

Paweł WIELGAT\*

## **MODELOWANIE WYMIANY WODY W ZBIORNIKACH HODOWLANYCH PRZY UŻYCIU ZMODYFIKOWANEGO MODELU TŁOKOWEGO NA PRZYKŁADZIE BASENÓW HODOWLANYCH DLA FOK**

Niniejszy artykuł opisuje sposób prostego modelowania wymiany wody w basenach hodowlanych fokarium Stacji Morskiej Instytutu Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego. W celu rozpoznania warunków wymiany wody oraz udziału stref zastoiskowych w basenach posłużono się dwiema uzupełniającymi się metodami. Były to badania traserowe z wykorzystaniem znacznika fluorescencyjnego oraz komputerowe obliczenia rozkładu linii prądu z użyciem modelu kinematycznego opisanego równaniem biharmonicznym. W oparciu o uzyskane dane stworzono model matematyczny opisujący wymianę wody w basenach będący modyfikacją prostego modelu przepływu tłokowego.

### **1. WSTĘP**

Modelowanie matematyczne ma szerokie zastosowanie przy badaniu obiektów przepływowych o znacznej kubaturze, takich jak reaktory biologiczne lub różnego rodzaju zbiorniki, np. baseny hodowlane dla zwierząt. Szczególnie ważne w tego typu obiektach jest stworzenie właściwych warunków hydraulicznych utrzymujących cyrkulację i wymianę wody na odpowiednim poziomie, a dzięki temu zapewniających właściwy poziom stężenia substancji deponowanych w wodzie w wyniku karmienia i bytowania zwierząt stałocieplnych. W takich przypadkach pomocne jest modelowanie matematyczne. Trudności może przysparzać jednak skomplikowanie i niedoskonałość opisu matematycznego zjawisk zachodzących w tych obiektach. Dlatego przez lata praktyki opracowano wiele modeli uproszczonych, opisujących wymianę i cyrkulację wody, bazujących na prostych równaniach algebraicznych (np. model tłokowy).

---

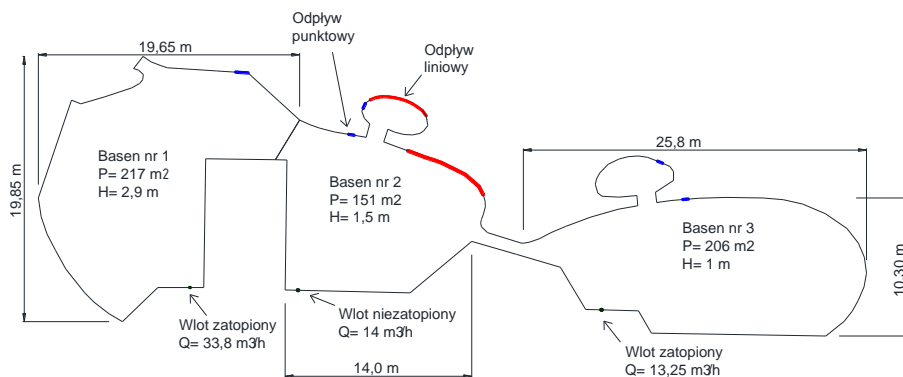
\* Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; pawel.wielgat@gmail.com.

Innym podejściem do zagadnienia jest badanie procesów transportu, dyspersji oraz pomiar czasów zatrzymania masy w układzie na drodze badań wskaźnikowych. Kolejnych możliwości dostarcza korzystanie z prostych programów komputerowych, które służą do rozwiązywania równań opisujących szczegółowo dane zagadnienie. Przykładem takiego podejścia jest analiza pola prędkości przepływu za pomocą modeli typu kinematycznego. Dostrojenie funkcji programu do rozwiązania jednego przypadku oraz stworzenie modelu matematycznego pod konkretny obiekt jest wysoce efektywnym i tanim rozwiązaniem.

Stacja Morska Instytutu Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego prowadzi program restytucji foki szarej w obszarze południowego Bałtyku. W ramach ochrony gatunku, od 1997 roku prowadzona jest także hodowla stada rozrodczego, z którego uzyskane młode osobniki wypuszczane są na wolność. Kompleks basenów hodowlanych jest zasilany wodą morską, której cyrkulację wymusza odpowiednio skonstruowany układ hydrauliczny. Dzięki wymuszonemu przepływowi wody wyplukiwane są zanieczyszczenia trafiające do zbiorników w wyniku karmienia i metabolizmu zwierząt. Niedostateczna sprawność hydraulicznego układu basenów może powodować spowolnienie ruchu wody i umożliwiać powstawanie stref stagnacji wody. W strefach tych mogą panować warunki odpowiednie dla rozwoju mikroorganizmów wydalanych wraz z odchodami. Zwierzęta przepływając przez potencjalne strefy stagnacji mogą rozprzestrzeniać mikroorganizmy po całym basenie.

Podstawowy wpływ na cyrkulację i równomierność wymiany wody w tego typu obiektach ma ich kształt, krotność wymiany wody oraz rozmieszczenie wlotów i odpływów wody. Parametry te w znacznym stopniu determinują układ linii prądu w obiekcie, umiejscowienie stref zastoiskowych i ruchu wirowego wody.

Kompleks fokarium składa się z trzech basenów (rys.1). Baseny posiadają dwa typy wlotów: zatopione i niezatopione oraz dwa typy odpływów: szczelinowe (w postaci kratki ściekowej wzdłuż brzegu) i punktowe.



Rys. 1. Przyjęty model fizyczny badanego obiektu

Basen nr 1 jest najgłębszy w całym kompleksie, a jego głębokość wynosi 2,9 metra. Powierzchnia wynosi 217 m<sup>2</sup>. Jest on oddzielony od pozostałych basenów szczelną przegrodą i zasilany zatopionym wlotem o średnicy 100 mm. Wg dokumentacji projektowej strumień objętości na dopływie wynosi 33,8 m<sup>3</sup>/h.

Basen nr 2 połączony jest z basenem nr 3 i zatoką pełniącą funkcję izolatki. Jest to jedyny basen z wlotem niezatopionym. Średnica wlotu wynosi 85 mm, a strumień dopływającej wody to 14 m<sup>3</sup>/h. Głębokość basenu osiąga 1,5 m, a jego powierzchnia 151 m<sup>2</sup>. Basen ma dwa odpływy: punktowy i szczelinowy. Basen - izolotka posiada także po jednym odpływie punktowym i szczelinowym.

Basen nr 3 połączony jest z basenem nr 2 wąskim kanałem o długości 3,8 m. Sąsiaduje on z basenem - izolatką. Wyposażony jest w jeden wlot zatopiony o średnicy 50 mm. Strumień jest na poziomie 13,25 m<sup>3</sup>/h. Głębokość w basenie wynosi 1 m, a powierzchnia 206 m<sup>2</sup>. Posiada on jeden odpływ punktowy. Ponadto basen - izolotka (połączony z basenem nr 3) posiada również jeden odpływ punktowy.

## 2. MODEL TŁOKOWY

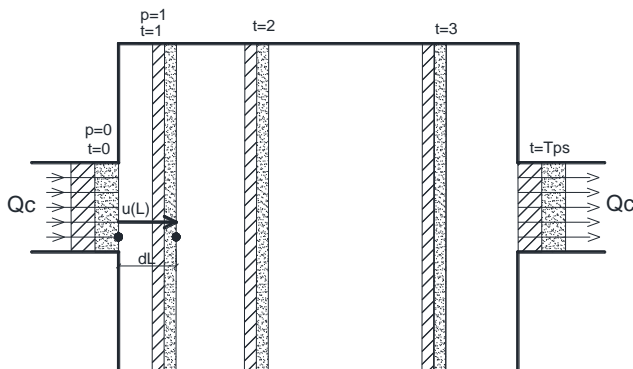
Najprostszymi i najpopularniejszymi metodami opisu wymiany wody w obiektach cyrkulacyjnych są metody algebraiczne. Należy do nich m.in. model przepływu tłokowego. W modelu tłokowym (rys. 2) w wyniku daleko idących uproszczeń przyjmujemy, że wszystkie elementarne porcje płynu trafiające do zbiornika przebywają w nim jednakowy czas, zwanym średnim czasem zatrzymania lub czasem przepływu tłokowego. Konsekwencją tego jest przyjęcie założenia, że wszystkie cząstki wody w zbiorniku poruszają się z tą samą średnią prędkością, po trajektoriach o tej samej długości. Wymusza to założenie równomiernego wypierania wody znajdującej się w zbiorniku przez wodę dopływającą. Założenie to nawiązuje do procesu wypychania cieczy z cylindra przez pracujący tłok (stąd też nazwa model tłokowy).

W modelu tłokowym prędkość jest wartością stałą, opisaną przez prędkość średnią dla całego przekroju poprzecznego strumienia cieczy, którą możemy obliczyć zgodnie z zależnością:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (1)$$

gdzie:

- $v$  – prędkość średnia w przekroju,
- $Q$  – obliczeniowy strumień objętości wody,
- $S$  – powierzchnia zbiornika.



Rys. 2. Schematyczne przedstawienie zasady działania modelu tłokowego w czasie

Przepływ cieczy - wody przez takie obiekty, jak baseny hodowlane, w większości przypadków odbywa się w warunkach ustalonych. Wówczas możemy przyjąć, że strumień wody  $Q$  na wlocie jest stały. Powierzchnia zbiornika  $S$  jest wymiarem geometrycznym, niezmiennym dla działającego układu, więc prawdziwe są zależności:

$$S = \text{const} \quad (2)$$

$$Q = \text{const} \quad (3)$$

$$v = \frac{Q}{S} = \text{const} \quad (4)$$

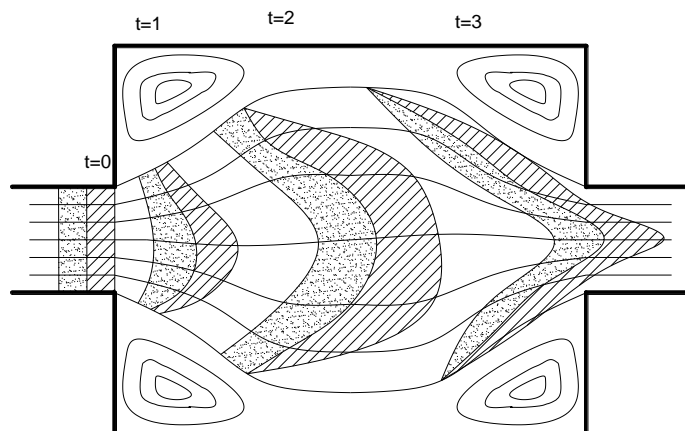
Po uwzględnieniu powyższych zależności, ostatecznie otrzymujemy wzór na czas przebywania wody w układzie:

$$t_p = \int_{p_1}^{p_2} \frac{S(L)dL}{Q} = \frac{1}{Q} \int_{p_1}^{p_2} S(L)dL = \frac{1}{Q} \int_{p_1}^{p_2} dV = \frac{V}{Q} = t_{ps} \quad (5)$$

gdzie:

- $t_p$  – czas przebywania,
- $p_2, p_1$  – punkty wyznaczające długość drogi (dystansu),
- $S$  – pole powierzchni,
- $L$  – droga,
- $dL$  – pochodna względem drogi,
- $Q$  – obliczeniowy strumień objętości wody,
- $V$  – objętość,
- $dV$  – pochodna względem objętości,
- $t_{ps}$  – czas przepływu tłokowego.

Model tłokowy nie uwzględnia zróżnicowanego pola przepływu cieczy przez rzeczywisty układ. W rzeczywistości objętość płynu wpływająca do czaszy zbiornika rozplywa się równomiernie w obszarze aktywnego przepływu (głównego nurtu). Poszczególne porcje przemieszczają się z różną prędkością i pokonują drogę o różnej długości. Można przyjąć prawidłowość, że im dłuższa trajektoria cząstki, tym mniejsza jest także jej prędkość. W wyniku tego poszczególne cząstki płynu opuszczają zbiornik, podczas gdy inne znajdują się daleko przed odpływem. Tym samym cząstki wody, z których składa się pewna umowna porcja płynu trafiająca do zbiornika, poruszają się z różną prędkością i wzdłuż trajektorii o różnej długości. Stąd można wnioskować, że czas przebywania każdej cząstki w zbiorniku jest inny.



Rys. 3. Przedstawienie przybliżonego zróżnicowania transportu masy w rzeczywistym obiekcie

W wyniku zróżnicowanego pola przepływu dochodzi do mieszania wody, co jest widoczne podczas pomiarów znacznikowych. Mieszanie to nosi nazwę dyspersji masy, a jego opis jest niemożliwy bez wykorzystania zaawansowanych narzędzi matematycznych. Z tego powodu, modele uwzględniające dyspersję są rzadko stosowane, natomiast z niesłabnącą popularnością wśród projektantów cieszy się model tłokowy.

### 3. ZMODYFIKOWANY MODEL TŁOKOWY

W modelu tłokowym do obliczeń brana jest pod uwagę tylko kubatura zbiornika, przy założeniu jej całkowitego wykorzystania. W praktyce na czas, jaki zajmuje cząstce płynu pokonanie drogi - dystansu pomiędzy wlotem a odpływem, wpływa prędkość wlotowa, kształt basenu oraz rozmieszczenie wlotów i odpływów wody. Czynniki te determinują także określony rozkład pola prędkości i układ linii prądu. Stworzony model jest próbą uchwycenia w prosty sposób wpływu dyspersji na wymianę wody

w zbiornikach hodowlanych. Zaproponowany model bazuje na:

- płaskim układzie linii prądu, obliczonego za pomocą równania biharmonicznego,
- zasadzie przepływu tłokowego,
- czasach wymiany wody, uzyskanych podczas traserowych pomiarów terenowych.

Obliczone linie prądu wyznaczają obszary o znanej powierzchni, która bierze udział w przepływie (wymianie wody) oraz strefy stagnacji, które charakteryzują się zamkniętą wirową strukturą i nie biorą udziału w wymianie wody. W dwuwymiarowym polu prędkości izolinie funkcji prądu odpowiadają liniom prądu. Wynika z tego, że różnica wartości dwóch sąsiednich linii funkcji prądu odpowiada strumieniowi objętości przepływu pomiędzy nimi. Znając strumień na wlocie i ułożenie linii prądu o określonych wartościach, możemy określić strumień objętości jaki dopływa na dany obszar pomiędzy tymi liniami. Odejmując od siebie wartość potencjałów funkcji prądu dwóch sąsiednich linii obliczamy część strumienia trafiającego na obszar ograniczony izoliniami:

$$P_i - P_{i-1} = N_i \quad (6)$$

$$Q_i = Q_c \cdot N_i \quad (7)$$

gdzie:

$P_i, P_{i-1}$  – wartości (procentowe) dwóch sąsiednich linii funkcji prądu,

$N_i$  – różnica wartości dwóch sąsiednich linii funkcji prądu,

$Q_c$  – strumień całkowity,

$Q_i$  – część strumienia przypadająca na obszar wyznaczony dwiema liniami funkcji prądu.

Zależności (6) i (7) pozwalają na obliczenie czasu napełnienia się danego obszaru i wymianę w nim wody, analogiczną jak w przepływie tłokowym.

Dwuwymiarowość modelu wymusza określenie miąższości (wysokości) warstwy wody biorącej udział w przepływie (wartość ta musi być jednakowa dla całego zbiornika). Wynika z tego, iż miąższość warstwy aktywnej ma kluczowy wpływ na kubaturę poszczególnych obszarów wyznaczonych liniami funkcji prądu. Tym samym decyduje o czasie wymiany wody w poszczególnych częściach warstwy aktywnej. Mnożąc powierzchnie i grubość warstwy aktywnej uzyskujemy jej kubaturę:

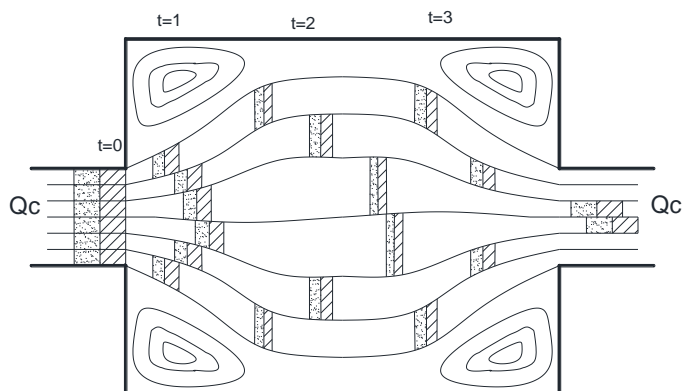
$$V_i = S_i \cdot H_{akt} \quad (8)$$

gdzie:

$V_i$  – objętość obszaru wyznaczonego liniami funkcji prądu,

$S_i$  – powierzchnia obszaru wyznaczonego liniami funkcji prądu,

$H_{akt}$  – miąższość warstwy aktywnej.



Rys. 4. Idea modelu kombinowanego (opis w tekście)

Znając strumień objętości trafiający do obszaru wyznaczonego dwoma liniami prądu strefy aktywnej, możemy obliczyć przybliżony czas wymiany wody w danym obszarze. Posługując się ilorazem objętości pojedynczego pasa powierzchni czynnej zbiornika i części strumienia dopływającego do niego, czas wymiany możemy obliczyć następująco:

$$t_i = \frac{V_i}{Q_i} \quad (9)$$

gdzie:

$t_i$  – czas wypełniania objętości obszaru wyznaczonego liniami funkcji prądu.

Kluczowe dla tego modelu określenie miąższości warstwy aktywnej musi być oparte dodatkowymi badaniami, pozwalającymi uzyskać informacje o czasie wymiany wody w basenie.

#### 4. BADANIA TRASEROWE

Rozpoznanie warunków hydraulicznych panujących w rzeczywistym obiekcie (takim jak zbiorniki hodowlane) wymaga użycia mało inwazyjnej metody, która nie będzie powodowała stresu u bytujących tam zwierząt oraz nie będzie stwarzała okazji do uszkodzenia aparatury pomiarowej. Wygodne w takim przypadku jest zastosowanie pomiarów traserowych z wykorzystaniem odpowiednich substancji znacznikowych. Substancja ta nie może zmieniać właściwości fizycznych wody w zbiorniku, a także musi być nietoksyczna dla żyjących w basenach zwierząt. Ponadto trzeba posłużyć się substancją niewystępującą w środowisku naturalnym (lub badanym układzie) oraz

musi być ona trudnorozkładalna biologicznie. Dodatkowo, barwnik taki powinien być łatwo wykrywalny za pomocą aparatury pomiarowej. Z tego powodu roztwór dozowany w czasie pomiarów powinien charakteryzować się dużym stężeniem, aby nie uległ rozcieńczeniu poniżej progu wykrywalności [1]. Powyższe wymagania najlepiej spełnia roztwór rodaminy WT, szeroko stosowany w pomiarach w środowisku naturalnym.

Pomiary znacznikowe z wykorzystaniem traseru mimo swej prostoty wymagają przestrzegania pewnego reżimu. Fundamentalną czynnością jest odpowiednie wprowadzenie barwnika do układu w formie tzw. impulsu technicznego [1]. Dawkę traseru o odpowiedniej objętości i stężeniu (zawierającą właściwy ładunek barwnika) wprowadzamy na wlocie wody do układu w możliwie najkrótszym czasie. W momencie wypuszczenia barwnika należy rozpocząć pomiar czasu w punkcie rejestracji stężenia barwnika na odpływie. W trakcie pomiarów otrzymujemy wykres przedstawiający zależność stężenia barwnika na odpływie od czasu mierzonego w momencie wypuszczenia impulsu technicznego.

W wyniku przeprowadzenia pomiarów traserowych uzyskujemy informacje na temat rozkładu traseru w czasie i przestrzeni. Z rozkładu stężenie w czasie możemy odczytać następujące informacje:

- najkrótszy czas przebywania wody w układzie,
- czas modalny,
- najdłuższy czas przebywania wody w układzie.

Najkrótszy czas przebywania wody w układzie to czas potrzebny pierwszym śladom znacznika na dotarcie do przekroju pomiarowego. Czas modalny z kolei dostarcza informację o czasie, w jakim odpływa barwnik o największym stężeniu. Natomiast najdłuższy czas przebywania wody w systemie informuje nas, kiedy miało miejsce odpłynięcie z układu ostatnich dawek znacznika. Najczęściej wyznaczany jest poprzez określenie czasu, w którym odpłynie znaczna i reprezentatywna część barwnika. Wykonanie pomiaru do chwili całkowitego usunięcia znacznika z układu często wymuszałyby długotrwałe pomiary, których wykonanie często jest niemożliwe lub utrudnione. Zazwyczaj wcześniej zebrane informacje dostarczają wystarczającej wiedzy na temat badanego obiektu.

Podczas prowadzonych badań traserowych nie było możliwe usunięcie zwierząt z badanych obiektów. Z tego powodu czas pomiarów był ograniczony i nie było możliwe określenie czasu całkowitego wypłukania barwnika z układu basenów. Trzeba też tym samym uzasadnić przerwanie badań i brak pomiaru w basenie nr 3. Uzyskane dane z dwóch pozostałych basenów dostarczyły wystarczającą ilość informacji na temat przepływów w obiekcie, potrzebnych do stworzenia i weryfikacji modelu matematycznego. Dodatkowo wysoki poziom barwnika „w tle” (spowodowany połączeniem basenów 2 i 3) mógłby uniemożliwić odczyt czasu szczytowego stężenia traseru na odpływie basenu nr 3. Dlatego też, mając na uwadze dobro zwierząt, zrezygnowano z prowadzenia dalszych pomiarów.



Jak już było wspomniane wcześniej, jako traser został użyty roztwór rodaminu WT o stężeniu  $0,2 \text{ g/dm}^3$  w ilości 80 ml, wpuszczony na wlocie w formie impulsu technicznego. Stężenie znacznika na odpływie mierzono za pomocą dwóch sond CYCLOPS-7 firmy Turner Designs (Fot. 1 i 2). Czujniki dokonywały pomiaru w dwóch stopniach czułości, przy czym jeden czujnik był 10-krotnie bardziej czuły od drugiego. Dla każdego badanego zbiornika, na podstawie uzyskanych podczas pomiarów wyników, utworzono dwie krzywe rozkładu stężenia na odpływie w czasie mierzonym od momentu wpuszczenia barwnika. Dzięki dwóm wykresom i korelacji między nimi można wykluczyć wadliwe działanie układu pomiarowego. Zastosowane sondy pomiarowe, wartość mierzonego stężenia zamieniały na sygnał napięciowy, wyrażony w voltach. Następnie sygnał ten był rejestrowany przez przetwornik analogowo-cyfrowy na komputerze, w interwałach czasowych co 1 s. Uzyskane w ten sposób wyniki przedstawione zostały na wykresach, na których czas wyrażono na osi odciętych. W ten sposób uzyskano informację o czasach wymiany w sposób pośredni, bez pomiarów wartości stężenia.



Fot. 1. Propagacja traseru po wpuszczeniu dawki znacznika do basenu nr 7



Fot. 2. Zbliżenie się traseru do odpływu z basenu nr 7 z umieszczonymi sondami pomiarowymi

## 4.1. WYNIKI POMIARÓW TRASEROWYCH

Analiza wyników pomiarów traserowych, przedstawionych w tabeli 1, pozwala stwierdzić, że niezależnie od basenu, czasy wymiany wody są do siebie zbliżone. Dopłynięcie dawki barwnika do odpływu zarejestrowano pomiędzy 12-stą a 13-stą minutą od jej wprowadzenia na wlocie. Odpływ barwnika trwał w obu basenach około 10 minut. Widoczną różnicą są momenty szczytowego stężenia na odpływie. W basenie nr 2 czas modalny to 17 minut - od momentu wpuszczenia traseru i 4 minuty - po zarejestrowaniu czasu najkrótszego przebywania. W zbiorniku nr 1 czas modalny zanotowano już po minucie od zarejestrowania czasu najkrótszego przebywania.

Tabela 1. Zestawienie czasów przebywania uzyskanych podczas pomiarów traserowych

Numer basenu	Czas najkrótszego przebywania		Czas modalny		Czas najdłuższego przebywania	
	[s]	[min]	[s]	[min]	[s]	[min]
1	720	12	781	13	1320	22
2	781	13	1019	17	1379	23
3	-	-	-	-	-	-

## 5. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Układ linii prądu obliczono za pomocą modelu kinematycznego opisanego równaniem biharmonicznym. W celu uproszczenia założono ustalony przepływ o małej prędkości oraz przyjęto dwuwymiarowość zjawiska. Zabieg ten nazywamy uproszczeniem Stokes'a. W wyniku takiego podejścia zakładamy, że dla przepływów powolnych, ustalonych w czasie, w równaniu Naviera-Stokes'a eliminuje się człon dotyczący gradientu ciśnienia i siły masowej. Wówczas pole prędkości możemy zdefiniować następująco:

$$\mathbf{u} = u_x(x, y)\mathbf{i} + u_y(x, y)\mathbf{j} \quad (10)$$

gdzie:

- $\mathbf{u}$  – wektor prędkości,
- $u_x(x, y), u_y(x, y)$  – składowe wektora prędkości,
- $\mathbf{i}, \mathbf{j}$  – wersory osi współrzędnych.

Model dwuwymiarowy bazuje na obliczeniu rozkładu pola prędkości przepływu posługując się opisem składowych wektora prędkości za pomocą funkcji prądu  $\Psi$ , spełniającej zależności:

$$u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (11)$$

$$u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (12)$$

gdzie:

$\psi$  - funkcja prądu,

$\partial x, \partial y$  - pochodna cząstkowa względem zmiennej  $x$  i  $y$ .

Bazując na równaniu ciągłości i warunku dwuwymiarowości można dowieść, że linie o stałej wartości funkcji prądu są styczne do wektorów prędkości [2].

Końcowa postać równania biharmonicznego dla funkcji prądu ma postać:

$$\Delta \Delta \psi = \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial y^4} = 0 \quad (13)$$

gdzie:

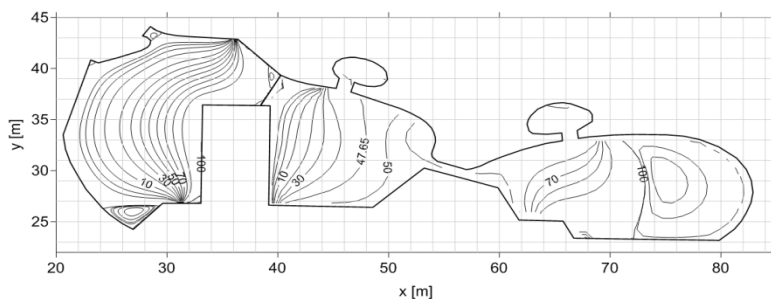
$\Delta$  - operator Laplace'a.

W modelu zakłada się, że ruch każdej z cząstek płynu jest sumą dwóch składowych, ruchu postępowego i obrotowego. Wartości tych składowych są zmienne, dzięki czemu model może opisywać powstałe struktury wirowe i przepływ wzdłużny. Równanie należy uzupełnić o 2 typy warunków brzegowych [3]. Pierwszy z nich, warunek Dirichleta, wymaga zdefiniowania wartości funkcji prądu na brzegu obszaru, gdzie wartość funkcji prądu zmienia się w zależności od wartości strumienia dopływu lub odpływu wody przez brzeg basenu. Drugi typ warunku brzegowego określa wartość pochodnej funkcji prądu, czyli biorąc pod uwagę zależności (11) i (12) są to wartości prędkości stycznej i normalnej. W przypadku brzegu nieprzepuszczalnego przyjmuje się, że prędkość styczna i normalna na brzegu obszaru są równe 0. W części obszaru, na którym następuje zmiana wartości funkcji prądu (wloty i wyloty), przyjmuje się, że prędkość styczna równa jest 0, natomiast prędkość normalna odpowiada zmianie wartości funkcji prądu [4]. Do określenia warunku brzegowego ważne jest jego umiejscowienie. Dlatego w modelu matematycznym użytym do obliczeń, każdy punkt określający brzeg poszczególnych basenów do swojej współrzędnej miał przyporządkowaną wartość funkcji prądu. W celu uproszczenia obliczeń operowano wartościami procentowymi funkcji prądu od 0% do 100% na jednostkę głębokości.

Końcowym efektem obliczeń numerycznych równania biharmonicznego jest przedstawienie układu izolinii funkcji prądu w poszczególnych basenach. Na uzyskanym w ten sposób wykresie widoczne są strefy bezodpływowe o wirowej strukturze oraz rozkład pola przepływu pomiędzy wlotami i odpływami wody. Obszary ograniczone zamkniętymi liniami potencjału prądu są obszarami bezodpływowymi. Po-

wierzchnie stref bezodpływowych można łatwo oszacować na podstawie różnicy powierzchni wziętej do obliczenia czasu tłokowego, a powierzchnią łączną strefy aktywnej wymiany w poszczególnych basenach (tab. 5).

Jak widać na rysunku 5, w basenach strefy zastoiskowe tworzą się w narożach. Największa strefa bezodpływowa w basenie nr 3 jest usytuowana po lewej stronie za wlotem wody. W porównaniu do całej powierzchni basenu jest ona jednak niewielka.



Rys. 5. Rozkład linii prądu  $\Psi(x,y)$  w warunkach ruchu ustalonego w basenach fokarium

W basenie nr 2 przepływ rozkłada się równomiernie po powierzchni basenu, tworząc strefę stagnacji wody przy przegrodzie oddzielającej basen nr 1. Brak przepływu ma miejsce także w kanale łączącym baseny nr 2 i 3. Potwierdzają to także pomiary rozkładu prędkości w kanale wykonane za pomocą prędkościomierza elektromagnetycznego Flo-Mate (model 2000) firmy Marsh-McBirney. Jest to spowodowane m.in. cyrkulacją wody w basenie nr 3, gdzie główny nurt biegnie wzdłuż linii łączących wlot wody z jej odpływem. Powoduje to zatrzymanie części wody we wspomnianym już kanale oraz rozwinięcie się strefy bezodpływowej o znacznych rozmiarach. W związku z niezależną wymianą wody w każdym z połączonych basenów, wartości potencjału linii prądu obliczono na nowo, aby mieściły się przedziale od 0% do 100% dla każdego zbiornika. We wszystkich strefach bezodpływowych cyrkulacja wody tworzy zamknięte obszary, pomiędzy którymi wymiana wody jest utrudniona. Na podstawie powyższych obserwacji można przypuszczać, że niedostateczna wymiana wody ma miejsce również w basenach - izolatkach. Jednak nie były one przedmiotem niniejszych badań. W celu uzyskania pełnego obrazu cyrkulacji wody we wszystkich obiektach fokarium, należałoby przeanalizować ich przypadek bardziej szczegółowo.

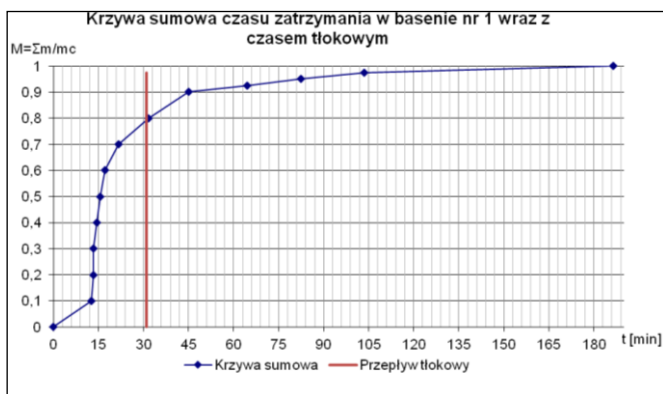
## 6. OBLICZENIA CZASU WYMIANY WODY ZA POMOCĄ MODELU TŁOKOWEGO I JEGO ZMODYFIKOWANEJ WERSJI

Użyte modele dwuwymiarowe wymagają określenia wysokości warstwy wody biorącej aktywny udział w wymianie. Model tłokowy zakłada całkowite wykorzysta-

nie objętości basenu w procesie cyrkulacji wody. Model kombinowany bazując na układzie linii prądu, eliminuje ze strefy aktywnej wymiany wody obszary o zamkniętej cyrkulacji. Powoduje to różnice w powierzchniach i objętościach stref aktywnych w tych modelach. Miąższość strefy aktywnej w modelu kombinowanym dobierano tak, aby czasy modalne obliczeniowe pokrywały się z czasami modalnymi uzyskanymi podczas pomiarów traserowych. Wyznaczoną w ten sposób wysokość warstwy aktywnej użyto również do obliczeń czasu tłokowego. We wszystkich basenach wysokość tej warstwy jest podobna i mieści się w przedziale 0,08–0,085 m.

Tabela 2. Wyniki obliczeń czasów przebywania wody w basenie nr 1

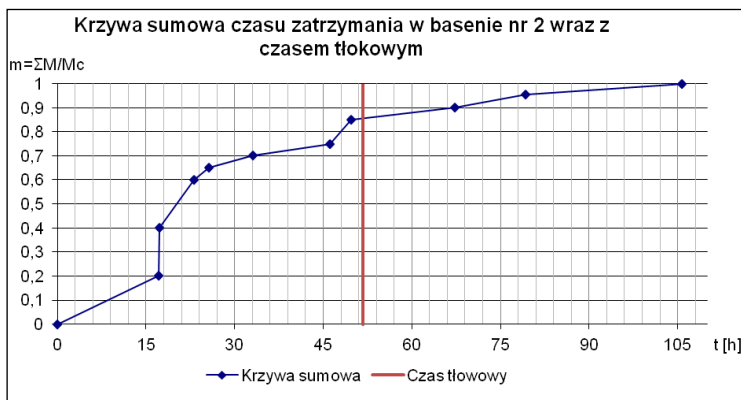
Wartość procentowa funkcji prądu $\Psi$ ograniczająca obszar paska		Ni	Si	H akt	Vi	Qi	Qi	ti	ti	M= $\Sigma m$ / mc
%		%	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /h]	[s]	[min]	[-]
								0	0	0,000
70	60	10	8,972	0,08	0,718	0,000939	3,380	764	12,7	0,100
80	70	10	9,440		0,755	0,000939	3,380	804	13,4	0,200
60	50	10	9,468		0,757	0,000939	3,380	807	13,4	0,300
50	40	10	10,291		0,823	0,000939	3,380	877	14,6	0,400
90	80	10	11,044		0,884	0,000939	3,380	941	15,7	0,500
40	30	10	12,127		0,970	0,000939	3,380	1033	17,2	0,600
30	20	10	15,270		1,222	0,000939	3,380	1301	21,7	0,700
20	10	10	22,359		1,789	0,000939	3,380	1905	31,8	0,800
100	90	10	31,775		2,542	0,000939	3,380	2707	45,1	0,900
5	2,5	2,5	11,366		0,909	0,000235	0,845	3874	64,6	0,925
7,5	5	2,5	14,513		1,161	0,000235	0,845	4946	82,4	0,950
10	7,5	2,5	18,226		1,458	0,000235	0,845	6212	103,5	0,975
2,5	0	2,5	32,820		2,626	0,000235	0,845	11186	186,4	1,000
$\Sigma$		100	207,670	$\Sigma$	16,614	0,009	33,800			



Rys. 6. Krzywa sumowa czasu zatrzymania w basenie nr 1

Tabela 3. Wyniki obliczeń czasów zatrzymania w basenie nr 2

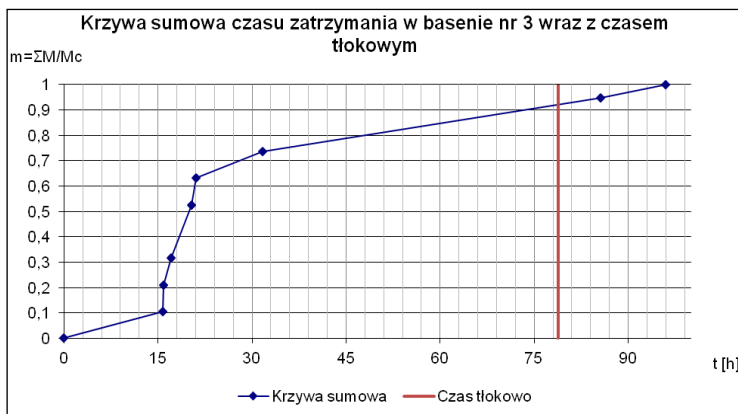
Wartość procentowa funkcji prądu $\Psi$ ograniczająca obszar paska		Ni	Si	H akt	Vi	Qi	Qi	ti	ti	M= $\Sigma m/mc$
%		%	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /h]	[s]	[min]	[-]
								0	0	0
20	30	20	9,991	0,08	0,799	0,000778	2,8	1028	17,1	0,2
10	20	20	10,11		0,809	0,000778	2,8	1040	17,3	0,4
30	40	20	13,463		1,077	0,000778	2,8	1385	23,1	0,6
2,5	5	5	3,741		0,299	0,000194	0,7	1539	25,7	0,65
5	7,5	5	4,824		0,386	0,000194	0,7	1985	33,1	0,7
7,5	10	5	6,724		0,538	0,000194	0,7	2766	46,1	0,75
40	45	10	14,487		1,159	0,000389	1,4	2980	49,7	0,85
0	2,5	5	9,81		0,785	0,000194	0,7	4036	67,3	0,9
45	47,65	5,3	12,244		0,98	0,000206	0,742	4752	79,2	0,953
47,65	50	4,7	14,487		1,159	0,000183	0,658	6341	105,7	1
$\Sigma$		100	99,881		$\Sigma$	7,99	0,003889	14		



Rys. 7. Krzywa sumowa czasu zatrzymania w basenie nr 2

Tabela 4. Wyniki obliczeń czasów zatrzymania w basenie nr 3

Wartość procentowa funkcji prądu $\Psi$ ograniczająca obszar paska		Ni	Si	H akt	Vi	Qi	Qi	ti	ti	M= $\Sigma m/mc$
%		%	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /s]	[m <sup>3</sup> /h]	[s]	[min]	[-]
				0,085				0	0	
75	70	10,53	4,313		0,367	0,00039	1,395	946	16	0,105
80	75	10,53	4,350		0,370	0,00039	1,395	954	16	0,211
70	65	10,53	4,678		0,398	0,00039	1,395	1026	17	0,316
90	80	21,053	11,149		0,948	0,00077	2,789	1223	20	0,526
65	60	10,53	5,779		0,491	0,00039	1,395	1268	21	0,632
60	55	10,53	8,676		0,737	0,00039	1,395	1904	32	0,737
100	90	21,05	46,786		3,977	0,00077	2,789	5132	86	0,947
55	52,50	5,26	13,127		1,116	0,00019	0,697	5760	96	1
$\Sigma$		100	81,418		$\Sigma$	6,921	0,00368	13,250		



Rys. 8. Krzywa sumowa czasu zatrzymania w basenie nr 3

Tabela 5. Zróżnicowanie objętości i powierzchni stref aktywnych

Numer basenu	H akt [m]	Model tłokowy, objętość i powierzchnia strefy aktywnej		Model zmodyfikowany, objętość i powierzchnia strefy aktywnej		Różnice objętości i powierzchni strefy aktywnej pomiędzy modelami	
		S [m <sup>2</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ]	S [m <sup>2</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ]	S [m <sup>2</sup> ]	V [m <sup>3</sup> ]
1	0,08	217,46	17,44	207,67	16,614	9,79	0,826
2	0,08	150,9	12,07	99,881	7,99	51,019	4,08
3	0,085	205,92	17,42	81,418	6,921	124,502	10,499

Czas tłokowy wynosi 31 minut dla basenu nr 3, 52 minuty dla basenu nr 4 i 79 minut dla basenu nr 7. Dysproporcja pomiędzy czasem modalnym obliczonym modelem kombinowanym a tłokowym jest tym większa, im większy jest udział stref bezodpływowych w poszczególnych basenach. Jest to widoczne wyraźnie w basenach nr 3 i 7. We wszystkich zbiornikach obliczeniowy czas najdłuższego przebywania jest znacznie dłuższy od obliczeniowych czasów modalnych.

Tabela 6. Zestawienie obliczeniowych czasów charakterystycznych dla modelu kombinowanego i tłokowego

Nr basenu	Grubość warstwy aktywnej	Model kombinowany						Model tłokowy	
		Czas najkrótszego przebywania		Czas modalny		Czas najdłuższego przebywania		Czas tłokowy	
		[s]	[min]	[s]	[min]	[s]	[min]	[s]	[min]
3	0,08	764	12,7	807	13,4	11186	186,4	1857	31
4	0,08	1028	17,1	1040	17,3	6341	105,7	3104	52
7	0,085	946	16	954	16	5760	96	4732	79

Analizując krzywą sumową czasu zatrzymania w basenie nr 1 (rys. 6) można wnioskować, że w modelu kombinowanym 60% wymiany warstwy czynnej zachodzi w około 15 minut. Po kolejnych 30 minutach wymywane jest następne 30%. Ostatnie 10% wody z warstwy czynnej opuszcza basen w 2 godziny i 20 minut. Obliczeniowo wyznaczona grubość warstwy aktywnej wynosi 0,08 m.

Wymiana w warstwie czynnej basenu nr 2 jest przedstawiona na rysunku 7. W czasie 23 minut wymianie ulega 60% wody. Po następnych 27 minutach usuniętych zostaje kolejne 25%. Ostatnie 15% objętości opuszcza zbiornik po upływie 56 minut. Najintensywniejsza wymiana odbywa się w czasie 17 minut po wpuszczeniu barwnika. Obliczeniowa wysokość - miąższość warstwy aktywnej cyrkulacji wynosi 0,08 m.

W przypadku basenu nr 3 nie dysponowano wynikami pomiarów znacznikowych, więc zastosowano do obliczeń tylko zmodyfikowany model wymiany wody (rys. 8). Z wykresu krzywej sumowej wynika, że 63% strefy aktywnej jest wymienionej w czasie 21 minut. Pozostała część wynosząca 37% równomiernie opuszcza zbiornik w około 75 minut. Największa intensywność wymiany ma miejsce w 16 minucie po wpuszczeniu barwnika.

## 7. PODSUMOWANIE

Krótki czas dopłynięcia traseru do odpływów świadczy o niedostatecznym wykozystaniu kubatury obiektu w procesie cyrkulacji wody. Barwnik tworzy smugę, która przemieszcza się do wylotu po możliwie najkrótszej drodze. Obserwacje zebrane podczas badań z wykorzystaniem barwnika potwierdzają przemieszczanie się traseru naj-



pierw w głównym nurcie, podczas gdy sąsiednie przestrzenie barwią się później. Świadczy to o zjawisku „przebiecia” jakie zachodzi w zbiornikach. Dodatkowo trzeba zauważyć, że czas jaki upływa od momentu wypuszczenia impulsu technicznego, a rejestracją barwnika na odpływie świadczy o małych prędkościach przepływu. Są one na poziomie kilku centymetrów na sekundę, w zależności od oddalenia od wlotu, który wymusza cyrkulację wody w zbiorniku.

Umiejscowienie wlotów i odpływów oraz kształt basenów ma znaczący wpływ na powstawanie stref bezodpływowych. Wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają tworzenie się stref o cyrkulacji zamkniętej i ruchu wirowym o małych prędkościach. Może to pogarszać parametry fizykochemiczne i mikrobiologiczne wody. Jednak przypuszczenia odnośnie zachodzenia niekorzystnych procesów w zbiornikach należy zweryfikować odpowiednimi badaniami, których realizacja planowana jest w niedalekiej przyszłości.

Nie bez znaczenia jest także umiejscowienie wlotów i odpływów. Wszystkie odpływy pracują jak przelewy z ostrą krawędzią. W basenach nr 1 i 3 wloty są zatopione, umiejscowione płytko, a basen nr 3 posiada wlot niezatopiony. Powoduje to niewystarczający ruch i wymianę wody w strefach przydennych. Pośrednio potwierdza to obliczeniowa wysokość warstwy aktywnej, obliczonej za pomocą modelu kombinowanego, jak i tłokowego.

Uzyskane parametry wymiany obliczone z pomocą modelu kombinowanego można uznać za niekorzystne. Kubatury zbiorników są rzędu kilkuset metrów sześciennych, podczas gdy objętości obliczeniowych warstw aktywnych (zebrane w tabeli 5) są rzędu kilkunastu metrów sześciennych. Jest to parametr mówiący pośrednio o wymianie wody. Model tłokowy znacznie upraszcza opis zjawiska wymiany wody, co omówiono w punkcie 2 pracy. Model zmodyfikowany jest dokładniejszy i dostarcza dodatkowo informacje na temat rozkładu wymiany wody w czasie. Uwzględnia on zróżnicowanie pola prędkości w zbiorniku. Jest to model dwuwymiarowy, więc nie jesteśmy w stanie uwzględnić zmian profilu prędkości wraz ze wzrostem głębokości. Model bazuje na zjawisku adwekcji w obliczeniu czasów wymiany wody w poszczególnych częściach zbiornika. Trzeba mieć świadomość, że nie uwzględnia on dyfuzji i przepływu burzliwego, których wpływ na dyspersję masy jest znaczący. W wyniku tego mogło dojść do obliczeniowego wypłylenia warstwy aktywnej, tak aby czasy wymiany odpowiadały rzeczywistym zanotowanym podczas pomiarów terenowych. Uwzględnienie dyfuzji i ruchu turbulentnego wymusza zastosowanie o wiele bardziej skomplikowanego aparatu matematycznego. Stworzony model kombinowany jest wygodnym, prostym i dokładniejszym narzędziem uwzględniającym więcej czynników, niż popularny model tłokowy.

*Badania na potrzeby publikacji wykonano dzięki uprzejmości Stacji Morskiej Instytutu Oceanografii Uniwersytetu Gdańskiego.*

## LITERATURA

- [1] SAWICKI J.M., MALUS D., ZIMA P., *Hydraulika reaktorów recyrkulacyjnych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, 38–52.
- [2] SAWICKI J.M., *Mechanika przepływów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009, 147–155.
- [3] SAWICKI J.M., *Migracja zanieczyszczeń*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007, 116–127.
- [4] WIELGAT P., ZIMA P., SAWICKI J.M., PAWLICZKA I., *Model cyrkulacji w zbiorniku hodowlanym na przykładzie basenów hodowlanych dla fok*, Inżynieria morska i geotechnika, 2014, Vol. 35, No. 5, 432–437.

WATER EXCHANGE MODELING IN THE BREEDING RESERVOIRS USING MODIFIED PLUG  
FLOW MODEL ON THE EXAMPLE OF SEALARIUM

Main subject of this article is to create a model which presents the circulation of water in the breeding tanks of the sealarium of the Hels' Marine Station of the University of Gdańsk. The results of computer simulations of water circulation and the results of tracer measurements were used to create the model. Rhodamine WT was used as a fluorescence tracer dye. The mathematical model of the three major pools with respect to their inlets and outlets of water was made. The simplified model of two-dimensional flow in the form of a biharmonic equation for the stream function (converted into components of the velocity vector) to describe the flow field was adopted. In order to obtain a proper solution, measurements of the velocity distribution in the characteristic points of the object were taken "in situ". Compute streamlines course and time of spending tracer in the tanks were the basic data to create "combine" model. Results of created model were compared with results of popular plug flow model.