowie do czasu ponownego otwarcia regulatora trwał 8 godzin (480 minut).

Na rys. 6 przedstawiono hydrogramy stanów i natężenia przepływu wody w przekroju klapowego regulatora przepływu przy dopływie wody o natężeniu  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  przy współczynniku szorstkości  $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .



Rys. 6. Hydrogram stanów wody (u góry) i natężenia wypływu wody w przekroju klapowego regulatora stanów przy stałym dopływie do rowu równym  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  i współczynniku szorstkości rowu nawadniającego  $n=0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

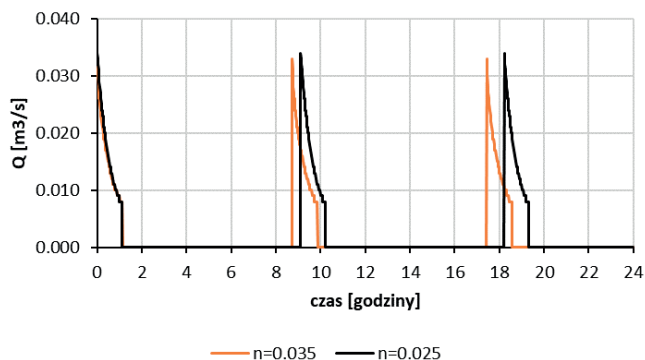
Źródło: opracowanie własne

Wzrost natężenia dopływu wody do rowu spowodował zwiększenie częstotliwości otwarcia kłapy regulatora, wydłużenie czasu otwarcia kłapy podczas pojedynczego cyklu i skrócenie czasu retencjonowania wody w rowie przy zamkniętej klapie. Przy dopływie do rowu równym  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  kłapa regulatora otwierała się sześciokrotnie w ciągu doby. Woda przez kołowy otwór regulatora wypływała przez 2,37 godziny (142 minuty). Okres piętrzenia i retencjonowania wody w rowie do czasu ponownego otwarcia regulatora trwał 2,20 godziny (132 minuty).

Opory przepływu wody w rowie bardzo mocno zmieniają się w trakcie okresu wegetacyjnego. Rozwój roślinności trawiastej porastającej skarpy rowu nawadniającego istotnie wpływa na opory przepływu wody i przepustowość rowu. Dlatego obliczenia prognostyczne powtórzono przy współczynniku szorstkości równym  $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , tzn. odpowiadającym porośnięciu skarpy koryta przez roślinność.

Na rys. 7 pokazano, jak wzrost oporów przepływu w rowie wpływa na warunki pracy regulatora stanów przy dopływie  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$ . W tym celu wartość współczynnika szorstkości zwiększono do  $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ .

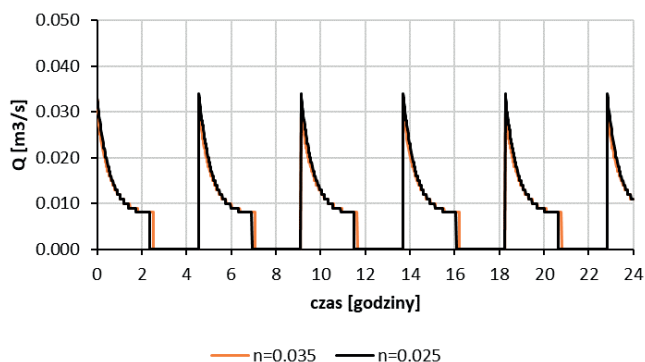
Wzrost szorstkości rowu nawadniającego od wartości  $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  do  $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  spowodował wydłużenie czasu otwarcia regulatora z 65 minut przy współczynniku szorstkości  $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  do 67 minut przy współczynniku szorstkości  $0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ . Przy zwiększonym współczynniku szorstkości w rowie regulator otwierał się o 15 minut szybciej niż przy współczynniku szorstkości  $0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ . Przy mniejszej szorstkości kanału wzrosły także maksymalne wysokości natężenia wypływu wody przez kołowy otwór z  $0,032 \text{ m}^3/\text{s}$  do  $0,034 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Rys. 7. Hydrogramy natężenia wypływu wody w przekroju klapowego regulatora stanów przy stałym dopływie do rowu równym  $0,002 \text{ m}^3/\text{s}$  i współczynniku szorstkości rowu nawadniającego  $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  oraz  $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Źródło: opracowanie własne

Na rys. 8 pokazano, jak wzrost oporów przepływu w rowie wpływa na warunki pracy regulatora stanów przy dopływie  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Rys. 8. Hydrogramy natężenia wypływu wody w przekroju klapowego regulatora stanów przy stałym dopływie do rowu równym  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  i współczynniku szorstkości rowu nawadniającego  $n = 0,025 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  oraz  $n = 0,035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$

Źródło: opracowanie własne

Porównanie wartości liczbowych wykorzystanych do sporządzenia rys. 8 pozwala stwierdzić, że wzrost współczynnika szorstkości rowu nawadniającego przy dopływie  $0,007 \text{ m}^3/\text{s}$  wydłużył o około 8 minut czas otwarcia kłapy regulatora podczas pojedynczego cyklu pracy regulatora.

Na podstawie obliczeń stwierdzono, że przy dopływie do rowu równym  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$  kołowa kłapa regulatora stanów pozostaje cały czas otwarta.



## 5. Wnioski

Przeanalizowano warunki działania klapowego regulatora stanów z obrotową klapą kołową przy różnych natężeniach dopływu do rowu nawadniającego i współczynnikach szorstkości charakteryzującego opory przepływu w rowie. Na podstawie wyników obliczeń stwierdzono, że:

- wzrost natężenia dopływu wody do rowu powoduje zwiększenie częstotliwości otwarcia kłapy regulatora, wydłużenie czasu otwarcia kłapy podczas pojedynczego cyklu pracy i skrócenie czasu retencjonowania wody w rowie przy zamkniętej klapie,
- wzrost szorstkości rowu nawadniającego spowodował wydłużenie czasu otwarcia regulatora podczas pojedynczego cyklu pracy i skrócenie czasu retencjonowania wody w rowie przy zamkniętej klapie,
- wyznaczona w obliczeniach wartość dopływu do rowu, przy którym kołowa kłapa regulatora stanów pozostaje cały czas otwarta, była równa  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## Bibliografia/References

- [1] Adib M.R.M., Amirza A.R.M., Wardah T., Junaidah A, *Effectiveness Using Circular Fibre Steel Flap Gate As a Control Structure Towards the Hydraulic Characteristics in Open Channel*, Soft Soil Engineering International Conference 2015 (SEIC2015), IOP Publishing IOP Conf. Series: "Materials Science and Engineering" 2016, 136, 012075. doi:10.1088/1757-899X/136/1/012075.
- [2] Ambrosini K., *Analysis of Flap Gate Design and Implementations for Water Delivery System in California and Nevada*, California Polytechnic State University 2014, San Luis Obispo, s. 56.
- [3] Belaud G., Litrico X., de Graaff B., Baume J.P., *Hydraulic Modeling of an Automatic Upstream Water Level Control Gate for Submerged Flow Conditions*, "J. Irrig. Drain Eng." 2008, 134, s. 315–326.
- [4] Bos M.G., *Discharge measurement structures*, ILRI pub. 20 Thirole ed., Wageningen 1976.
- [5] Cassan L., Baume J.P. Belaud G., Litrico X., Malaterre P., Bruno I.R., *Hydraulic Modeling of a Mixed Water Level Control Hydromechanical Gate*, "J. Irrig. Drain Eng." 2011, 137, s. 446–453.
- [6] Cunge J.A., Holly F.M., Verwey A., *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, Pitman, London 1980.
- [7] FAO Irrigation and Drainage: Small hydraulic structures, 2005, PAPER 26.
- [8] Kaca E., Kubrak J. (red.), *Budowle i urządzenia do pomiaru przepływu wody w kanałach melioracyjnych*, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań 2020.
- [9] Kubrak J., Kubrak E., Kaca E., Kiczko A., Kubrak M., *Theoretical and Experimental Analysis of Operating Conditions of a Circular Flap Gate for an Automatic Upstream Water Level Control*, "Water" 2019, 11(12), 2576, <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/12/2576>, s. 1–11.

- [10] Litrico X., Belaud G., Baume J., Ribot-Bruno J., *Hydraulic modeling of an Automatic Upstream Water-Level Control Gate*, "J. Irrig. and Drain. Eng." 2005, Vol. 131, s. 176–189.
- [11] Regulator piętrzenia wody w rurze: Zgłoszenie patentowe oznaczone numerem P.428319, 2018 [WIPO ST 10/C PL428319].
- [12] Żbikowski A., *Małe budowle wodne, część II kanały i przewody*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1974.