

## OCENA WPŁYWU UKŁADU OPTYCZNEGO WODA-ILUMINATOR PŁASKORÓWNOLEGŁY-POWIETRZE NA WIELKOŚĆ OBIEKTU OBFOTOGRAFOWANEGO

Ł. Sokół, A.Olejnik

Katedra Technologii Prac Podwodnych, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

### STRESZCZENIE

W materiale omówiono problematykę wpływu układu optycznego woda – iluminator płaskorównoległy - powietrze na wielkość obiektu obfotografowanego w środowisku podwodnym, przedstawiono analizę funkcji opisującej wielkość kątową obiektu obfotografowanego takim układem oraz wyniki symulacji komputerowych. Wskazano, że przy zastosowaniu takiego typu układu optycznego w praktyce największy wpływ na wielkość wyjściową ma wartość kąta padania promieni od fotografowanego obiektu na płaszczyznę iluminatora.

**Słowa kluczowe:** inżynieria mechaniczna, technologia prac podwodnych, podwodna fotogrametria inżynierska.

---

### ARTICLE INFO

PolHypRes 2021 Vol. 76 Issue 3 pp. 7 – 20

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2021-0013

Strony: 14, rysunki: 10, tabele: 0

page **www of the periodical:** [www.phr.net.pl](http://www.phr.net.pl)

#### Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

**Typ artykułu:** oryginalny

**Termin nadesłania:** 13.04.2021 r.

**Termin zatwierdzenia do druku:** 14.06.2021 r.



## WSTĘP

Człowiek, aby realizować skuteczną oraz efektywną działalność w środowisku wodnym musi dostosować swoje działania ściśle do wymagań hydrosferycznych. Znaczącym elementem funkcjonowania człowieka w każdym środowisku jest możliwość prowadzenia obserwacji, zazwyczaj w sposób naturalny za pomocą zmysłu wzroku. A jeśli to jest niemożliwe to za pomocą środków obserwacji technicznej. W hydrosferze światło podlega innym zjawiskom niż w atmosferze, co powoduje niewyraźne widzenie nieuzbrojonego ludzkiego oka bądź też kamery fotograficznej bez specjalnej konstrukcji [1,2,3]. Zagadnienia te zostały szeroko opisane na przykład w pracy J. Williamsa [4]. Najprostszym sposobem zapewnienia ostrego widzenia ludzkiemu oku lub kamerze w środowisku podwodnym jest odseparowanie ich od otaczającej hydrosfery.

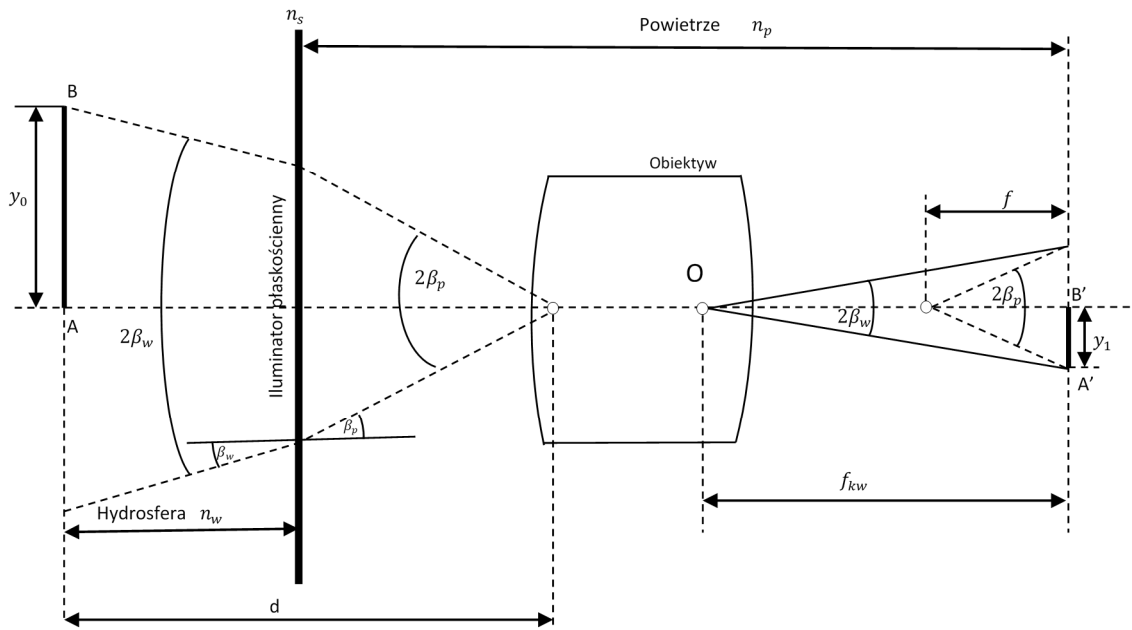
W przypadku kamery fotograficznej konieczne jest również odseparowanie jej wrażliwych elementów konstrukcyjnych szczelną obudową. Powstaje wówczas układ optyczny woda – iluminator – powietrze, który przyczynia się do powstawania przekłamania w odbieranym obrazie obiektu obfotografowanego. W przypadku nurka jest on w stanie samodzielnie zminimalizować to przekłamanie, które powstaje przez załamanie się światła na iluminatorze maski bądź hełmu. Problem pojawia się przy obrazie uzyskanym kamerą fotograficzną. Obraz, który został uzyskany przez wykonanie obfotografowania danego obiektu w hydrosferze może wtedy zostać błędnie zinterpretowany. Określenie wpływu jaki na uzyskane obrazy ma układ optyczny woda –iluminator – powietrze jest zatem kluczowym zagadnieniem niezbędnym do skutecznego wykorzystania zebranego przy użyciu kamery materiału, na przykład do diagnozowania powierzchni obiektów podwodnych [5].

W technice głębinowej najczęściej znajdują zastosowanie dwa rodzaje iluminatorów do kamer: sferyczny i płaskorównoległy [6,7,8]. Iluminator sferyczny cechuje się dużym kątem widzenia kamery, aczkolwiek dobrą jakością obrazu uzyskuje się tylko w przypadku małych kątów padania światła odbitego od obiektu [9,10]. Z tych powodów w tego typu rozwiązaniach wymagana jest specjalna konstrukcja układu optycznego z soczewką kompensacyjną jeśli matryca aparatu cyfrowego ma wymiary zbliżone do klatki filmu 35 mm i precyzyjne ustawienie iluminatora względem obiektywu. Taki iluminator może też powodować niewielką dystorsję obrazu [6,10]. W przypadku iluminatorów płaskorównoległych (płaskościennych), po pierwsze są one o wiele prostsze w wykonaniu i nie wymagają precyzyjnego ustawienia względem obiektywu. Ponadto cechują się tzw. zerową mocą optyczną – dla nieskończonej odległości fotografowania nie zmieniają skali obrazu [5]. Należy jednak pamiętać, że zastosowanie takiego iluminatora wraz z obiektywem szerokokątnym powoduje aberrację chromatyczną oraz dystorsję obrazu [6]. Wynika z tego, że do diagnostyki wizyjnej obiektów podwodnych najlepiej jest zastosować układ optyczny woda – iluminator – powietrze z iluminatorem płaskościennym bez obiektywu szerokokątnego, co spowoduje jak najmniejsze degradacje zbieranych danych wizyjnych [5].

Wpływ takiego układu optycznego na wielkość kątową obiektu obfotografowanego był przedmiotem pracy dyplomowej inżynierskiej realizowanej w Katedrze Technologii Prac Podwodnych Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni przez pchor. Łukasza Sokoła pod kierownictwem dr hab. inż. Adama Olejnika [11]. Praca została pomyślnie obroniona na początku roku 2021. W niniejszym materiale zostaną przedstawione jej rezultaty.

## WIELKOŚĆ OBIEKTU OBFOTOGRAFO-WANEGO UKŁADEM OPTYCZNYM WODA– ILLUMINATOR PŁASKORÓWNOLEGŁY – POWIETRZE

Przebieg promieni przechodzących przez układ optyczny woda – iluminator płaskorównoległy – powietrze wygląda tak, jak przedstawiono na Rys. 1. Promienie, które przechodzą od przedmiotu reprezentowanego na rysunku odcinkiem  $\overline{AB}$  biegną w środowisku wodnym od przedmiotu do obiektywu kamery  $O$ . Przed obiektywem trafiają na krawędź płaszczyzny rozgraniczającej hydrosferę i powietrze, czyli na iluminator płaskorównoległy pod kątem  $2\beta_w$ . Na krawędzi iluminatora następuje załamanie promieni w kierunku normalnej, które docierają do obiektywu pod kątem  $2\beta_p$ .



Rys. 1 Przebieg promieni w układzie woda – iluminator płaskorównoległy – powietrze, na podstawie [5,6].

A zatem obiekt jest widziany przez obiektyw przy innej wielkości kątowej niż rzeczywista. Promienie przechodzą przez obiektyw w płaszczyźnie obrazowej  $\pi'$  gdzie powstaje obraz  $\overline{A'B'}$  =  $y_i$  rzeczywistego obiektu oznaczonego  $\overline{AB}$  =  $y_0$ . W sytuacji gdy punkt A znajduje się na osi optycznej układu, punkt oznaczony B' jest końcem promienia radialnego  $r'$  w płaszczyźnie obrazowej, wtedy [5,6,11]:

$$r' = f_{kp} \cdot \operatorname{tg} \beta_p \quad (1)$$

$$r' = f_{kw} \cdot \operatorname{tg} \beta_w \quad (2)$$

gdzie:

- $r'$  - wielkość radialna obiektu obfotografowanego [rad],
- $f_{kp}$  - ogniskowa kamery fotograficznej w powietrzu [m],
- $f_{kw}$  - ogniskowa kamery fotograficznej w wodzie [m],
- $\beta_p$  - kąt padania światła na iluminator w powietrzu [°],
- $\beta_w$  - kąt padania światła na iluminator w wodzie [°].

Równania (1) i (2) stanowią układ, który można przekształcić do postaci:

$$r' = f_{kp} \cdot \operatorname{tg} \beta_p \Rightarrow f_{kp} = \frac{r'}{\operatorname{tg} \beta_p} \quad (3)$$

$$r' = f_{kw} \cdot \operatorname{tg} \beta_w \quad (4)$$

wówczas

$$f_{kp} = \frac{f_{kw} \cdot \operatorname{tg} \beta_w}{\operatorname{tg} \beta_p} = f_{kw} \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta_w}{\operatorname{tg} \beta_p} \quad (5)$$

Na podstawie zależności trygonometrycznych oraz w oparciu o prawo Snelliusa można zapisać następujące związki [2,6,10]:

$$\operatorname{tg}\beta_p = \frac{\sin\beta_p}{\cos\beta_p} \quad (6)$$

A także,

$$\frac{\sin\beta_w}{\sin\beta_p} = \frac{n_p}{n_w} \quad (7)$$

gdzie:

- $n_p$  - współczynnik załamania światła w powietrzu,
- $n_w$  - Współczynnik załamania światła w wodzie.

Z zależności (7) wynika, że

$$\sin\beta_p = \frac{n_w}{n_p} \sin\beta_w \quad (8)$$

Ponieważ

$$\cos^2\beta_p + \sin^2\beta_p = 1 \Rightarrow \cos^2\beta_p = 1 - \sin^2\beta_p \quad (9)$$

wtedy

$$\cos\beta_p = (1 - \sin^2\beta_p)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Wówczas uwzględniając równanie (8) można zapisać:

$$\sin^2\beta_p = \left(\frac{n_w}{n_p}\right)^2 \sin^2\beta_w \quad (11)$$

Ponieważ

$$n_p = 1 \Rightarrow \frac{n_w}{n_p} = n_w \quad (12)$$

Następnie biorąc pod uwagę zależności (11) oraz (12) równanie (6) można zapisać w postaci:

$$\cos\beta_p = [1 - n_w^2 \sin^2\beta_w]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

Uwzględniając zależność (8) oraz (13) w (6) otrzymujemy:

$$\operatorname{tg}\beta_p = n_w \sin\beta_w [1 - n_w^2 \sin^2\beta_w]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Ostatecznie po uwzględnieniu zależności (2) w (14) otrzymujemy finalną postać równania na wielkość kątową obiektu obfotografowanego układem optycznym woda - iluminator płaskorównoległy - powietrze:

$$r' = f_{kp} \cdot n_w \cdot \sin\beta_w \cdot [1 - n_w^2 \cdot \sin^2\beta_w]^{-\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Z czego wynika, że

$$r' = f(f_{kp}; n_w; \beta_w) \quad (16)$$

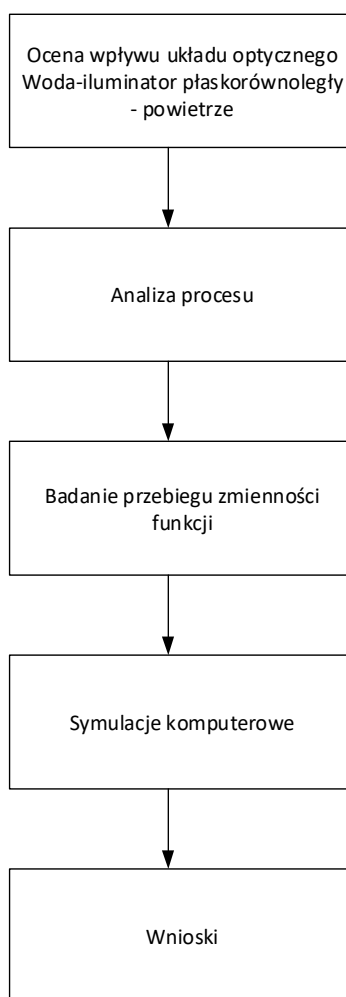
W przypadku iluminatora sferycznego wielkość kątowna obiektu ( $r'$ ) będzie jeszcze dodatkowo uzależniona od promienia krzywizny iluminatora ( $R$ ) oraz ogniskowej soczewki kompensującej ( $f_s$ ) i kąta padania promieni w powietrzu, wówczas:

$$r' = f(R; f_s; \beta_p; n_w; \beta_w) \quad (17)$$

Porównanie zależności (17) i (16) wyraźnie pokazuje, że wielkość kątowna obiektu obfotografowanego układem optycznym woda – iluminator płaskorównoległy – powietrze jest zależna tylko od trzech zmiennych: orientacji wewnętrznej kamery – jej ogniskowej w powietrzu ( $k_p$ ), współczynnika załamania światła w wodzie ( $n_w$ ) oraz kąta padania światła na iluminator ( $\beta_w$ ).

### OCENA WPŁYWU UKŁADU OPTYCZNEGO WODA – ILUMINATOR PŁASKORÓWNOLEGŁY – POWIETRZE NA WIELKOŚĆ OBIEKTU OBFOTOGRAFOWANEGO

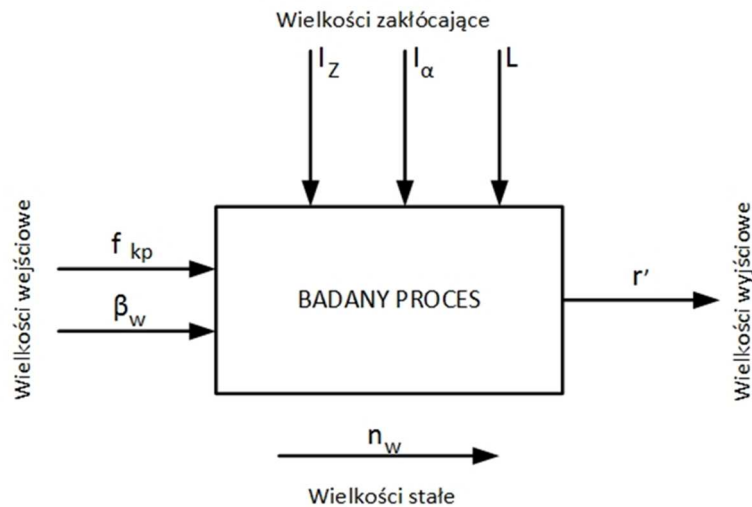
Ocenę wpływu analizowanego układu optycznego na wielkość kątowną obiektu obfotografowanego w środowisku podwodnym realizowano według algorytmu przedstawionego na rysunku poniżej.



Rys. 2 Algorytm postępowania podczas oceny wpływu analizowanego układu optycznego na wielkość kątowną obiektu obfotografowanego.

W toku analizy procesu zdefiniowano wielkości wejściowe i wyjściowe oraz wielkości zakłócające i wielkości stałe procesu (Rys. 3). Zgodnie z równaniem (16) wielkościami wejściowymi w badanym procesie jest ogniskowa kamery ( $f_{kp}$ ) oraz wartość kąta pod jakim pada światło na iluminator płaskorównoległy, natomiast współczynnik załamania światła w wodzie ( $n_w$ ) jest wielkością stałą procesu i wynosi 1,33. Wielkościami zakłócającymi analizowany proces są absorpcja światła przez środowisko wodne ( $I_z$ ), rozproszenie mechaniczne i molekularne światła w wodzie ( $I_a$ ) oraz pochłanianie światła ( $L$ ). Wielkością wyjściową jest wielkość kątowna obiektu obfotografowanego ( $r'$ ). Badanie przebiegu funkcji wykonano przyjmując za założenia wyjściowe.

W pierwszym przypadku badany był wpływ zmiany wielkości ogniskowej kamery przy stałej wartości kąta padania światła na iluminator, a w drugim badano wpływ zmiany kąta przy stałej wartości ogniskowej (Rys. 4). Przed rozpoczęciem badania dokonano analizy w jakim zakresie zmianie może ulegać kąt padania światła na iluminator.



Rys. 3 Schemat analizowanego procesu (oznaczenia w tekście).

Zgodnie z prawem załamania światła na granicy dwóch ośrodków oraz przy założeniu, że maksymalną wartością padania światła jest  $90^\circ$ , można obliczyć kąt  $\beta_w$ . Promień świetlny w analizowanym układzie załamują się najpierw na granicy wody i iluminatora, następnie po przejściu przez iluminator załamuje się na granicy iluminatora i powietrza. Wystąpią tu zatem trzy kąty padania światła -  $\beta_w$  - kąt załamania światła na granicy wody i iluminatora,  $\alpha$  - kąt padania światła

w iluminatorze oraz  $\beta_p$  - kąt załamania światła na granicy iluminatora i powietrza. Występują także trzy współczynniki załamania światła, ponieważ promień przechodzi przez trzy ośrodki:  $n_w$  - współczynnik załamania światła w wodzie (1,33);  $n_s$  - współczynnika załamania światła w szkłe (1,60) oraz  $n_p$  - współczynnik załamania światła w powietrzu (1,0). Wówczas wykorzystując prawo załamania światła możemy zapisać:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta_p} = \frac{n_p}{n_s} \quad (18)$$

Ponieważ zakładamy, że maksymalna wartość  $\beta_p$  wynosi  $90^\circ$  to  $\sin \beta_p = 1,0$  wówczas równanie (18) przyjmuje postać:

$$\frac{\sin \alpha}{1,0} = \frac{1,0}{1,60} \Rightarrow \sin \alpha = 0,625 \quad (19)$$

Podobnie wykorzystując prawo załamania światła możemy zapisać:

$$\frac{\sin \beta_w}{\sin \alpha} = \frac{n_s}{n_w} \quad (20)$$

Co uwzględniając równanie (19) można zapisać:

$$\frac{\sin \beta_w}{0,625} = \frac{1,60}{1,33} \Rightarrow \sin \beta_w = 0,751 \Rightarrow \beta_w \cong 48^\circ \quad (21)$$

Z zależności (21) wynika, że wartością maksymalną dla kąta  $\beta_w$  jest  $48^\circ$ .

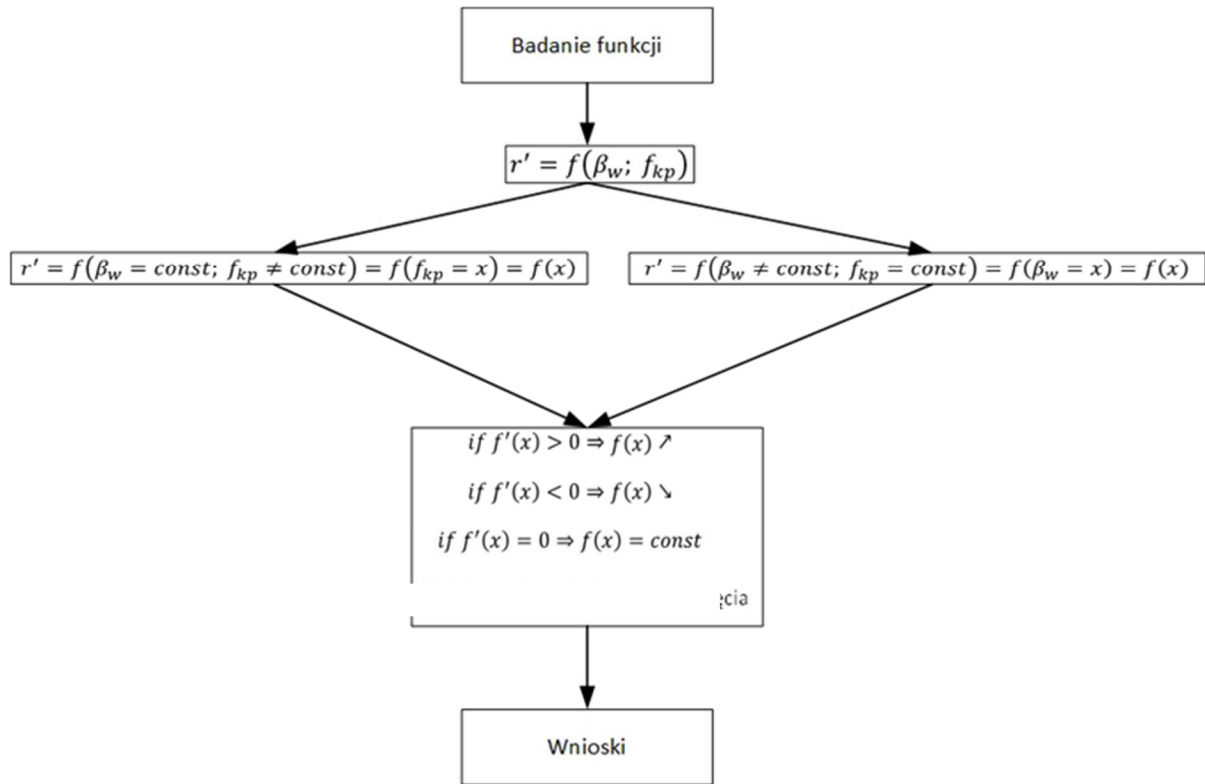


Fig. 4 The adopted algorithm of function evaluation.

Rys. 4 Przyjęty algorytm badania funkcji.

Funkcję o postaci opisanej równaniem (15) badano z wykorzystaniem standardowych procedur w oparciu o analizę matematyczną, sprawdzając następujące warunki:

$$1. \quad f'(x) > 0 \Rightarrow f(x) \nearrow \tag{22}$$

$$2. \quad f'(x) < 0 \Rightarrow f(x) \searrow \tag{23}$$

$$3. \quad f'(x) = 0 \Rightarrow f(x) = const; f(x) \text{ ma ekstremum} \tag{24}$$

Zgodnie z Rys. 4 badanie funkcji rozpoczęto od założenia, że zmianie ulega jedynie jedna z wielkości wejściowych – kąt padania światła na iluminator na granicy woda – iluminator ( $\beta_w$ ), pozostałe wielkości są stałe. Przyjmując, że  $x = \beta_w; a = f_{kp}; b = n_w$ , badana funkcja opisana zależnością (15) przyjmuje następującą postać:

$$f(x) = a \cdot b \cdot \sin x \cdot (1 - b^2 \sin^2 x)^{-\frac{1}{2}} \tag{25}$$

Wówczas:

$$f'(x) = \frac{ab \cos x}{(1 - b^2 \sin^2 x)^{\frac{1}{2}}} + \frac{ab^3 \sin^3 x \cos x}{(1 - b^2 \sin^2 x)^{\frac{3}{2}}} \tag{26}$$

Dla warunku (22)  $f'(x) > 0$ , równanie (27) przyjmuje postać:

$$f'(x) > 0 \Rightarrow \frac{abc \cos x}{(1 - b^2 \sin^2 x)^{\frac{1}{2}}} + \frac{ab^3 \sin^3 x \cos x}{(1 - b^2 \sin^2 x)^{\frac{3}{2}}} > 0 \quad (27)$$

co po przeliczeniu można zapisać:

$$1 - b^2 \sin^2 x > 0 \quad (28)$$

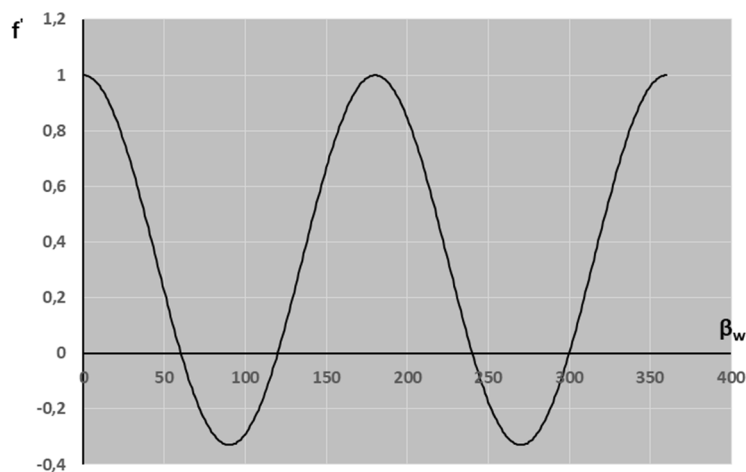
Dla warunku (23)  $f'(x) < 0$ , można zapisać:

$$1 - b^2 \sin^2 x > 0 \quad (29)$$

Natomiast dla warunku  $f'(x) = 0$ , równanie (26) przyjmuje postać:

$$1 - b^2 \sin^2 x = 0 \quad (30)$$

Pamiętając, że  $b = n_w = \text{const} = 1,33$  oraz, że  $x = \beta_w$ , i że teoretycznie wartość kąta może zawierać się w przedziale od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , można obliczyć przebieg zmienności funkcji  $f'(x)$  i zbadać warunki opisane zależnościami (28), (30) i (31) graficznie – Rys. 5.



Rys. 5 Przebieg zmienności funkcji  $f'(x)$  gdzie  $x = \beta_w$ .

Zgodnie z zależnością (21) maksymalna wartość kąta  $\beta_w$  nie może przekroczyć wartości  $48^\circ$ , biorąc pod uwagę dane z Rys. 5 oraz Tab.1 pochodna  $f'(x)$  w przedziale od  $0^\circ$  do  $61^\circ$  jest większa od zera, w związku z powyższym funkcja  $f(x)$  będzie w tym przedziale rosnąca.

W kolejnym kroku badania funkcji założono, że zmianie w równaniu (15) ulega tylko wartość ogniskowej kamery fotogrametrycznej, a pozostałe wielkości są stałe. Przyjmując, że  $f_{kp} = x$ ;  $a = n_w$ ;  $b = \beta_w$  równanie (15) przyjmuje postać:

$$f(x) = x \cdot a \cdot \sin b (1 - a^2 \sin^2 b)^{-\frac{1}{2}} \quad (36)$$

Podczas badania zastosowano te same warunki (22), (23), (24).

Wówczas:

$$f'(x) = a \cdot \sin b (1 - a^2 \sin^2 b)^{-\frac{1}{2}} \quad (31)$$



Dla warunku (22)  $f'(x) > 0$ , równanie (39) przyjmuje postać:

$$a \cdot \sin b(1 - a^2 \sin^2 b)^{-\frac{1}{2}} > 0 \quad (32)$$

Podobnie dla warunku (23)  $f'(x) < 0$ , możemy zapisać:

$$a \cdot \sin b(1 - a^2 \sin^2 b)^{-\frac{1}{2}} < 0 \quad (33)$$

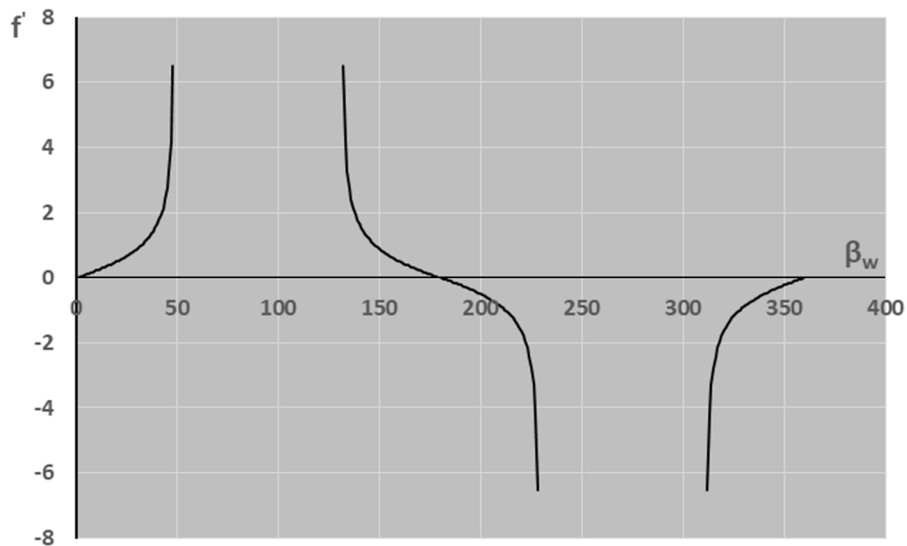
Dla warunku (24), można natomiast zapisać:

$$a \cdot \sin b(1 - a^2 \sin^2 b)^{-\frac{1}{2}} = 0 \quad (34)$$

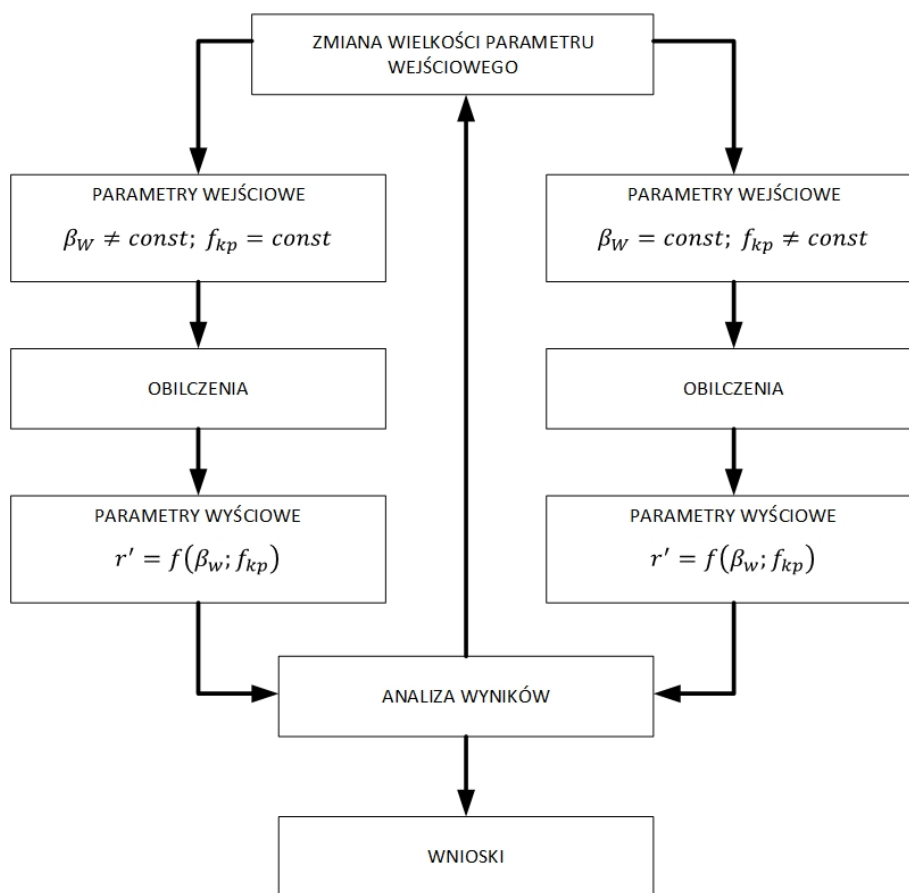
Również i w tym przypadku, co wynika z postaci równań (32), (33) i (34) wartość pochodnej  $f'(x)$  pomimo tego, że w tym przypadku  $x = f_{kp}$  będzie jednak uzależniona od wartości kąta  $b$  ( $\beta_w$ ). Podobnie jak w poprzednim przypadku zagadnienie można rozwiązać graficznie, ponieważ wartości  $a$  i  $b$  stanowią zbiór zamknięty. W tym przypadku  $a = 1,33$ , a wartość  $b$  zawiera się w przedziale od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  – Rys. 6.

Zgodnie z zależnością (21) maksymalna wartość kąta  $\beta_w$  nie może przekroczyć wartości  $48^\circ$ , biorąc pod uwagę dane z Rys. 6 oraz Tab.2 pochodna  $f'(x)$  w przedziale od  $0^\circ$  do  $48^\circ$  jest większa od zera, w związku z powyższym funkcja  $f(x)$  będzie w tym przedziale rosnąca.

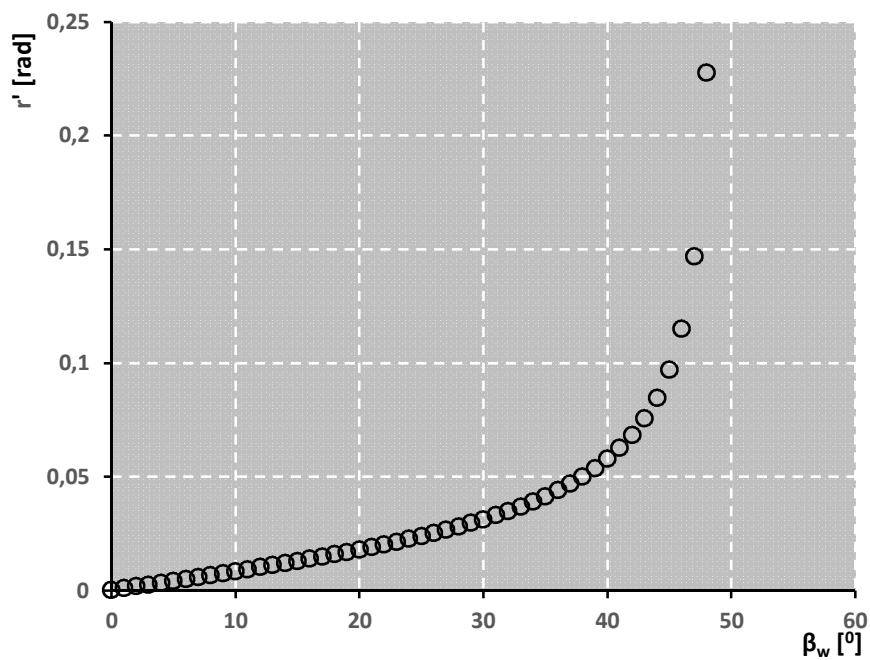
W kolejnym kroku wykonano obliczenia symulacyjne zgodnie z algorytmem przedstawionym na Rys. 5. W pierwszej kolejności przyjmując stałą wartość ogniskowej kamery  $f_{kp} = const = 0,035 [m]$  oraz zmiany kąta zgodnie z wnioskiem wynikającym z równania (21) w zakresie od  $0^\circ$  do  $48^\circ$  ( $\beta_w \in (0^\circ \div 48^\circ)$ ), a także  $n_w = 1,33$ . Dla tak dobranych wartości obliczono wartości funkcji opisanej równaniem (15) – wyniki przedstawiono na kolejnym rysunku.



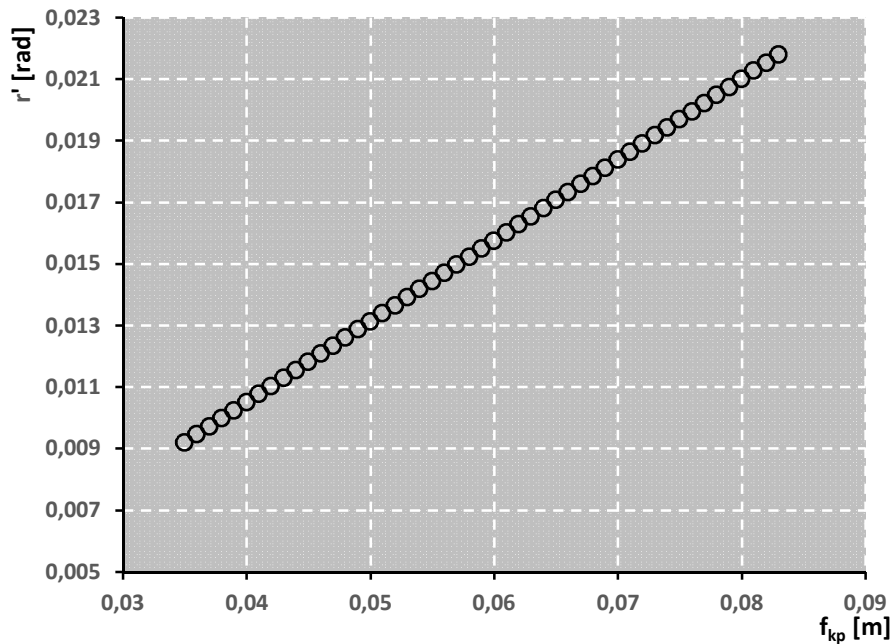
Rys. 6 Przebieg zmienności funkcji  $f'(x)$  gdzie  $x = f_{kp}$ .



Rys. 7 Algorytm wykonanych obliczeń symulacyjnych.

Rys. 8 Wyniki obliczeń dla  $f_{kp} = 0,035$  [m],  $n_w = 1,33$  i  $B_w \in (0^\circ \div 48^\circ)$ .

Następnie wykonano obliczenia przyjmując  $\beta_w = \text{const} = 11,0 [^\circ]$ ,  $n_w = 1,33$  oraz  $f_{kp} \in (0,035 \div 0,083)[m]$ , wyniki przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 9 Wyniki obliczeń dla  $\beta_w = 11,0$ ,  $n_w = 1,33$  i  $f_{kp} \in (0,035 \div 0,083)$ .

## WNIOSKI

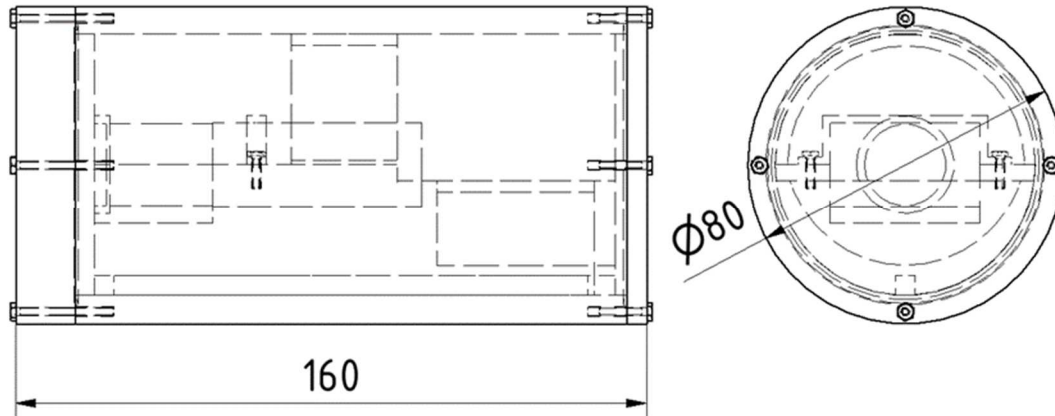
Analizie poddano funkcję opisującą wielkość kątową obiektu obfotografowanego ( $r'$ ) układem optycznym woda – iluminator płaskorównoległy – powietrze opisaną równaniem (15). Z równania tego wynika, że wielkość wyjściowa jest uzależniona od zmiany trzech parametrów: kąta padania promieni na iluminator, ogniskowej kamery oraz współczynnika załamania światła w wodzie. Ponieważ wartość współczynnika jest wielkością stałą, z powyższego wynika, że bezpośredni wpływ na wielkość obiektu obfotografowanego ma kąt padania promieni ( $\beta_w$ ) i ogniskowa kamery ( $f_{kp}$ ). Z powyższych powodów podczas badania funkcji analizowano wpływ zmian tych wielkości na wielkość wyjściową. Przebieg zmienności funkcji  $f'(\beta_w)$  i  $f'(f_{kp})$  przedstawiono na Rys. 5 i Rys. 6. W obydwu przypadkach okazało się, że wartości pochodnej wykazują znaczącą zależność od wartości  $\beta_w$ .

Ponadto, zgodnie z wynikiem równania (21) maksymalna wartość tego kąta nie może przekroczyć wartości  $48^\circ$ . Zarówno pochodna funkcji  $f'(\beta_w)$  i  $f'(f_{kp})$  w zakresie  $\beta \in (0^\circ \div 48^\circ)$  przyjmuje wartości dodatnie  $f'(x) > 0 \Rightarrow f(x) \nearrow$ , a to oznacza, że wzrost wartości  $\beta_w$  i  $f_{kp}$  będzie miał wpływ na wzrost wartości  $r'$ . Wnioski z badania funkcji  $r' = f(\beta_w; f_{kp})$  zostały potwierdzone wynikami symulacji komputerowych. Za pomocą równania (15) wykonano obliczenia funkcji przy  $f_{kp} = 0,035 [m]$ ;  $n_w = 1,33$  oraz  $\beta_w \in (0^\circ \div 48^\circ)$  oraz przy założeniu, że  $\beta_w = 11,0^\circ$ ;  $n_w = 1,33$  oraz  $f_{kp} \in (0,035[m] \div 0,083[m])$ . Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 8 i Rys. 9. Obydwa rysunki wskazują wprost na istnienie korelacji pomiędzy zmiennymi. W przypadku Rys. 8 obrazuje on korelację krzywoliniową, a Rys. 9 – prostoliniową. Potwierdzają to obliczone dla tych przebiegów współczynniki korelacji Pearsona. Dla Rys. 8 wynoszący odpowiednio  $e_{r\beta_w} = 0,7933$ , a dla przebiegu z Rys. 9 -  $e_{rf_{kp}} = 1,0$ . Obliczone na ich podstawie współczynniki determinacji pokazują, że w przypadku funkcji  $r' = f(\beta_w)$  63% zmian wartości zmiennej niezależnej miały wpływ na zmiany wartości zmiennej zależnej ( $e_{r\beta_w}^2 = 0,6294$ ), a w przypadku funkcji  $r' = f(f_{kp})$  100% zmian wartości zmiennej niezależnej miało wpływ na zmiany zmiennej zależnej.

Jak wynika z przeprowadzonych analiz obliczeń teoretycznie wielkość kątową obiektu obfotografowanego jest najbardziej wrażliwa na zmiany ogniskowej kamery fotograficznej. W warunkach praktycznych zachodzi jednak sytuacja, w której ta wielkość jest wartością stałą, co przy stałej wartości współczynnika załamania światła w wodzie oznacza, że praktycznie wartość  $r'$  jest uzależniona od wartości  $\beta_w$ . Wyniki obliczeń dla funkcji  $r' = f(\beta_w)$  pokazują wyraźnie, że ponad 60% zmian kąta miało bezpośredni wpływ na zmiany wielkości  $r'$ . Przy czym w zakresie od  $0^\circ$  do  $30^\circ$  wartość  $r'$  narasta średnio o 0,1% na  $1^\circ$ , a w przedziale od  $30^\circ$  do  $48^\circ$  narasta średnio o 1,05% na  $1^\circ$ . Z powyższego wynika, że wraz ze wzrostem kąta padania promieni na iluminator zmianie ulega skala obrazu, który chcielibyśmy wykorzystać do związowania obfotografowanego obiektu.

Wyniki przedstawionych analiz są zgodne z założeniami teoretycznymi podanymi w publikacji Bekiera i Kaczyńskiego (Rys. 3.29 str. 54) [2]. W dalszym

toku prac planuje się przeprowadzenie szeregu eksperymentów w basenie testowym w kierunku potwierdzenia powyższych wniosków. Dla potrzeb planowanego eksperymentu dobrano odpowiednią kamerę fotograficzną oraz zaprojektowano dla niej obudowę do pracy w warunkach środowiska wodnego (Rys. 10).



Rys. 10 Projekt obudowy dla kamery fotograficznej planowanej do wykorzystania w eksperymentach w basenie testowym.

## LITERATURA

1. Aw M., Meur M.: Cyfrowa fotografia podwodna dla zaawansowanych, Wielki Błękit 2010; ISBN 978-83-61217-28-2,
2. Edge M., Gibson S.: The Underwater Photographer; CRS Press 2020 r., ISBN 978-1-136-12358-8,
3. Zubrzycki W.: Fotografia podwodna, Filmowa Agencja Wydawnicza, W-wa 1959.
4. Williams J.: Optical properties of the sea; United States Naval Institute; USA 1970, ISBN 0-87021-506-X,
5. Olejnik A.: Metoda diagnozowania powierzchni obiektów podwodnych z wykorzystaniem systemu wizyjnego; Zeszyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia 2015 r., Tom LVI; Zeszyt Nr 200A; ISSN 0860-889X; e-ISSN 2300-5300; DOI: 10.5604/0860889X;
6. Beker L., Kaczyński R.: Fotografia i fotogrametria podwodna; Wyd. Naukowo-Techniczne W-wa 1985 r., ISBN 83-204-0669-2;
7. Jackson R.M.: Essentials of underwater photography; Best Publishing Company, USA 2000 r., ISBN 0-941332-77-2;
8. O'Byrne M., Ghosh B., Schoefs F., Pakrashi V.: Image-Based Damage Assessment for Underwater Inspections; CRS Press 2019 r., ISBN 978-1-138-03186-9;
9. Orzepkowski Sł.: Fotografia podwodna; Wyd. Naukowo-Techniczne, W-wa 1975 r.,
10. Samsel J.: Pletwonurek fotograf; KDP Poland, W-wa 2001 r., ISBN 83-913030-2-0;
11. Sokół Ł.: Ocena wpływu układu optycznego woda-iluminator płaskorównoległy-powietrze na wielkość obiektu obfotografowanego w środowisku podwodnym; Praca dyplomowa Inżynierska Wydział Mechaniczno-Elektryczny Akademii Marynarki Wojennej w Gdyni pod kierunkiem dr hab. inż. A. Olejnik, Gdynia 2021 rok,

inż. Łukasz Sokół

e-mail: 21281@edu.amw.gdynia.pl

Adam Olejnik ORCID: 0000-0003-1199-5835