

POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA
KATEDRA HYDROTECHNIKI

ROZPRAWA DOKTORSKA

**HYDRAULICZNA CHARAKTERYSTYKA
ROZPŁYWU STRUMIENIA CIECZY
W REAKTORZE RECYRKULACYJNYM**

mgr inż. Aleksandra Kondziela

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy M. Sawicki

Gdańsk, czerwiec 2007 r.

Spis treści

WYKAZ UŻYWANYCH OZNACZEŃ	1
Litery łacińskie.....	1
Litery greckie	5
Symbole	5
WPROWADZENIE	6
1. CEL I ZAKRES PRACY	8
2. OGÓLNE UWAGI O REAKTORACH PRZEPLYWOWYCH I PROCESACH RECYRKULACJI.....	12
3. OSADNIKI WTÓRNE JAKO PRZYKŁAD REAKTORÓW PRZEPLYWOWYCH	16
3.1. Uwagi ogólne	16
3.2. Stopień recyrkulacji	17
3.3. Głębokość osadnika	19
3.4. Systemy usuwania osadu z osadników wtórnych	22
4. DYNAMICZNA CHARAKTERYSTYKA REAKTORA	24
4.1. Wprowadzenie	24
4.2. Opis kinetyki reakcji	24
4.3. Modele opisu przepływu masy przez reaktor	26
4.3.1. Modele uproszczone	26
4.3.2. Metody dokładne	28
4.3.3. Metody eksperymentalne	32
4.3.4. Modele uproszczone a przepływ z recyrkulacją	33
5. MODEL DYNAMICZNEJ CHARAKTERYSTYKI REAKTORA	36
5.1. Ogólna zasada modelu	36
5.2. Ogólne uwagi dotyczące wyznaczania charakterystycznych rozkładów stężenia substancji rozproszonej	38
5.3. Teoretyczne wyznaczanie charakterystycznych rozkładów stężenia substancji rozproszonej	38
5.3.1. Ogólne równanie zachowania masy substancji rozproszonej	38
5.3.2. Uproszczone modele transportu substancji rozproszonej	42
5.3.3. Wybór modelu transportu	45
5.4. Teoretyczne wyznaczanie pola prędkości	48
5.4.1. Równania ogólne	48
5.4.2. Modele uśrednione	49
5.4.3. Modele kinematyczne	51
5.4.4. Wybór modelu pola prędkości	55
5.5. Doświadczalne wyznaczanie charakterystyk rozkładu stężenia substancji rozproszonej	56
5.5.1. Uwagi ogólne	56
5.5.2. Znaczniki i ich przydatność w badaniach przepływu	56
5.5.3. Fluorescencja i fluorymetria	57
5.5.4. Pomiary przewodności. Konduktometria	59
5.5.5. Pomiary prędkości przepływu	62

6. BADANIA LABORATORYJNE	65
6.1. Wstęp	65
6.2. Metodyka zastosowana do pomiarów laboratoryjnych.....	65
6.2.1. Budowa i zasada działania stanowiska pomiarowego	65
6.2.2. Rodamina WT jako traser	73
6.2.3. Sonda kolorymetryczna CYCLOPS-7	73
6.2.3.1. Wyznaczenie charakterystyki pracy sondy CYCLOPS-7.....	75
6.2.4. Mikromłynek hydrometryczny	77
6.2.5. Zasada wykonywania pomiarów.....	77
6.3. Pomiarы wykonane w laboratorium	81
6.3.1. Pomiarы stężenia znacznika w przekrojach odpływowych.....	81
6.3.2. Pomiarы prędkości	83
6.4. Oszacowanie dokładności wykonanych pomiarów	99
6.4.1. Powtarzalność	99
6.4.2. Błędy pomiarów	99
6.5. Badania konduktometryczne.....	102
6.5.1. Uwagi wstępne.....	102
6.5.2. Pomiarы konduktometryczne	102
6.5.2.1. Użyty sprzęt pomiarowy	102
6.5.2.2. Metodyka i przebieg pomiarów	106
6.5.3. Dyskusja wyników. Ocena dokładności metody konduktometrycznej .	107
7. MATEMATYCZNY MODEL REAKTORA.....	112
7.1. Wybór schematu numerycznego do opisu pracy reaktora	112
7.2. Metoda różnic skończonych	113
7.2.1. Sposoby aproksymacji pochodnych.....	113
7.2.2. Zastosowane schematy numeryczne	115
7.2.2.1. Równanie biharmoniczne.....	115
7.2.2.2. Równanie adwekcji	116
7.2.2.3. Równanie dyspersji	117
7.2.3. Obszar poszukiwania rozwiązania i jego dyskretyzacja	117
7.2.4. Warunki graniczne	120
7.2.4.1. Warunki początkowe.....	120
7.2.4.2. Warunki brzegowe	121
7.2.5. Aproksymacja równań różniczkowych i ich rozwiązanie.....	122
7.2.5.1. Równanie biharmoniczne.....	122
7.2.5.2. Równanie adwekcji-dyspersji	123
7.3. Rezultaty symulacji komputerowych.....	124
7.4. Wyniki badań a problemy obserwowane podczas pracy osadników wtórnych	136
8. PRÓBA OPISU PRZEPŁYWU Z RECYRKULACJĄ Z ZASTOSOWANIEM INNYCH MODELI UPROSZCZONYCH.....	141
8.1. Wstęp	141
8.2. Metoda „racjonalna”	141
8.3. Zastosowanie metody „racjonalnej” do opisu przepływu z recyrkulacją	143
9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	147
BIBLIOGRAFIA	151
SPIS TABEL.....	154

Wykaz używanych oznaczeń

Litery łacińskie

a	- liczba fotonów zaabsorbowanych przez substancję fluorescencyjną
B	- szerokość
c	- stężenie masowo-objętościowe substancji rozproszonej
C_0	- stężenie znacznika we wprowadzonym impulsie
C_{CH}	- współczynnik szorstkości według Chézy'ego
C_k	- stężenie substancji w przekroju odpływowym
C_{k0}	- stężenie substancji w strumieniu odpływającym przelewem
C_{kR}	- stężenie substancji w strumieniu pobieranym do recyrkulacji
C_m	- stężenie modalne (maksymalne dla danego przekroju odpływowego)
Cr_a	- adwekcyjna liczba Couranta
Cr_d	- dyfuzyjna liczba Couranta
C_w	- stężenie końcowe substancji rozkładalnej
D_{Mj}	- współczynnik dyfuzji molekularnej j -tej substancji rozpuszczonej
D_T	- skalarny współczynnik dyfuzji burzliwej
$[D_T]$	- tensorowy współczynnik dyfuzji burzliwej
D_e	- efektywny współczynnik transportu względnego substancji rozpuszczonej
E	- zewnętrzna funkcja rozkładu czasu przebywania płynu w reaktorze
\mathbf{f}	- jednostkowy wektor siły masowej
f	- liczba fotonów wyemitowanych przez substancję fluorescencyjną
F	- stała Faraday'a
\mathbf{g}	- przyspieszenie ziemskie ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
h	- średnia głębokość cieku lub zbiornika
H	- głębokość stanowiska laboratoryjnego
i	- indeks, identyfikujący proces, substancję lub kierunek
\mathbf{i}	- wersor osi $0x$
j	- indeks, identyfikujący proces, substancję lub kierunek
\mathbf{j}	- wersor osi $0y$
k	- indeks, identyfikujący proces, substancję lub kierunek
\mathbf{k}	- wersor osi $0z$
K	- stała szybkości przebiegu reakcji
$[K_D]$	- tensorowy współczynnik dyspersji
K_L	- efektywny współczynnik dyspersji podłużnej
K_T	- efektywny współczynnik dyspersji poprzecznej
l_0	- średnia droga swobodna molekuly

L	- długość stanowiska pomiarowego
L_A	- długość podstrefy adwekcyjnej
L_C	- dystans przecięcia brzegu
L_M	- długość pola bliskiego
m	- masa
m_d	- jednostkowy dyfuzyjny strumień masy
m_D	- jednostkowy dyspersyjny strumień masy
m_T	- jednostkowy turbulentny strumień masy
M	- masa
M_0	- masa znacznika wprowadzonego do stanowiska laboratoryjnego
M_O	- masa substancji pozostała w reaktorze (np. odprowadzona przelewem)
M_P	- masa substancji wprowadzona do reaktora
M_R	- masa substancji usunięta w reaktorze (np. przewodem recyrkulacyjnym)
\mathbf{n}	- wektor jednostkowy, normalny do powierzchni
N_R	- stopień recyrkulacji
p	- ciśnienie
q	- sprawność kwantowa
Q	- wydatek płynu
Q_D	- wydatek cieczy dopływającej do obiektu (np. do reaktora)
Q_O	- wydatek cieczy odpływającej z obiektu swobodnie (przelewem)
Q_R	- wydatek cieczy pobieranej z obiektu do recyrkulacji
r_{ef}	- efektywny stopień usuwania w reaktorze danej substancji
r_O	- zmiana stężenia substancji rozproszonej w cieczy odpływającej z obiektu przelewem
r_R	- zmiana stężenia substancji rozproszonej w cieczy pobieranej z obiektu do recyrkulacji
r	- krzywa kinetyki reakcji
r_z	- ilość substancji, która uległa reakcji po czasie t_z
R	- opór przewodnika
R_h	- promień hydrauliczny
S	- pole powierzchni
t	- czas
t_{kO}	- czas, po którym cała masa wprowadzona do obiektu opuściłaby jego obszar odpływając tylko przelewem
t_{kR}	- czas, po którym cała masa wprowadzona do obiektu opuściłaby jego obszar odpływając tylko przewodem recyrkulacyjnym

t_{mO}	- czas modalny (po którym w odpływającej cieczy notujemy maksymalne stężenie znacznika) dla cieczy odpływającej przelewem
t_{mR}	- czas modalny (po którym w odpływającej cieczy notujemy maksymalne stężenie znacznika) dla cieczy odpływającej szczeliną recyrkulacyjną
t_{pO}	- średni czas przepływu cieczy przez obiekt w kierunku poziomym
t_{pR}	- średni czas przepływu cieczy przez obiekt w kierunku pionowym
t_Z	- średni czas zatrzymania w obiekcie przepływającej przez niego masy
t_{zO}	- średni czas zatrzymania cieczy odpływającej z obiektu przelewem
t_{zR}	- średni czas zatrzymania cieczy odpływającej z obiektu szczeliną recyrkulacyjną
u	- prędkość adwekcji
u*	- prędkość względna składnika względem mieszaniny lub roztworu (prędkość dyfuzji)
u_s	- składowa prędkości wzdłuż aktualnego kierunku ruchu
U_i	- ruchliwość elektrolityczna
v	- moduł prędkości uśrednionej względem zmiennych przestrzennych
v^*	- prędkość dynamiczna
v_h	- pozioma składowa wektora średniej prędkości w obiekcie
v_O	- średnia prędkość przepływu przez obiekt w kierunku poziomym
v_R	- średnia prędkość przepływu przez obiekt w kierunku pionowym (nad szczeliną recyrkulacyjną)
v_v	- pionowa składowa wektora średniej prędkości w obiekcie
V	- objętość
V_M	- „martwa” część objętości obiektu (nie biorąca udziału w przepływie)
V_O	- część objętości obiektu, z której ciecz odpływa przelewem
V_R	- część objętości obiektu, z której ciecz odpływa przewodem recyrkulacyjnym
x	- współrzędna przestrzenna
X_R	- zawartość suchej masy w osadzie powrotnym (recyrkulowanym)
X_{SM}	- zawartość suchej masy w komorze reakcji
y	- współrzędna przestrzenna
z	- współrzędna przestrzenna
z_{jk}	- funkcja źródłowa k -tej reakcji j -tej substancji
Z_j	- sumaryczna funkcja źródłowa j -tej substancji
Q_m	- obliczeniowy dopływ ścieków do oczyszczalni w czasie deszczu z kanalizacji ogólnospławnej
Γ_{ps}	- niezbędny stopień redukcji zanieczyszczeń

t_{ps}	- niezbędny średni czas zatrzymania
s	- droga
Q_S	- wydatek osadu nadmiernego
Q_N	- wydatek cieczy wpływającej do reaktora (osadnika) z komory reakcji
T	- temperatura
n_s	- współczynnik szorstkości
L_{MVC}	- zasięg strefy dyfuzji przestrzennej
L_{MHC}	- zasięg pola bliskiego
RWT	- Rodamina WT
N	- liczba domieszek w elektrolicie
w	- ładunek jonów
J_i	- gęstość strumienia i -tego jonu elektrolitu
k_m	- skok hydrauliczny młynka hydrometrycznego
n_m	- liczba obrotów łopatek młynka hydrometrycznego w ciągu sekundy
n	- ilość prób, powtórzeń
ΔX	- błąd bezwzględny pomiaru
x_i	- wynik i -tego pomiaru
x_r	- wartość rzeczywista pomiaru
p_k	- krzywa szybkości usuwania ze ścieków osadu
d_r	- krzywa zagęszczania osadu

Litery greckie

Δ	- stała łopatek młynka hydrometrycznego
δ	- średni błąd kwadratowy (wariancja)
δ_0	- błąd systematyczny pomiaru
δ_x	- błąd względny pomiaru
κ	- przewodnictwo właściwe
Λ	- przewodnictwo molowe elektrolitu
λ_i	- przewodnictwo jonowe i -tego składnika elektrolitu
μ	- dynamiczny współczynnik lepkości roztworu
ν_i	- ruchliwość i -tego składnika elektrolitu
ρ	- gęstość płynu
τ_d	- napężenie przyścienne
φ	- funkcja potencjału prędkości płynu
ψ	- funkcja prądu
ω	- współczynnik nadrelaksacji
Ω	- funkcja rozkładu wirowości (rotacja prędkości)

Symbole

$-$	- wielkość uśredniona lokalnie w czasie
\sim	- wielkość uśredniona względem jednej lub dwóch zmiennych przestrzennych
$'$	- burzliwa fluktuacja wielkości fizycznej
\wedge	- wielkość tensorowa

Wprowadzenie

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci nastąpił dynamiczny rozwój przemysłu i gospodarki, nierzadko bardzo bezwzględnych dla otaczającego nas środowiska, co zrodziło pilną potrzebę wzmocnienia dbałości o stan naturalnych zasobów przyrody. Pojawiły się organizacje, instytucje, przepisy prawne oraz, co najważniejsze, obiekty i urządzenia techniczne, których celem stały się: monitorowanie, kontrola, ocena i wreszcie działania praktyczne zmierzające z jednej strony do odwrócenia zaistniałych już procesów degradacji środowiska naturalnego, z drugiej zaś do zapobiegania dalszym, destrukcyjnym efektom.

Spośród wielu rodzajów obiektów, służących celom ochrony i poprawy jakości ulegającego wciąż niszczeniu środowiska, ogromnie ważną rolę odgrywają te, których zadaniem jest oczyszczanie wody i ścieków. Efekty pracy tych systemów przepływowych z reguły mają bezpośrednie przełożenie na jakość wody, która krąży w otaczającym nas środowisku, a tym samym tej, którą wykorzystujemy w naszych domach, rolnictwie i przemyśle.

Wraz z potrzebą budowania obiektów, chroniących środowisko naturalne, pojawiły się metody i zasady ich projektowania. Opracowano wiele praktycznych rozwiązań umożliwiających konstrukcję i efektywne funkcjonowanie tego rodzaju systemów.

Skuteczność działania wszystkich przepływowych systemów oczyszczania ścieków, zbiorników i urządzeń do uzdatniania wody zależna jest od prawidłowego przebiegu zjawisk hydraulicznych i technologicznych zachodzących w ich wnętrzu. Warunki przepływu przez reaktor lub inny element systemu sprowadzają się do utrzymania odpowiednich – dla danego typu cieczy i dla danego procesu – prędkości i stężeń składników oraz w niektórych przypadkach także temperatury układu.

Uzyskany w każdym obiekcie obraz rozkładu pola przepływu wraz ze stopniem jego zgodności z wymaganiami technologicznymi dla poszczególnych etapów procesu decyduje o osiąganym efekcie i ma bezpośredni wpływ na gabaryty urządzenia, oddziałując w rezultacie na ekonomiczną stronę przedsięwzięcia. Warunki przepływu wpływają zatem bezpośrednio na koszt budowy i eksploatacji oczyszczalni ścieków, stacji uzdatniania wody jak też każdego innego obiektu hydrotechnicznego.

Tak więc umiejętność wyznaczania, a tym samym właściwego ukształtowania parametrów przepływu i ich rozkładu w obiekcie, jest podstawą wszelkich działań praktycznych.

Jak wynika z powyższego, procesy hydrauliczne odgrywają jedną z kluczowych ról w przypadku urządzeń przepływowych. Większość tego typu zjawisk w teorii opisują równania różniczkowe, przeważnie skomplikowane i trudne do rozwiązania analitycznego.

Dlatego też, aby skutecznie projektować niezbędne obiekty stosuje się wiele uproszczeń, które znacznie ułatwiają opracowanie wytycznych technicznych,

zachowując równocześnie na zadowalającym poziomie zgodność opisu z rzeczywistością.

Niekiedy jednak narzędzia te okazują się być niedoskonale lub wręcz niemożliwe do zastosowania. Dzieje się tak wtedy, gdy pojawia się nowy, nieznany lub dotychczas pomijany problem techniczny lub gdy okazuje się, że proces technologiczny przebiega w sposób inny niż przewidziano, a co za tym idzie, nie daje pożądanego efektu. Właśnie taka sytuacja zainspirowała powstanie niniejszej pracy. Jest ona poświęcona przepływowi z recyrkulacją, czyli takiemu rodzajowi funkcjonowania obiektów, gdy część cieczy roboczej jest pobierana w formie oddzielnego strumienia i ponownie zwracana do układu, przy czym intensywność tego procesu jest na tyle znaczna, że musi on być uwzględniony już na etapie projektowania, we wszystkich swych aspektach.

1. Cel i zakres pracy

Odpowiednie rozpoznanie i zaplanowanie procesów składających się na hydrauliczną charakterystykę przepływu przez reaktor, takich jak rozkład prędkości cieczy, czas jej przebywania w zbiorniku czy ryzyko powstania niekorzystnych zjawisk, jak przebiecie hydrauliczne czy nadmierne zawirowania, stanowi bardzo ważny element pracy projektanta.

Opis hydraulicznej charakterystyki urządzeń oczyszczających ścieki i uzdatniających wodę oraz zbiorników wody czystej sprowadza się bardzo często do obliczenia syntetycznych wskaźników dynamicznych (najczęściej - prędkości średniej przepływu przez komory, kanały i przewody). Badania szczegółowe czy choćby sprawdzenie lokalnych wskaźników przepływu na obiektach prowadzi się wyrywkowo i najczęściej tylko wtedy, gdy urządzenie nie osiąga projektowanej wydajności lub wykazuje inne niepożądane objawy.

Tak więc w praktyce inżynierskiej oraz pracach projektowych dotyczących zbiorników i reaktorów przepływowych generalnie wykorzystuje się uproszczone modele przepływu. Najczęściej jest to tzw. model przepływu tłokowego. Oparty jest on na założeniu, iż czas przebywania w reaktorze każdego z wpływających doń elementów płynu t_z jest taki sam i wyrażony relacją [50]:

$$t_z = \frac{V}{Q} \quad (1.1)$$

Założenie to jest z reguły słabo zgodne z rzeczywistością (gdyż każdy przepływ rzeczywisty wykazuje pewien poziom dyspersji, wynikający z wewnętrznego zróżnicowania pola prędkości), ale przyjmowane jest ze świadomości błędu, jaki się przy jego akceptacji popełnia. Tak samo zresztą rzecz się ma z innymi modelami uproszczonymi (jak np. model idealnego mieszania zawartości reaktora).

Opracowano je kierując się wynikami badań oraz pomiarów i jak dowodzi praktyka, stanowią one najczęściej wystarczająco dobre przybliżenie rzeczywistych parametrów przepływu przez urządzenie, a więc zastosowanie ich jest uzasadnione, tym bardziej, że są one bardzo proste pod względem formalnym (relacja (1.1) ma charakter algebraiczny). Niemniej istnieją przypadki, dla których niemożliwe jest posługiwanie się wyżej wspomnianymi modelami, ponieważ opisywane zjawisko z natury rzeczy uniemożliwia akceptację, poczynionych na potrzeby stworzenia tychże modeli, założeń.

Jednym z takich przypadków jest przepływ przez zbiornik, w którym następuje rozdzielanie strumienia cieczy, stanowiące między innymi pierwszy etap procesu recyrkulacji. Łatwo wykazać, że w takim układzie (jakikolwiek spełniałby on zadania techniczne) nie sposób zastosować modelu przepływu tłokowego, i to ze względów

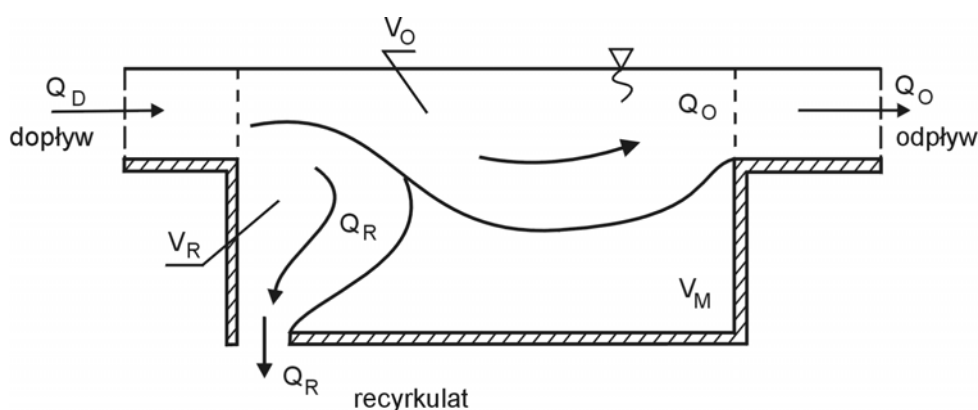
czysto praktycznych. W układzie takim strumień dopływowy rozdziela się na dwie części:

$$Q_D = Q_O + Q_R \quad (1.2)$$

z których każda zajmuje tylko część objętości reaktora (odpowiednio V_O oraz V_R).

Uwzględniając, że w rzeczywistych układach zawsze pewna część reaktora nie będzie objęta aktywnym przepływem („martwa strefa” o objętości V_M), możemy napisać (rys. 1.1):

$$V_D = V_O + V_R + V_M \quad (1.3)$$



Rys. 1.1. Schemat rozdziału strumienia cieczy w reaktorze

Pojawia się teraz pytanie, jakie objętości i wydatki podstawiać w tym przypadku do wzoru (1.1). Nie ma tu bowiem pełnej jednoznaczności, takiej jak w sytuacji przepływu bez rozdziału strumienia (gdy $V = V_D$ – całkowita objętość reaktora, $Q = Q_D$ – całkowity wydatek).

Logicznym rozwiązaniem wydawałoby się wprowadzenie dwóch relacji:

$$t_{ZO} = \frac{V_O}{Q_O}, \quad t_{ZR} = \frac{V_R}{Q_R} \quad (1.4)$$

Problem polega jednak na tym, że o ile wydatki Q_O i Q_R są ściśle określone i znane, to objętości V_O i V_R nie da się wyznaczyć w sposób tak prosty, jak dla przepływu bez rozdziału strumienia. W dodatku zależą one od aktualnych wydatków Q_O i Q_R , ale nawet w przepływie ustalonym ich wyznaczenie wymagałoby rozwiązania złożonych równań różniczkowych, co zniweczyłoby całą prostotę formalną, decydującą o atrakcyjności modelu przepływu tłokowego.

Tak więc brak jest prostej metody, którą można byłoby zastosować do opisu dynamicznej charakterystyki reaktora pracującego z recyrkulacją. Istnieje zatem potrzeba opracowania dla tego rodzaju reaktorów odrębnego, uwzględniającego szczególne warunki hydrauliczne w nich panujące, sposobu postępowania. Poza kwestiami poznawczymi, wynika ona także z faktu, iż taki problem pojawił się w praktyce (np. zwiększanie ilości pobieranego z osadników wtórnych recyrkulatu). Za cel przedstawianej tu pracy przyjęto wyznaczenie charakterystyk przepływu cieczy przez obiekt rozdzielający jej strumień oraz zastosowanie ich do weryfikacji prostego schematu matematycznego, za pomocą którego opisano zjawisko.

Ze względu na dość złożoną naturę takiego przepływu nie jest to zadanie łatwe. W polskiej literaturze naukowej i technicznej bardzo mało jest prac dotyczących tego problemu.

Zastosowano więc metodę własnych badań laboratoryjnych, wykorzystujących racjonalne techniki pomiarowe, wspomaganych równocześnie matematycznym opisem hydrodynamiki procesu.

Opracowanie niniejsze, stosownie do zakresu przeprowadzonych studiów i prac praktycznych, zawiera zarówno opis podstaw teoretycznych, na których oparto przedstawiony w nim model opisu pracy reaktora, jak i badań empirycznych, wykonanych na stanowisku laboratoryjnym.

Zakres zrealizowanych prac teoretycznych, omówionych w rozdziałach 2, 3, 4 i 5 jest następujący:

- dokonanie przeglądu informacji zawartych w literaturze oraz publikacjach dotyczących tematyki związanej z projektowaniem i eksploatacją reaktorów, w szczególności osadników wtórnych, a zwłaszcza tych, które pracują w warunkach recyrkulacji osadu czynnego;
- zebranie szeregu danych, pochodzących bezpośrednio od eksploatorów oczyszczalni ścieków. Z informacji tych wynika, iż wiele obiektów napotyka problemy zarówno projektowe jak i praktyczne, które między innymi spowodowane mogą być niewystarczająco dokładnym rozpoznaniem tematyki dotyczącej procesów hydraulicznych zachodzących w osadnikach;
- dokonanie charakterystyki technicznej obiektów, w których procesy recyrkulacji zarówno wewnętrznej jak i zewnętrznej są wykorzystywane wraz z opisem zjawiska recyrkulacji, oraz jej znaczenia w praktyce inżynierskiej;
- przedstawienie teoretycznych podstaw metody matematycznego opisu badanych zjawisk hydraulicznych niezbędnych do zrozumienia i stosowania tejże metody;

- zaprezentowanie teoretycznych podstaw, wybranych do pomiarów własnych, sposobów doświadczalnego badania zjawisk hydraulicznych (konduktometria i fluorymetria).

W rozdziałach 6 i 7, dotyczących przeprowadzonych badań empirycznych oraz numerycznych, ich założeń, celów, metodyki i wyników, znalazły się następujące wiadomości:

- zaprezentowanie laboratoryjnej metody weryfikacji modelu matematycznego, w skład której weszły następujące prace:
 - zaprojektowanie i uruchomienie stanowiska laboratoryjnego, umożliwiającego symulacje przepływu cieczy przez zbiornik recyrkulacyjny,
 - opracowanie eksperymentalnego sposobu uzyskiwania danych służących do wyznaczania charakterystyk odpływowych z wykorzystaniem metod znacznikowych,
 - przeprowadzenie na stanowisku laboratoryjnym kompletu systematycznych serii pomiarowych, w celu zbadania wybranych procesów hydraulicznych, zachodzących w zbiorniku rozdzielającym strumień cieczy lub uczestniczącym w procesach recyrkulacji,
 - opracowanie danych uzyskanych podczas pomiarów i wykreślenie na ich podstawie charakterystyk dynamicznych modelu laboratoryjnego;
- opracowanie matematycznego odpowiednika modelu zbiornika laboratoryjnego, w skład którego wchodzi wyznaczenie rozkładu pola prędkości oraz symulacja transportu masy w obiekcie;
- przygotowanie własnego programu na EMC na podstawie teoretycznego modelu matematycznego i przeprowadzenie za jego pomocą symulacji odpowiadających poszczególnym przypadkom badań empirycznych;
- weryfikacja opracowanego modelu matematycznego i własnego rozwiązania numerycznego problemu z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych.

Jako uzupełnienie badań zjawisk hydraulicznych, zachodzących w reaktorach, wykonano w laboratoryjnych lejach Imhoffa eksperyment dotyczący zagęszczania sedymentującego osadu. Otrzymaną charakterystykę tego procesu przedstawiono w ostatniej części rozdziału 7, dokonując próby powiązania jej z otrzymanymi wynikami pomiarów parametrów przepływu.

Na zakończenie pracy przedstawiono próbę opisu badanych zjawisk i procesów z zastosowaniem uproszczonej metody racjonalnej (rozdział 8). Podsumowano też całość prac i zaprezentowano spostrzeżenia oraz wnioski wynikające z interpretacji i analizy uzyskanych wyników badań (rozdział 9).

2. Ogólne uwagi o reaktorach przepływowych i procesach recyrkulacji

Poszukując jak najlepszego rozwiązania rozpatrywanego tu problemu, warto na wstępie usytuować go na szerszym tle.

Zasadniczą grupę obiektów, którymi zajmuje się hydromechanika, stanowią *systemy przepływowe*. Stosując bardzo ogólne kryteria dokonać można następującego ich podziału [48]:

- systemy kubaturowe (zbiorniki i reaktory),
- systemy tranzytowe (koryta otwarte, rurociągi, strumienie swobodne),
- maszyny hydrauliczne (pompy, wentylatory, dmuchawy, turbiny, ..)
- łączniki i regulatory (armatura),
- urządzenia pomiarowe.

Obiektem zainteresowania niniejszej pracy jest układ należący do pierwszej z wymienionych kategorii, obejmującej *zbiorniki* i *reaktory*. Przez system kubaturowy rozumie się każdy układ hydrauliczny, którego zadaniem jest zgromadzenie pewnej ilości płynu. Gdy rozważany system ma na celu jedynie zmagazynowanie masy płynu, bez zwracania uwagi na jego skład fizykochemiczny, mówimy o zbiorniku. Jeżeli natomiast jego głównym zadaniem jest umożliwienie przebiegu pewnych reakcji, procesów lub przemian (chemicznych, biologicznych czy też fizycznych), nazywamy go *reaktorem*.

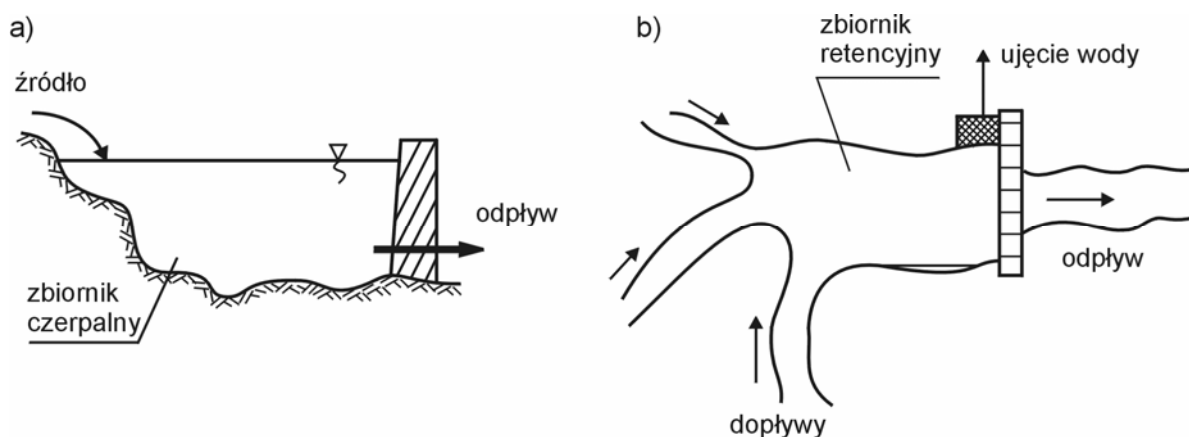
Wśród reaktorów można wyróżnić obiekty działające jako:

- *okresowe* (gdy wprowadzona do nich zawartość zostaje zatrzymana na pewien czas bez możliwości dopływu czy też odpływu cieczy),
- *przepływowe* (gdy dostarczanie/dopływ masy płynu mającego podlegać przemianom i odprowadzanie/odpływ odpowiednio przekształconego płynu odbywa się w nich w systemie ciągłym).

Zatem każda oczyszczalnia ścieków czy też stacja uzdatniania wody jest szeregowym i/lub równoległym układem reaktorów okresowych oraz przepływowych.

Niezależnie od powyższych klasyfikacji, warto podzielić systemy kubaturowe na dwie dodatkowe grupy:

- *o przepływie prostym* (gdy układ jest zasilany przez jeden przekrój wlotowy, zaś płyn opuszcza go przez jeden przekrój wylotowy – rys. 2.1a);
- *o przepływie wielostrumieniowym* (gdy układ zasilany jest przez więcej niż jeden przekrój wlotowy oraz/albo posiada więcej niż jeden przekrój wylotowy – rys. 2.1b).



Rys.2.1. Rodzaje systemów kubaturowych

Ten drugi typ systemów kubaturowych jest szczególnie interesujący w przypadku reaktorów, dla których łączenie oraz/albo rozdzielanie poszczególnych strumieni płynu jest często podstawowym warunkiem ich właściwego funkcjonowania.

Układy takie występują w bardzo różnych dziedzinach techniki, a w literaturze omawiane są raczej w ujęciu użytkowym. Dlatego trudno byłoby przedstawić systematyczną i wyczerpującą klasyfikację istniejących obiektów.

Tym niemniej celowe jest tu wyróżnienie istotnej kategorii *przepływów zwrotnych*, a wśród nich:

- przepływów mieszających,
- przepływów cyrkulacyjnych,
- przepływów recyrkulacyjnych.

W dalszym ciągu tej pracy rozważane będą reaktory stosowane w inżynierii sanitarnej. Stanowią one bardzo specyficzną grupę obiektów, wyraźnie różną od reaktorów stosowanych w przemyśle. Pod tym więc kątem podawane będą komentarze i przykłady praktyczne.

Generalnie rzecz biorąc, przepływy zwrotne wywołuje się w reaktorze albo z powodów dynamicznych, albo z powodów technologicznych.

Pierwsza z wcześniej wymienionych kategorii, *przepływy mieszające*, ma na celu homogenizację zawartości reaktora, czyli utrzymanie możliwie wyrównanego stężenia wszystkich składników rozważanego procesu. Jako przykłady odpowiednich urządzeń można podać mieszacze reagentów (np. przy koagulacji wody), lub klasyczne komory napowietrzania w metodzie osadu czynnego [37].

Mianem *przepływów cyrkulacyjnych* określono tutaj ten typ ruchu cieczy, którego zasadniczą cechą jest istnienie uporządkowanego krążenia płynu wewnątrz reaktora. Typowym przykładem mogą tu być piaskowniki napowietrzane [26].

Z kolei o *przepływach recyrkulacyjnych* mówimy wtedy, gdy część zawartości reaktora zostaje odprowadzona z układu i ponownie do niego wprowadzona, w innym miejscu (jednym lub kilku). Najczęściej pobór recyrkulatu odbywa się z tych miejsc

reaktorów, gdzie przemiany są już bardzo zaawansowane, a tym samym płyn zawiera znaczną ilość produktów reakcji. Celem recyrkulacji jest w takich sytuacjach najczęściej wzbogacenie płynu w strefie początkowej w produkty („zaszczepienie” substratów produktami). Typowym przykładem jest tu recyrkulacja bogatego w mikroorganizmy osadu nadmiernego w obiektach do oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego.

Drugim ważnym zadaniem, jakie niekiedy spełnia recyrkulacja, jest utrzymanie niezbędnej intensywności przepływu przez reaktor. Potrzeba taka pojawia się na przykład wtedy, gdy wydatek ścieków surowych staje się bardzo niewielki.

Rozważając procesy recyrkulacji wyróżnić można dwie sytuacje:

- *recyrkulację wewnętrzną,*
- *recyrkulację zewnętrzną.*

W pierwszym przypadku recyrkulat jest pobierany i zawracany do tego samego reaktora, jak na przykład przy zawracaniu części osadu z komór nityfikacji ponownie do komór denityfikacji, we wstępnej fazie denityfikacji ścieków [37]. Z recyrkulacją zewnętrzną mamy natomiast do czynienia, gdy recyrkulat pobierany jest z innego reaktora niż ten, do którego jest zawracany. Przykładem jest tu proces recyrkulacji osadu czynnego, czyli jego powrót po sedymentacji w osadniku wtórnym do komory reakcji biologicznych. Stanowi to niezbędny element technologiczny pracy większości oczyszczalni ścieków. Umożliwia on utrzymanie stałego stężenia kłaczków osadu czynnego w komorze, w której następuje biologiczny rozkład substancji organicznych. Recyrkulacja zewnętrzna jest więc ważnym czynnikiem wpływającym na pracę układu biologicznego oczyszczania ścieków.

Przepływy recyrkulacyjne należą do najslabiej omawianych w literaturze hydraulicznych aspektów urządzeń do oczyszczania wody i ścieków, zaś w praktyce pomija się całkowicie wpływ tego czynnika na dynamikę układu [27, 41].

Przyczyną takiego stanu rzeczy jest prawdopodobnie fakt, iż jeszcze kilkadziesiąt lat temu, mianowicie w latach 60-tych ubiegłego stulecia, zalecany i stosowany typowy stopień recyrkulacji zewnętrznej (patrz rozdz. 3.2), przyjmował dość niską wartość od 25 do 40% objętości oczyszczanych ścieków [19]. Przy tego rzędu wielkości recyrkulacji ścieków jej wpływ na parametry hydrauliczne reaktora (osadnika wtórnego), skąd dokonywany jest pobór, mógł być traktowany marginalnie czyli w praktyce pomijany.

Na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci sytuacja uległa znacznej zmianie. Stosowany obecnie stopień recyrkulacji, w wielu przypadkach utrzymywany jest na zdecydowanie wyższym poziomie niż zalecany 75% ÷ 100% [45] i wynosi 150% ÷ 200%, a czasami nawet więcej. Takie zwiększenie stopnia recyrkulacji pociąga za sobą zmiany rozkładu hydraulicznych parametrów osadnika, a tym samym zmienia charakterystykę jego pracy.

W praktyce technicznej szczególnie ważny wpływ na pracę układu wywiera pobór recyrkulatu, bowiem w każdym przypadku odbija się on na polu prędkości cieczy w reaktorze, a tym samym na jego efektywności. Strumień powrotny odgrywa ważną rolę dynamiczną wtedy, gdy jest wprowadzany do układu niezależnie od strumienia substratów (w tym przypadku – ścieków surowych). Wpływ ten jest mniej istotny, jeżeli mieszanie substratów i recyrkulatu odbywa się przed wlotem do reaktora.

Z tego względu warto rozróżnić dwa etapy procesu recyrkulacji – pobór płynu i jego ponowne wprowadzenie do układu.

Niniejsza praca poświęcona jest dynamicznej charakterystyce reaktorów recyrkulacyjnych, z których pobierany jest płyn (zawracany następnie do obiegu), stanowiący recyrkulat.

Wspomnianym już i przywoływanym w całej niniejszej pracy przykładem obiektu należącego do tej kategorii, reprezentującym praktyczny przykład omawianego w niej typu reaktorów, jest osadnik wtórny w układzie metody osadu czynnego. Z tego względu kolejny rozdział poświęcono omówieniu specyfiki tego obiektu oraz przedstawiono w nim zestaw podstawowych parametrów warunkujących skuteczne działanie osadnika wtórnego.

3. Osadniki wtórne jako przykład reaktorów przepływowych

3.1. Uwagi ogólne

Osadnikami nazywamy obiekty lub urządzenia służące do oddzielania ze ścieków zawieszin łatwo opadających, o gęstości większej od 1 g/cm^3 [44]. W najogólniejszym ujęciu działanie osadników polega na przetrzymywaniu ścieków w warunkach zwolnionego przepływu, co ułatwia zachodzący na zasadzie zjawiska grawitacji rozdział dwóch faz: wody lub ścieków i zawieszonych w niej cząstek. Opadły osad jest zgarniany i usuwany poza osadnik, natomiast sklarowane ścieki odprowadza się do dalszych obiektów oczyszczalni lub do odbiornika ścieków.

Osadniki wtórne są powszechnie stosowane w miejskich oczyszczalniach ścieków, jeżeli te obejmują dwu- lub więcej stopniowy proces oczyszczania. Są one nieodłącznym obiektem, służącym do biologicznego oczyszczania ścieków.

Najogólniejsza klasyfikacja osadników dzieli je na obiekty *o przepływie poziomym* oraz *o przepływie pionowym* (możliwe są też konfiguracje pośrednie). Z kolei ze względu na kształt komory mamy do czynienia z osadnikami *prostokątnymi* lub *okrągłymi (radialnymi)* [44].

Funkcją osadników wtórnych współpracujących z komorami osadu czynnego jest klarowanie ścieków i zagęszczanie osadu czynnego, który stanowią kłaczkowate zawiesiny, będące koloniami różnego rodzaju mikroorganizmów (bakterii, pierwotniaków [39]) oraz substancji organicznych i nieorganicznych. Osad ten jest następnie częściowo zawracany do komór napowietrzania, a częściowo utylizowany lub wykorzystywany w inny sposób.

Dopływający wraz z oczyszczonymi ściekami do osadnika wtórnego osad czynny stanowi medium specyficzne, opisywane własnym, indywidualnym zestawem parametrów. Od prawidłowych wartości tych parametrów zależy skuteczność działania reaktora (osadnika), która w znacznym stopniu wpływa na sprawność całego systemu (oczyszczalni).

Parametry hydrauliczne oraz technologiczne, charakteryzujące osad czynny, wprowadzany do osadników wtórnych jak i własności samych osadników, podzielić można na dwie kategorie [27]. Pierwszą z nich stanowią właściwości osadu, charakteryzujące go pod względem zachowania się przy sedymentacji i zagęszczaniu. Zaliczyć do nich możemy:

- *prędkość swobodnego opadania* (wielkość zmienna, zależna od wielkości i gęstości kłaczków osadu),
- *indeks osadu* (zwany indeksem Mohlmanna, parametr diagnostyczny, służący do szybkiej oceny właściwości sedymentacyjnych osadu),

- *porównawcza objętość osadu* (iloczyn zawartości suchej masy oraz indeksu osadu dla osadu wprowadzanego z komory osadu czynnego do osadnika wtórnego).

Z kolei druga grupa to czynniki, służące bezpośrednio do wymiarowania osadników wtórnych, a należą do niej:

- *obciążenie osadnika objętością osadu,*
- *zawartość suchej masy w osadzie powrotnym,*
- *stopień recyrkulacji,*
- *głębokość osadnika*
- *czas zagęszczania.*

Blżej omówiono tylko te wielkości, które będą przywoływane w dalszej części niniejszego opracowania.

3.2. Stopień recyrkulacji

Stopień recyrkulacji N_R dla komór napowietrzania w metodzie osadu czynnego definiuje się jako [41]:

$$N_R = \frac{Q_R}{Q_D} \quad (3.1)$$

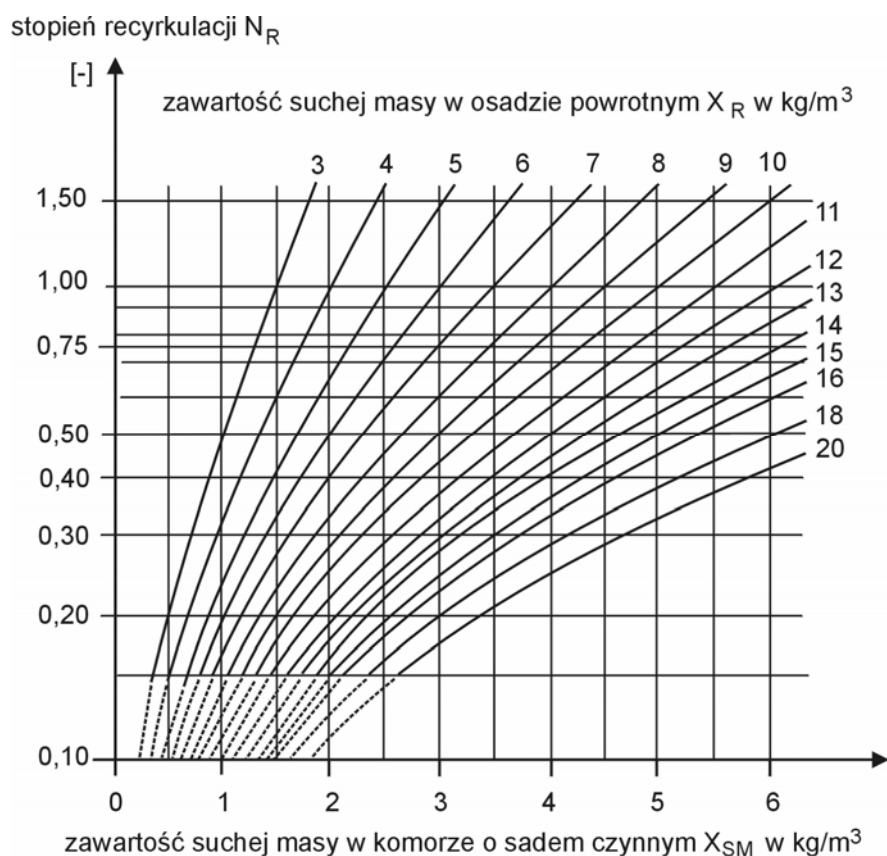
gdzie: Q_R – natężenie strumienia ścieków recyrkulowanych

Q_D – natężenie strumienia ścieków dopływających do oczyszczalni.

Warunki eksploatacyjne układu komory osadu czynnego z osadnikiem wtórnym podlegają wzajemnemu oddziaływaniu, poprzez zależności pomiędzy zawartością suchej masy (stężeniem osadu) X_{SM} w komorze, zawartością suchej masy w osadzie powrotnym X_R oraz stopniem recyrkulacji N_R .

Pożądana zawartość (stężenie) suchej masy w komorze osadu czynnego X_{SM} może być utrzymana tylko wtedy, gdy przy danym stopniu recyrkulacji N_R zawartość suchej masy w osadzie powrotnym X_R osiągnie stężenie konieczne dla spełnienia poniższego równania równowagi (patrz rys. 3.1):

$$N_R = \frac{X_{SM}}{X_R - X_{SM}} \quad (3.2)$$



Rys.3.1. Wymagany stopień recyrkulacji w zależności od stężenia osadu w osadzie powrotnym oraz w komorze osadu czynnego [3]

Dobór właściwego dla danego obiektu stopnia recyrkulacji jest zadaniem nielatawym. Parametr ten zależy bowiem od kilku czynników, takich jak wydatek ścieków dopływających do oczyszczalni, stężenie osadu czynnego w komorze reakcji czy zawartość suchej masy w osadzie powrotnym, które to parametry bywają często zmienne w czasie. Dlatego też przy określaniu optymalnego stopnia recyrkulacji najczęściej stosuje się zbiór ogólnych wytycznych, opracowanych na drodze badań. Podstawowe reguły przedstawiają się następująco [45]:

- przy wymiarowaniu osadników wtórnych (i komór osadu czynnego) należy założyć maksymalny strumień objętościowy osadu powrotnego o wartości $0,75 \cdot Q_m$, gdzie Q_m - obliczeniowy dopływ ścieków do oczyszczalni w czasie deszczu z kanalizacji ogólnospławnej ;
- całkowita wydajność pomp recyrkulacyjnych osadu powrotnego, tzn. z pompami rezerwowymi włącznie powinna być dobrana w sposób umożliwiający tłoczenie strumienia osadu powrotnego wynoszącego $1,0 \cdot Q_m$;
- wartości zalecanych stopni recyrkulacji N_R w zależności od rodzaju przepływu w osadniku (poziomy, pionowy, pośredni) przedstawiono w tabeli 3.1.

Tab.3.1. Wartości dopuszczalne dla osadników wtórnych o parametrach pośrednich z zakresu pomiędzy osadnikami wtórnymi o przepływie głównie poziomym i głównie pionowym [3]

v_v/v_h	$\geq 0,33$	$\geq 0,36$	$\geq 0,39$	$\geq 0,42$	$\geq 0,44$	$\geq 0,47$	$\geq 0,5$
N_R	$\leq 0,75$	$\leq 0,80$	$\leq 0,85$	$\leq 0,90$	$\leq 0,90$	$\leq 0,95$	$\leq 1,0$

v_v/v_h – stosunek składowej pionowej prędkości przepływu przez osadnik do składowej poziomej, np. 1 : 2,5 = 0,4

W przypadku stopnia recyrkulacji wyższego niż zalecany dla danego rodzaju osadnika, proces sedymentacji wtórnej, na skutek wzrastających prędkości przepływu, ulega istotnemu pogorszeniu. Wzrastające skokowo wydajności strumienia recyrkulacji zwiększają także turbulencję w osadniku wtórnym. W wyniku zwiększonej turbulencji osad czynny w osadniku wtórnym rozprzestrzenia się dalej i wyżej. Kłaczki osadu, które przedostają się do strefy ścieków sklarowanych w obszar odpływu z osadnika wtórnego, pogarszają jakość ścieków odpływających z oczyszczalni. Wydajność strumienia osadu powrotnego należałoby, w miarę możliwości, tak stopniować poprzez dobór pomp lub regulację ich obrotów, aby możliwe było jego dostosowanie do zmiennych warunków eksploatacyjnych [3]. Na przykład dla osiągnięcia denitryfikacji konieczny jest stopień recyrkulacji $N_R > 1,0$ (patrz rys. 3.1). Wówczas, celem uniknięcia turbulencji, należałoby część osadu czynnego pobierać już z dopływu do osadnika wtórnego, a nie dopiero z recyrkulacją z samego osadnika [3].

Należy unikać również przyjmowania stopnia recyrkulacji niższego od $N_R = 50\%$, ponieważ narzuca on wysoką zawartość suchej masy w osadzie powrotnym. Jest to możliwe do osiągnięcia jedynie w warunkach niskiego indeksu osadu i długiego czasu zagęszczania w osadniku wtórnym.

Aktualne dane z oczyszczalni ścieków, dotyczące stosowanych stopni recyrkulacji (patrz rozdz. 2) wskazują na jego znaczne wartości. Pociąga to za sobą zmiany rozkładu hydraulicznych parametrów osadnika a tym samym zmienia charakterystykę jego pracy.

3.3. Głębokość osadnika

Przeprowadzone obserwacje procesu sedymentacji osadu pozwalają podzielić głębokość osadnika wtórnego na następujące głębokości cząstkowe [3, 22]:

- h_1 – strefa ścieków sklarowanych $\geq 0,5\text{m}$. Jest to strefa bezpieczeństwa. Ulegają tu uśrednieniu wpływy wiatru, temperatury, różnic gęstości cieczy, oddziaływanie krawędzi przelewowej itp.;

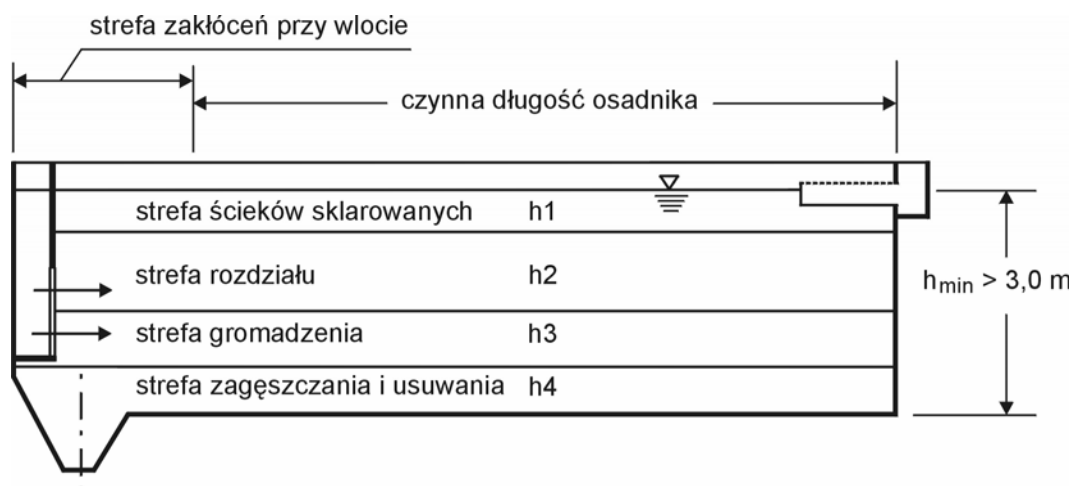
- *h2* – strefa rozdziału i przepływu wstecznego. Następuje tu rozdzielanie mieszaniny wody i osadu przy udziale procesu flokulacji, korzystnego dla dalszego zagęszczania osadu, dopływ ścieków powinien mieć zagwarantowany 0,5-godzinny czas przepływu, w odniesieniu do wolnej pojemności wodnej. Poza obszarem wlotu, nad strefą gromadzenia osadu znajduje się strefa przepływu wstecznego, w której zgodnie z warunkiem ciągłości obserwowany jest przepływ ścieków o niewielkiej zawartości substancji stałej w kierunku obszaru wlotu do osadnika. Jako strefa bezpieczeństwa tworzy ona ze strefą ścieków sklarowanych funkcjonalną całość;
- *h3* – strefa prądów gęstościowych i gromadzenia. Trafiająca tu mieszanina osadu i ścieków na skutek wyższej od ścieków sklarowanych gęstości opada na nagromadzoną już warstwę osadu i przepływa w kierunku zewnętrznej krawędzi osadnika. Tu występują maksymalne prędkości przepływu w osadniku. Następuje tu zatrzymanie i zmagazynowanie ścieków dopływających z komory osadu czynnego, strefa ta musi pomieścić w ciągu 0,5 godziny dodatkową ilość osadu dopływającego z komory osadu czynnego, przy stężeniu 500 l/m^3 (również przy wysokim stopniu recyrkulacji);
- *h4* – strefa zagęszczania i usuwania. Następuje tu koncentracja osadzonego osadu, wysokość zagęszczania zależy od czasu trwania tego procesu. Jest to warstwa, w której panują małe prędkości przepływu w kierunku leja osadowego.

Procesy zachodzące w poszczególnych warstwach wzajemnie się przenikają. W obrębie wlotu i wylotu występują strefy zakłóceń hydraulicznych, których wielkość ogranicza się poprzez stosowne ukształtowanie tych partii obiektów.

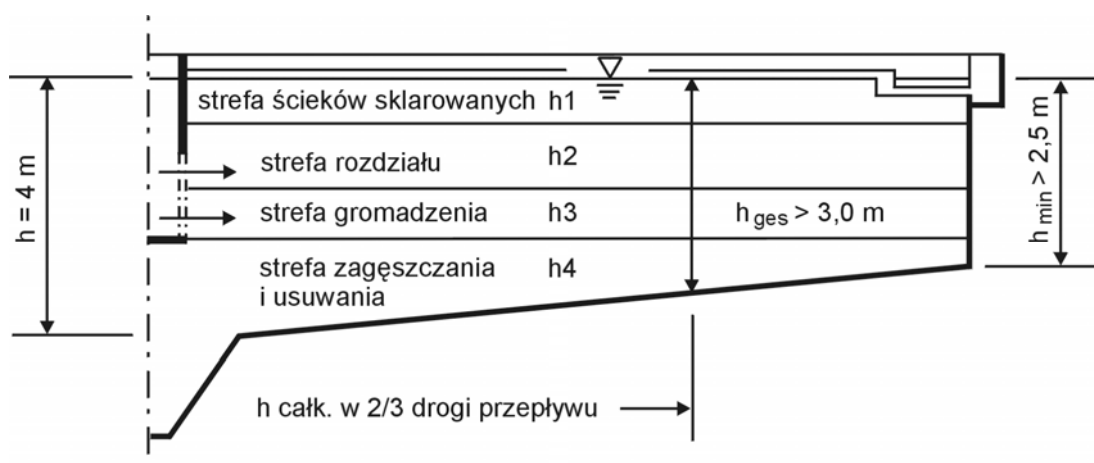
W osadnikach wtórnych o przepływie poziomym i o pochylonym dnie należy wyliczoną całkowitą głębokość zachować na $2/3$ drogi przepływu. Głębokość na obwodzie osadnika wtórnego w osadnikach prostokątnych nie może być mniejsza od 3,0 m, a w osadnikach radialnych 2,5 m. W osadnikach o przepływie pionowym (lejoywych) głębokość strefy zagęszczania powinna wynosić co najmniej jedną trzecią całkowitej głębokości użytkowej.

Na rysunkach 3.2, 3.3 i 3.4 przedstawiono graficznie podział (na omówione wyżej strefy głębokości) obszaru różnego typu osadników wtórnych.

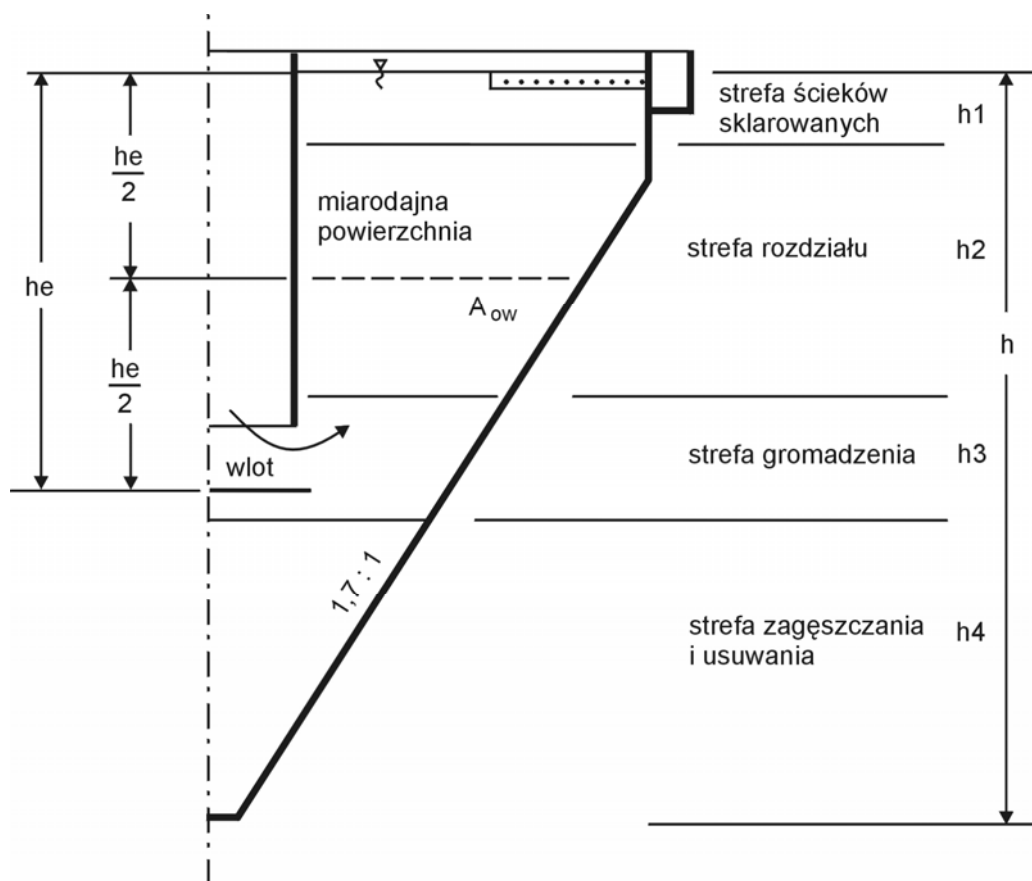
Warto zauważyć, że przytoczone wyżej wytyczne zawierają tylko wybiórcze dane dotyczące struktury przepływu w osadnikach, a informacje o polu prędkości są ogólnikowe. Dokładne wyznaczenie jego rozkładu wymagałoby rozwiązania równań różniczkowych, którymi jest ono opisywane.



Rys.3.2. Strefy i głębokości w osadniku prostokątnym [3]



Rys.3.3. Strefy i głębokości w osadniku okrągłym o przepływie poziomym [3]



Rys.3.4. Strefy i głębokości w osadniku okrągłym o przepływie pionowym [3]

3.4. Systemy usuwania osadu z osadników wtórnych

Omawiając najistotniejsze dla tego opracowania elementy konstrukcyjne osadników wtórnych nie wolno zapomnieć o urządzeniach do zgarniania i usuwania gromadzącego się na ich dnie osadu zwanych *zgarzniaczami osadu*.

Proces zgarniania osadu oraz parametry strumienia osadu recyrkulowanego określają w znacznym stopniu czas zatrzymania osadu czynnego w osadniku wtórnym. Osad powrotny powinien wracać z osadnika wtórnego do komory reakcji jak najszybciej (maksymalnie po 2 godzinach od jej opuszczenia) [3, 30], gdyż usuwanie zanieczyszczeń zachodzi najintensywniej w czasie 1 – 2 godzin sedimentacji a jego aktywność oraz jakość zachowuje pożądane dla procesów biologicznych parametry. Dłuższy czas powoduje powstanie warunków beztlenowych w osadzie. Następuje wówczas wtórne uwalnianie znacznych ilości fosforu do ścieków, powodujące wzrost jego stężenia w ściekach oczyszczonych. W dużej mierze warunkuje to odpowiednio dobrany system usuwania osadu z osadnika wtórnego. Urządzenia zgarniające powinny być wymiarowane w sposób umożliwiający zachowanie dopuszczalnego czasu

zgęszczania osadu. Równocześnie istotne jest, aby ich ruch nie zakłócał korzystnych warunków hydraulicznych panujących we wnętrzu osadnika [30].

Stosowane w osadnikach wtórnych zgarniacze podzielić można na następujące rodzaje [30]:

- *tarczowe* (osad z dna gromadzi się przed tarczą i na skutek jej ruchu spływa w kierunku wylotu),
- *ssawkowe* (osad zostaje uchwycony przez zassanie bezpośrednio w miejscu osadzenia),
- *taśmowe* (osad zostaje zgarniany w kierunku wylotu poprzez system belek zamocowanych na ruchomych taśmociągach).

Na podstawie przedstawionych powyżej tylko kilku wybranych informacji, dotyczących parametrów, mających bezpośredni wpływ na funkcjonowanie reaktora (przykład – osadnik wtórny), ocenić można problem opisu hydrodynamiki tego obiektu jako złożony i wielowątkowy. W przedstawianej tu pracy skoncentrowano się na hydraulicznych aspektach zachodzących w reaktorze zjawisk, świadomie dokonując wynikających z takiego postawienia zadania uproszczeń i założeń.

4. Dynamiczna charakterystyka reaktora

4.1. Wprowadzenie

Mianem dynamicznej charakterystyki reaktora określono zespół informacji ilościowych, opisujących funkcjonowanie takiego obiektu od strony przepływowej (hydraulicznej) z uwzględnieniem aspektów procesowych (technologicznych).

Charakterystyka taka może być opracowana na różnym poziomie dokładności. W najbardziej ogólnym ujęciu będzie ona zawierała dokładny opis pola prędkości cieczy oraz stężenia każdego ze składników reakcji zachodzących w układzie, i to dla zmiennych w czasie warunków zasilania reaktora. Pozwala to na analizowanie pracy obiektu pod kątem jego efektywności dla różnych wariantów, lecz jest kosztowne i czasochłonne.

Z kolei w ujęciu najprostszym charakterystyka taka zawiera kilka liczbowych wskaźników, których utrzymanie podczas pracy reaktora, uważane jest za warunek jego pożądanej efektywności. Typowym przykładem może tu być średni czas zatrzymania płynu w reaktorze, gdy pracuje on w warunkach przepływu tłokowego (1.1).

Ze względu na łatwość ich użycia, metody uproszczone są chętnie stosowane w praktyce. Niekiedy są one tak dalece proste, że nie pozwalają na analizę struktury działania reaktora, a jedynie na „kopiowanie” (w sensie statystycznym) obiektów już istniejących.

Pomiędzy tymi skrajnymi możliwościami umieścić można metody pośrednie.

Każdorazowo należy starannie dobrać metodę wymiarowania nowego lub analizę pracy istniejącego reaktora, aby dążenie do prostoty formalnej nie odbiło się na jakości wyników (ale też aby pracochłonność metody dokładnej nie przeważała nad uzyskanymi efektami praktycznymi).

Jest to szczególnie ważne w przypadku reaktorów recyrkulacyjnych, dla których nie można zastosować popularnego modelu tłokowego (patrz rozdz. 1).

W niniejszej pracy zaproponowano opis dynamicznej charakterystyki reaktora recyrkulacyjnego za pomocą metody typu pośredniego, dostosowanej do warunków jego pracy, a względnie prostej formalnie.

4.2. Opis kinetyki reakcji

Jak wynika z powyższego, dynamiczna charakterystyka reaktora zawiera głównie informację o hydraulicznych aspektach pracy obiektu, lecz musi ona być skorelowana z aspektami technologicznymi. Poprawnie dobrane parametry hydrauliczne obiektu powinny iść w parze z dostarczaniem do niego substratu o odpowiednich

właściwościach. Z tego względu nieodłączną częścią takiej charakterystyki musi być przydatny technicznie opis kinetyki rozważanych reakcji, czy przemian.

Pracę każdego działającego reaktora opisać można za pomocą krzywej, przedstawiającej zależność prędkości przebiegu zachodzącej w nim reakcji, od parametrów substratu, podlegającego przemianom oraz warunków panujących w reaktorze.

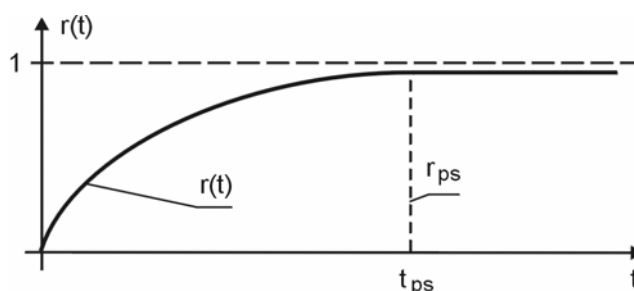
Prędkość przebiegu procesu może zależeć od czynników takich jak: temperatura, odczyn pH, potencjał redoks, pole prędkości i inne. Jednak zazwyczaj najistotniejszy wpływ na tempo przebiegu reakcji ma stężenie substratu. Jego optymalna wartość warunkuje sprawność działania reaktora.

Najczęściej opisuje się kinetykę reakcji przebiegającej w danym obiekcie za pomocą *krzywej zależności prędkości przebiegu procesu od wartości stężenia substratu*, a krzywe takie mogą mieć różny przebieg i kształt. Zależą one od rodzaju reakcji, ich stopnia złożoności, specyfiki procesu oraz typu reaktora.

Wykresy charakteryzujące kinetykę reaktorów mogą być wyznaczane w oparciu o formuły o różnych stopniach złożoności. Możemy mieć zatem do czynienia z krzywymi różnych rzędów. Najpopularniejsze do praktycznych zastosowań krzywe kinetyki reakcji wyznaczane są za pomocą formuł rzędu pierwszego [37]. Na przykład dla przypadku rozkładu substancji mamy:

$$r_i(t) = 1 - \exp(-K_i t) \quad (4.1)$$

Funkcję $r_i(t)$ można wyznaczyć teoretycznie, określając uprzednio stałą szybkości reakcji K_i każdej z reakcji, którym podlega każda z i ulegających przemianom substancji. Natomiast, gdy dysponujemy wynikami pomiarów, relacja (4.1) stanowi podstawę do wyznaczenia odpowiedniej stałej szybkości K .



Rys. 4.1. Krzywa kinetyki reakcji I rzędu

4.3. Modele opisu przepływu masy przez reaktor

Jak wspomniano na wstępie tego rozdziału, opisu przepływu cieczy przez reaktor dokonywać można stosując różne poziomy dokładności.

W praktyce najpopularniejsze są metody oparte na założeniach, które pozwalają pominąć wiele występujących w rzeczywistości, ale komplikujących opis elementów. Nazywamy je modelami uproszczonymi, a obiekty o charakterystykach z nimi zgodnych – idealnymi.

Choć w wielu przypadkach można z zadowalającą dokładnością stosować modele uproszczone, należy jednak w każdym przypadku projektowania nowego lub modernizacji istniejącego obiektu dokładnie rozważyć skutki zastosowania tychże uproszczeń.

W przypadku opisu dynamiki pracy reaktora przepływowego typu osadnik, powszechnie stosowane metody to modele przepływu tłokowego i idealnego wymieszania. Jednak zastosowanie ich jest możliwe tylko w przypadku, gdy dopływający do reaktora strumień cieczy po oddzieleniu osadu odprowadzany jest również jednym strumieniem odpływowym.

Sytuacja taka ma miejsce w reaktorach pracujących bez recyrkulacji lub z niewielką recyrkulacją, której intensywność można pominąć.

Jak już pokazano w rozdziale 1, przy opisie dynamiki reaktora pracującego ze znaczną recyrkulacją, której stopień osiąga $150 \div 200\%$ lub więcej, modelu przepływu tłokowego zastosować nie da się wcale.

Przyjrzyjmy się bliżej przywołanym tu modelom przepływu i wynikającym z ich własności możliwym zastosowaniom, aby wykazać poprawność powyższego stwierdzenia.

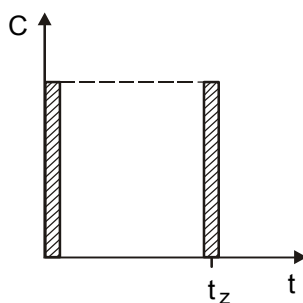
4.3.1. Modele uproszczone

Zaliczamy do nich dwa powszechnie stosowane modele: przepływu tłokowego oraz przepływu z idealnym mieszaniem.

Model tłokowy oparty jest na założeniu, że każdy element („porcja”) masy przebywa w reaktorze przez taki sam okres czasu (czyli rzeczywisty czas przebywania masy w reaktorze t jest wielkością stałą). Dla idealnego przepływu tłokowego po wprowadzeniu impulsu δ -Diraca otrzymuje się taką samą odpowiedź po czasie równym średniemu czasowi t_z przebywania płynu w zbiorniku (patrz rys. 4.2). Najczęściej model taki realizuje się przez założenie, iż w całej objętości zbiornika panuje jednakowa, stała prędkość $u = \text{const}$, profil prędkości jest płaski, poszczególne elementy płynu poruszają się po torach równoległych, dzięki czemu przebywają

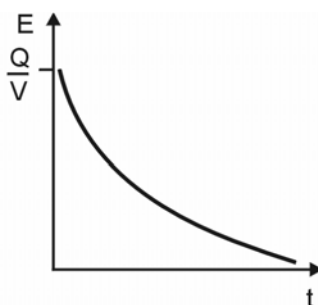
w reaktorze przez jednakowy okres czasu. Średni czas przepływu przez zbiornik opisuje w takim wypadku zależność (1.1).

Jednakże model ten, mimo, że bardzo często stosowany, wykazuje dużą rozbieżność z rzeczywistym rozkładem prędkości, który jest zwykle funkcją czasu i położenia $u = u(x,y,z,t)$. Ponadto drogi przebywane w reaktorze przez różne elementy płynu są różne. Tym samym wartość średniego czasu przebywania t_z słabo opisuje rzeczywisty rozkład czasu przebywania masy w reaktorze (patrz rozdz. 4.3.2).



Rys. 4.2. Charakterystyka dynamiczna przepływu tłokowego [40]

Model przepływu z idealnym mieszaniem wynika z założenia, że każdy element płynu wprowadzany do aparatu w nieskończenie krótkim czasie traci swoją tożsamość i zostaje natychmiast rozprowadzony w całej objętości płynu. W tym modelu zjawiska nie każdy element płynu przebywa przez jednakowy czas w zbiorniku. Przebieg funkcji określającej odpowiedź modelu z idealnym wymieszaniem na impuls trasera przedstawia rysunek 4.3. Charakterystyczną cechą tego przepływu jest to, że gdy w zbiorniku zachodzą reakcje chemiczne, wtedy stężenie każdego składnika jest w całej objętości płynu jednakowe i równe stężeniu tego składnika w strumieniu opuszczającym aktualnie zbiornik.



Rys.4.3. Charakterystyka dynamiczna przepływu z idealnym wymieszaniem [40]

Najbardziej rozpowszechnionymi w praktyce metodami opisu rzeczywistych przepływów płynów w zbiornikach jest przybliżanie zjawisk którymś z wyżej

opisanych modeli, najczęściej modelem tłokowym, lub pewną kombinacją takich modeli [40]. Jednakże rzeczywistość w większości przypadków na tyle znacząco różni się od tych idealnych modeli, że nie stanowią one wystarczająco dobrego przybliżenia. Ze względu na budowę i konstrukcję zbiorników oraz warunki ruchu, z reguły występują odchylenia od tych dwóch hipotetycznych rodzajów przepływu. Wynikają one z:

- pewnych stref bezruchu cieczy lub bardzo wolnego przepływu płynu, mówi się o występowaniu w zbiorniku objętości martwych,
- recyrkulacji płynu w zbiorniku,
- występowania pewnych przepływów uprzywilejowanych, niekiedy płyn przebywa w zbiorniku przez bardzo krótki czas (w szczególności chodzi o „krótkie spięcia” lub „przebiecie hydrauliczne”).

4.3.2. Metody dokładne

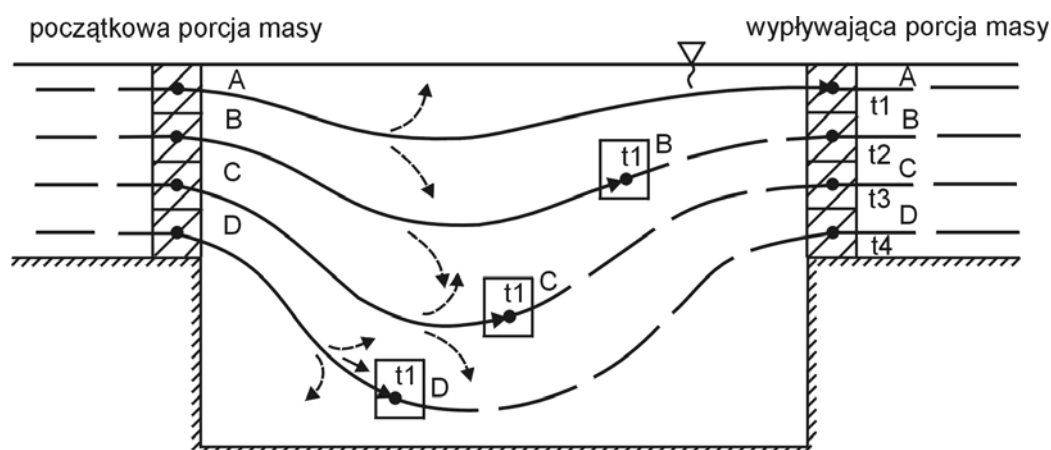
Ze względu na zróżnicowanie pola prędkości płynu w reaktorze, poszczególne elementy określonej porcji płynu, która wpływa do układu jako całość, opuszczają ten układ niejednocześnie, po upływie różnych okresów czasu, co jest związane ze zjawiskiem dyspersji (patrz dalej). Z definicji czas dt , w którym masa poruszająca się z prędkością u_s (jest to składowa prędkości wzdłuż aktualnego kierunku ruchu) przebywa dystans ds , jest równy

$$dt = \frac{ds}{u_s} \quad (4.2)$$

Dla dowolnej linii s (od $s = 0$ do $s = s_k$), gdy prędkość u_s zmienia się wzdłuż drogi, mamy

$$t = \int_s^{s_k} \frac{ds}{u_s} \quad (4.3)$$

Gdy rozważamy ruch w każdym układzie przepływowym (także w reaktorze), różne części tej samej porcji masy (która wpływa do reaktora jednocześnie) poruszają się po różnych torach i z różnymi prędkościami.



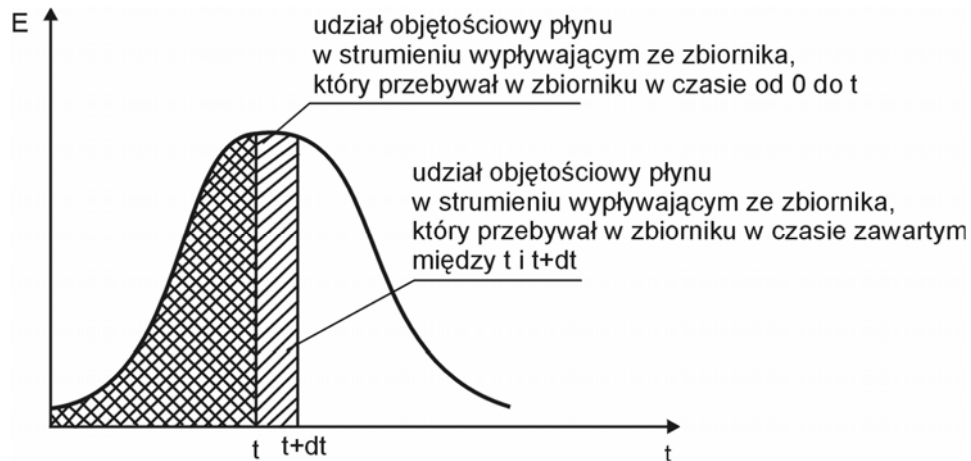
Rys.4.4. Dyspersja masy w reaktorze

Ilustruje to rysunek 4.4, na którym początkową porcję masy podzielono na przykładowe cztery elementy A, B, C i D. Czasy przepływu przez komorę dla każdego z nich są różne (odpowiednio t_1 , t_2 , t_3 , t_4). Oznacza to, że po czasie t_1 tylko pierwszy z nich dotrze do przekroju końcowego, a pozostałe będą jeszcze znajdować się gdzieś we wnętrzu reaktora. Tym samym możemy stwierdzić, że wypływająca porcja masy składa się z elementów, których czasy przebywania w reaktorze były różne. Ma to zasadnicze znaczenie wtedy, jeżeli podczas przepływu zachodzą reakcje lub przemiany masy substancji rozpuszczonej. W takim razie stopień reakcji w każdym elemencie będzie inny, zaś stopień łączny dla całej wypływającej porcji – będzie pewną wypadkową.

Do opisu rozkładu tego czasu przebywania płynu w obiekcie posłużyć się można zewnętrzną funkcją rozkładu czasu przebywania E [40], opisującą objętościowy ułamek masy płynu w strumieniu opuszczającym zbiornik, który przebywał w nim przez okres czasu zawarty w przedziale $\langle t, t+dt \rangle$ (patrz rys. 4.5). Spełniony musi być przy tym warunek:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad (4.4)$$

Charakterystykę tę, czyli funkcję rozkładu czasu przebywania płynu w zbiorniku lub też funkcję rozkładu stężenia substancji rozproszonej w płynie w przekroju odpływowym można wyznaczyć *teoretycznie* lub też *empirycznie*.



Rys.4.5. Zewnętrzna funkcja rozkładu czasu przebywania płynu E [40]

Metody teoretyczne dokładne oparte są na rozwiązaniu równań przenoszenia masy (patrz rozdz. 5.3). Układ stanowiący podstawę metody tworzą równania zachowania masy i pędu płynu niejednorodnego wraz z odpowiednio dobranym równaniem stanu [46] oraz z równania zachowania masy dla każdej z j substancji rozproszonych, które to zależności możemy zapisać w postaci [50]:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} + \text{div}(c_j \mathbf{u}_j) = \text{div} [(D_{M_j} + D_T) \text{grad } c_j] + Z_j \quad (4.5)$$

Rozwiązaniem równania (4.5) w przekroju końcowym jest funkcja $c_k(t)$, opisująca stężenie substancji rozpuszczonej w czasie. Zdefiniowana powyżej zewnętrzna funkcja rozkładu $E(t)$ jest znormalizowanym rozkładem stężenia $c_k(t)$, tak, aby spełniała warunek (4.4). Innymi słowy, wyraża ona względny ułamek masy, wypływającej z reaktora. Aby przeliczyć $c_k(t)$ na $E(t)$, musimy pierwszą z tych funkcji podzielić przez czynnik normalizujący, pisząc

$$E(t) = \frac{c_k(t)}{\int_0^{\infty} c_k(t) dt} = \frac{c_k(t)}{c_0 \Delta t} \quad (4.6)$$

gdzie: c_0 – stężenie znacznika we wprowadzanym impulsie,

Δt – czas trwania impulsu.

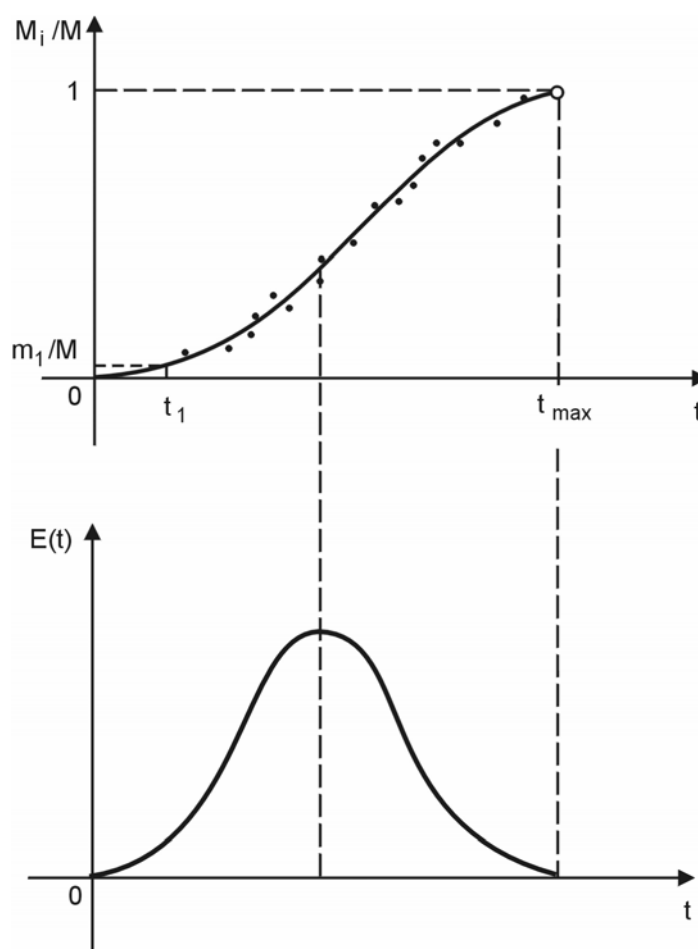
Obok omówionej wyżej metody dokładnej, można też zastosować *metodę teoretyczną uproszczoną*. Jej zasada oparta jest na schemacie przedstawionym na rysunku 4.4.

Wprawdzie transportowi masy substancji rozpuszczonej wzdłuż przedstawionych tam linii prądu towarzyszy jeszcze wymiana dyfuzyjna między tymi liniami (może to być dyfuzja molekularna albo turbulenta), ale przy względnie dokładnym opisie pola prędkości adwekcji, mieszanie dyfuzyjne można (przynajmniej w pierwszym przybliżeniu) pominąć. Z pewnością obniża to dokładność rezultatów, lecz pozwala na sformułowanie poglądowej metody „adwekcyjnego” opisu transportu substancji rozpuszczonej.

Dla każdej linii prądu wyznaczamy czas przepływu elementu płynu t_i oraz masy m_i substancji, rozpuszczonej w tym elemencie. Następnie uszeregujemy te czasy rosnąco, a dla każdego czasu t_i obliczymy łączną masę substancji M_i , która wypłynęła z reaktora do chwili t_i . Oczywiście dla $t_i = t_{max}$ masy $M_i = M_{max} = M$ – całkowitej masy substancji, wprowadzonej do reaktora. Mamy tu

$$M_i = \sum_{i=1}^i m_i \quad (4.7)$$

Zaznaczmy teraz punkty $(t_i, M_i/M)$ na układzie współrzędnych jak na rys (4.6).



Rys.4.6. Przybliżone wyznaczanie funkcji $E(t)$

Jeżeli teraz wyrównamy ten układ linią ciągłą i zróżniczkujemy (np. numerycznie), to otrzymamy szukaną funkcję $E(t)$, gdyż

$$E(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{M_i}{M} \right) \quad (4.8)$$

obrazuje to wykres na rysunku 4.6.

4.3.3. Metody eksperymentalne

Metody empiryczne oparte są na pomiarach stężenia końcowego znacznika $C_k(t)$, a następnie ewentualnym przeliczeniu ich na funkcję rozkładu $E(t)$, według (4.6).

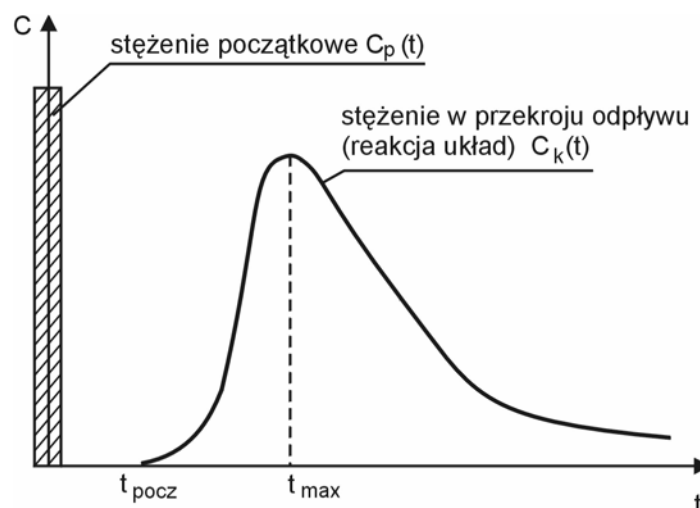
Wyznaczenie empirycznej charakterystyki będącej rozkładem czasu przebywania poszczególnych elementów płynu w reaktorze możliwe jest tylko dla obiektów już istniejących lub ich modeli.

W tym celu wykonuje się badania dynamiki reaktora poprzez wprowadzenie pewnej ilości znacznika na wlocie do zbiornika oraz analizę odpowiedzi na wylocie ze zbiornika. W przypadku cieczy znacznikami mogą być roztwory barwników, organicznych związków chemicznych, roztwory soli związków nieorganicznych, dla gazów mogą to być inne gazy, jak CO_2 , NH_3 , He, Kr itd. [53]. W obu przypadkach można stosować radioznaczniki [20, 24]. Zakłócenie może mieć różny charakter, jednakże najczęściej stosuje się impuls δ -Diraca (krótkotrwały, skokowy impuls) lub impuls ciągły (skokowa zmiana natężenia). W pierwszym przypadku wprowadza się skokowo określoną ilość znacznika o danym stężeniu C_p . Od tego momentu analizuje się stężenie znacznika na wylocie z obiektu. W ten sposób otrzymuje się dynamiczną krzywą C .

Dla przepływu tłokowego impuls na wylocie będzie równoważny impulsowi wprowadzonemu na wlocie, patrz rysunek 4.2.

Natomiast charakterystykę odpływową dla przepływu z idealnym mieszaniem przedstawia rysunek 4.3.

Jak wspomniano jednak wcześniej, zarówno przepływ tłokowy jak i z idealnym mieszaniem są modelami czysto teoretycznymi, w rzeczywistości zaś krzywa odpowiedzi różni się w sposób istotny od impulsu w strumieniu wlotowym i wygląda jak na rysunku 4.7.



Rys.4.7. Rozkład stężeń dla przepływu rzeczywistego [43]

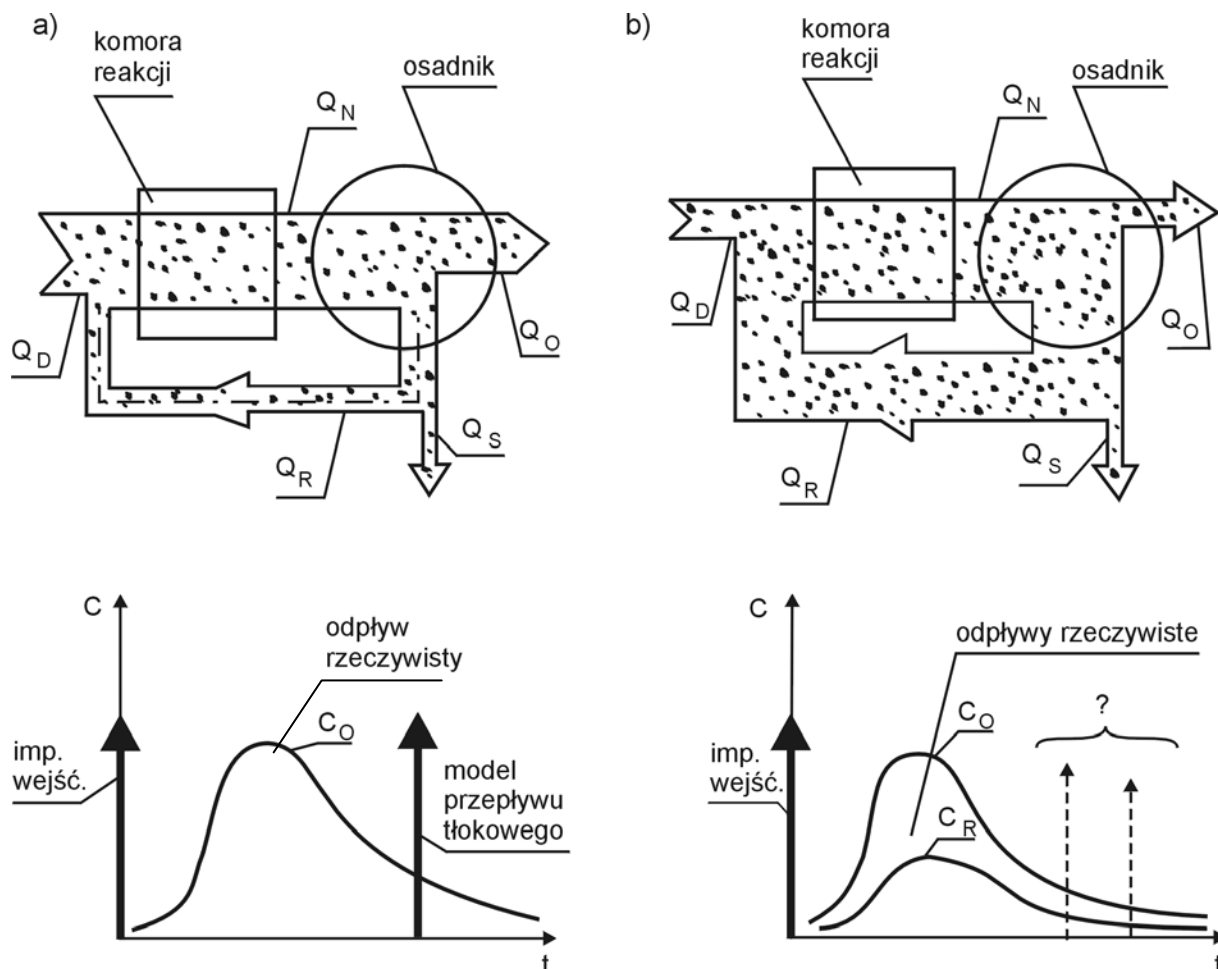
Konkretne zastosowanie tej metody omówione jest w rozdziale 6 niniejszego opracowania.

4.3.4. Modele uproszczone a przepływ z recyrkulacją

Stosowane w praktyce metody projektowania reaktorów prawie wyłącznie bazują na modelu przepływu tłokowego (bezpośrednio lub przez parametry pomocnicze), łączonego z wytycznymi technicznymi. Podejście takie jest proste z formalnego punktu widzenia, jednakże stosowane w nim uproszczenia skutkować mogą w pewnych przypadkach utratą dokładności opisu głównych parametrów hydraulicznych (takich jak prędkość czy czas zatrzymania) wewnątrz obiektu. Ponadto, jeśli rozpatrzymy przypadek bardziej złożony, taki jak ruch cieczy w osadniku wtórnym z recyrkulacją osadu, zastosowanie modelu przepływu tłokowego staje się niemożliwe i zachodzi konieczność poszukiwania innego rozwiązania.

Reaktor pracujący z recyrkulacją, której stopień, określany wg (1.1), wynosi ponad 100% (patrz rys. 4.8b) nie może być już traktowany (nawet w przybliżeniu) tak jak obiekt o charakterystyce przepływu zbliżonego do tłokowego (patrz rys. 4.8a), kiedy to strumień recyrkulowany (zwrotny) stanowi pomijalnie (dla dynamiki całego obiektu) małą wartość.

W przypadku przedstawionym na rysunku 4.8b (a mającym odzwierciedlenie w aktualnych parametrach pracy wielu reaktorów) strumień cieczy pobieranej z komory reaktora np. do celów recyrkulacji, jest równy lub nawet przekracza wartość wydatku strumienia odpływającego z tego reaktora. Odgrywa on więc ważną rolę w kształtowaniu się dynamicznych warunków panujących wewnątrz obiektu. Równocześnie charakterystyki odpływowe z obu opisanych tu typów układów zdecydowanie różnią się od siebie.



Rys.4.8. Charakterystyki odpływowe reaktorów:
 a) pracujących bez recyrkulacji, b) pracujących z recyrkulacją

Mianowicie w przypadku pierwszym (rys. 4.8a) mamy jedną krzywą, która może być przy akceptowalnych założeniach zastąpiona charakterystyką odpływową modelu tłokowego (patrz rozdz. 4.4.1). Taka operacja nie jest jednak możliwa w przypadku drugim (rys. 4.8b), gdy otrzymujemy dwie, znaczące dla opisu pracy urządzenia, wzajemnie skorelowane, krzywe odpływowe.

W tym przypadku zachodzi konieczność poszukiwania innego modelu opisu ruchu cieczy oraz przepływu masy przez obiekt.

Skutki nadmiernych uproszczeń są nietrudne do przewidzenia. Obiekt o nieprawidłowo dobranych parametrach zazwyczaj funkcjonuje w sposób daleki od oczekiwanego, jego charakterystyki często trudno jest skorygować przy użyciu prostych zabiegów, jego praca staje się nieekonomiczna i uciążliwa w sterowaniu.

W ramach omawianej pracy poszukiwano metody matematycznego opisu rzeczywistego przepływu cieczy przez reaktor, bez uciekania się jednak do kosztownego

oprogramowania komputerowego, opartego na rozwiązaniu pełnych równań ruchu cieczy. Zastosowano mianowicie (omówione w dalszej części pracy, rozdz. 5) uproszczone modele i nieskomplikowane metody matematycznego opisu zjawisk hydraulicznych i transportu masy w reaktorze, tak jednak dobrane, aby możliwe stało się uwzględnienie zjawiska rozdzielania strumienia cieczy wewnątrz reaktora.

Wyniki tych badań, zaprezentowane w dalszych rozdziałach, stanowią propozycję metody pośredniej (pomiędzy znacznym uproszczeniem a skomplikowanym stosowaniem pełnych postaci równań) wyznaczania charakterystyk dynamicznych reaktorów pracujących ze znaczną recyrkulacją.

5. Model dynamicznej charakterystyki reaktora

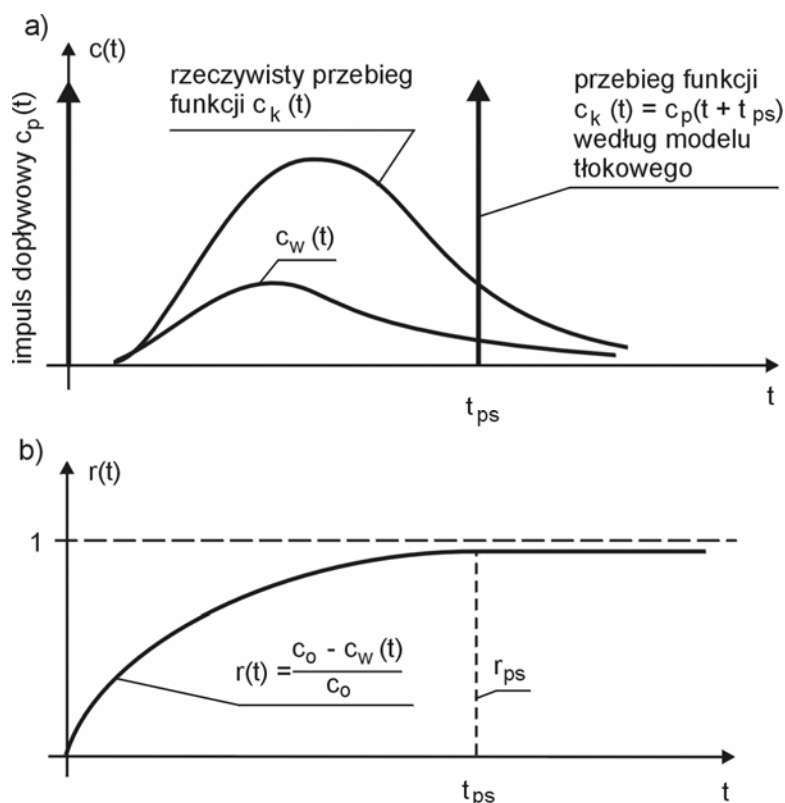
5.1. Ogólna zasada modelu

Dotychczasowe, zawarte w niniejszej pracy rozważania, podsumować można konkluzją, iż reaktory przepływowe, pracujące w układzie z recyrkulacją, w przypadku, gdy strumień tejże recyrkulacji ze względu na wielkość wydatku nie może być pominięty, wymagają odrębnej metody opisu hydraulicznych warunków, panujących w ich obszarze.

Metoda taka powinna mieć charakter „kompromisowej”, to znaczy:

- uwzględniać wewnętrzną strukturę przepływu cieczy przez reaktor;
- cechować się formalną prostotą w stopniu umożliwiającym jego praktyczne stosowanie.

Jak wykazano wcześniej (rozdz. 4.3.4), model taki może zostać utworzony na bazie rozkładu stężenia znacznika, wprowadzonego do układu jako jedna całość (w ujęciu idealnym impulsowo). Analiza stopnia deformacji tego początkowego impulsu i porównywanie go ze stężeniem obserwowanym w przekroju odpływowym $C_k(t)$, pozwala na określenie gęstości rozkładu czasu przebywania w reaktorze poszczególnych elementów każdej takiej porcji. W ujęciu bezpośrednim opisuje to znormalizowana krzywa $E(t)$ (patrz rozdz. 4.3.2), lecz do celów praktycznych wystarczy posłużyć się krzywą $C_k(t)$ (rys. 5.1a).



Rys.5.1. Funkcjonalna charakterystyka reaktora pracującego bez recyrkulacji [33]

Należy podkreślić, że krzywa $C_k(t)$ opisuje tylko hydrauliczne aspekty transportu masy przez reaktor (czyli odnosi się do substancji nie ulegającej reakcjom, czy też przemianom). W rzeczywistości interesują nas jednak substancje nietrwałe, podlegające przemianom (rozkładowi lub produkcji). Kinetykę tych przemian opisuje krzywa $r(t)$, stanowiąca drugi element opracowywanego tu modelu pracy reaktora (rys. 5.1b). Rozkład stężenia końcowego substancji rozkładanej $C_w(t)$ można otrzymać z rozkładu $C_k(t)$, korzystając z oczywistej relacji:

$$C_w(t) = C_k(t)[1 - r(t)] \quad (5.1)$$

Tak więc masa każdej porcji usuwanej substancji o stężeniu $C(t)$, wprowadzanej do reaktora, jest proporcjonalna do pola pod krzywą $C_k(t)$ na rysunku 5.1a, bowiem mamy:

$$M_p = \int_0^{\infty} C_k(t) Q dt \quad (5.2)$$

Z kolei pole pod krzywą $C_w(t)$ reprezentuje tę część wprowadzanej porcji masy, która nie uległa w reaktorze rozkładowi i opuszcza układ wraz ze strumieniem wypływającej cieczy. Oznacza to, że masa usunięta M_R da się wyrazić zależnością:

$$M_R = \int_0^{\infty} [C_k(t) - C_w(t)] Q dt \quad (5.3)$$

Efektywny stopień usuwania rozważanej substancji w reaktorze wyniesie więc:

$$r_{ef} = \frac{M_R}{M_p} \quad (5.4)$$

Naszkiowaną wyżej procedurę można uznać za klasyczną (np. [40]), jednakże odnosi się ona do przepływów prostych, bez recyrkulacji. W niniejszej pracy uogólniono ją dla badanego tu przypadku – dla rozplywu strumienia w reaktorze na dwie części: „odpływową” i „powrotną”.

Oznacza to, że należy wyznaczyć dwie krzywe rozkładu stężenia – $C_{kO}(t)$ dla strumienia ścieków oczyszczonych oraz $C_{kR}(t)$ dla strumienia recyrkulatu, a także dwie krzywe, opisujące zmianę stężenia substancji rozproszonej w ściekach – $r_O(t)$ dla strumienia ścieków oczyszczonych oraz $r_R(t)$ dla strumienia recyrkulatu. W przypadku najbardziej typowego reaktora w tej kategorii (czyli osadnika wtórnego w metodzie osadu czynnego) będą to krzywe opisujące odpowiednio spadek stężenia zawiesiny w ściekach oczyszczonych oraz wzrost jej stężenia w osadzie dennym.

Kwestia ta zostanie omówiona w rozdziale 7, zaś w pierwszej kolejności przedstawiony będzie proponowany sposób wyznaczania krzywych $C_{kO}(t)$ oraz $C_{kR}(t)$.

5.2. Ogólne uwagi dotyczące wyznaczania charakterystycznych rozkładów stężenia substancji rozproszonej

Niezbędne dla sformułowania proponowanej tu metody rozkładu stężenia $C_{kO}(t)$ oraz $C_{kR}(t)$ można otrzymać stosując jedno z dwóch fundamentalnych podejść:

- teoretyczne;
- empiryczne.

To pierwsze, polegające na rozwiązywaniu równań, opisujących rozważane zjawiska, ma z pewnością przewagę – jest tańsze (choć jego koszt zależy od przyjętej dokładności opisu) oraz bardziej uniwersalne (raz uzyskane rozwiązanie pozwala na analizowanie różnych wariantów zagadnienia), a co szczególnie istotne, może być stosowane dla obiektów, które dopiero mają powstać (projektowanych). Istotną wadą tych metod są problemy z wyznaczeniem parametrów i stałych procesowych, które często są trudne do dokładnego określenia na drodze teoretycznej.

Z tego względu często chętnie stosuje się metody empiryczne – w skali laboratoryjnej lub technicznej (lub ułankowo-technicznej). Mają one charakter bardziej lokalny, ograniczony do zakresu przeprowadzonych pomiarów, lecz pozwalają na analizę pracy konkretnego obiektu, toteż są szczególnie przydatne przy modernizacji lub przebudowie urządzeń już istniejących.

Ponadto metody empiryczne stanowią bardzo ważne uzupełnienie metod teoretycznych. Przy opracowywaniu tzw. „modelu matematycznego” często niezbędne jest dokonanie empirycznej identyfikacji jego parametrów, jak też doświadczalnej weryfikacji końcowych wyników obliczeń.

Tak właśnie jest w przypadku niniejszej pracy, toteż obie metody zostaną omówione osobno.

5.3. Teoretyczne wyznaczanie charakterystycznych rozkładów stężenia substancji rozproszonej

5.3.1. Ogólne równanie zachowania masy substancji rozproszonej

Analiza i wyprowadzanie równań zachowania dla mieszaniny i jej składników jest obszernym i oddzielnym problemem, toteż w pracy przedstawiono tylko podstawowe formuły opisujące prawa i procesy związane z transportem substancji rozproszonej. Formuły te posłużyły jako punkt wyjścia dla prac teoretycznych opisanych w kolejnych rozdziałach.

Opisując procesy transportu masy j -tego składnika roztworu, w ogólnym przypadku musimy brać pod uwagę możliwość, że jest to substancja nietrwała. Oznacza to, iż podlega ona w wyniku przemian chemicznych, biologicznych oraz fizycznych rozkładowi lub też syntezie. Odpowiadające takim przemianom procesy opisywane są poprzez tak zwane funkcje źródłowe, dodatnie, gdy substancja jest produkowana, ujemne zaś, gdy ulega rozkładowi.

Różniczkową postać równania zachowania masy dla j -tego składnika mieszaniny możemy zapisać następująco [50]:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} + \operatorname{div}(c_j \mathbf{u}) = \operatorname{div}(-c_j \mathbf{u}_j^*) + \sum_{k=1}^{K_r} z_{jk} \quad (5.5)$$

gdzie: k – numer reakcji ($k = 1, 2, \dots, K_r$), której podlega j -ta substancja.

Prędkość \mathbf{u} jest prędkością *adwekcji*, zaś \mathbf{u}_j^* - prędkością *dyfuzji* j -tego składnika.

Jednostkowy dyfuzyjny strumień masy j -tego składnika m_{dj} opisany jest więc równaniem:

$$m_{dj} = c_j \mathbf{u}_j^* \quad (5.6)$$

Wspomniane wcześniej zjawisko dyfuzji molekularnej, czyli efektywny transport masy substancji rozpuszczonej, wywołany przez chaotyczny ruch jej molekuł oraz nierównomierność stężenia opisany jest przez formułę, wyrażającą *prawo Ficka*:

$$m_{dj} = -D_{Mj} \operatorname{grad} c_j \quad (5.7)$$

gdzie: D_{Mj} – współczynnik proporcjonalności, zwany *współczynnikiem dyfuzji molekularnej*, $\operatorname{grad} c_j$ – gradient gęstości rozkładu masy j -tego składnika.

Po prawej stronie formuły (5.7) występuje znak minus, który oznacza, że efektywny strumień masy zorientowany jest w kierunku obszarów o niższej koncentracji. Jeśli w oddalonych o l_0 warstwach płynu stężenie cząsteczek różni się o Δn , to strumień masy m_j pomiędzy tymi warstwami wywołany chaotycznym ruchem molekuł z prędkością średnią \bar{u}_j , wynosi [46]:

$$m_{dj} = -m \Delta n \bar{u}_j = -\Delta c_j \bar{u}_j. \quad (5.8)$$

Jeżeli rozwiniemy przyrost stężenia w formule (5.8) w szereg Taylora, wówczas możemy zapisać:

$$m_{dj} \cong -l_0 \bar{u}_j \frac{\partial c_j}{\partial l}. \quad (5.9)$$

Porównując wyrażenia (5.9) oraz (5.7) stwierdzamy, że występujący w kontynu-
alnej wersji prawa Ficka *współczynnik dyfuzji molekularnej* D_{Mj} zależy od dwóch
wielkości: średniej drogi swobodnej l_0 i średniej prędkości ruchu molekularnego \bar{u}_j .
Tym samym zależy on od rodzaju substancji i od temperatury.

Uogólniając prawo Ficka (5.7) na przypadek dyfuzji anizotropowej, otrzymujemy
następującą zależność:

$$m_{dj} = -\hat{\mathbf{D}}_j \text{grad } c_j \quad (5.10)$$

gdzie: $\hat{\mathbf{D}}_j$ – tensorowy współczynnik dyfuzji j -tej substancji.

Podstawiając powyższą formułę do równania (5.5) otrzymujemy ogólną postać
równania opisującego migrację masy w ośrodku ciągłym:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} + \text{div}(c_j \mathbf{u}) = \text{div}(\hat{\mathbf{D}}_j \text{grad } c_j) + \sum_{k=1}^{K_r} z_{jk}. \quad (5.11)$$

W praktyce dyfuzja molekularna ma charakter izotropowy, toteż współczynnik
 $\hat{\mathbf{D}}_j$ jest wielkością skalarną (D_{Mj}).

Teoretyczne wyznaczenie wartości D_{Mj} dla konkretnych substancji, ze względu na
stosunkowo niską dokładność opisu molekularnej struktury materii, jest zadaniem
niełatwym, chociaż w literaturze [5] można znaleźć służące temu celowi metody.

W praktyce jednak współczynnik ten traktowany jest jako wielkość o charakterze
empirycznym. Przykładowe wartości uzyskane za pomocą różnych formuł przedsta-
wiono w tabeli 5.1, zaś na drodze badań i pomiarów – w tabeli 5.2.

Dla omawianych w niniejszej pracy roztworów ciekłych wartość współczynnika
dyfuzji molekularnej zależy od stężenia roztworu (jak zauważyć można w tabeli 5.2).
Na jego wartość wpływ ma również temperatura. W tym przypadku zastosować moż-
na następujący wzór [50]:

$$D_M(T = T_1) = D_M(T = 20^\circ \text{C})[1 + \alpha_D(T_1 - 20)], \quad (5.12)$$

gdzie:

$$\alpha_D = 0,002 \mu^{1/2} \rho^{-1/3}. \quad (5.13)$$

μ – dynamiczny współczynnik lepkości rozpuszczalnika (w temperaturze 20°C)
w g/cm·s, ρ – gęstość rozpuszczalnika w g/cm³.

Tab.5.1. Wartości współczynników transportu uzyskane za pomocą różnych formuł

Współczynnik samodyfuzji dla wody ¹⁾	T=25°C $D_M=2,43 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$		T=45°C $D_M=3,84 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$	
Współczynnik dyfuzji NaCl w wodzie ¹⁾	T=25°C stężenie 0,1 mol/dm ³ $D_M=1,483 \times 10^{-9} \text{ NaCl}$		T=25°C stężenie 3 mol/dm ³ $D_M=1,565 \times 10^{-9} \text{ NaCl}$	
Współczynnik dyspersji podłużnej w ruchu burzliwym wg Taylora (...) dla rury gładkiej	D=0,01 m u=0,1 m/s $K_L=4,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	D=0,3 m u=0,5 m/s $K_L=3,47 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	D=0,7 m u=1,5 m/s $K_L=0,2160 \text{ m}^2/\text{s}$	D=1 m u=2 m/s $K_L=0,3670 \text{ m}^2/\text{s}$
Współczynnik dyspersji w rzekach wg Eldera (..)	h=0,5 m u=0,1 m/s $n_s=0,009$ $R_h=0,1 \text{ m}$ $K_L=0,01227 \text{ m}^2/\text{s}$	h=1,0 m u=0,5 m/s $n_s=0,014$ $R_h=0,6 \text{ m}$ $K_L=0,14178 \text{ m}^2/\text{s}$	h=1,5 m u=1,0 m/s $n_s=0,040$ $R_h=1,3 \text{ m}$ $K_L=1,06743 \text{ m}^2/\text{s}$	
Współczynnik dyspersji w rzekach wg Krenkela (..)	h=0,5 m u=0,1 m/s $n_s=0,009$ $R_h=0,10 \text{ m}$ $K_L=0,01883 \text{ m}^2/\text{s}$	h=1,0 m u=0,5 m/s $n_s=0,014$ $R_h=0,6 \text{ m}$ $K_L=0,21757 \text{ m}^2/\text{s}$	h=1,5 m u=1,0 m/s $n_s=0,040$ $R_h=1,3 \text{ m}$ $K_L=1,63805 \text{ m}^2/\text{s}$	
Współczynnik dyspersji w rzekach wg Parkera (..)	h=0,5 m u=0,1 m/s $n_s=0,009$ $R_h=0,1 \text{ m}$ $K_L=0,00836 \text{ m}^2/\text{s}$	h=1,0 m u=0,5 m/s $n_s=0,014$ $R_h=0,6 \text{ m}$ $K_L=0,28978 \text{ m}^2/\text{s}$	h=1,5 m u=1,0 m/s $n_s=0,040$ $R_h=1,3 \text{ m}$ $K_L=3,15129 \text{ m}^2/\text{s}$	

¹⁾ Zbiór wielkości fizykochemicznych. Warszawa: PWN 1974

Tab.5.2. Współczynniki dyfuzji molekularnej niektórych elektrolitów w wodzie (w temp. 20°C), 10^{-9} [m²/s] [50]

Substancja	Stężenie roztworu (mol/dm ³)									
	0,000	0,001	0,003	0,005	0,010	0,05	0,1	0,5	1,0	3,0
BaCl ₂	1,385	1,320	1,283	1,265	1,256	1,179	1,159	1,151	1,179	1,291
CaCl ₂	1,335	1,249	1,201	1,179	1,173	1,121	1,101	1,140	1,203	1,265
LiCl	1,366	1,345	1,331	1,323	1,312	1,28	1,27	1,28	1,30	1,43
KCl	1,993	1,964	1,945	1,934	1,917	1,864	1,844	1,850	1,892	2,112
NaCl	1,610	1,585	1,570	1,560	1,545	1,507	1,483	1,474	1,484	1,565
ZnSO ₄	0,846	0,748	0,724	0,705	0,696	0,688	0,670	0,521	0,512	0,478
H ₂ SO ₄	1,960	1,940	1,920	1,881	1,900	1,921	1,928	1,940	2,020	2,312

Równanie zachowania masy j -tego składnika roztworu (5.11) zwane jest potocznie *równaniem adwekcji-dyfuzji ze źródłami* [50]. Przy założeniu stałego współczynnika dyfuzji molekularnej $D_{Mj} = \text{const}$, przyjmuje ono postać:

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} + u_x \frac{\partial c_j}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_j}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_j}{\partial z} = D_{Mj} \left(\frac{\partial^2 c_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c_j}{\partial z^2} \right) + Z_j. \quad (5.14)$$

Bardzo ważną rolę pełni tu wypadkowa funkcja źródłowa Z_j , będąca sumą funkcji jednostkowych z_{jk} (patrz równanie (5.5)), opisujących kinetykę każdej z „ k ” reakcji, którym może podlegać substancja „ j ”.

Jej wyznaczenie (patrz równanie (4.1)) w złożonych przypadkach jest zadaniem dla specjalisty z zakresu technologii wody i ścieków. W sytuacjach bardziej typowych można wykorzystać standardowe modele kinetyki (np. [50]).

Ze względu na charakter niniejszej pracy, poświęconej przepływowym aspektom charakterystyki reaktorów, funkcje źródłowe nie zostały w niej szerzej omówione. Ograniczono się tu jedynie do przedstawienia propozycji jej doświadczalnego wyznaczenia dla dwóch równoległe biegnących procesów – klarowania ścieków oraz zagęszczania osadu dennego w osadniku [33] (patrz rozdz. 7).

5.3.2. Uprozczone modele transportu substancji rozproszonej

Podstawowym problemem, utrudniającym operowanie ogólnym równaniem transportu (5.14) jest burzliwość przepływu. W klasycznym ujęciu przyjmuje się

wtedy, że wielkości charakteryzujące przepływ da się przedstawić jako sumy części uśrednionej (głównej) oraz fluktuacyjnej. W szczególności mamy:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}', \quad c_j = \bar{c}_j + c'_j \quad (5.15)$$

Pozwala to przekształcić równanie (5.14), opisujące czystą adwekcję, dyfuzję molekularną i czynniki źródłowe, w równania opisujące uśrednioną adwekcję, dyfuzję łączną (molekularną i turbulentną) i czynniki źródłowe [50]:

$$\frac{\partial \bar{c}_j}{\partial t} + \text{div}(\bar{c}_j \bar{\mathbf{u}}_j) = D_{Mj} \left(\frac{\partial^2 \bar{c}_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{c}_j}{\partial z^2} \right) + \text{div}(-\bar{\mathbf{m}}_{Tj}) + \bar{Z}_j \quad (5.16)$$

Turbulentny strumień jednostkowy $\bar{\mathbf{m}}_{Tj}$ wyraża się przez wielkości uśrednione, stosując różne modele turbulencji [50]. W rezultacie otrzymuje się bardzo istotną relację – *równanie adwekcji i burzliwej dyfuzji ze źródłami* (5.16). Daje ona możliwość opisu trójwymiarowego (3D) i uśrednionego, pola stężenia $\bar{c}_j(t)$ rozważanej substancji rozproszonej.

W ogólnym przypadku dyfuzji burzliwej nie możemy przyjmować (tak jak dla dyfuzji na poziomie molekularnym), iż zjawisko to przebiega w sposób izotropowy. Mamy więc do czynienia z *anizotropią*, a *współczynnik dyfuzji burzliwej* $[D_T]$ jest tensorem. Zaś prawo Ficka przyjmuje w tej sytuacji następującą postać:

$$\mathbf{m}_{Tj} = -[D_T] \text{grad} \bar{c}_j \quad (5.17)$$

Gdy jednak możliwe jest założenie izotropii, czyli gdy dla składowych prędkości fluktuacyjnych zachodzi warunek [50]:

$$u_x'^2 = u_y'^2 = u_z'^2 \quad (5.18)$$

Wówczas współczynnik D_T jest skalarem i prawo (5.17) przyjmuje postać

$$\mathbf{m}_{Tj} = -D_T \text{grad} \bar{c}_j \quad (5.19)$$

Zakładając izotropię zjawiska dyfuzji burzliwej i jednocześnie uwzględniając przestrzenną zmienność współczynnika dyfuzji burzliwej możemy podstawić (5.19) do (5.16) i zapisać równanie migracji j -tej substancji rozpuszczonej następująco:

$$\frac{\partial \bar{c}_j}{\partial t} + u_x \frac{\partial c_j}{\partial x} + u_y \frac{\partial c_j}{\partial y} + u_z \frac{\partial c_j}{\partial z} = \text{div}[(D_{Mj} + D_T) \text{grad } \bar{c}_j] + \bar{Z}_j \quad (5.20)$$

Jednakże rozwiązanie równania w wersji trójwymiarowej (3D) jest bardzo kłopotliwe, czego główną przyczyną jest konieczność wyznaczenia przestrzennego pola prędkości [50]. Z tego względu duże znaczenie praktyczne mają modele jeszcze bardziej uproszczone.

Wśród ogólnych klas modeli tego typu, szczególną rolę odgrywają *modele dyspersyjne* – dwuwymiarowy (2D) oraz jednowymiarowy (1D).

Pierwsza z tych grup dotyczy takich przypadków, gdy pole prędkości i stężenie substancji rozpuszczonych mają (w przybliżeniu lub dokładnie) charakter płaski, co pozwala napisać:

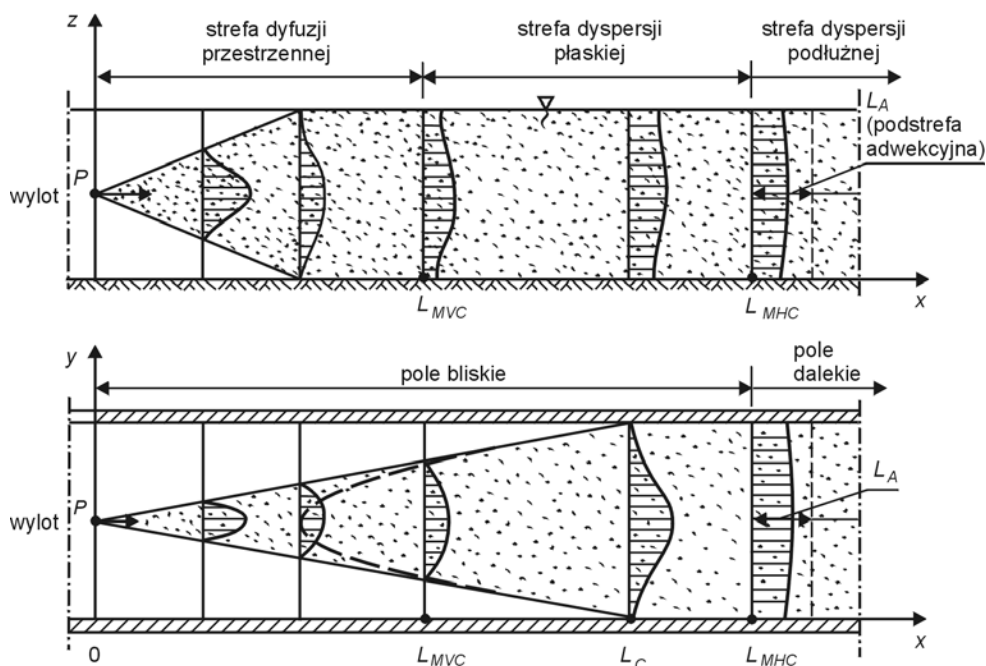
$$\mathbf{u}(x, y, t) = u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j} \quad (5.21)$$

$$c_j = c_j(x, y, t) \quad (5.22)$$

Oznacza to, że:

- uśredniamy profil prędkości płynu wzdłuż jednego kierunku oraz
- rozkład stężenia substancji rozpuszczonej transportowanej przez ciecz jest na tyle wyrównany, że możemy wzdłuż tej zmiennej zastąpić go jedną wartością średnią (patrz rys. 5.2).

Mamy wówczas do czynienia z *płaską dyspersją masy*. Rysunek 5.2 przedstawia przykład sytuacji, gdzie występuje strefa dyspersji płaskiej (pomiędzy L_{MVC} i L_{MHC}), profil prędkości został tu uśredniony wzdłuż kierunku z .



Rys.5.2. Płaska dyspersja masy [50]

Z analizy teoretycznej oraz wyników pomiarów wynika, że w ruchu płaskim dyspersja ma charakter anizotropowy [50]. Prawo Ficka przyjmuje wobec tego postać:

$$\mathbf{m}_D(x, y, t) = -[K_D] \text{grad } \tilde{c}(x, y, t) \quad (5.23)$$

gdzie $[K_D]$ – tensorowy współczynnik dyspersji.

W przypadku dyspersji w płaszczyźnie xOy , gdy uśredniamy prędkość oraz stężenie względem jednego z kierunków poziomych, prawo Ficka (5.23) możemy zapisać w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} m_{Dx} \\ m_{Dy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} \\ \frac{\partial \tilde{c}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Natomiast równanie transportu masy, czyli *równanie płaskiej adwekcji-dyspersji* przyjmuje postać [50]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + v_y \frac{\partial \tilde{c}}{\partial y} = & \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} h \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + K_{xy} h \frac{\partial \tilde{c}}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yx} h \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + K_{yy} h \frac{\partial \tilde{c}}{\partial y} \right) + \tilde{Z} \end{aligned} \quad (5.25)$$

gdzie: v_x, v_y – składowe prędkości uśrednionej względem głębokości h .

Z kolei model dyspersji 1D stosujemy wtedy, gdy można przyjąć, że:

$$\mathbf{u}(x, t) = u_x \mathbf{i} \quad (5.26)$$

$$c_j = c_j(x, t) \quad (5.27)$$

Równanie transportu wygląda tu następująco [50]:

$$\frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} + v \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} = \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left[S(D_M + D_T) \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} \right] + \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} (-\mathbf{m}_D S) + \tilde{Z} \quad (5.28)$$

gdzie: S – pole powierzchni, przez którą następuje transport masy.

5.3.3. Wybór modelu transportu

Ze względu na rozkład stężenia, reaktory można podzielić na dwie kategorie:

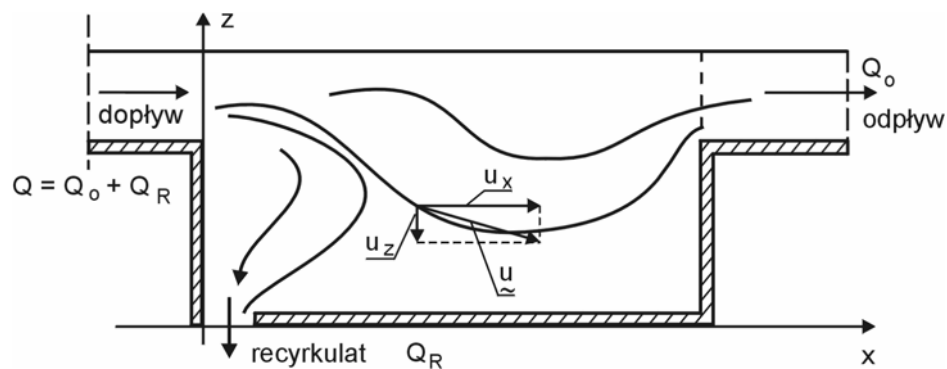
- reaktory o równomiernym rozkładzie stężenia;

- reaktory o zmiennym rozkładzie stężenia.

Do pierwszej z nich należą te urządzenia, dla których zasadniczym wymogiem jest homogenizacja zawartości. Do opisu ich pracy (niekiedy w ujęciu uproszczonym) szczególnie przydatny jest model przepływu z idealnym mieszaniem (patrz rozdz. 4.3.1).

Rzecz oczywista, rozważane tu obiekty, w których następuje rozdział strumienia, nie mogą należeć do tej kategorii (w przeciwnym razie wystarczyłby tu jeden odpływ, który byłby ewentualnie rozdzielany już poza reaktorem), a ich szczególną cechą jest wewnętrzna zmienność pola stężeń.

Obiekty te wykazują wszakże istotną regularność kształtu, co pozwala przyjąć, że pole stężeń ma charakter 2D *plaski pionowy*, **toteż taki właśnie model transportu przyjęto dla potrzeb niniejszej pracy** (patrz rys. 5.3)



Rys.5.3 *Plaski pionowy model transportu masy*

Uwzględniając poprzeczną anizotropię zjawiska [50], równanie transportu (5.16) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + v_z \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} = \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} B \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + K_{xz} B \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} \right) + \\ + \frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zx} B \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + K_{zz} B \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} \right) + \tilde{Z} \end{aligned} \quad (5.29)$$

W dowolnym układzie współrzędnych składowe współczynnika dyspersji K_{xx} , K_{xz} oraz K_{zz} opisują następujące związki:

$$\left. \begin{aligned} K_{xx} &= K_L n_x^2 + K_T n_z^2 \\ K_{xz} &= K_{zx} = (K_L - K_T) n_x n_z \\ K_{zz} &= K_L n_z^2 + K_T n_x^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.30)$$

gdzie:

$$n_x = \frac{u_x}{|\bar{\mathbf{u}}|}, n_z = \frac{u_z}{|\bar{\mathbf{u}}|} \quad (5.31)$$

zaś K_L oraz K_T są efektywnymi współczynnikami dyspersji odpowiednio: podłużnej i poprzecznej.

Za podstawową relację, określającą *współczynnik dyspersji podłużnej* K_L (wyznaczonej przez wektor prędkości) dla układów typu kanał czy rzeka (do której to kategorii zaliczyć można badany model laboratoryjny), uznaje się wzór Eldera [50], zgodnie z którym:

$$K_L = 5,93 h v^* \quad (5.32)$$

gdzie: v^* - prędkość dynamiczna równa [50]:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_d}{\rho}} = \sqrt{\frac{g v}{C_{CH}}} \quad (5.33)$$

gdzie: τ_d – naprężenie przyścienne, C_{CH} – współczynnik Chézy'ego.

Wartość stała, występująca w powyższym wzorze uznawana jest za klasyczną dla przypadków podobnych do tutaj rozpatrywanego czyli takiego, dla którego można pominąć wpływ brzegów na profil prędkości. Istnieje jednak znaczna liczba publikacji [28, 47] dowodzących, iż wartość tego mnożnika bywa wyznaczana lokalnie, dla badanego przypadku na drodze pomiarów.

Oprócz przytoczonego już wzoru Eldera można znaleźć w literaturze dotyczącej zagadnienia dyspersji wiele innych zależności pozwalających określić współczynnik K_L . Poniżej przedstawiono kilka z nich [50]:

$$K_L = 0,058 \frac{Q}{i_o b} \quad (\text{McQuivey i Keefer}), \quad (5.34)$$

$$K_L = 0,008 \frac{v^2 b^2}{i_o b} \quad (\text{Fisher i Jain}), \quad (5.35)$$

$$K_L = 20,2 R_h v \sqrt{g} / C_{CH} \quad (\text{Parker}), \quad (5.36)$$

$$K_L = 7,25 h v^* \left(\frac{v}{v^*} \right)^{1/4} \quad (\text{Thackston}), \quad (5.37)$$

$$K_L = 0,18 \left(\frac{v}{v^*} \right) \frac{Q^2}{v^* R_h^3} \text{ (Lin).} \quad (5.38)$$

Z kolei dla *współczynnika dyspersji poprzecznej* K_T jako podstawową dla kanałów prostych przyjmuje się relację Eldera [50]:

$$K_T = 0,23 h v^*. \quad (5.39)$$

Przytoczone tu formuły pozwalają na wyznaczenie współczynników dyspersji dla wielu praktycznych przypadków. Należy jednak mieć świadomość, iż wzory te nie uwzględniają indywidualnej złożoności zjawiska dyspersji [13]. W sytuacji, gdy istotny jest dokładny opis zjawiska dla konkretnego układu, współczynniki dyspersji wyznacza się metodami doświadczalnymi [50]. W tabeli 5.1 przedstawiono przykładowe wartości współczynników transportu podłużnego obliczone różnymi metodami.

5.4. Teoretyczne wyznaczanie pola prędkości

5.4.1. Równania ogólne

Podstawowym czynnikiem, na którym opiera się opis dynamiki przepływu cieczy przez obiekt hydrotechniczny, jest układ pola prędkości w jego wnętrzu. Aby wyznaczyć dokładny jego rozkład w danym obszarze, należałoby rozwiązać układ równań opisujących stan płynu.

Wyjściowy zestaw równań zachowania, opisujący rozważane w dalszej części opracowania zagadnienia, stanowią:

- równanie zachowania masy roztworu,
- równanie zachowania pędu roztworu,
- równania zachowania masy dla poszczególnych składników roztworu.

Układ tych równań ma następującą postać [50]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \end{array} \right. \quad (5.40)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = \rho \mathbf{f} - \nabla p + \mu \Delta \mathbf{u} \end{array} \right. \quad (5.41)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial c_j}{\partial t} + \text{div}(c_j \mathbf{u}) = \text{div}(D_e \text{grad } c_j) + Z_j \end{array} \right. \quad (5.42)$$

gdzie: 5.40 – równanie zachowania masy roztworu

5.41 – równanie zachowania pędu roztworu

5.42 – równanie zachowania masy j -tego składnika roztworu

Równania zachowania w wersji ogólnej mają złożoną postać. Ich dokładne rozwiązanie analityczne możliwe jest tylko w szczególnych przypadkach.

Koniecznością staje się wobec tego sięgnięcie do metod przybliżonych. Szczególnie atrakcyjnym narzędziem są w tym przypadku metody numeryczne. Zadania takie jak rozwiązywanie skomplikowanego układu równań różniczkowych, także w przypadku zastosowania metod komputerowych, stanowią poważny problem. Dlatego też programy służące do takich obliczeń opracowywane są często przez całe zespoły specjalistów. W rezultacie powstaje narzędzie, które jest bardzo atrakcyjne z punktu widzenia użytkownika ze względu na wygodę obsługi i łatwość generowania efektywnych wyników. Jednakże programy takie są bardzo kosztowne zaś zasada ich działania, a co za tym idzie, poczynione przez autora założenia, stanowią bardzo często tajemnicę twórców danego oprogramowania. Fakt ten, w połączeniu z wysoką ceną nabycia i użytkowania takiego narzędzia (co warunkuje możliwość korzystania z wyników uzyskanych przy jego wykorzystaniu), stanowić może w wielu przypadkach poważną przeszkodę uniemożliwiającą wybór takiego rozwiązania, które w praktyce jest możliwe do realizacji tylko w firmach lub instytucjach dysponujących odpowiednimi środkami finansowymi.

Opracowanie narzędzia tańszego, lecz opartego na podobnych założeniach, czyli bazującego na rozwiązaniu równań opisujących rzeczywiste zjawiska, mogłoby dać szansę jego wykorzystania niezależnie od wielkości i zamożności firmy czy osoby chcącej taki sposób zastosować.

Rozwiązanie, o jakim tu mowa, bazować musi na jednym z uproszczonych modeli równań.

5.4.2. Modele uśrednione

Jak już wspomniano istnieją następujące możliwości uśrednień:

- względem dwóch zmiennych przestrzennych (w efekcie uzyskujemy strumień jednokierunkowy),
- względem jednej zmiennej w przestrzeni (pionowej lub poziomej, co prowadzi do modelu płaskiej warstwy cieczy).

Terminem model jednokierunkowy i jednowymiarowy, określamy taki przypadek, gdy dana wielkość (np. wektor prędkości u lub stężenie c) ma jedną niezerową składową wzdłuż tej samej osi układu odniesienia (np. Ox) lub zmienia się tylko wzdłuż jednej osi, która określa przestrzenną zmienną niezależną (w tym przypadku - zmienną x)

$$u = u_x(x,t) \quad \text{i} \quad c = c(x,t) \quad (5.43)$$

Przepływ podłużny w ścisłym znaczeniu opisuje następujący układ trzech równań skalarnych [51]

- równanie zachowania masy

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} = 0, \quad (5.44)$$

- równanie zachowania pędu

$$\rho \frac{\partial u_x}{\partial t} + \rho u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}, \quad (5.45)$$

- odpowiednie do rodzaju rozważanego płynu równanie stanu

$$\rho = \rho(\dots). \quad (5.46)$$

Przepływ płaski poziomy jest to taki przypadek ruchu cieczy, gdy wektor prędkości cieczy ma tylko dwie różne od zera składowe, skierowane wzdłuż poziomych osi, które jednocześnie określają niezależne zmienne przestrzenne. Ponadto prędkość może zależeć od czasu, co pozwala dla ruchu płaskiego napisać

$$\mathbf{u} = u_x(x,y,t) \mathbf{i} + u_y(x,y,t) \mathbf{j} \quad (5.47)$$

Równania zachowania dla tego modelu możemy napisać (w układzie kartezjańskim, dla ruchu laminarnego cieczy o stałej gęstości) następująco [51]

- równanie zachowania masy

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (5.48)$$

- równania zachowania pędu

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right), \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right), \quad (5.50)$$

$$-g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0. \quad (5.51)$$

Chociaż z rzeczywistym płaskim przepływem mamy do czynienia tylko w nielicznych sytuacjach, jednakże stosunkowo często spotyka się przepływy, które można określić mianem „quasi-dwuwymiarowych”. Sytuacja taka ma miejsce wówczas, gdy dwa spośród wymiarów, w których odbywa się ruch zdecydowanie dominują nad pozostałymi, a spośród trzech składowych wektora prędkości jedna jest znacząco mniejsza od dwóch pozostałych. Przepływy tego rodzaju najczęściej występują w zbiornikach wodnych, zarówno naturalnych jak i sztucznych.

Ruch płaski pionowy występuje wtedy, gdy wektor prędkości cieczy ma dwie niezerowe składowe, leżące na pionowej powierzchni układu współrzędnych, zależne od zmiennych niezależnych, wyznaczających tę powierzchnię (np. x oraz z) i od czasu

$$\mathbf{u} = u_x(x, z, t) \mathbf{i} + u_z(x, z, t) \mathbf{k}. \quad (5.52)$$

Podstawowe równania zachowania w tym przypadku przyjmują postać [51]

- równanie zachowania masy

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (5.53)$$

- równanie zachowania pędu

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right), \quad (5.54)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right), \quad (5.55)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0. \quad (5.56)$$

5.4.3. Modele kinematyczne

Bardzo interesującym narzędziem, dającym dobre wyniki przy stosunkowo niewielkim nakładzie pracy i w krótkim czasie są modele kinematyczne. Spełniają one tylko prawo zachowania masy, a zamiast równania zachowania pędu stosuje się w nich pewne założenie kinematyczne z reguły dotyczące rotacji elementów płynu.

Najprostszym z modeli kinematycznych jest *płaski ruch potencjalny*. Dotyczy on przypadku, gdy rozpatrywane zjawisko ma charakter dwuwymiarowy, czyli wektor

prędkości posiada dwie składowe zależne od czasu i dwóch zmiennych przestrzennych:

$$\mathbf{u} = u_x(x,y,t)\mathbf{i} + u_y(x,y,t)\mathbf{j} \quad (5.57)$$

Ponadto zakłada się, że obrót cząstek płynu jest zaniedbywalnie mały, czyli mamy przepływ pozbawiony wirowości:

$$\text{rot } \mathbf{u} = 0 \quad (5.58)$$

Równanie zachowania masy przyjmuje postać:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (5.59)$$

a więc otrzymujemy układ równań różniczkowych:

$$\begin{cases} \text{div } \mathbf{u} = 0 \\ \text{rot } \mathbf{u} = 0 \end{cases} \quad (5.60)$$

który składa się z równania ciągłości i kinematycznego warunku bezwirowości (5.60). Po zdefiniowaniu funkcji prądu dla ruchu płaskiego

$$u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (5.61)$$

$$u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5.62)$$

i wstawieniu jej do równania (5.58), otrzymamy w układzie kartezjańskim równanie zwane równaniem Laplace'a dla funkcji prądu ψ :

$$\Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (5.63)$$

Po zdefiniowaniu funkcji potencjału prędkości ϕ :

$$u_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (5.64)$$

$$u_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (5.65)$$

i podstawieniu jej do równania (5.61) otrzymujemy:

$$\Delta\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (5.66)$$

a więc również równanie Laplace'a dla potencjału prędkości.

Warto wymienić tu również inne stosowane modele kinematyczne, a mianowicie *przepływ płaski o stałej wirowości*, różniący się co do wektora prędkości od płaskiego ruchu potencjalnego założeniem stałej, niezerowej, wartości rotacji. Otrzymujemy zatem następujący układ równań:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \\ \operatorname{rot} \mathbf{u} = \text{const} = \mathbf{\Omega} \end{cases} \quad (5.67)$$

gdzie: $\mathbf{\Omega}$ – rotacja prędkości.

Funkcja prądu ψ zdefiniowana jest tak jak w poprzednim przypadku, a więc równanie (5.66) przyjmie postać:

$$\Delta\psi = \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\psi}{\partial y^2} = \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{z} = \text{const} \quad (5.68)$$

Ostatni przykład to *przepływ ze zmienną rotacją*. Jest on uogólnieniem poprzedniego przypadku, a zestaw równań opisujących go wygląda następująco:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \\ \operatorname{rot} \mathbf{u} = \mathbf{\Omega}(x,y) \end{cases} \quad (5.69)$$

gdzie: $\mathbf{\Omega}(x,y)$ – zadana funkcja rozkładu wirowości.

Liczba modeli, powstających w efekcie uproszczeń, jest znaczna. Tutaj ograniczymy się tylko do jednego z nich, który będzie wykorzystywany w dalszym ciągu opracowania. Jest to *model biharmoniczny*.

Model biharmoniczny jest wynikiem wprowadzenia założenia Stokesa do modelu ruchu rzeczywistego płaskiego (poziomego lub pionowego). Założenie to (w swej klasycznej wersji występujące przy opisie ruchu kuli w cieczy) polega na pominięciu nieliniowego członu adwekcyjnego (sił bezwładności) w równaniu zachowania pędu, gdy nie ma on znacznego wpływu na rozwiązanie.

Jeżeli do równania zachowania pędu (5.41) wprowadzimy następujące założenia:

1) przepływ jest stacjonarny

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad (5.70)$$

2) siły masowe sprowadzają się do siły ciężkości

$$\mathbf{f} = g\mathbf{k} = \text{const} \quad (5.71)$$

3) siły bezwładności są zaniedbywalne w porównaniu z siłami masowymi (założenie Stokesa)

$$(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = 0 \quad (5.72)$$

a następnie uproszczone równanie poddamy działaniu operatora rotacji

$$0 = \rho - \nabla p + \mu \Delta \quad / \text{rot} \quad (5.73)$$

to otrzymamy:

$$0 = \text{rot}(\rho \mathbf{f}) - \text{rot grad } p + \text{rot}(\mu \Delta \mathbf{u}) \quad (5.74)$$

Uwzględniając relacje:

$$\text{rot}(\rho \mathbf{f}) = 0 \quad (g = \text{const}) \quad (5.75)$$

oraz

$$\text{rot grad } p = 0 \quad (\text{rot grad} = 0) \quad (5.76)$$

mamy:

$$\text{rot}(\mu \Delta \mathbf{u}) = 0 \quad (5.77)$$

Ponieważ:

$$\Delta \mathbf{u} = \text{grad div } \mathbf{u} - \text{rot rot } \mathbf{u} \quad (5.78)$$

$\text{div } \mathbf{u} = 0$ (z równania zachowania masy (5.40))

$$\Delta \mathbf{u} = - \text{rot rot } \mathbf{u} \quad (5.79)$$

otrzymujemy:

$$\text{rot}(\text{rot rot } \mathbf{u}) = 0 \quad (5.80)$$

A wobec:

$$\text{rot } \mathbf{u} = \mathbf{\Omega} \quad (5.81)$$

oraz

$$\text{div rot} = 0 \quad (5.82)$$

piszemy:

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{\Omega}) = 0 \quad (5.83)$$

$$\text{grad div } \mathbf{\Omega} - \Delta \mathbf{\Omega} = 0 \quad (5.84)$$

i ostatecznie mamy:

$$\Delta \mathbf{\Omega} = 0 \quad (5.85)$$

Jest to równanie dla harmonicznej funkcji Ω , zwane równaniem Helmholtza. Model ten bazuje na założeniu kinematycznym, zakładającym zmienną rotację cząstki:

$$\text{rot } \mathbf{u} = \Omega = \text{var} \quad (5.86)$$

dla zdefiniowanej wcześniej (5.61) i (5.62) funkcji prądu określamy postać równania biharmonicznego w kartezjańskim układzie współrzędnych:

$$\Delta \Omega = \Delta \Delta \psi = 0 \quad (5.87)$$

a więc dla ruchu ustalonego mamy (w układzie kartezjańskim):

$$\Delta \Delta \psi = \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial y^4} = 0 \quad (5.88)$$

Model biharmoniczny może więc być interpretowany jako uogólnienie modeli kinematycznych, w którym rotacja prędkości jest funkcją harmoniczną, opisaną równaniem Laplace'a.

5.4.4. Wybór modelu pola prędkości

Spośród dostępnych, uproszczonych modeli, za pomocą których opisać można przepływy przez zbiorniki i reaktory (patrz 5.2.3.2), pozwalających na wyznaczenie pól prędkości, **wybrano do opracowania opisywanej tu metody, rozwiązanie numeryczne równania biharmonicznego** (5.88). Wybór tego modelu oparto na wnioskach z wcześniejszych jego zastosowań w badaniach [31, 48], gdzie okazał się on zadowalająco dobrym opisem dość skomplikowanych przepływów w różnego typu obiektach. Główne zalety tego modelu stanowią:

- jego formalna prostota, umożliwiająca zaprogramowanie jego rozwiązania przy użyciu powszechnie stosowanych schematów numerycznych;
- fakt, iż za jego pomocą możliwe jest odtworzenie dość złożonych zjawisk, takich jak powstawanie w obszarze obliczeniowym stref martwych oraz wirów.

5.5. Doświadczalne wyznaczanie charakterystyk rozkładu stężenia substancji rozproszonej

5.5.1. Uwagi ogólne

Obok omówionych już sposobów wyznaczania charakterystyk odpływowych reaktorów, opartych na analizie teoretycznej i rozwiązaniu równań opisujących ruch cieczy, mamy do dyspozycji zestaw metod eksperymentalnych. Stanowią one cenne uzupełnienie matematycznych rozważań, ale umożliwiają również praktyczną weryfikację rozwiązań i rezultatów otrzymanych w wyniku zastosowania teoretycznych modeli.

Badań i pomiarów parametrów przepływu dokonuje się niekiedy na obiektach rzeczywistych, lecz jest to zwykle skomplikowane i trudne do realizacji a także kosztowne przedsięwzięcie. W praktyce najczęściej więc modeluje się będące przedmiotem zainteresowania zjawiska w warunkach laboratoryjnych.

Jednymi z najpopularniejszych metod empirycznego badania dynamiki reaktorów i innych obiektów oraz systemów przepływowych są metody znacznikowe, oparte na obserwacjach i pomiarach przemieszczania się znacznika w obrębie badanego obiektu.

5.5.2. Znaczniki i ich przydatność w badaniach przepływu

Głównym elementem eksperymentalnych metod określania dynamicznych charakterystyk zbiorników przepływowych są pomiary stężenia w przekrojach odpływowych, impulsowo wprowadzanego na wlocie do obiektu znacznika (zwanego też *traserem*) [8].

Techniki pomiarowe wykorzystujące trasery stosowane są w pracach dotyczących wielu dziedzin nauki takich jak fizjologia, hydrologia czy inżynieria chemiczna. Metody te pozwalają określić rozkład czasu przebywania (R.C.P.) cząstek płynnych lub stałych w obrębie określonej przestrzeni. Można przy tym poznać warunki mieszania, prędkości oraz kierunki przemieszczania się i ukazać jego przebieg bez szczególnych wewnętrznych badań przepływu [38].

Aby substancja mogła być użyta jako traser, musi charakteryzować się kilkoma niezbędnymi cechami. Są to:

- *trwałość* (musi być nierozkładalna w środowisku, gdzie będzie zastosowana, przez cały czas trwania eksperymentu);
- *dobra wykrywalność* (musi być możliwa do wykrycia nawet w bardzo niewielkim stężeniu);
- *nieszkodliwość dla środowiska* (zazwyczaj nie ma możliwości usunięcia trase-ra ze środowiska po przeprowadzeniu badań);

- *dostępność* (często koszt wykonania pomiarów decyduje o ich podjęciu).

Trasery podzielić można na kilka kategorii [58] w zależności od ich zachowania w środowisku, gdzie są użyte lub źródła ich pochodzenia. Substancje, które zostały wprowadzone do badanego systemu, nie posiadające w nim swego źródła i nie ulegające w nim rozkładowi nazywane są *konserwatywnymi*. Do tej kategorii należą np. gazy szlachetne, freon czy Rodamina WT. Dostarczają one informacji na temat fizycznej struktury systemu, podczas gdy trasery zwane *reaktywnymi*, takie jak związki nitroaromatyczne czy węgiel ^{13}C niezbędne są do studiowania przebiegu procesów chemicznych lub biologicznych. Trasery *naturalne* stanowią substancje, pochodzące z geochemicznych lub biogenicznych źródeł, jak na przykład zasolenie czy ^{222}Rn , mogą też pochodzić ze źródeł antropogenicznych (np. ^3H , freon) wtedy nazywa się je *przejściowymi*. Ich stężenie bywa często bardzo niewielkie, zazwyczaj do ich detekcji potrzebny jest niezwykle czuły sprzęt. Z kolei znaczniki *sztuczne* to substancje, które dozuje się do badanego systemu w wybranym, ściśle określonym miejscu, czasie i stężeniu (wyższym od stężenia tła) w celu śledzenia dróg i czasu ich przemieszczania. Przykładami mogą tu być różne barwniki czy SF_6 [7, 14, 21, 24]. Jako traserów często używa się też izotopów, zarówno stabilnych jak i radioaktywnych (np. ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{222}Rn) [24].

Wybór sposobu i miejsca wprowadzania traserów do badanego systemu czy obiektu nie może być przypadkowy, wymaga zatem przeprowadzenia wstępnych analiz jego funkcjonowania i dynamiki. Równie istotnym problemem jest kwestia zapewnienia powtarzalności parametrów wprowadzanego do systemu zakłócenia tak, aby eksperyment można było przeprowadzać wiele razy, a następnie porównywać i zestawiać ze sobą poszczególne wyniki. Najczęściej znacznik wprowadzany jest jako impuls skokowy tzw. δ -Diraca lub jako impuls ciągły, czyli trwający pewien okres czasu przy zachowaniu stałej wartości stężenia.

Wybrany do pomiarów znacznik warunkuje w dużej mierze dobór odpowiedniej metody badań. W części eksperymentalnej omawianej tu pracy zastosowano pomiary fluorymetryczne z użyciem Rodaminy WT jako traserów, wykonano też próby pomiarowe metodą konduktometryczną, gdzie znacznikiem była sól kuchenna NaCl. W dalszej części tego rozdziału omówiono obydwie metody znacznikowe, z których korzystano podczas laboratoryjnych pomiarów elementów dynamiki reaktora.

5.5.3. Fluorescencja i fluorymetria

Wszystkie molekuly absorbują światło, ale tylko niewielka ilość substancji posiada zdolność jego reemisji w wyniku tejże absorpcji. Jeśli reemisja jest natychmiastowa, zjawisko takie nazywa się *fluorescencją*.

Światło jest absorbowane przez molekuly substancji fluorescencyjnej w czasie 10^{-15} s wprowadzając elektrony w stan pobudzenia, w którym pozostają przez około 10^{-8} s, po czym powracają do stanu wyjściowego. Podczas tego ponownego przejścia

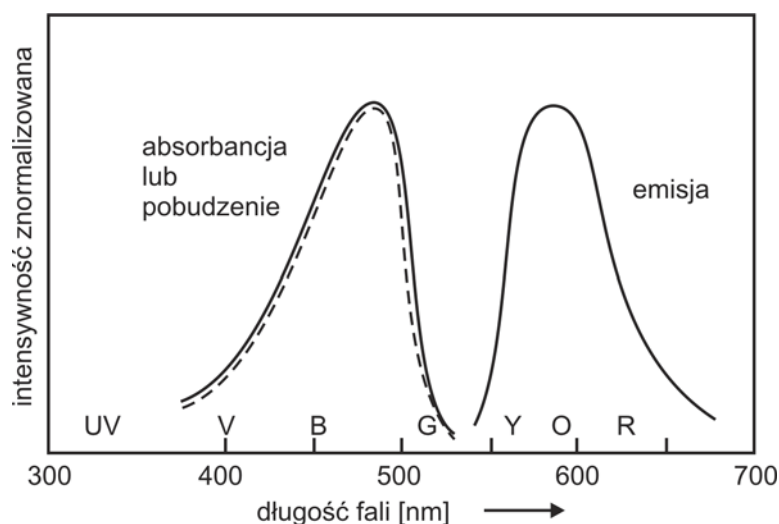
na inny stan energetyczny, elektrony emitują nadwyżkę energii w postaci fali świetlnej, która jest zawsze dłuższa niż ta zaabsorbowana z powodu utraty pewnej części energii na proces emisji.

Miarą fluorescencji jest kwantowa sprawność q , definiowana jako stosunek wyemitowanych fluorescencyjnie fotonów f do ilości fotonów zaabsorbowanych a :

$$q = \frac{f}{a} \quad (5.89)$$

Wartość q określa prawdopodobieństwo, że dana molekula będzie fluoryzować.

Związki fluorescencyjne mają dwa charakterystyczne spektra: pobudzenia oraz emisji charakteryzujące długość fali i ilość absorbowanego/emitowanego światła (patrz rys. 5.4).



Rys. 5.4. Spektrum związku fluorescencyjnego

Długość fali emitowanej przez czyste pierwiastki jest niezależna od długości fali pobudzającej. Na przykład chlorofil A emituje falę o długości 685 nm, niezależnie od tego czy pobudzany jest promieniowaniem UV, niebieskim, zielonym czy też czerwonym. Natomiast intensywność fluorescencji tak jak i intensywność absorpcji, zależy od długości fali pobudzającej.

Najczęściej stosowanymi jako trasyery w pomiarach substancjami fluorescencyjnymi są fluoresceina oraz Rodamina WT [58] (patrz rozdz. 6.2.2).

Pomiarów fluorescencji dokonuje się za pomocą techniki zwanej *fluorymetrią*. Polega ona na pomiarze intensywności promieniowania, emitowanego przez oznaczoną substancję, podczas zjawiska fluorescencji. Jest ona wprost proporcjonalna do stężenia tego składnika w badanym roztworze.

Do pomiarów fluorymetrycznych służą urządzenia zwane *fluorymetrami*. Zasadniczy element takiego oprzyrządowania stanowi sonda, która wyposażona jest w źródło oraz detektor promieniowania świetlnego (fot. 6.15). Do najpopularniejszych źródeł światła, stosowanych w sondach fluorymetrycznych należą lampy rtęciowe oraz diody (LED), natomiast rejestracja najczęściej odbywa się za pomocą fotodiody, gdzie wzbudzany jest prąd elektryczny pod wpływem energii świetlnej. Jest on następnie zamieniany poprzez konwerter A/D na napięcie na elektrodach w celu umożliwienia jego cyfrowego odczytu. Zarówno emiter jak i detektor światła wyposażone są w specjalnie dobrane filtry (zazwyczaj wykonane z kolorowego szkła), które zapewniają przenikanie przez nie światła o odpowiedniej długości fali w celu wyeliminowania ewentualnych interferencji.

Niektóre fluorymetry (jak na przykład CYCLOPS-7, patrz rozdz. 6.2.3) posiadają opcje pomiaru w kilku zakresach, umożliwiając w ten sposób detekcję nawet bardzo niewielkich stężeń znaczników (rzędu 0,01 ppb). Ich konstrukcja sprawia również, iż dokonywany pomiar jest niezależny od warunków zewnętrznych takich jak temperatura, ciśnienie czy promieniowanie słoneczne.

Do najistotniejszych zalet pomiarów fluorescencyjnych należą:

- specyficzność (nie ma dwóch znanych substancji, których pobudzenie i emisja zachodzą dla tych samych długości fal);
- prostota (możliwość wielu zastosowań z użyciem tych samych narzędzi);
- szybkość uzyskiwania wyników (na miejscu pomiaru).

5.5.4. Pomiary przewodności. Konduktometria

Elektrolity, podobnie jak metale, przewodzą prąd elektryczny. Jednak mechanizm tego zjawiska w elektrolitach jest inny niż w przewodnikach metalicznych. O ile w metalu pod wpływem przyłożonego napięcia przemieszczają się wyłącznie elektrony, to w elektrolitach nośnikami ładunku są jony obu znaków. Oznacza to przede wszystkim przemieszczanie się mas dziesiątki i setki tysięcy razy przewyższających masę elektronu, a co za tym idzie znacznie większy opór, czyli mniejsze przewodnictwo. Ponadto mamy do czynienia z "podwójnym" prądem - aniony poruszają się w przeciwną stronę niż kationy, jednocześnie "przeszkadzają" sobie nawzajem w tych wędrówkach, oddziałując polami elektrycznymi o przeciwnych znakach.

Najbardziej widocznym objawem zewnętrznym tych różnic jest wpływ temperatury na przewodnictwo metali i elektrolitów. Oporność metali pod wpływem ogrzewania rośnie, zaś elektrolitów maleje. W konduktometrii częściej posługujemy się terminem przewodności tj. odwrotności oporności, a jednostką jest *simens* $1\text{S} = 1\ \Omega^{-1}$.

Konduktometria jest metodą elektroanalityczną opartą na badaniu przewodnictwa elektrycznego roztworu znajdującego się między dwiema elektrodami. Badanie

przewodnictwa dotyczy roztworów elektrolitów, dlatego przewodnictwo to nazywamy przewodnictwem elektrolitycznym lub przewodnością elektrolityczną.

Jeżeli rozważymy elektrolit (w warunkach braku silnego pola elektrycznego), możemy zapisać warunek elektrobojętności [34]:

$$\sum_{i=1}^N w_i c_i = 0 \quad (5.90)$$

Gdzie: c_i - stężenie jonów w elektrolicie

z_i - ładunek jonów

N - liczba domieszek

Jeżeli spełniony jest warunek (5.90), możemy zapisać prawo Faradaya, określając gęstość prądu \mathbf{j} płynącego przez elektrolit

$$\mathbf{j} \sum_i^N w_i F \mathbf{J}_i = 0 \quad (5.91)$$

gdzie \mathbf{j} – gęstość prądu, opisana prawem Ohma:

$$\mathbf{j} = -\kappa \text{grad } \varphi \quad (5.92)$$

oraz: κ – przewodnictwo właściwe,

φ – wewnętrzny potencjał elektryczny rozważanej fazy,

F – stała Faradaya,

\mathbf{J}_i – gęstość strumienia i -tego jonu elektrolitu.

Występujące we wzorze (5.92) przewodnictwo właściwe jest odwrotnością oporu właściwego. Opór przewodnika R jest wprost proporcjonalny do jego długości l i odwrotnie proporcjonalny do pola S jego przekroju poprzecznego, a współczynnikiem proporcjonalności jest właśnie opór właściwy $1/\kappa$.

$$R = \frac{1}{\kappa} \frac{l}{S} \quad (5.93)$$

Postać prawa Faradaya (5.91) wyraża równowagę transportu naładowanej elektrycznie materii i transportu ładunków elektrycznych, tj. prądu elektrycznego (analogia do prawa Ficka). Czynnikiem powodującym elektrolityczne przenoszenie ładunków elektrycznych jest gradient energii elektrycznej, odniesionej do jednostki ilości substancji. Wielkość tą definiuje się jako iloczyn ładunku mola substancji

($w_i F$) oraz natężenia pola elektrycznego $\text{grad } \varphi$. Uwzględniając powyższą definicję otrzymamy:

$$\mathbf{J}_i = -v_i c_i z_i F \text{ grad } \varphi \quad (5.94)$$

gdzie: v_i – ruchliwość i -tego składnika.

Podstawiając równanie (5.94) do (5.91) oraz definiując ruchliwość elektrolityczną U_i następująco:

$$U_i = |w_i| v_i F, \quad (5.95)$$

a następnie porównując wzór (5.95) z wyrażeniem (5.92), otrzymamy formułę na przewodnictwo właściwe:

$$\kappa = \sum_{i=1}^N w_i^2 F^2 v_i c_i = \sum_{i=1}^N |w_i| F U_i c_i \quad (5.96)$$

Przewodnictwo właściwe jest więc w rozcieńczonych roztworach liniową funkcją stężenia składników roztworu, a stałe proporcjonalności nazywa się indywidualnymi przewodnictwami jonowymi:

$$\lambda_i = |w_i| F^2 v_i = F U_i. \quad (5.97)$$

Z kolei wielkość

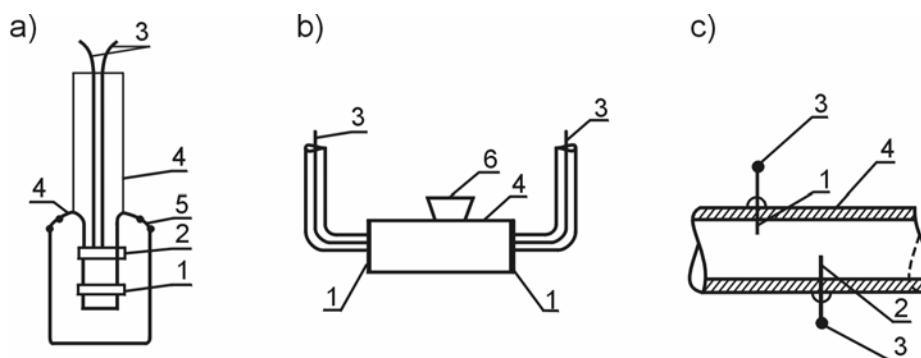
$$\Lambda = \frac{\kappa}{c} \quad (5.98)$$

nazywamy przewodnictwem molowym elektrolitu.

Korzystając z zależności (5.96) oraz (5.98) możemy wyznaczyć stężenie jonów danej substancji. Należy jednak pamiętać, że pomiary przewodności należą do mało selektywnych. Na mierzoną dokładność mogą wpływać także inne domieszki oraz zanieczyszczenia znajdujące się w roztworze.

Przewodnictwo elektryczne roztworów elektrolitów mierzymy przy pomocy *konduktometrów*. Są to omomierze o specjalnej konstrukcji, gdzie opór mierzony jest pomiędzy platynowymi elektrodami znajdującymi się w obszarze pomiarowym. W konduktometrach zmierzony opór przeliczany jest automatycznie na przewodnictwo w simensach. Ze względu na możliwość reakcji elektrolizy zakłócającej pomiar, w konduktometrach do pomiaru stosuje się prąd przemienny o dużej częstotliwości.

Czujnik konduktometryczny wykonany jest w sposób gwarantujący niezmienną odległość między elektrodami pomiarowymi, co wydatnie przyczynia się do dużej stabilności i powtarzalności wykonywanych pomiarów. Przykłady budowy sond pomiarowych pokazano na rysunku 5.5.



Rys.5.5. Przykłady budowy sond do pomiaru przewodności: a) zanurzeniowa, b) do napełniania, c) przepływowa; 1,2 – elektroda, 3 – przewody łączące elektrody z urządzeniem pomiarowym, 4 – obudowa, 5 – otwór odpowietrzający, 6 – wlew [29]

Wynik takiego pomiaru, z uwagi na zjawiska zachodzące na powierzchni elektrod czujnika konduktometrycznego, może być obarczony pewnym błędem. Na dokładność wykonywanych pomiarów mają ogromny wpływ reakcje zachodzące na powierzchni czynnej elektrod oraz pojemność warstwy podwójnej utworzonej na granicy faz elektroda-elektrolit. Warstwa ta, przy niewielkich napięciach, może znacznie zredukować przepływ prądu elektrycznego. Obok powstającej warstwy podwójnej, niekorzystne jest także zjawisko elektrolizy, występujące przy większych różnicach potencjałów elektrod oraz tworzenie się gradientu koncentracji jonów na skutek nienadążania dopływu jonów z elektrolitu podczas elektrolizy. Zastosowanie prądu zmiennego o odpowiedniej częstotliwości, przyłożonego do elektrod, pozwala na znaczne zmniejszenie wpływu wymienionych zjawisk na wynik pomiaru konduktywności cieczy.

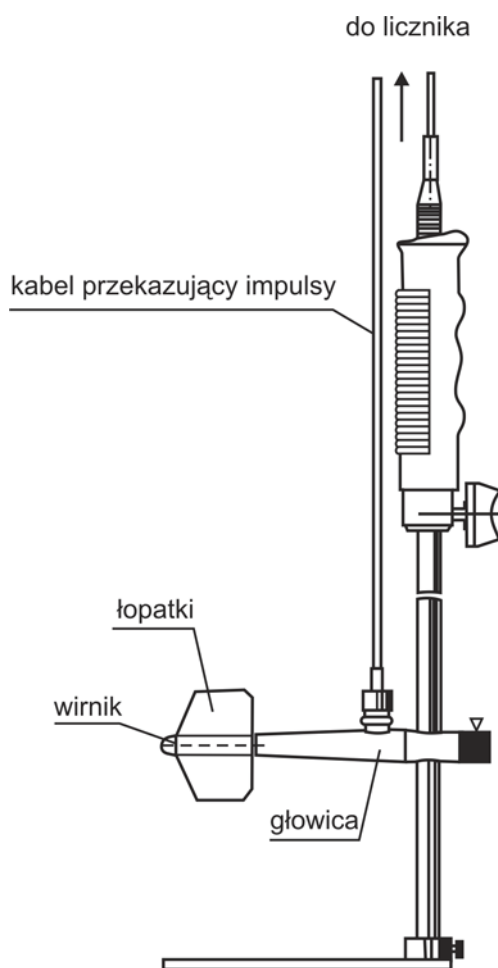
5.5.5. Pomiary prędkości przepływu

Niezwykle istotny etap opisu dynamiki przepływu przez reaktor stanowi określenie rozkładu pola prędkości w jego obszarze. Przeprowadzając badania na obiekcie/modelu, dokonuje się czasami pomiarów prędkości w punktach lub na odcinkach, gdzie stanowi ona podstawę do określenia innych, istotnych parametrów lub własności przepływu.

Do pomiarów prędkości wykorzystywać można zarówno znaczniki, mierząc czas ich przemieszczania na wybranym dystansie, jak również sprzęt i aparaturę techniczną umożliwiającą punktowy pomiar tej wielkości.

Popularnym urządzeniem stosowanym do pomiarów prędkości punktowej, zarówno w obiektach rzeczywistych, jak i w skali laboratoryjnej jest młynek hydrometryczny (patrz rys. 5.6). Istnieją różne wersje tego urządzenia od mikromłynków,

mierzących prędkości rzędu kilku cm/s, do dużych, stosowanych w rzekach i kanałach, gdzie prędkości przepływu wynoszą kilka, kilkanaście m/s.



Rys.5.6. Schemat budowy młynka hydrometrycznego

Zasadniczą część mechaniczną młynka hydrometrycznego stanowi wirnik wyposażony w łopatki. Parcie przepływającej wody powoduje obrót wirnika, a jego obroty są zliczane w określonym czasie. Prędkość przepływającej wody wyznacza się z równania młynka:

$$v = k_m \cdot n_m + \Delta \quad (5.99)$$

gdzie: k_m – skok hydrauliczny [m], ustalony podczas prób modelowych, n_m – liczba obrotów łopatek w ciągu sekundy, Δ - stała łopatek [m/s], ustalona również podczas prób modelowych w kanale pomiarowym.

Zazwyczaj podczas wykonywania pomiarów korzysta się z możliwości zdalnego przekazywania impulsów z młynka do komputera PC (stosując odpowiedni przetwornik) co znacznie ułatwia opracowywanie wyników pomiarów.

Omówiony w niniejszym rozdziale zestaw metod teoretycznych oraz doświadczalnych zastosowany został jako narzędzie do wyznaczenia dynamicznych charakterystyk przepływu przez obiekt rozdzielający strumień wpływającej do niego cieczy.

6. Badania laboratoryjne

6.1. Wstęp

W poprzednich rozdziałach nadmieniono kilkakrotnie, iż opisywana tu metoda wyznaczania dynamicznych charakterystyk przepływu cieczy przez reaktor składa się z dwóch, wzajemnie się uzupełniających, rodzajów badań:

- teoretycznych (patrz rozdz. 7);
- empirycznych, których szczegółowemu omówieniu poświęcony jest niniejszy rozdział.

Prace eksperymentalne obejmowały zaprojektowanie i zainstalowanie stanowiska służącego do modelowania przepływu przez reaktor recyrkulacyjny, czyli taki, w którym następuje rozdzielanie strumienia cieczy na dwie części. Konstrukcja stanowiska oraz sprzęt pomiarowy, w który zostało ono wyposażone, umożliwiły dokonywanie w systemie ciągłym pomiarów stężenia znacznika w przekrojach odpływowych oraz pomiarów prędkości przepływu w wybranych punktach.

Wyniki uzyskane podczas badań posłużyły do wykreślenia krzywych będących dynamicznymi charakterystykami odpływowymi laboratoryjnego modelu reaktora.

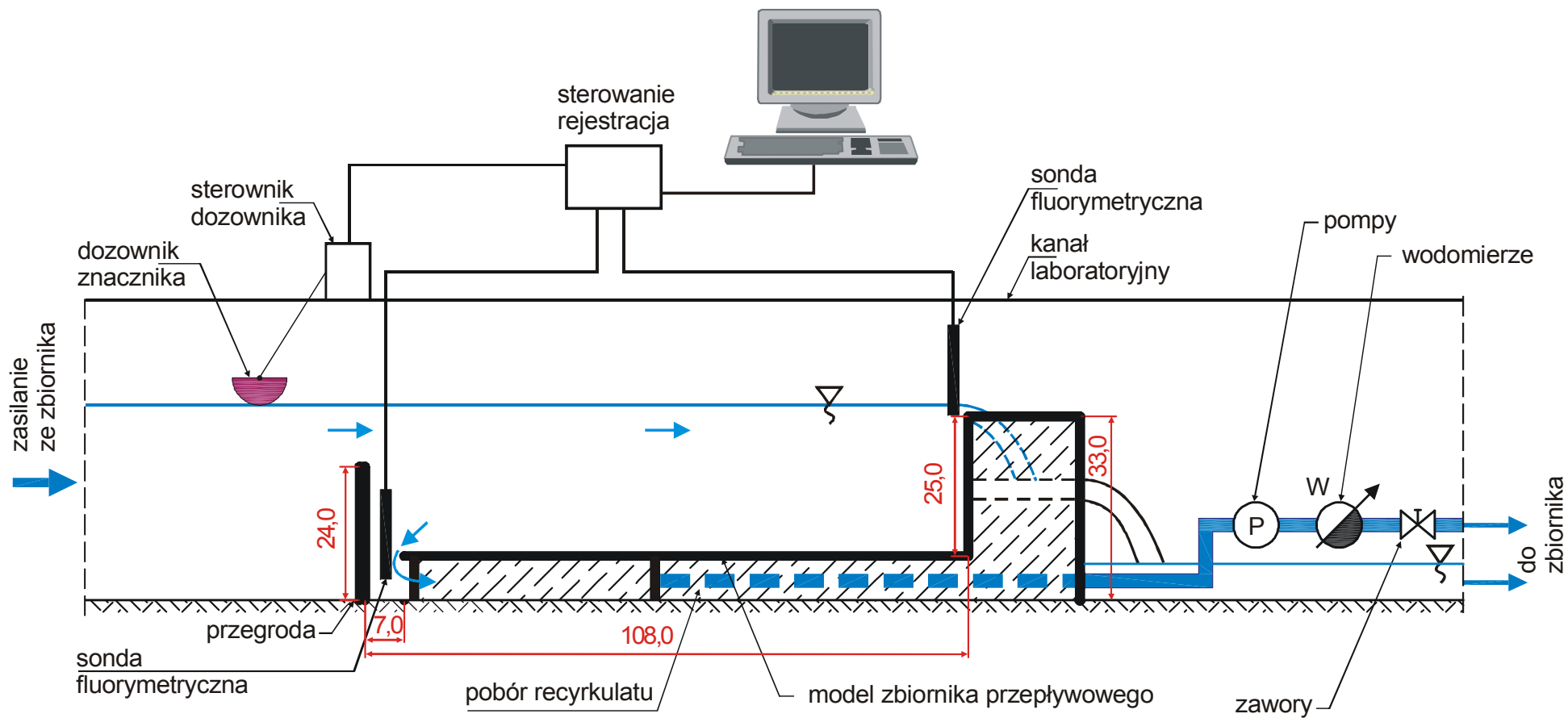
Wszystkie badania wykonano w Laboratorium Hydrauliki i Hydrologii Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej.

6.2. Metodyka zastosowana do pomiarów laboratoryjnych

6.2.1. Budowa i zasada działania stanowiska pomiarowego

Jak wspomniano wyżej, w celu przeprowadzenia badań empirycznych, w kanale laboratoryjnym umieszczono wspomniane już stanowisko pomiarowe (fot. 6.1), w którym modelowano hydrauliczne aspekty funkcjonowania reaktora o charakterze przepływowym. Zostało ono zaprojektowane w taki sposób, aby przepływ przez nie miał charakter płaski pionowy (patrz rozdz. 5.3), czyli zarówno profil prędkości jak i pole stężenia można było uśrednić wzdłuż kierunku poprzecznego poziomego. W tym przypadku była to szerokość kanału laboratoryjnego. Biorąc takie założenie za podstawę działań, można było dokonać wszystkich pomiarów w przekroju znajdującym się w osi komory modelu reaktora i potraktować je jako reprezentatywne dla każdego innego przekroju pionowego obiektu.

Schemat budowy modelu przedstawiono na rysunku 6.1. Konstrukcja tego obiektu umożliwiała rozdzielanie wpływającej do niego wody na dwa strumienie: odpływowy i recyrkulacyjny, jak na rysunkach 1.1 oraz 5.3.

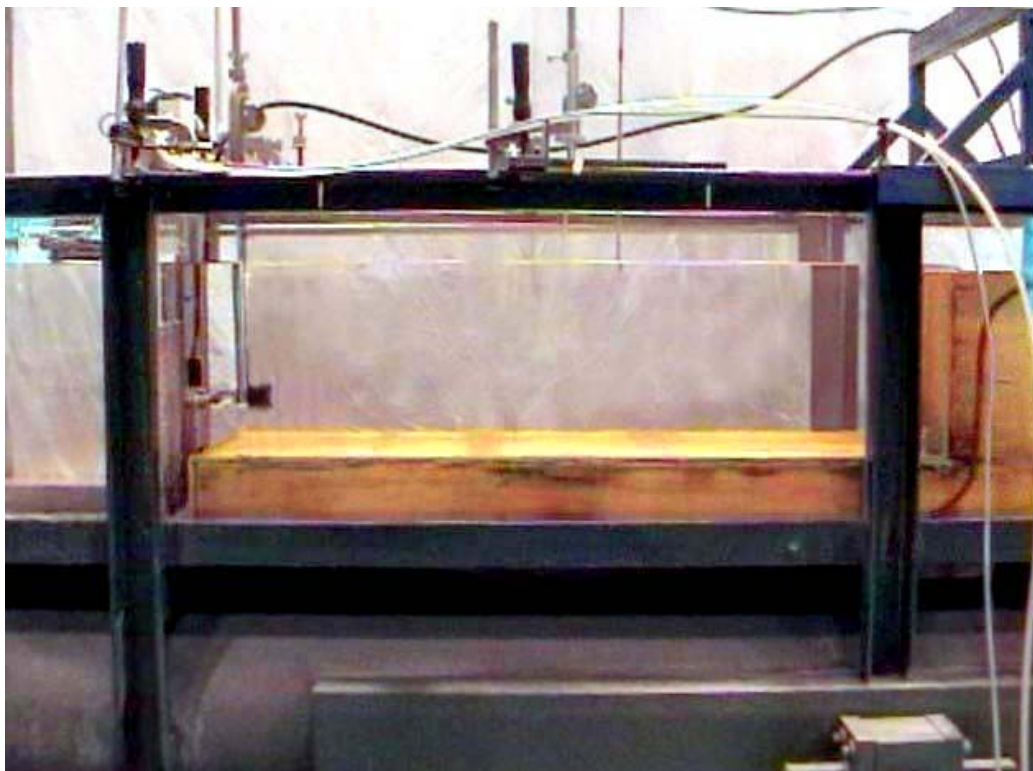


Rys. 6.1. Schemat stanowiska laboratoryjnego (wymiary w [cm])

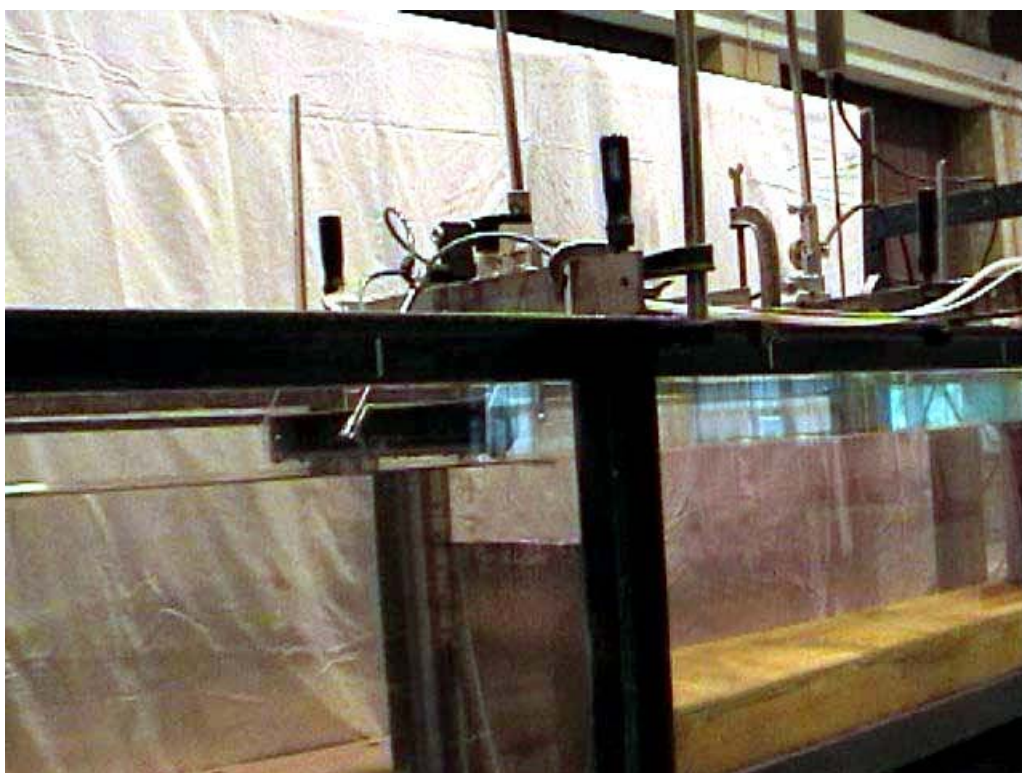
Zasadniczą część modelu stanowiła wykonana ze sklejki wodoodpornej (o grubości 10 mm) komora przepływowa o szerokości $B = 0,385$ m i wymiarach poprzecznych jak na rysunku 6.1. Wlot do niej zaprojektowano w formie przegrody, oddzielającej dopływową część kanału laboratoryjnego (fot. 6.2) od komory modelu. Pierwszy z przekrojów odpływowych, zlokalizowany w górnej części modelu (fot. 6.3) stanowił przelew. Drugi strumień odpływowy, symulujący pobierany z reaktora recyrkulat, odprowadzany był z dolnej części modelu, poniżej wlotu (fot. 6.4) za pomocą systemu rur, zakończonego układem pompującym, złożonym z dwóch pomp, wodomierzy i zaworów (fot. 6.5). System ten, wraz ze zlokalizowanym u wylotu z kanału laboratoryjnego, bardzo dokładnym przelewem pomiarowym Thomsona (fot. 6.6), umożliwiał precyzyjne regulowanie wydatków cieczy, odprowadzanej poszczególnymi przekrojami.

Elementy dynamiki reaktora laboratoryjnego badano stosując *fluorymetryczną metodę znacznikową* (patrz rozdz. 5.5.3), wykorzystując jako traser roztwór Rodaminy WT (patrz rozdz. 6.2.2). W celu wprowadzenia impulsu znacznika do modelu zainstalowano specjalnie do tego celu opracowany system dozujący (fot. 6.7). Składał się on z rynienki o długości wyznaczonej przez szerokość kanału oraz części sterującej pracą rynienki. Dozowanie impulsu znacznika do wnętrza modelu odbywało się automatycznie i zsynchronizowane było z całym systemem pomiarowo-sterującym, współpracującym z modelem. Równocześnie z wprowadzeniem porcji traseru do wody, realizowanym poprzez obrót rynienki w osi, uruchamiał się program rejestrujący stężenie znacznika w obu przekrojach pomiarowych, czyli na wylotach z obiektu. Pomiaru tego dokonywano za pomocą sondy fluorymetrycznej, która była mocowana (w zależności od wykonywanego pomiaru) w bezpośrednim sąsiedztwie każdego z odpływów w osi kanału (fot. 6.8 i 6.9). Komplet mierzonych parametrów hydraulicznych modelu reaktora uzupełniały pomiary prędkości, realizowane za pomocą mikromłynka hydrometrycznego (fot. 6.10), który również podłączono do aparatury rejestrującej. Dane dotyczące prędkości przepływu (ze względu na konstrukcję mikromłynka) zbierane były tylko w kilku wybranych punktach (patrz rys. 6.6), w których kierunek przepływu uznać można było za poziomy.

Jak już wspomniano, do pomiaru stężenia znacznika, wybrano metodę fluorymetryczną, która to technika została opisana w poprzednim rozdziale (patrz rozdz. 5.5.3). Pomiary wykonano za pomocą sondy CYCLOPS-7 wyprodukowanej przez firmę Turner Design, zaś jako traser posłużył roztwór wspomnianego już barwnika – Rodaminy WT. W dalszej części przedstawiono najważniejsze dane dotyczące sprzętu pomiarowego oraz zastosowanego do badań znacznika.



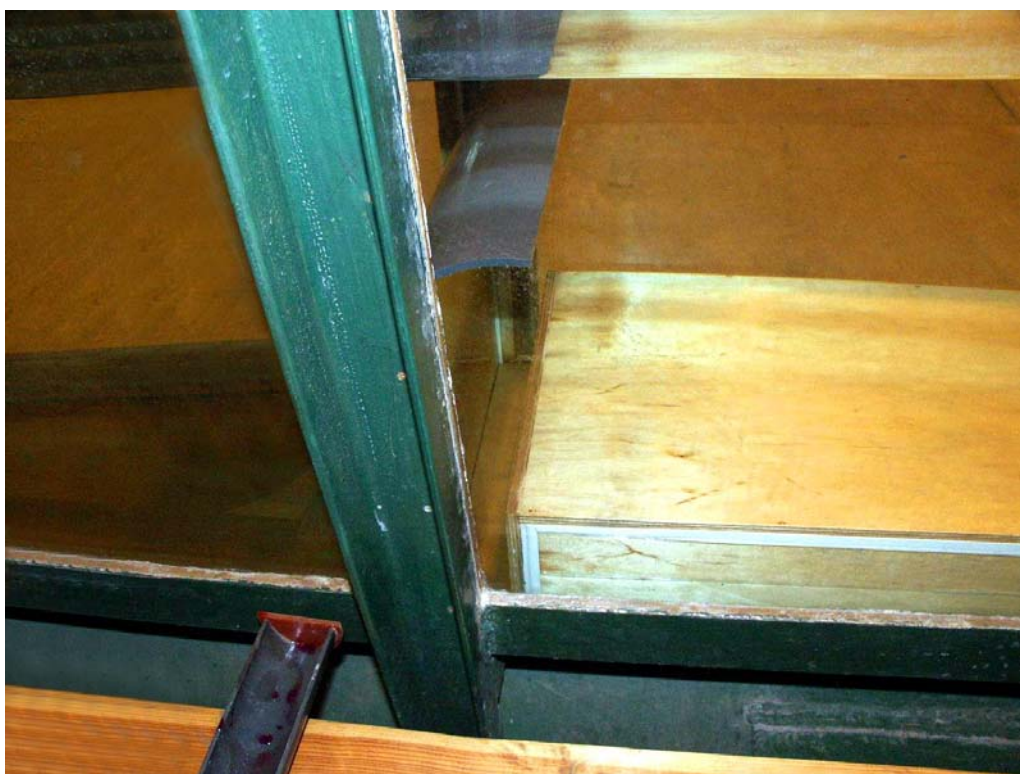
Fot. 6.1. Widok ogólny stanowiska pomiarowego



Fot. 6.2. Przekrój wlotowy do komory stanowiska laboratoryjnego



Fot. 6.3. Przelew odpływowy u wylotu ze stanowiska pomiarowego



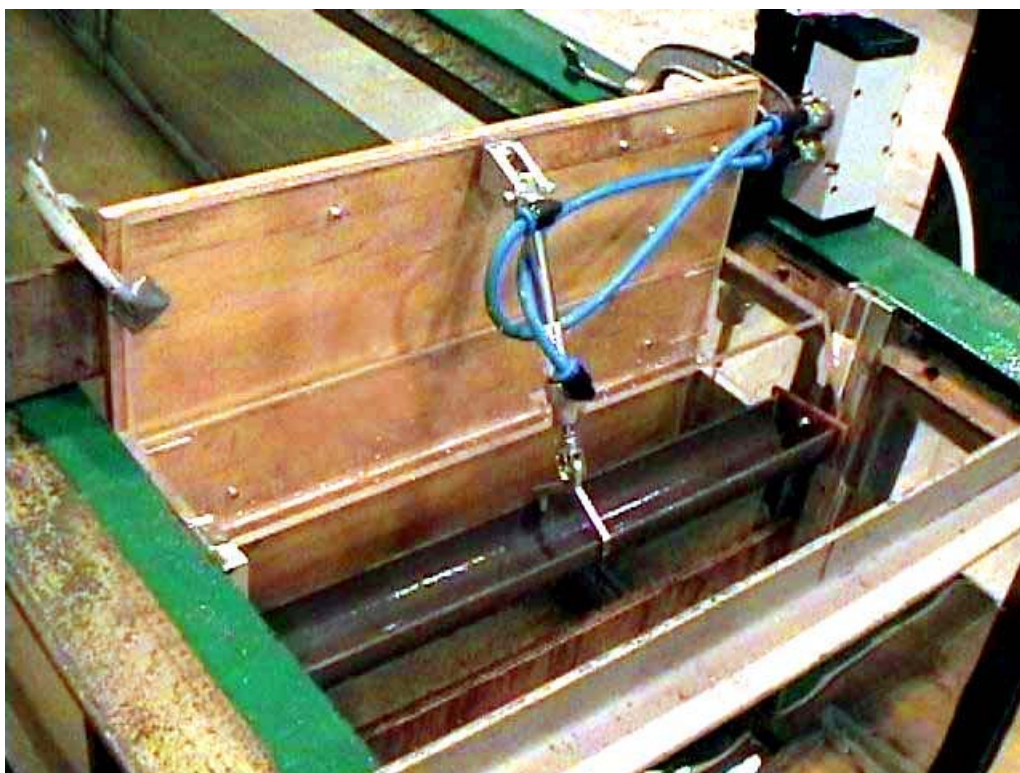
Fot. 6.4. Szczelina "recyrkulacyjna" w dolnej części komory stanowiska pomiarowego



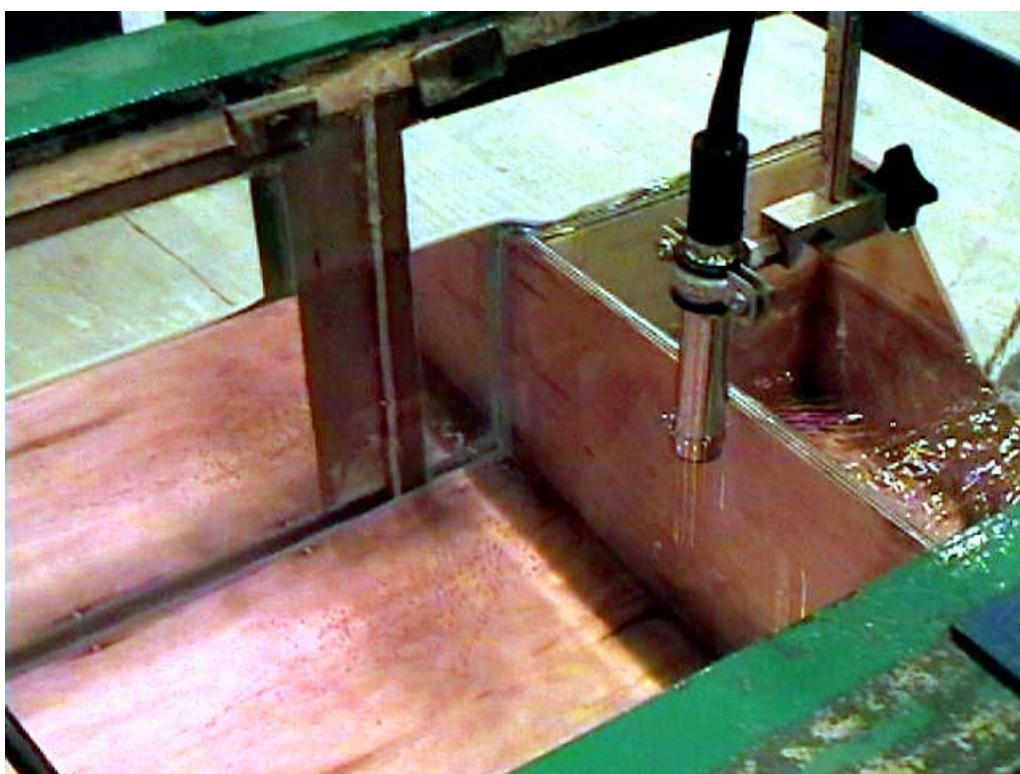
Fot. 6.5. Układ pompujący wodę ze szczeliny “recyrkulacyjnej”



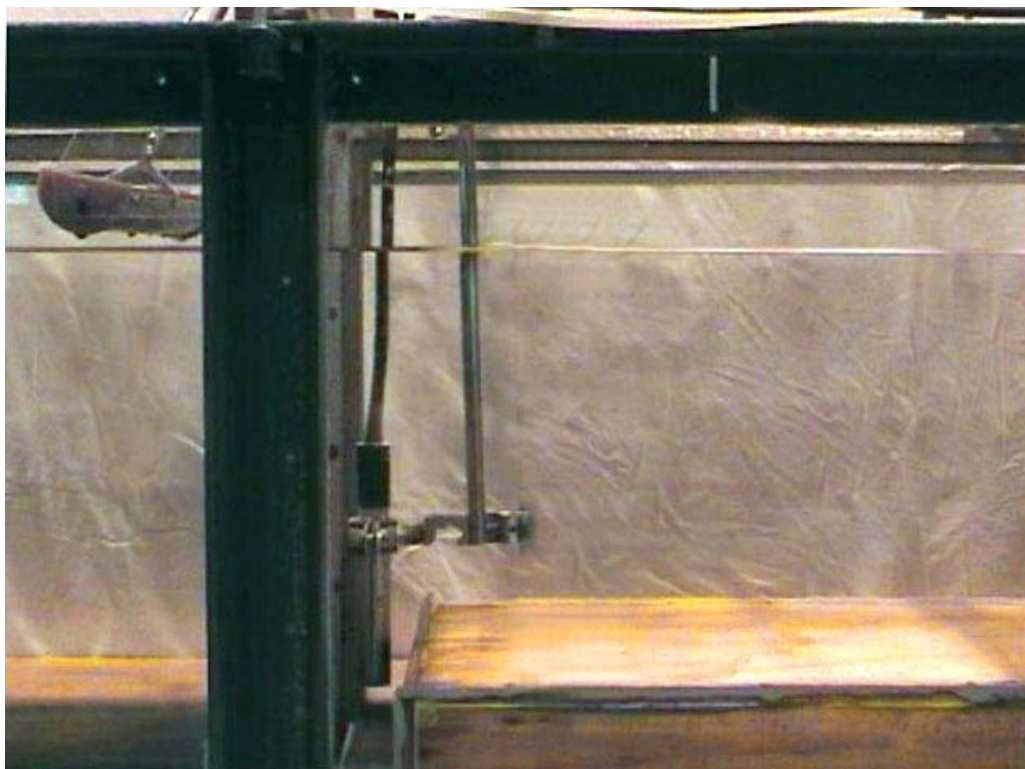
Fot. 6.6. Przelew Thomsona u wylotu kanału laboratoryjnego



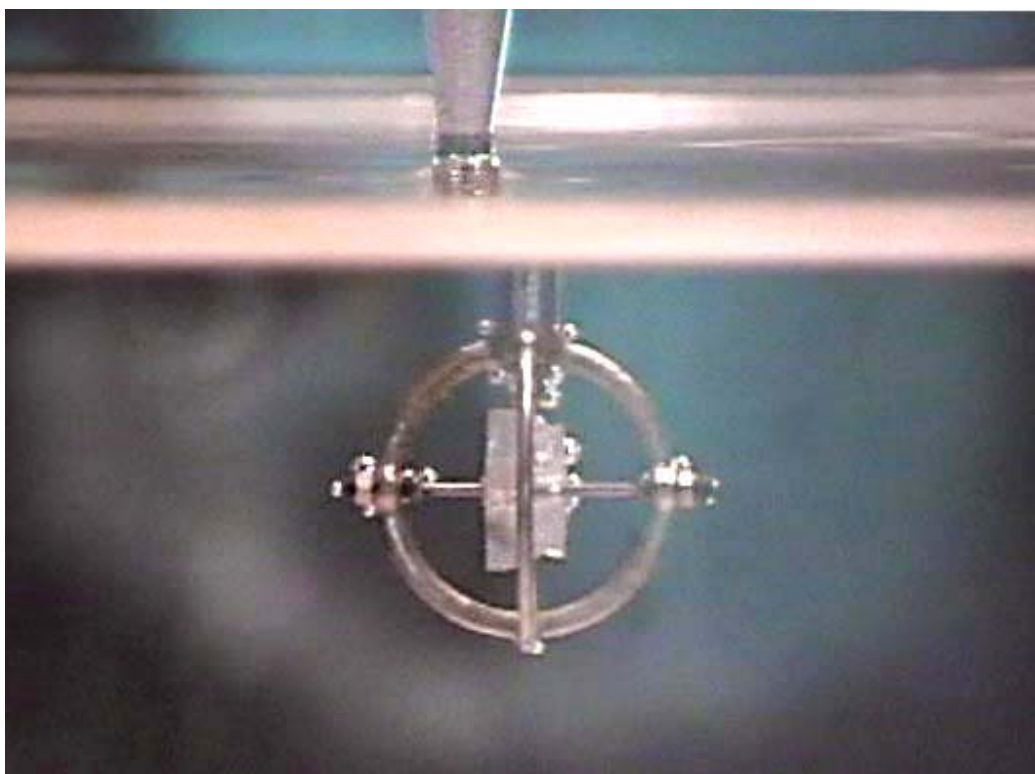
Fot. 6.7. Układ dozujący impuls znacznika



Fot. 6.8. Usytuowanie sondy fluorymetrycznej przy przelewie wylotowym stanowiska laboratoryjnego



Fot. 6.9. Usytuowanie sondy fluorymetrycznej w szczelinie „recyrkulacyjnej” stanowiska laboratoryjnego



Fot. 6.10. Głowica mikromłynka hydrometrycznego podczas pomiaru prędkości przepływu na stanowisku laboratoryjnym

6.2.2. Rodamina WT jako traser

Substancją spełniającą chyba wszystkie wymagane cechy dobrego traseru (patrz rozdz. 5.5.2) jest *Rodamina WT* (RWT) (patrz fot. 6.15), jaskrawoczerwonej barwy substancja, której symbolem chemicznym jest $C_{29}H_{29}N_2O_5Cl$. Została ona zatwierdzona przez Agencję Ochrony Środowiska jako oficjalnie dopuszczony do używania w badaniach znacznik [9]. Ta fluorescencyjna substancja posiada unikalną zdolność absorpcji zielonego światła i emisji światła czerwonego. Tylko bardzo nieliczne materiały posiadają taka własność, a więc interferencje pochodzące od innych substancji występują bardzo rzadko. Jej zdolności fluorescencyjne są niezwykle silne, ponadto jest ona stabilna chemicznie, bardzo dobrze dyfunduje oraz nie podlega adsorpcji. Wszystkie te cechy w połączeniu z jej niezbyt wygórowaną ceną sprawiają, iż Rodamina WT jest znakomitym traserem o bardzo wysokiej dokładności, stosowanym w wielu rodzajach badań [58].

Podczas stosowania RWT należy zwrócić szczególną uwagę na kilka parametrów, od których uzależnione jest uzyskanie poprawnych wyników pomiarów. Są to:

- stężenie impulsu traseru (musi ono być tak dobrane aby stężenia w punktach pomiarowych mieściły się w zakresie pomiarowym urządzeń zastosowanych do detekcji);
- temperatura (zjawisko fluorescencji jest silnie uzależnione od temperatury, wraz ze wzrostem temperatury własności fluorescencyjne słabną i na odwrót);
- obecność substancji hamujących fluorescencję (np. chlor jest substancją zmieniającą własności fluorescencyjne RWT);
- jasne światło słoneczne (dłuższe jego działanie powoduje reakcję fotochemicznego rozpadu RWT i spadek fluorescencji);
- mętność ośrodka (jeśli jest znaczna, powoduje zahamowanie emisji i transmisji światła);
- odczyn pH (fluorescencyjne właściwości RWT są stabilne w zakresie pH 5-10 i maleją poza tym zakresem).

6.2.3. Sonda kolorymetryczna CYCLOPS-7

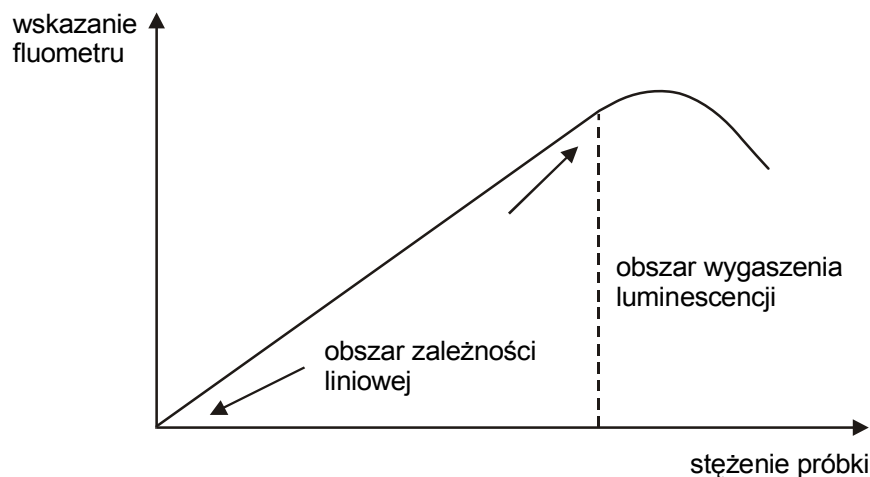
Minifluorymetr zanurzeniowy CYCLOPS-7 (fot.6.11) jest bardzo dokładnym urządzeniem, zaprojektowanym do monitorowania obecności barwników fluorescencyjnych w wodzie i wraz z traserem - Rodaminą WT stanowi doskonały system pomiarowy. Podstawowym elementem sondy do pomiaru stężenia Rodaminy WT, zwanej *fluorymetrem* jest dioda emitująca zielone światło, którego wiązka (o długości fali 550 nm) kierowana jest na ośrodek zawierający traser. Ten z kolei pod wpływem pobudzenia emituje światło czerwone (o długości fali 590-715 nm), które rejestrowane

jest przez fotodiodeę umieszczoną w głowicy czujnika. Ilość emitowanego światła jest wprost proporcjonalna do koncentracji barwnika aż do wartości 100 $\mu\text{g RWT/l}$.

Na potrzeby pomiarów wykonanych w ramach opisywanej tu pracy jako wprowadzany do badanego układu impuls Rodaminy WT użyto jej roztworu o stężeniu 0,17064 g RWT/l (patrz rozdz. 6.2.3.1).

Za pomocą fluorymetru można dokonywać bezpośrednich pomiarów dyskretnych lub też ciągłych w terenie lub w laboratorium, eliminując tym samym konieczność przeprowadzania kosztownych analiz laboratoryjnych. Hermetycznie obudowana sonda zasilana jest prądem $3 \div 15 \text{ V}$, zaś na wyjściu zwraca sygnał o napięciu $0 \div 5 \text{ V}$, który jest wprost proporcjonalny do mierzonej fluorescencji a tym samym stężenia barwnika w roztworze. Po wykalibrowaniu systemu w roztworze o znanym stężeniu stosowanego znacznika, można łatwo przeliczyć sygnał na wyjściu z sondy na stężenie tejże substancji w wodzie, zaś zależność ta ma charakter liniowy. Zmiana charakterystyki pracy urządzenia następuje dopiero w przypadku bardzo dużych stężeń traseru (rys. 6.2). Zakres obowiązywania liniowej charakterystyki oraz jej parametry należy ustalić laboratoryjnie przed rozpoczęciem pomiarów (patrz rozdz. 6.2.3.1). Specjalne wersje przewodów transmitujących sygnał wyjściowy z sondy umożliwiają rejestrację stężenia w bardzo szerokim zakresie stężeń znacznika. W przypadku Rodaminy WT wartość minimalnego wykrywalnego stężenia znacznika w próbce laboratoryjnej wynosi 0,04 ppb zaś maksymalna 1000 ppb. Niewielkie są więc dawki znacznika potrzebnego do prowadzenia badań, co sprawia iż system ten jest wygodny i ekonomiczny. Dokładność urządzenia wynosi $\pm 2 \%$ a bezwładność wykonywania pomiaru jest tak niewielka, iż możliwe jest wykorzystanie tego sprzętu w bardzo szerokim zakresie natężeń i prędkości przepływów [50]. Urządzenie to jest między innymi wykorzystywane do pomiaru wydatku i prędkości przepływu na różnego typu obiektach (np. oczyszczalniach ścieków), kalibrowania przepływomierzy, lokalizowania nieszczelności systemów przepływowych, dokładnego określania ilości zrzucanych wód poprodukcyjnych, weryfikacji parametrów sprzętu takiego jak pompy czy turbiny.

Podczas wykonywania pomiarów należy pamiętać, iż fluorescencja jest zjawiskiem wrażliwym na zmiany temperatury. Jeżeli więc wzrasta temperatura badanej cieczy – jej własności fluorescencyjne słabną, a tym samym spada wartość pomiaru rejestrowanego przez sondę. Jeśli pomiary mają być porównywalne ze sobą i stanowić komplet danych muszą być wykonywane w takiej samej temperaturze. Sonda CYCLOPS-7 może pracować w zakresie temperatur pomiędzy $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ i $+50 \text{ }^\circ\text{C}$ oraz na głębokości do 600 m.



Rys. 6.2. Charakterystyka funkcjonalna fluorometru CYCLOPS-7 [56]

6.2.3.1. Wyznaczenie charakterystyki pracy sondy CYCLOPS-7

Wyjściowe stężenie rodaminy WT, podane przez producenta na opakowaniu, wynosiło $21,33\% \pm 2,5\%$ (213,3 g RWT/l).

Stężenie stosowanego do pomiarów rozcieńczenia znacznika określono na drodze weryfikacji, sporządzając kolejne rozcieńczenia według specyfikacji [23] i badając poziom detekcji w przekrojach wylotowych. Ostatecznie ustalono jego wartość jako 0,17064 g/l. Aby sporządzić każdorazowo roztwór o takim samym stężeniu dodawano 4ml rodaminy WT z oryginalnego pojemnika do 5 l wody (pobieranej z systemu zasilającego stanowisko laboratoryjne).

Przed przystąpieniem do pomiarów z wykorzystaniem fluorometru CYCLOPS-7 dokonano doświadczalnego wyznaczenia charakterystyki pracy tego urządzenia w warunkach, w jakich następnie prowadzono pomiary. Temperatura panująca w laboratorium zarówno w czasie cechowania urządzenia jak i podczas pomiarów wynosiła $17 \div 18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Roztwór znacznika przygotowany do badań rozcieńczono 100 oraz 200 razy (patrz tab. 6.1), a następnie dokonano pomiaru napięcia, jakie generowane było przez czujnik zanurzony w tych roztworach oraz w wodzie pozbawionej znacznika. Na podstawie tych danych wyznaczono równanie prostej aproksymującej zależność wyznaczoną przez układ punktów pomiarowych.

Tab. 6.1. Wartości przygotowanych stężeń roztworów Rodaminy WT i odpowiadające im odczyty na czujniku kolorymetrycznym

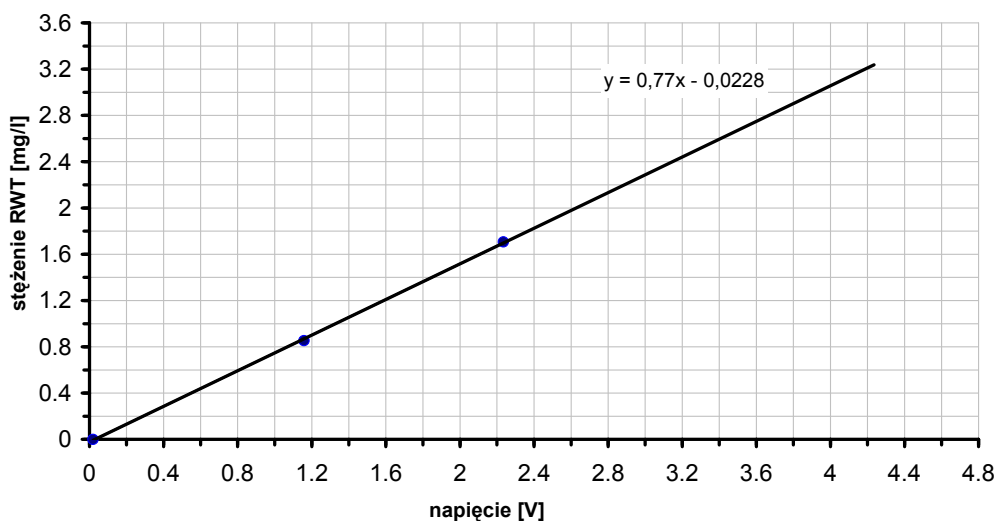
Próbka	Stężenie próbki [gRWT/l]	Napięcie [V]
1	0,0008532	1,158
2	0,0017064	2,235
3	0,0034128	3,923

Wyznaczone równanie miało następującą postać:

$$y = 0,77x - 0,0228 \quad (6.1)$$

gdzie: y – stężenie badanej próbki, x – napięcie powstające na czujniku.

Na rysunku 6.3 przedstawiono wyznaczoną doświadczalnie charakterystykę pracy, używanej do pomiarów sondy CYCLOPS-7.



Rys. 6.3. Charakterystyka funkcjonalna zastosowanej do badań sondy CYCLOPS-7

Wszystkie wyniki pomiarów przeliczono na stężenia znacznika, stosując powyższą zależność.

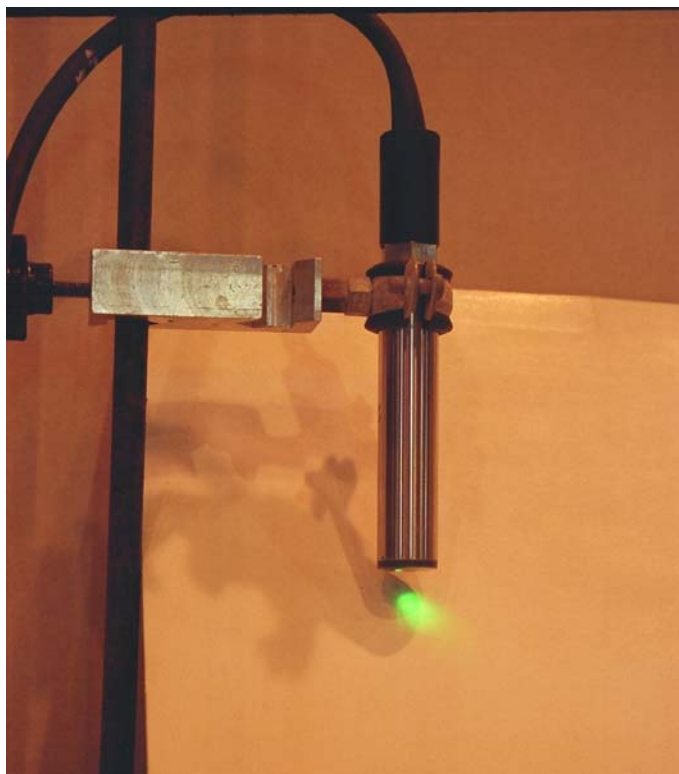
6.2.4. Mikromłynek hydrometryczny

Mikromłynek hydrometryczny służy do pomiarów prędkości chwilowych i średnich przepływu wody oraz jej wektora. Przyrząd ten składa się z sondy mikromłynkowej oraz miernika prędkości (patrz fot. 6.12). Sondę stanowi śmigielko z elektrodami oraz głowica elektroniczna. W czasie ruchu obrotowego śmigielka przechodzenie łopatek w pobliżu elektrod pomiarowych powoduje zmianę rezystancji pomiędzy elektrodą a masą. Zmiany tej rezystancji są zamieniane na impulsy elektryczne przez odpowiedni układ elektroniczny umieszczony w głowicy sondy mikromłynkowej. Przebiegi elektryczne z głowicy podawane są do miernika, gdzie po odpowiednim przetworzeniu identyfikowane są na cyfrowym wyświetlaczu i wyjściu analogowym.

Urządzenie umożliwia wykonywanie pomiarów prędkości w zakresie od 2 cm/s do 2 m/s. W zależności od wymagań pomiarowych możliwy jest wybór różnych czasów uśredniania (1, 2, 4 sekundy). Ekspozycja mierzonej prędkości następuje na 4-cyfrowym wyświetlaczu, a jej kierunek rozróżniany jest znakiem „+” lub „-”.

6.2.5. Zasada wykonywania pomiarów

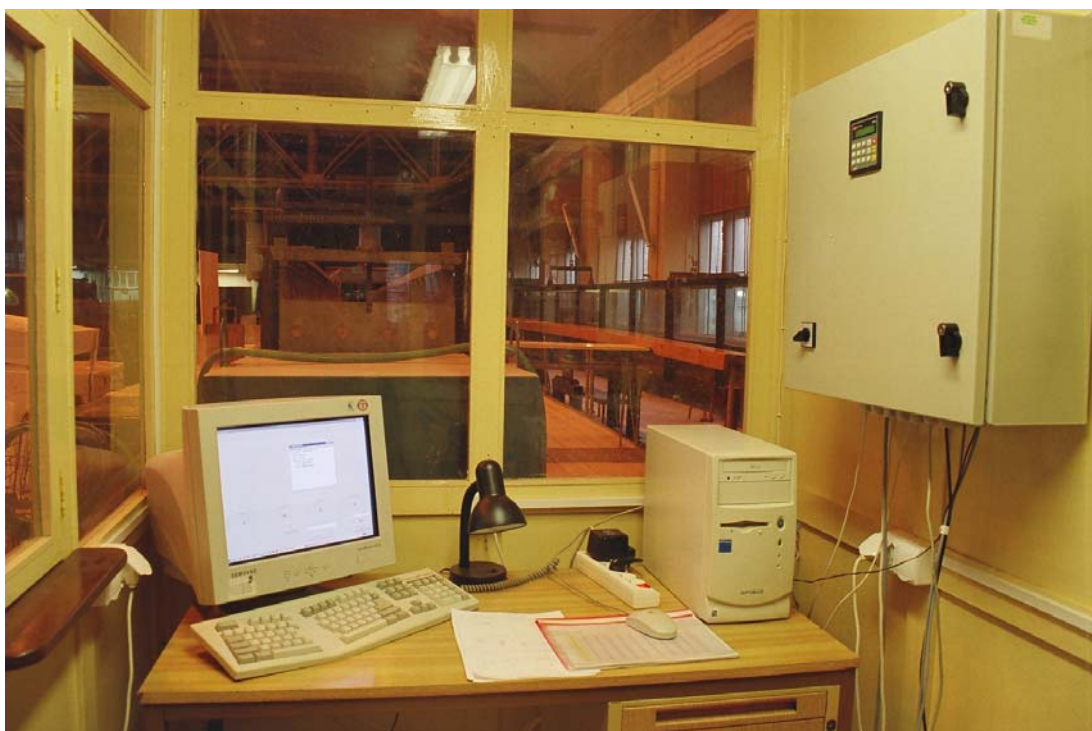
Każda seria pomiarowa wymagała wstępnego ustalenia poszczególnych wydatków: zarówno ilości wody wpływającej do modelu jak i obydwu strumieni opuszczających reaktor. Parametr ten regulowano za pomocą pomp i przelewów pomiarowych. Jedna seria pomiarów obejmowała po kilka (minimum 5) powtórzeń dla górnego oraz dolnego położenia sondy. Po zamocowaniu czujnika w odpowiedniej pozycji (fot. 6.8 i 6.9) napełniano rynienkę dozownika wlewając do niej 150 ml roztworu Rodaminy WT. Pozostała część eksperymentu miała przebieg automatyczny i sterowana była ze stanowiska zaopatrzonego w odpowiednią aparaturę (fot. 6.13). Za pomocą pulpitu sterownika (fot. 6.14) uruchamiano siłownik (fot. 6.7), który obracał korytko z roztworem znacznika, powodując impulsowe wprowadzenie roztworu rodaminy do kanału laboratoryjnego tuż przy wlocie do modelu (fot. 6.15). Równocześnie z obrotem dozownika trasera uruchamiana była (w sposób automatyczny) sesja pomiarowa sondy kolorymetrycznej, której wyniki rejestrował specjalnie do tego celu napisany program komputerowy. Znacznik, przepływając przez komorę modelu rozdzielał się, wraz z unoszącą go wodą na dwa strumienie odpływowe w sposób uzależniony od ustalonej w danym momencie wzajemnej proporcji wydatków na odpływach, zaś na obydwu odpływach rejestrowane były rozkłady jego stężenia w czasie trwania eksperymentu.



Fot. 6.11. Sonda fluorymetryczna CYCLOPS-7



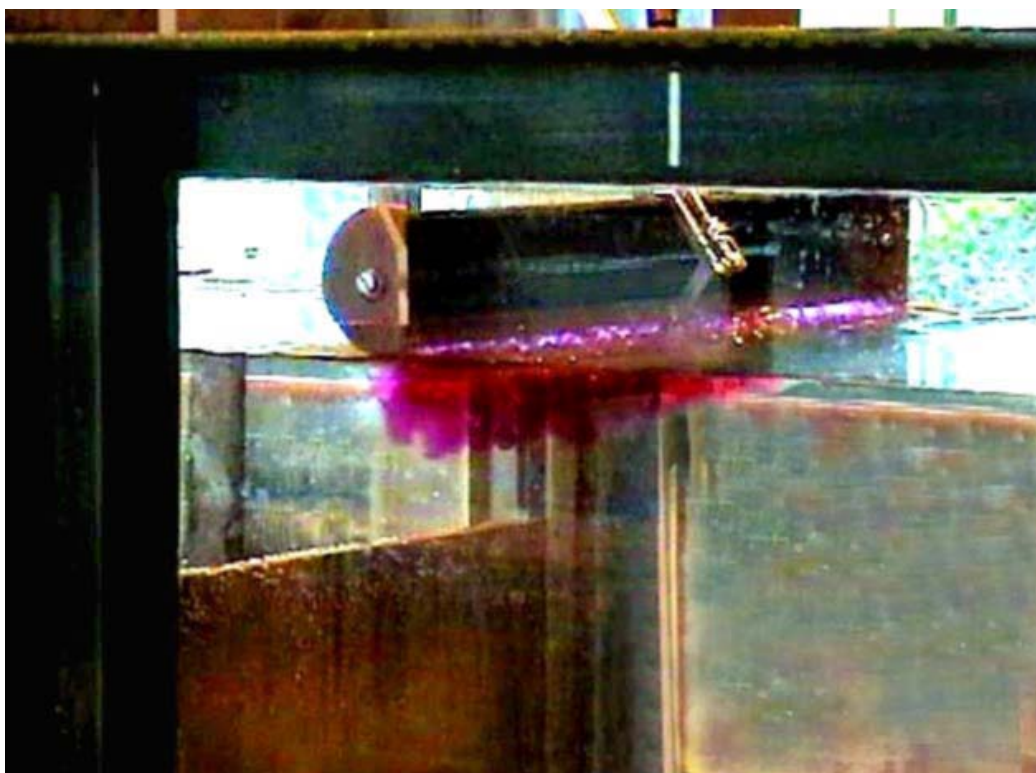
Fot. 6.12. Mikromłynek hydrometryczny (sonda wraz z rejestratorem)



Fot. 6.13. Stanowisko sterująco-rejestrujące



Fot. 6.14. Pulpit sterownika



Fot. 6.15. Sposób wprowadzania impulsu znacznika do komory stanowiska laboratoryjnego



Fot. 6.16. Widok ogólny stanowiska pomiarowego w wersji ze „zgarzniaczem osadu”

6.3. Pomiary wykonane w laboratorium

6.3.1. Pomiary stężenia znacznika w przekrojach odpływowych

Aby wyznaczyć charakterystyki odpływowe badanego modelu reaktora w jak najszerszym zakresie wzajemnych proporcji wydatków dla obydwu przekrojów odpływowych, konieczne było przeprowadzenie szeregu serii pomiarowych.

Całkowity wydatek przepływu utrzymywany był podczas wszystkich serii badań na stałym poziomie $Q = 1,48$ l/s. Regulacji ilości wody odprowadzanej poszczególnymi przekrojami odpływowymi, przelewowym - górnym oraz „recyrkulacyjnym” – dolnym, dokonywano za pomocą pomp pobierających wodę z dolnej części stanowiska (patrz rys. 6.1 oraz fot. 6.6).

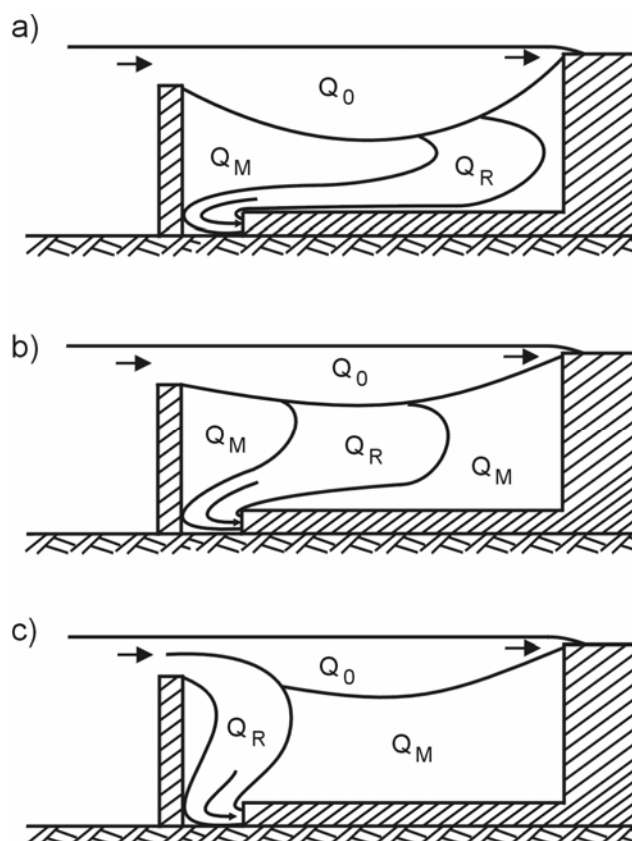
W tabeli 6.2 przedstawiono parametry przepływów, dla których dokonywano pomiarów.

Tab. 6.2. Zestawienie wzajemnych proporcji wydatków odpływowych stosowanych podczas eksperymentu w laboratorium

Seria pomiarowa	$Q_R : Q_O$	Q_R [l/s]	Q_O [l/s]
1	3 : 1	1,14	0,34
2	2 : 1	0,98	0,50
3	1 : 1	0,76	0,72
4	1 : 2	0,47	1,01
5	1 : 3	0,37	1,11

Sposób, w jaki wewnątrz modelu kształtowało się pole prędkości, a co za tym idzie, wpływający do modelu strumień wody (wraz z porcją znacznika) przemieszczał się w jego obszarze oraz ulegał rozdzieleniu na dwa odpływy, pozostawał w silnej zależności od przyjętej proporcji wydatków odpływowych (patrz rys. 6.4).

Gdy ilość wody pobierana przez pompy stanowiła mniej niż 50% dopływu do modelu, wpływająca fala znacznika przemieszczała się głównie w górnej części komory w kierunku przelewu, rozdzielając się wolno w środkowej i końcowej części stanowiska na dwa strumienie (patrz rys. 6.4a oraz fot. 6.23, 6.24, 6.25). W tym przypadku przeważająca ilość znacznika opuszczała stanowisko pomiarowe górnym, przelewowym przekrojem odpływowym, zaś pozostała część wolno kierowała się do szczeliny „recyrkulacyjnej”.



Rys. 6.4. Kształtowanie się strumieni masy w komorze modelu reaktora w zależności od wydatków odpływowych: a) $Q_R < Q_O$, b) $Q_R = Q_O$, c) $Q_R > Q_O$.

Z kolei w sytuacji przeciwnej, gdy większość odpływającej wody stanowił pobór dokonywany za pomocą pomp, znacznik kierował się ku dołowi komory tuż po wpłynięciu do jej wnętrza i tylko niewielka jego część przepływała przez całe stanowisko, odpływając przelewem końcowym (patrz rys. 6.4c oraz fot. 6.17, 6.18, 6.19).

Kiedy obydwie odpływy pozostawały w równowadze, rozdział strumienia cieczy (wraz z porcją traseru) następował w centralnej części modelu, zaś proporcje stężeń znacznika rejestrowanego na odpływach były do siebie zbliżone (patrz rys. 6.4b oraz fot. 6.20, 6.21, 6.22).

Jak już powiedziano, dane dotyczące wskazań sondy kolorymetrycznej w obu przekrojach odpływowych, zarejestrowano w plikach komputerowych. Następnie przeliczono je, stosując formułę (6.1), na wartości stężenia znacznika, co umożliwiło wykreślenie krzywych odpływowych dla poszczególnych pomiarów na przelewie oraz w szczelinie recyrkulacyjnej. Jako, że w każdej serii pomiarowej wykonywano kilka (od 5 do 8) powtórzeń, wykresy składają się z pęków krzywych o zbliżonym przebiegu (patrz rys. 6.6, 6.8, 6.10, 6.12, 6.14). Dla celów dalszej analizy wyników i weryfikacji modelu matematycznego wyznaczono średnie charakterystyki stanowiska laboratoryjnego dla każdego z rozpatrywanych przypadków przepływu (zestawionych

w tab. 6.2). Pary uśrednionych wykresów przedstawiono na rysunkach 6.7, 6.9, 6.11, 6.13 i 6.15.

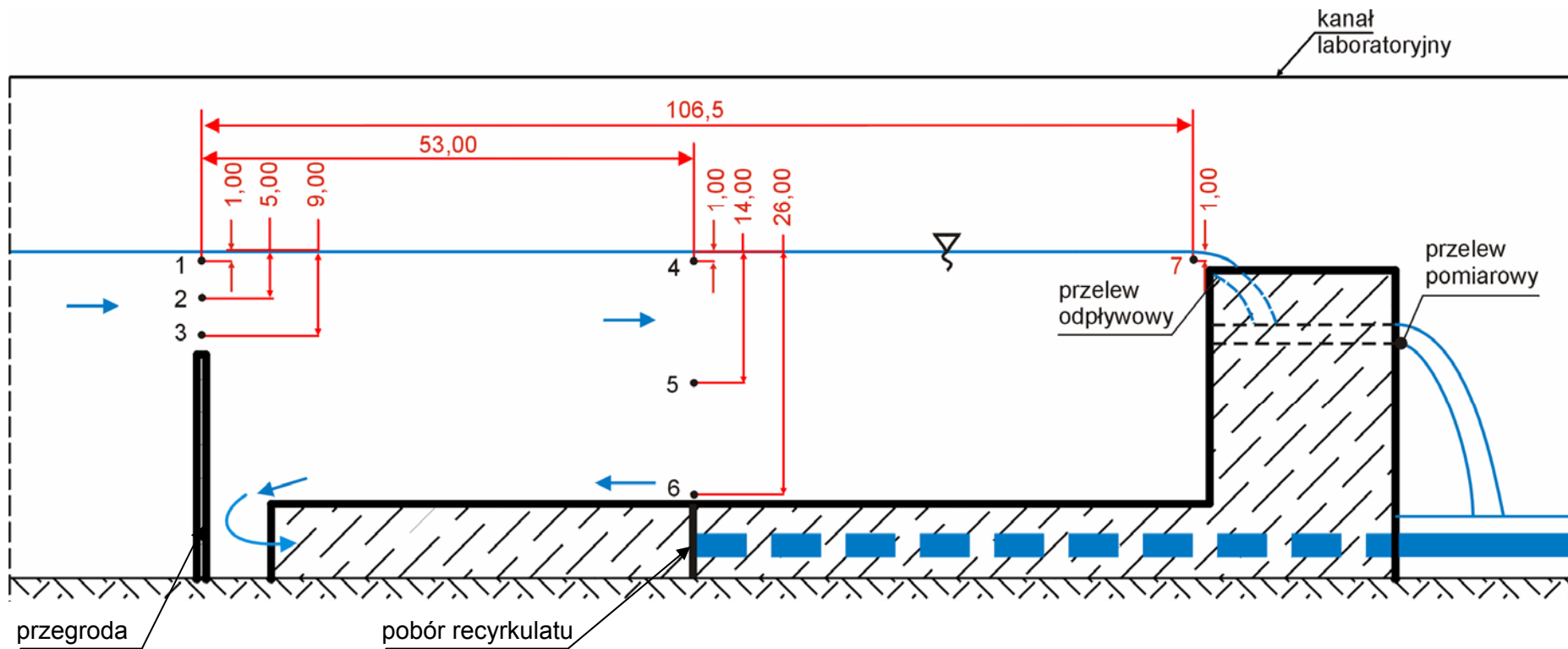
Wzajemne proporcje uzyskanych krzywych zgodne są z obserwacjami dotyczącymi rozdziału i przemieszczania się wewnątrz zbiornika strumienia cieczy wraz ze znacznikiem (patrz rys. 6.4). Obraz ten ulega przewidywanym zmianom wraz ze zmianami zadanych parametrów przepływu (proporcje wydatków). Świadczy to o bardzo dobrych własnościach Rodaminy WT jako znacznika oraz wysokiej czułości i niewielkiej bezwładności aparatury pomiarowej.

6.3.2. Pomiary prędkości

Jeden z elementów składowych przeprowadzonych badań laboratoryjnych stanowiły pomiary prędkości przepływu w wybranych punktach wewnątrz stanowiska, celem późniejszej weryfikacji wyników obliczeń numerycznych. Tak jak pozostałe badania, również pomiary prędkości przeprowadzono w przekroju modelu, znajdującym się w jego osi. Punkty pomiarowe wybrano w taki sposób, aby przepływ przez nie miał charakter poziomy. Było to podyktowane możliwościami technicznymi, gdyż młynek hydrometryczny, umożliwia dokonywanie pomiarów prędkości tylko jednokierunkowych przepływów. Wobec tego punkty, w których kolejno umieszczano młynek i rejestrowano średnie prędkości w nich panujące, rozmieszczono w następujący sposób (patrz rys. 6.5):

- bezpośrednio nad wlotem do modelu (punkt nr 1 – tuż pod powierzchnią zwierciadła wody, punkt nr 2 – w połowie odległości pomiędzy górną krawędzią przegrody a powierzchnią, punkt nr 3 – tuż nad przegrodą wlotową);
- w połowie długości modelu (punkt nr 4 – tuż pod powierzchnią zwierciadła wody, punkt nr 5 – w połowie głębokości zbiornika, punkt nr 6 – tuż nad dnem komory);
- tuż przed wlotem do komory przelewowej na końcu modelu, bezpośrednio pod powierzchnią zwierciadła wody (punkt nr 7).

Pomiarów dokonywano zgodnie z zasadą opisaną w rozdziałach 5.5.5 i 6.2.4, a ich wyniki zebrano w tabeli 6.3.



Rys. 6.5. Rozmieszczenie wewnątrz modelu laboratoryjnego punktów pomiaru prędkości przepływu (wymiały w [cm])

Tab. 6.3. Uśrednione wyniki pomiarów prędkości w wybranych punktach stanowiska pomiarowego
(pomiaru ze „zgarniaczem osadu” – patrz rozdz. 6.5)

Nr punktu Pomiar	1	2	3	4	5	6	7
Prędkość przepływu [cm/s] (pomiaru bez „zgarniacza osadów”)							
$Q_R : Q_O = 3:1$	1,66	4,00	5,20	1,44	-0,17	-2,10	5,90
$Q_R : Q_O = 2:1$	2,51	3,54	5,40	1,24	0,12	-1,16	8,16
$Q_R : Q_O = 1:1$	3,60	3,52	3,86	3,44	0,52	-0,5	11,00
$Q_R : Q_O = 1:2$	5,12	4,58	0,51	6,93	1,81	-0,53	13,94
$Q_R : Q_O = 1:3$	8,52	4,51	0,54	8,12	1,92	-0,47	15,06
Prędkość przepływu [cm/s] (pomiaru ze „zgarniaczem osadów”)							
$Q_R : Q_O = 3:1$	1,25	3,82	6,11	1,10	-0,15	-3,34	6,14
$Q_R : Q_O = 2:1$	2,46	4,11	5,73	1,98	-0,09	-2,18	7,11
$Q_R : Q_O = 1:1$	3,75	4,46	3,59	3,11	0,11	-1,05	11,38
$Q_R : Q_O = 1:2$	5,89	4,21	1,00	4,99	0,88	-0,8	14,06
$Q_R : Q_O = 1:3$	7,99	5,03	0,84	5,74	1,94	-0,93	14,82

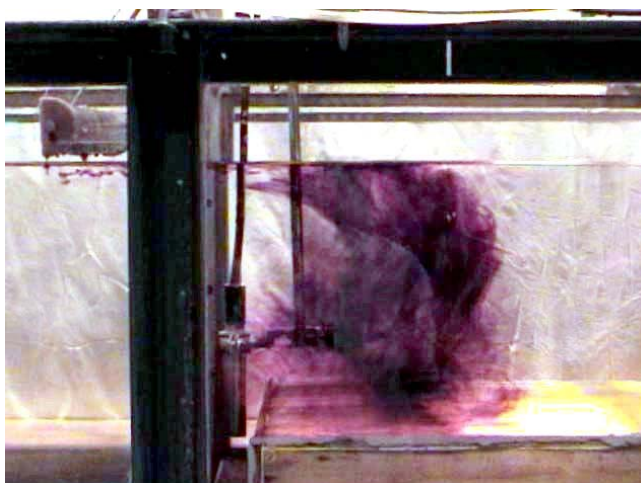


Fot. 6.17.

Rozkład znacznika po 4 sekundach od wprowadzenia impulsu.

Stosunek $Q_R:Q_O = 3:1$.

Opis w tekście.



Fot. 6.18.

Rozkład znacznika po 9 sekundach od wprowadzenia impulsu.

Stosunek $Q_R:Q_O = 3:1$.

Opis w tekście.

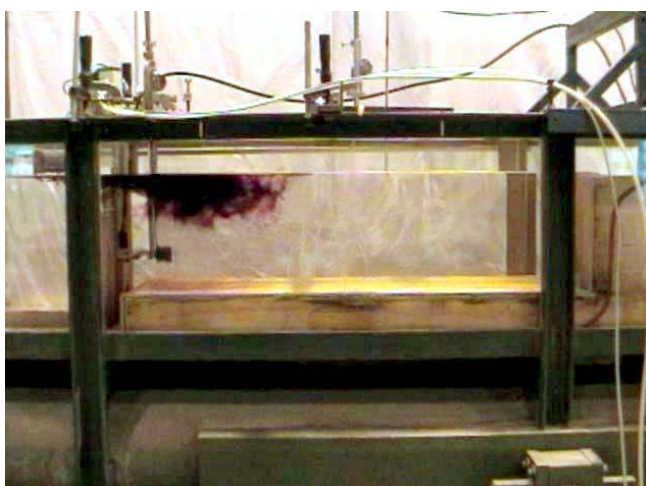


Fot. 6.19.

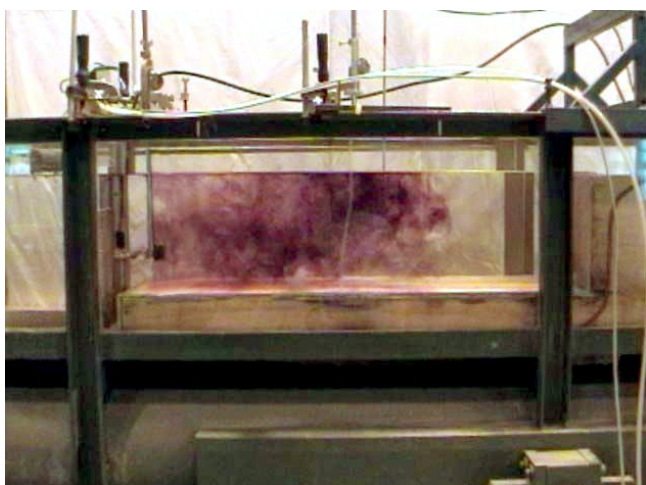
Rozkład znacznika po 15 sekundach od wprowadzenia impulsu.

Stosunek $Q_R:Q_O = 3:1$.

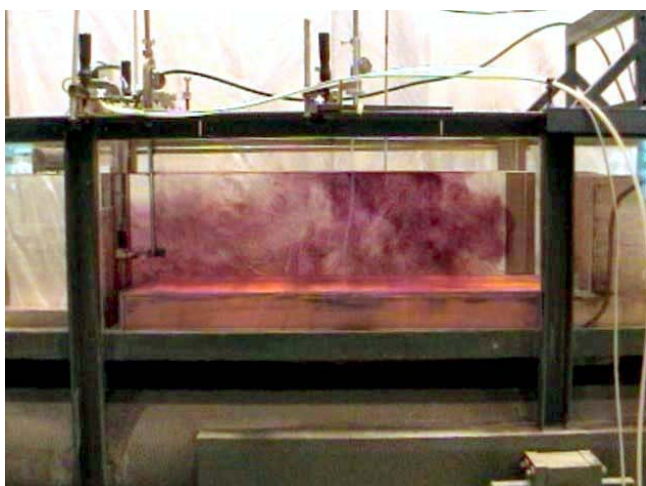
Opis w tekście.



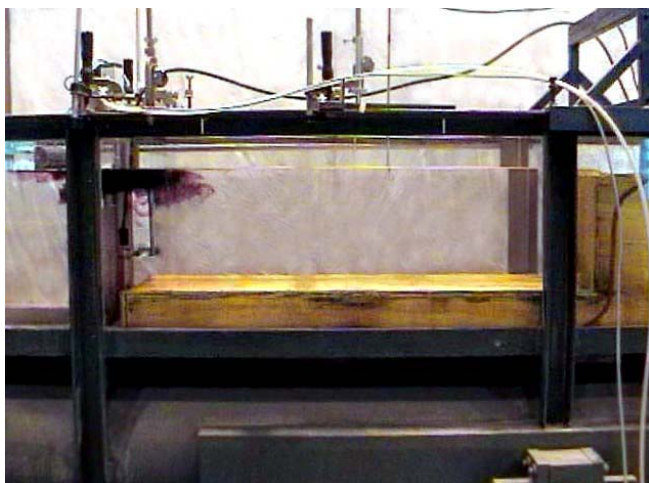
*Fot. 6.20.
Rozkład znacznika po 4 sekundach od wprowadzenia impulsu.
Stosunek $Q_R:Q_O = 1:1$.
Opis w tekście.*



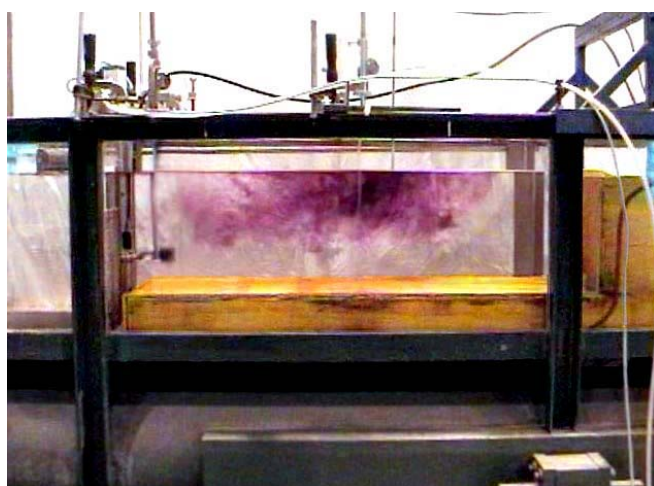
*Fot. 6.21.
Rozkład znacznika po 11 sekundach od wprowadzenia impulsu.
Stosunek $Q_R:Q_O = 1:1$.
Opis w tekście.*



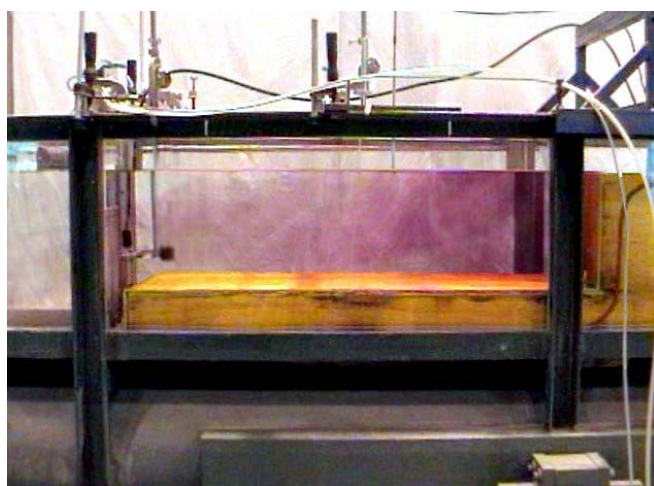
*Fot. 6.22.
Rozkład znacznika po 24 sekundach od wprowadzenia impulsu.
Stosunek $Q_R:Q_O = 1:1$.
Opis w tekście.*



*Fot. 6.23.
Rozkład znacznika po 4 sekundach od wprowadzenia impulsu.
Stosunek $Q_R:Q_O = 1:3$.
Opis w tekście.*

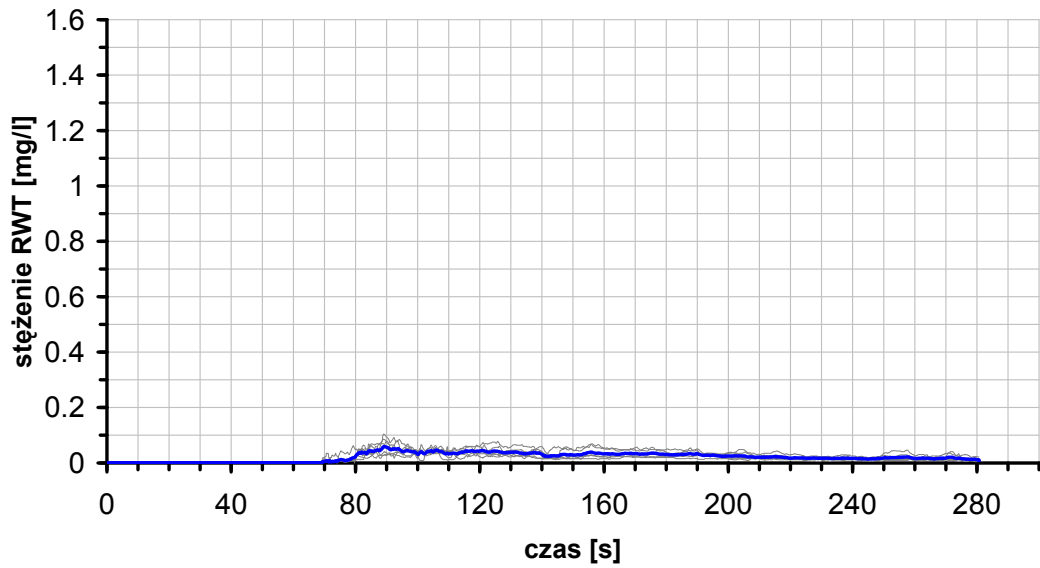


*Fot. 6.24.
Rozkład znacznika po 13 sekundach od wprowadzenia impulsu.
Stosunek $Q_R:Q_O = 1:3$.
Opis w tekście.*

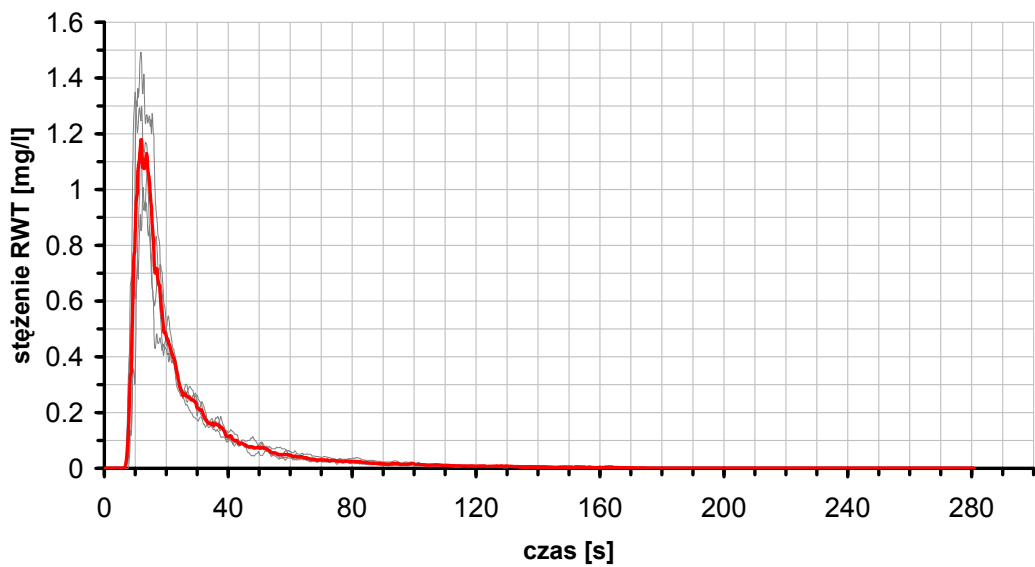


*Fot. 6.25.
Rozkład znacznika po 20 sekundach od wprowadzenia impulsu.
Stosunek $Q_R:Q_O = 1:3$.
Opis w tekście.*

Sonda górna (przelew) $Q_R:Q_O = 3:1$



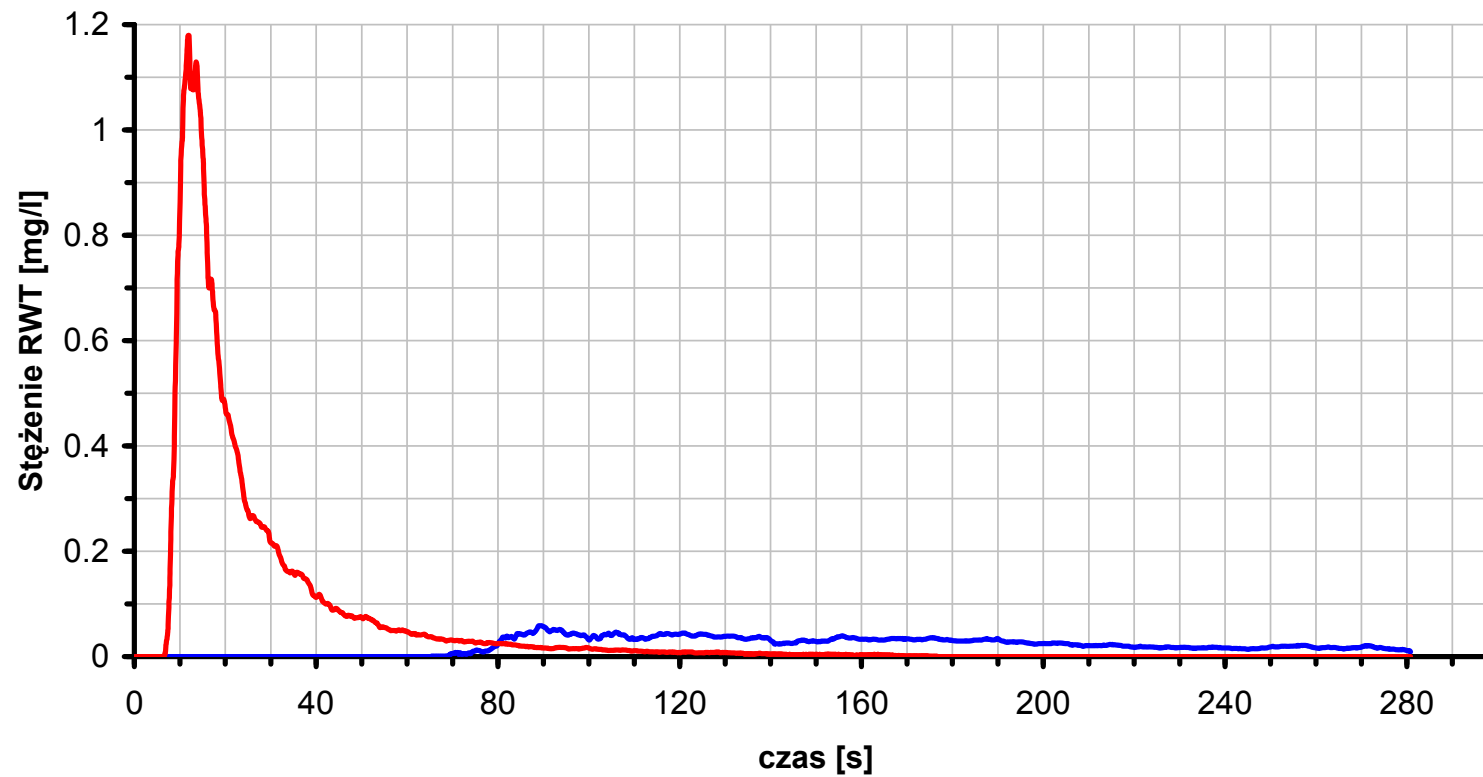
Sonda dolna (recyrkulacja) $Q_R:Q_O = 3:1$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej
- wartości stężenia traseru dla poszczególnych pomiarów

Rys. 6.6. Charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=3:1$
(opis w tekście)

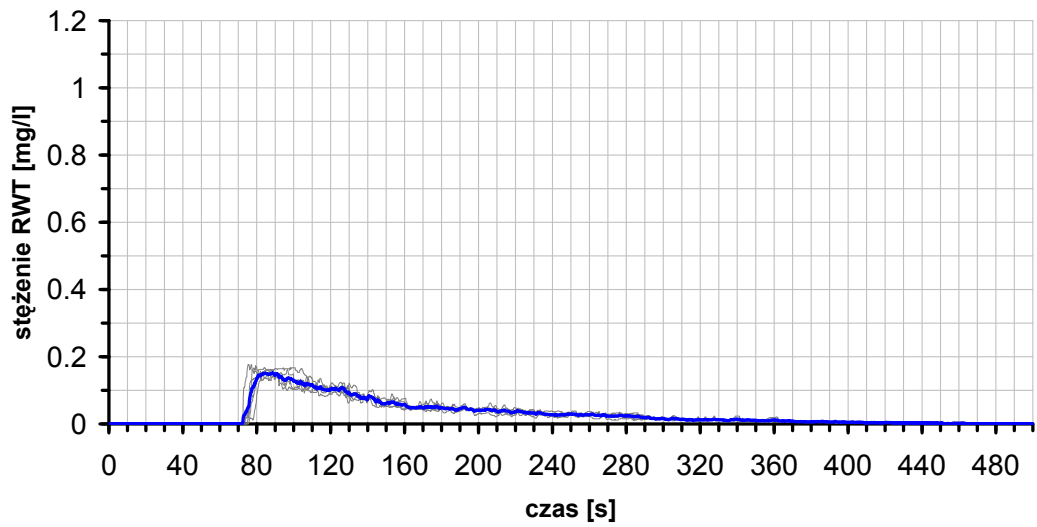
$$Q_R:Q_0 = 3:1$$



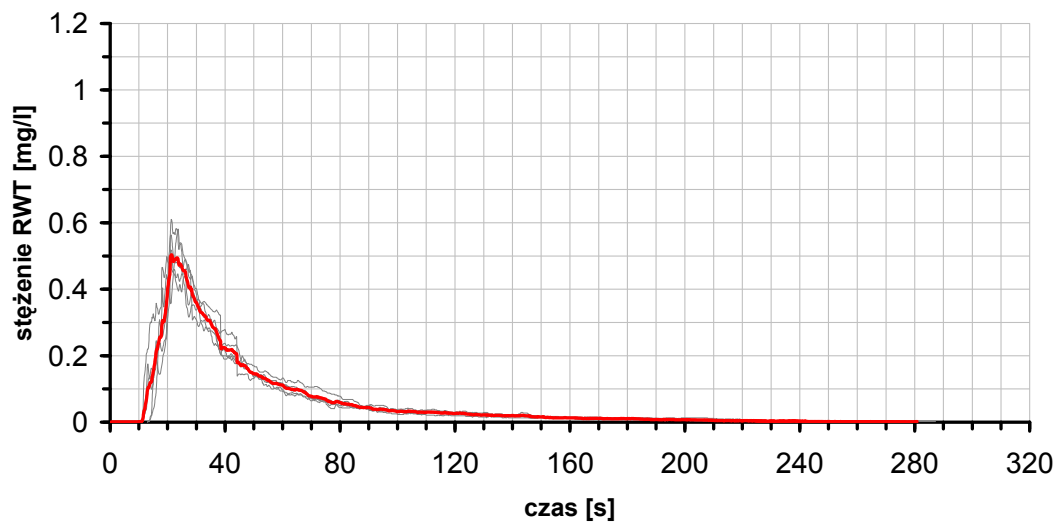
- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 6.7. Średnie charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_0=3:1$ (opis w tekście)

sonda górna (przelew) $Q_R:Q_O = 2:1$



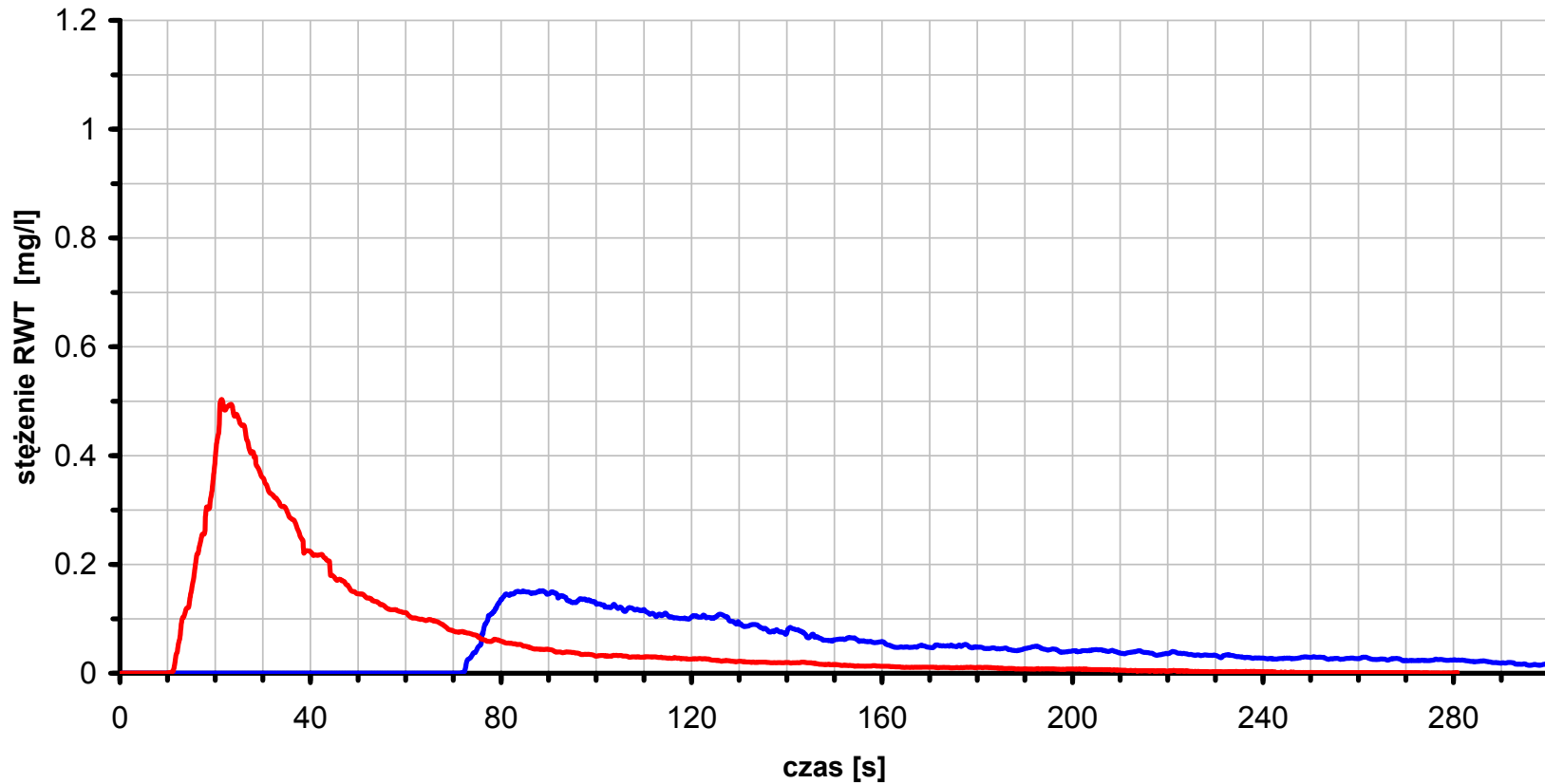
sonda dolna (recyrkulacja) $Q_R:Q_O = 2:1$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej
- wartości stężenia traseru dla poszczególnych pomiarów

Rys. 6.8. Charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=2:1$
(opis w tekście)

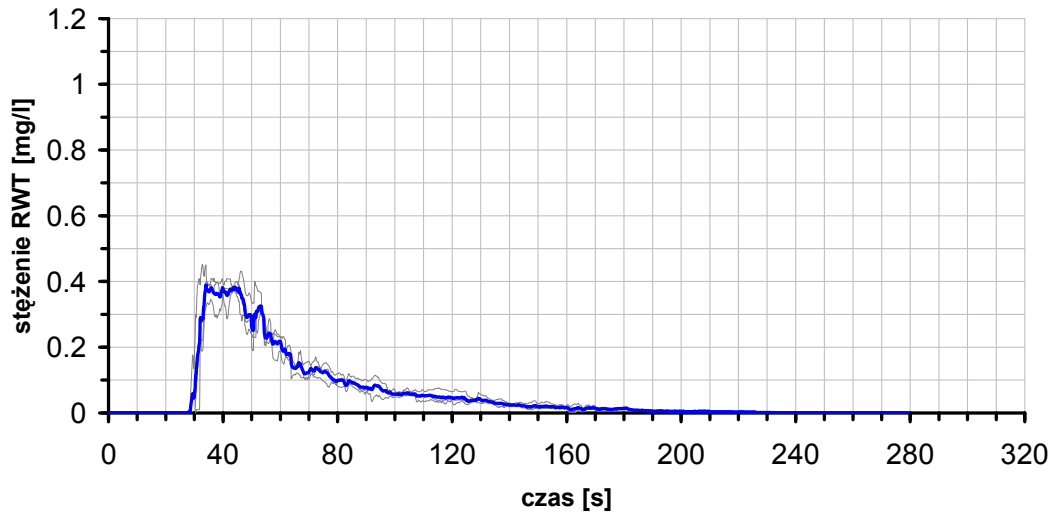
$$Q_R:Q_0 = 2:1$$



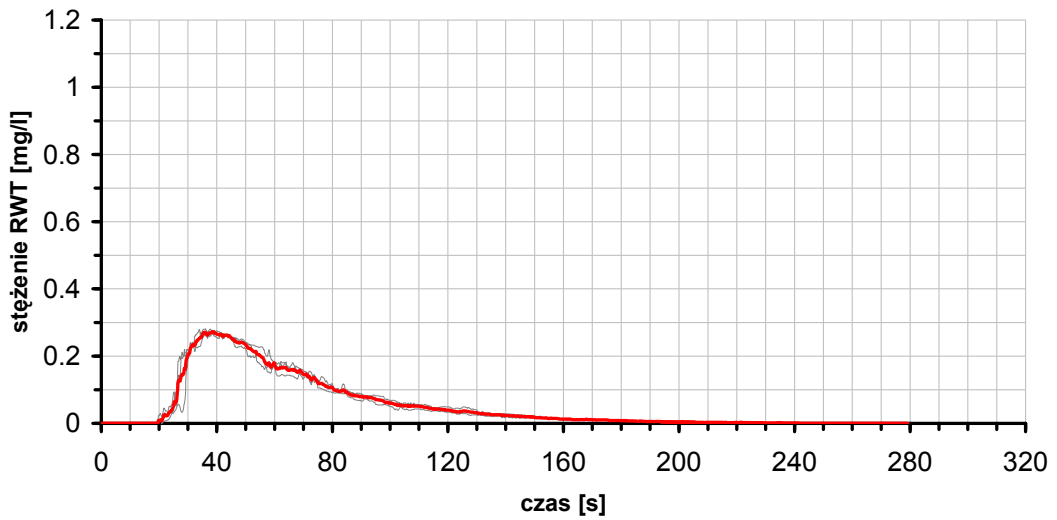
- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 6.9. Średnie charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_0=2:1$ (opis w tekście)

sonda górna (przelew) $Q_R:Q_O = 1:1$



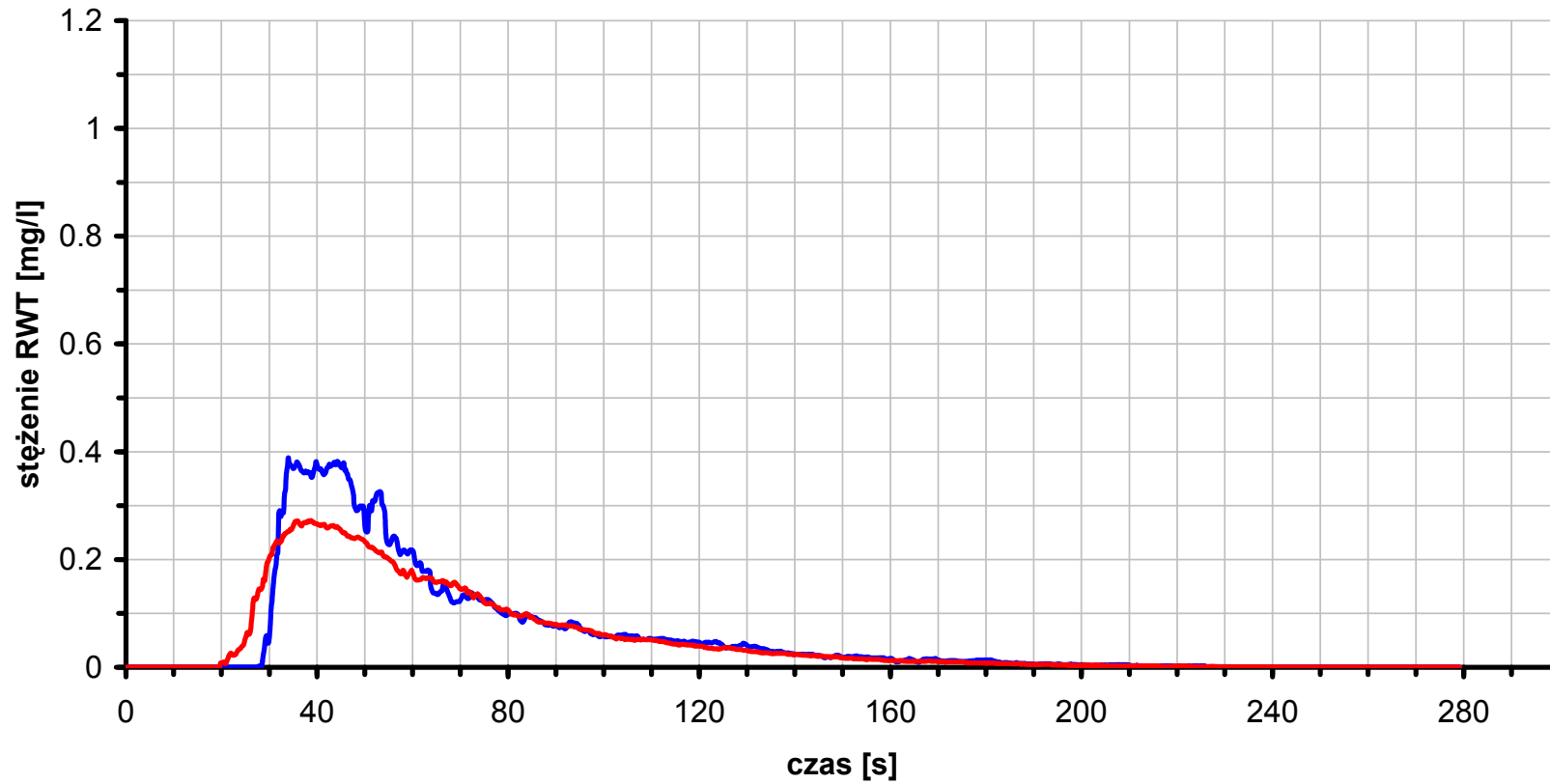
sonda dolna (recyrkulacja) $Q_R:Q_O = 1:1$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej
- wartości stężenia traseru dla poszczególnych pomiarów

Rys. 6.10. Charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=1:1$
(opis w tekście)

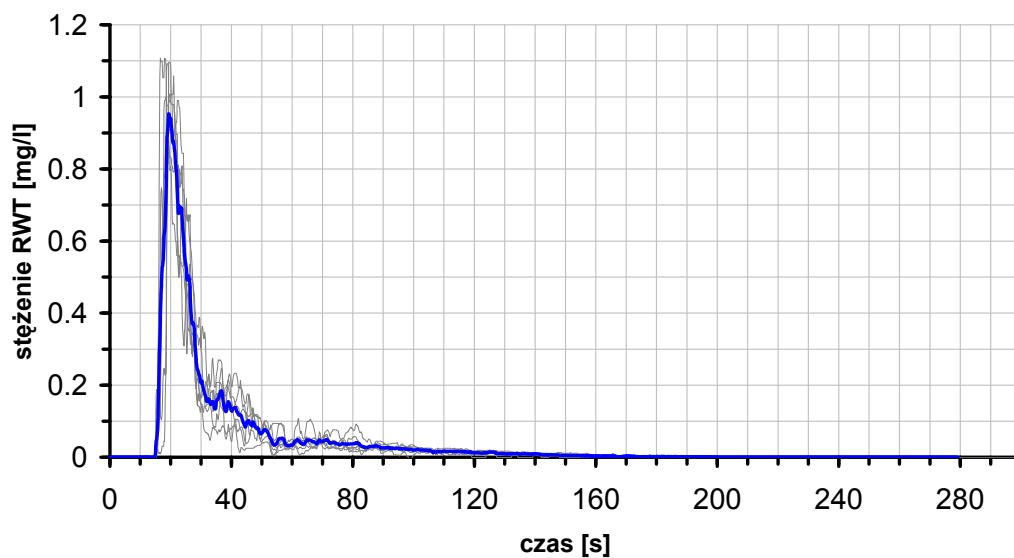
$$Q_R:Q_O = 1:1$$



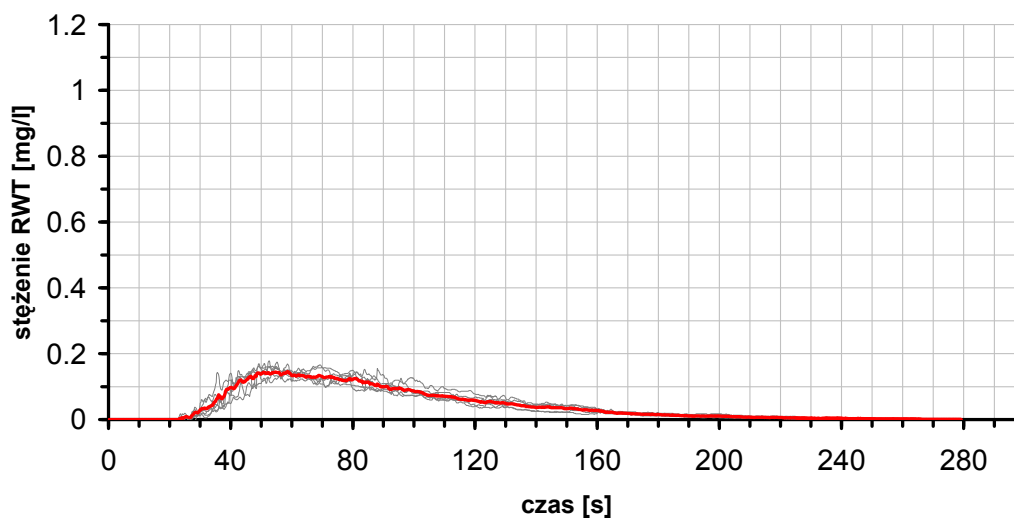
- średnia wartość stężenia trasaera na przelewie
- średnia wartość stężenia trasaera w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 6.11. Średnie charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=1:1$ (opis w tekście)

sonda górna (przelew) $Q_R:Q_O = 1:2$



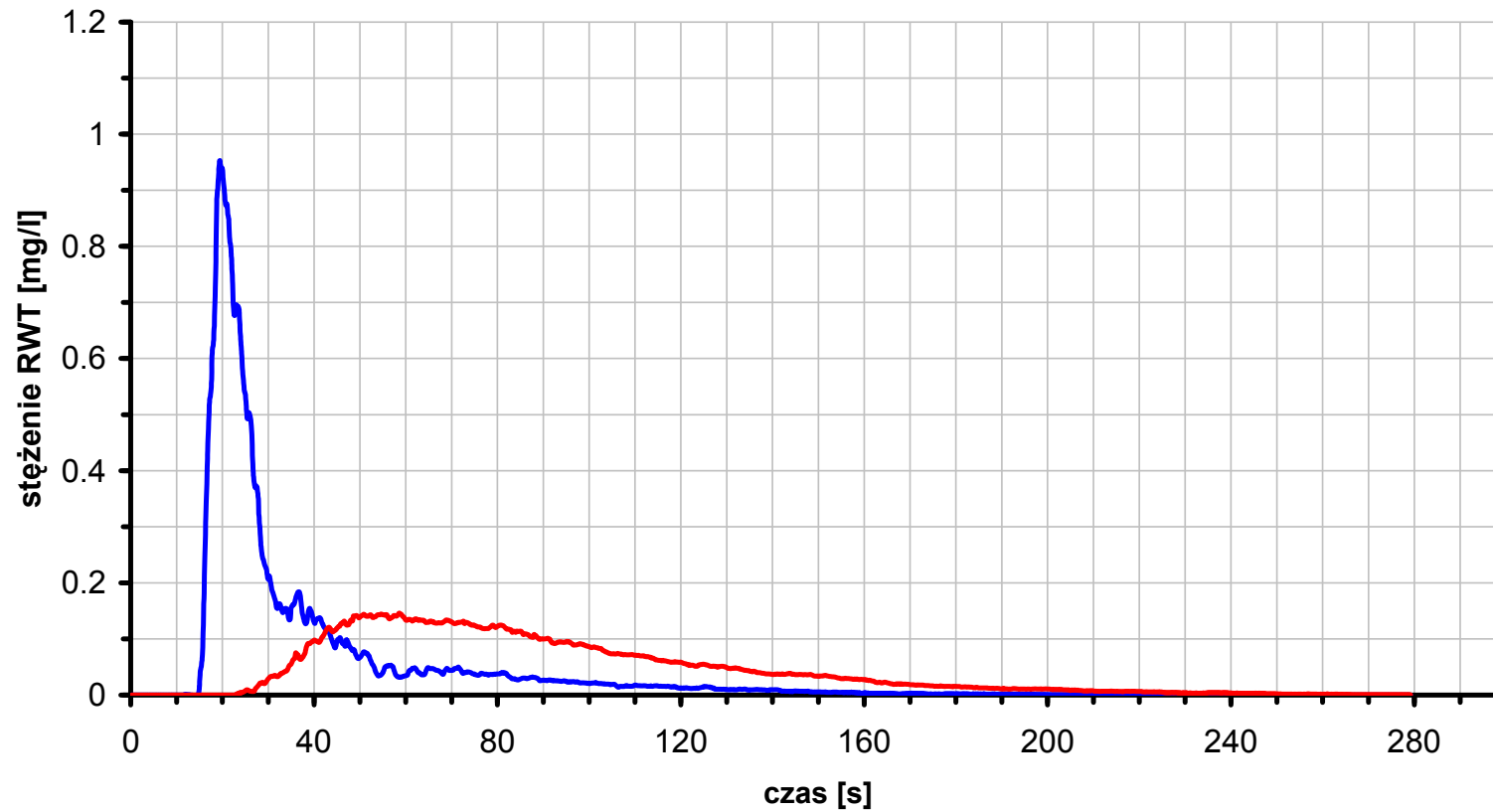
sonda dolna (recyrkulacja) $Q_R:Q_O = 1:2$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej
- wartości stężenia traseru dla poszczególnych pomiarów

Rys. 6.12. Charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=1:2$
(opis w tekście)

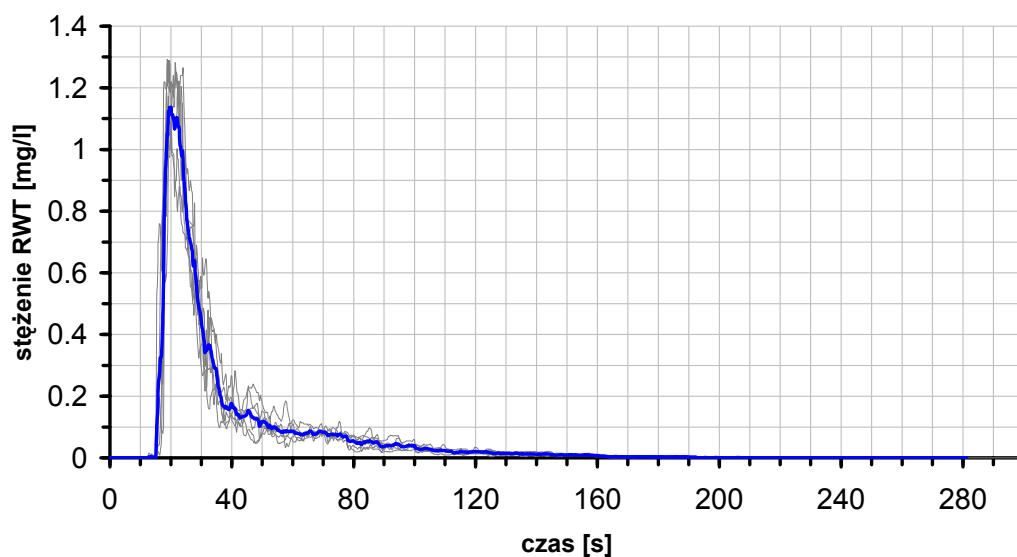
$$Q_R:Q_O = 1:2$$



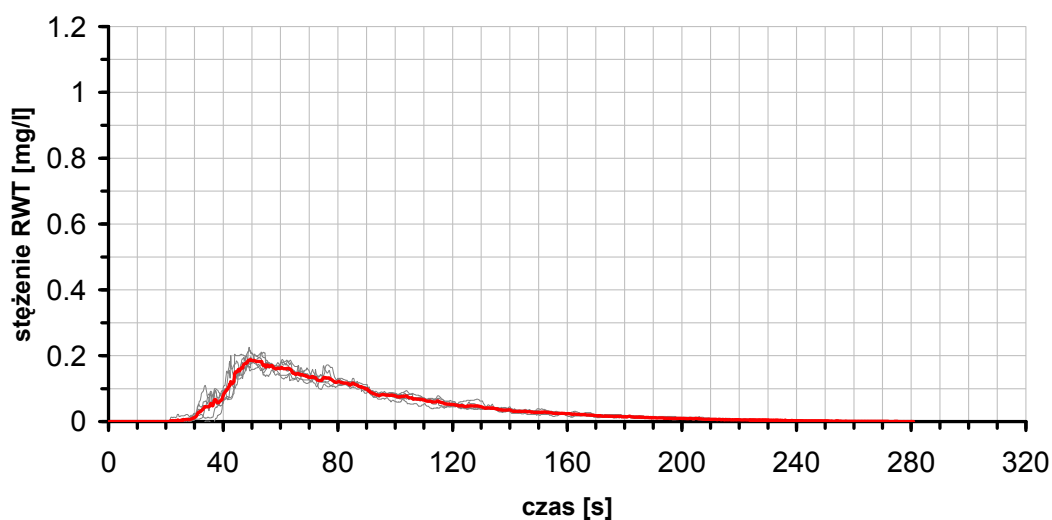
- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 6.13. Średnie charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=1:2$ (opis w tekście)

sonda górna (przelew) $Q_R:Q_O = 1:3$



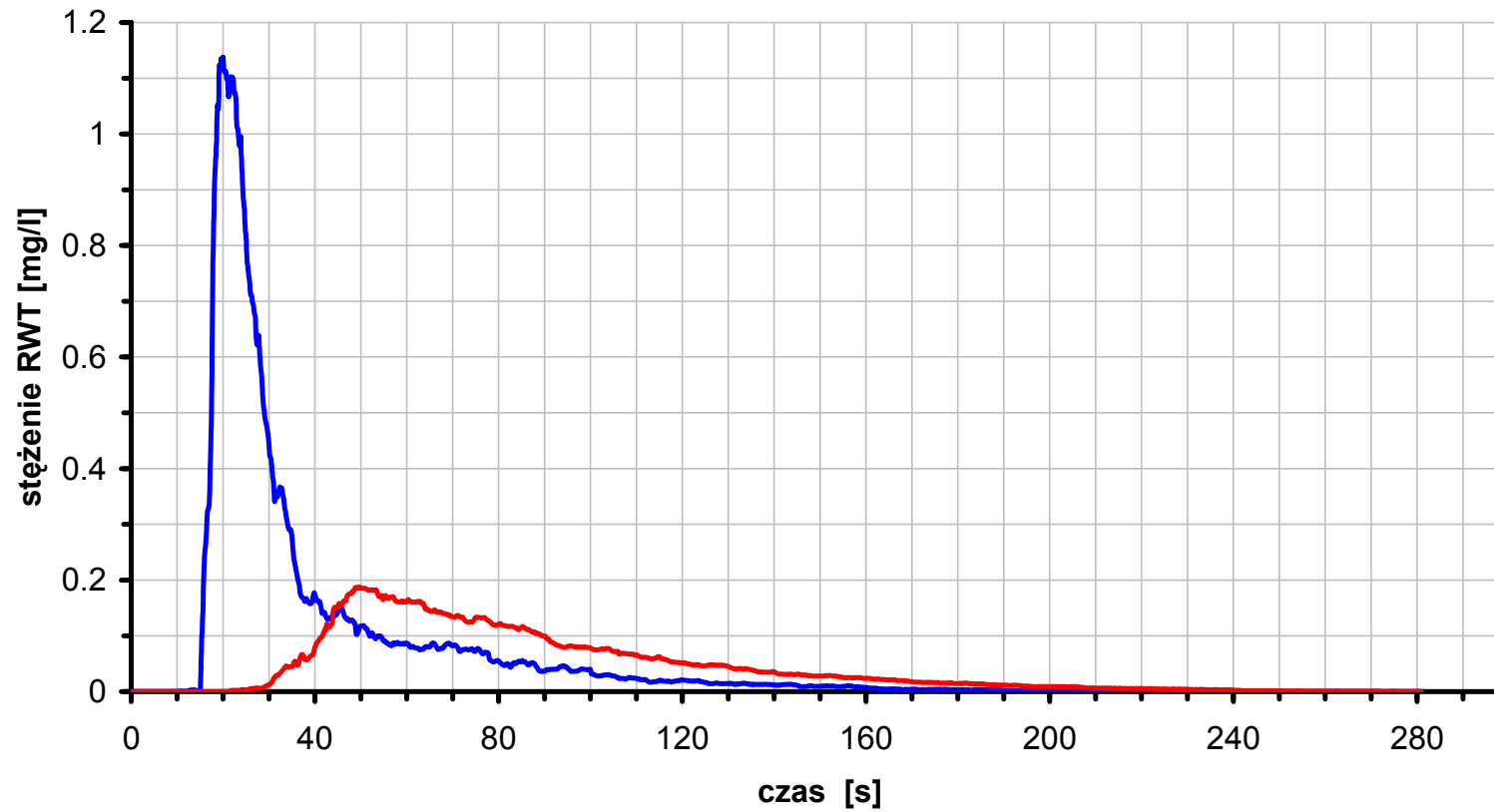
sonda dolna (recyrkulacja) $Q_R:Q_O = 1:3$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej
- wartości stężenia traseru dla poszczególnych pomiarów

Rys. 6.14. Charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=1:3$
(opis w tekście)

$$Q_R:Q_O = 1:3$$



— średnia wartość stężenia traseru na przelewie

— średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 6.15. Średnie charakterystyki odpływowe modelu laboratoryjnego. $Q_R:Q_O=1:3$ (opis w tekście)

6.4. Oszacowanie dokładności wykonanych pomiarów

6.4.1. Powtarzalność

Na etapie projektowania, przygotowania oraz podczas testów stanowiska laboratoryjnego opracowano taki sposób jego funkcjonowania, aby zapewnić powtarzalność przeprowadzanych eksperymentów.

W tym celu zautomatyzowano jak największą ilość wykonywanych operacji (patrz rozdz. 6.2.1 i 6.2.5), w oparciu o specyfikacje dotyczące znacznika - Rodaminy WT przyjęto szczegółowe procedury przygotowywania jego roztworu, który stosowano do badań (patrz rozdz. 6.2.3.1), a do rejestracji wyników użyto komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie.

Ze względu na sporą bezwładność systemu zasilającego stanowisko laboratoryjne w wodę i związane z tym trudności z ustalaniem żądanych wydatków cieczy, każdą serię pomiarową przeprowadzano w całości po uzyskaniu zaplanowanych parametrów przepływu, zapewniając w ten sposób niezmienność warunków dla wszystkich pomiarów.

Stosowany do wszelkich operacji pomocniczych sprzęt laboratoryjny (taki jak menzurki, pipety, waga) dobrany został z dużą starannością, tak, aby jego użycie nie obniżało dokładności wykonywanych pomiarów.

6.4.2. Błędy pomiarów

Każdy pomiar wielkości fizycznej wymaga oszacowania błędu, którym obarczony jest wynik tzn. podania z jaką dokładnością dana wielkość została wyznaczona. W procesie pomiaru wyróżnić można trzy etapy:

- wyznaczenie szukanej wielkości fizycznej,
- określenie błędu pomiaru,
- podanie przypuszczalnych przyczyn błędów.

Ogólnie błędy dzielimy na:

- *błędy grube* (zazwyczaj jednorazowe, wynikłe np. z pomyłek eksperymentatora);
- *błędy systematyczne* (występujące zawsze, wynikające np. z niedokładności przyrządów pomiarowych, z mało dokładnego ustawienia całego eksperymentu lub z błędu eksperymentatora);
- *błędy przypadkowe* (występują tylko w przypadku serii pomiarowej, ich źródłem jest natura mierzonego obiektu oraz niedoskonałość naszych zmysłów).

Nieprawidłowe wyniki pomiarów, będące skutkiem popełnienia błędów grubych są łatwe do wykrycia i wyeliminowania. Podczas wykonywania pomiarów oszacowano więc popełniane błędy: systematyczny oraz przypadkowe.

Błąd systematyczny w przypadku użycia elektrycznych przyrządów pomiarowych (z takim jest fluorymetr) określa następująca formuła:

$$\delta_0 = \text{zakres} \times \frac{\text{klasa}}{100} \quad (6.2)$$

Zakres pomiarowy jest to największa wartość, jaką może mierzyć przyrząd pomiarowy przy określonym ustawieniu (wyborze zakresu). Natomiast *klasę przyrządu* stanowi dokładność, z jaką przekształca on sygnał pomiarowy na odczytywane wskazanie. W przypadku elektrycznych urządzeń pomiarowych klasa przyrządu jest podawana w procentach zakresu pomiarowego.

Zastosowany do przeprowadzenia badań zakres pomiarowy fluorymetru wynosił 1000 ppb RWT, natomiast klasa sprzętu określona została przez jego producenta na +/- 2 %.

W teorii określenia *błędów przypadkowych* stosuje się pojęcia [17]:

- *błędu bezwzględnego* ΔX definiowanego jako różnica wyniku pomiaru x_i i wartości rzeczywistej x_r :

$$\Delta X = x_i - x_r; \quad (6.3)$$

- *błędu względnego* δx definiowanego jako stosunek błędu bezwzględnego ΔX do wartości rzeczywistej x_r :

$$\delta x = \frac{\Delta X}{x_r} = \frac{x_i}{x_r - 1}; \quad (6.4)$$

Pojęcie wartości rzeczywistej w przypadku pomiarów wykonanych w laboratorium jest czysto teoretyczne, gdyż praktycznie jej nie znamy. Nie można zatem w tym przypadku zastosować bezpośrednio powyższych zależności. Jednak w oparciu o statystyczną teorię błędów przypadkowych można oszacować przybliżone wartości tych błędów, a tym samym dokładność otrzymanych wyników pomiarowych. Te przybliżone wartości błędów noszą nazwę *wskaźników dokładności pomiarowych*.

Z jednego pomiaru nie możemy wnioskować o jego dokładności. W celu zminimalizowania wpływu *błędów systematycznych* na wyniki pomiarów najczęściej stosowaną metodą jest wykonanie serii (n) pomiarów i przyjęcie jako najlepszego przybliżenia nieznaney wartości x , średniej arytmetycznej ze wszystkich wyników x_i :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad (6.5)$$

Parametrem stosowanym w teorii błędów do określenia „rozmycia” rozkładu wyników poszczególnych pomiarów wokół wartości średniej jest *odchylenie standardowe* δ zwane też *średnim błędem kwadratowym*, który wyznacza się z wyrażenia [17]:

$$\delta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (6.6)$$

Błąd średni kwadratowy jest najważniejszym i najczęściej stosowanym wskaźnikiem dokładności pomiaru, ponieważ jest on policzony optymalnie – najdokładniej z danej serii pomiarowej. Dlatego też opracowując wyniki otrzymane w laboratorium na drodze pomiarów zastosowano go jako parametr określający ich dokładność. Wyniki tych analiz zebrano w tabeli 6.4.

Tab. 6.4. Zestawienie średnich błędów z serii pomiarowych

Seria pomiarowa	Średni błąd kwadratowy pomiaru δ [mg RWT/l]	
	Sonda górna	Sonda dolna
$Q_R : Q_O = 3:1$	0,00884	0,01456
$Q_R : Q_O = 2:1$	0,01474	0,00948
$Q_R : Q_O = 1:1$	0,04647	0,03351
$Q_R : Q_O = 1:2$	0,02771	0,00647
$Q_R : Q_O = 1:3$	0,02929	0,00861

Otrzymane wartości średnich błędów kwadratowych są stosunkowo niewielkie i zawierają się pomiędzy $0,00861 \div 0,04647$ mg RWT/l. Uznano zatem, iż średnia wartość z każdej serii pomiarowej jest dobrym przybliżeniem wyników rzeczywistych i przyjęto ją jako materiał do weryfikacji modelu matematycznego.

6.5. Badania konduktometryczne

6.5.1. Uwagi wstępne

Jak już wspomniano w rozdz. 5.5.2, zanim wybrano fluorymetrię jako metodę przeprowadzenia finalnych pomiarów laboratoryjnych, na tym samym stanowisku (rys. 6.1) wykonano konduktometryczne badania rozpoznawcze z użyciem roztworu soli kuchennej (NaCl) jako traseru [4, 32]. Podstawowe wiadomości dotyczące zasad pomiarów konduktometrycznych zostały przedstawione w rozdz. 5.5.4.

O przeprowadzeniu wstępnych badań przy pomocy metody konduktometrycznej zadecydowała dostępność sprzętu pomiarowego (fluorymetr zakupiono znacznie później) oraz doświadczenia z wcześniejszych tego typu pomiarów, prowadzonych w laboratorium.

Pomimo, iż wyniki badań przeprowadzonych przy zastosowaniu konduktometrów nie zostały ostatecznie wykorzystane do opracowania modelu, prezentowanego w niniejszej pracy, są one oraz metoda ich uzyskiwania na tyle interesujące, że zdecydowano się przedstawić je krótko i skomentować.

6.5.2. Pomiary konduktometryczne

6.5.2.1. Użyty sprzęt pomiarowy

Do wykonania opisywanych tu badań użyto czujników konduktometrycznych typu CD-2 (fot. 6.26). Za ich pomocą można dokonywać pomiarów *konduktywności* (przewodności właściwej roztworów wodnych). Jednostką przewodności właściwej jest simens/metr [S/m] a zakres pomiarowy sondy wynosi $0,1 \text{ mS/m} \div 10 \text{ S/m}$.

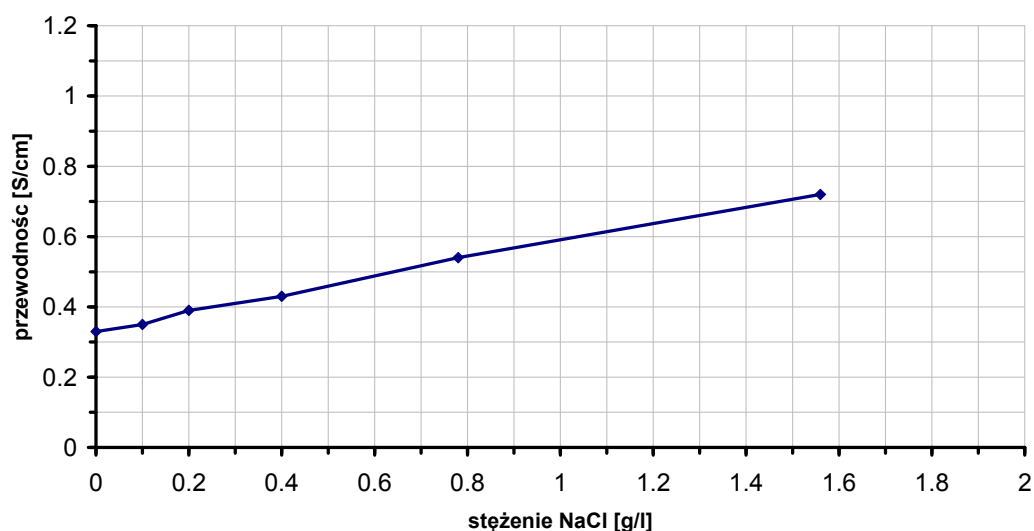
Czujnik konduktometryczny CD-2 jest układem dwóch elektrod wykonanych z pasków platynowych w postaci pierścieni, pokrytych czernią platynową w celu zwiększenia ich powierzchni czynnej, osadzonych trwale na szklanym rdzeniu, umieszczonym wewnątrz szklanej osłony. Elektrody połączone są drutami platynowymi z przewodem ekranowanym, który umożliwia zasilanie prądem zmiennym o określonej częstotliwości, dostarczonym z konduktometru.

Do rejestracji mierzonych danych użyto dwóch (dostępnych w momencie wykonywania badań) mierników konduktometrycznych typu: N5721 oraz N5721M (fot. 6.27). Umożliwiają one rejestrację pomiaru przewodności roztworu w kilku zakresach pomiarowych. Podstawową jednostką pomiarową jest 1 S/m a zakres wynosi $1 \div 100 \text{ S/m}$ zaś dostępne zmiany zakresu to: $\times 10$, $\times 3$, $\times 0,3$, $\times 0,1$.

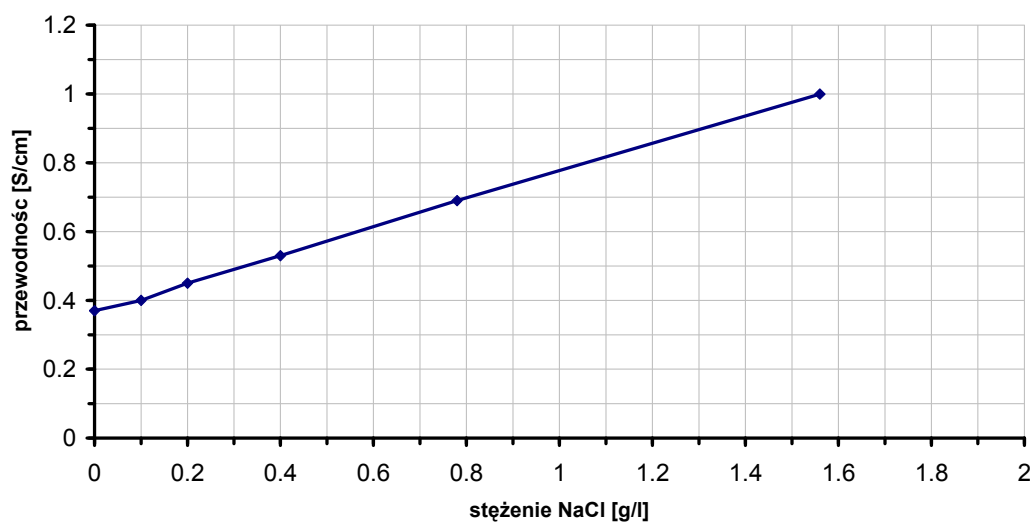
W celu wyznaczenia stężenia badanego roztworu na podstawie pomiaru jego przewodności należy dla zastosowanego konduktometru sporządzić doświadczalnie

krzywą cechowania. W tym celu sporządzono zestaw rozcieńczeń znacznika o stężeniach: 100 g/l, 25 g/l, 6,25 g/l, 1,56 g/l, 0,4 g/l. Następnie za pomocą każdego z konduktometrów zmierzono przewodność wszystkich roztworów, dobierając odpowiednie skale pomiarowe. Zbadano również przewodność wody bez dodatku soli. Wyniki przedstawiono w tabelach 6.5 i 6.6.

Po wykonaniu wstępnych oszacowań spodziewanych na wylotach z modelu laboratoryjnego stężenie znacznika ustalono, iż należy zastosować do pomiarów skalę „x0,3”. Dla niej też sporządzono krzywe cechowania mierników, przedstawione na rys. 6.16 i 6.17.



Rys. 6.16. Krzywa cechowania konduktometru N5721M dla zakresu pomiarowego x0,3



Rys. 6.17. Krzywa cechowania konduktometru N5721 dla zakresu pomiarowego x0,3

Tab. 6.5. Kalibracja konduktometru N5721

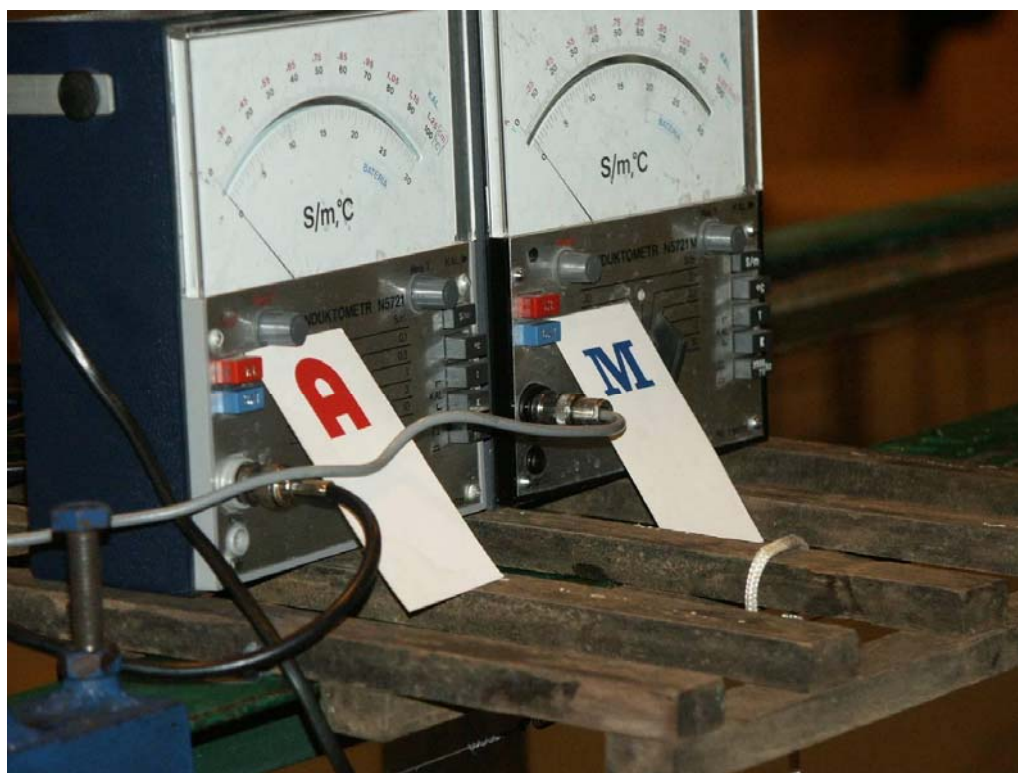
Znane stężenie NaCl [g/l]	Przewodność [S/cm]				
	Skala				
	X10	X3	X1	X0,3	X0,1
200	0,98				
100	0,88				
50	0,65				
25	0,48	1,03			
12,5	0,37	0,67			
6,25	0,31	0,48	0,97		
3,125		0,37	0,65		
1,56		0,31	0,47	1	
0,78			0,38	0,69	
0,4			0,33	0,53	1,11
0,2				0,45	0,87
0,1				0,4	0,74
0				0,37	0,63

Tab. 6.6. Kalibracja konduktometru N5721M

Znane stężenie NaCl [g/l]	Przewodność [S/cm]				
	Skala				
	X10	X3	X1	X0,3	X0,1
200	0,64				
100	0,53	1,22			
50	0,45	0,93			
25	0,38	0,69			
12,5	0,32	0,5	1,01		
6,25	0,3	0,39	0,69		
3,125		0,33	0,49	1,07	
1,56		0,29	0,39	0,72	
0,78			0,37	0,54	1,12
0,4				0,43	0,81
0,2				0,39	0,67
0,1				0,35	0,58
0				0,33	0,5



Fot. 6.26. Sonda konduktometryczna CD-2



Fot. 6.27. Mierniki konduktometryczne N5721 oraz N5721M

6.5.2.2. Metodyka i przebieg pomiarów

Konstrukcja i sposób funkcjonowania stanowiska laboratoryjnego podczas pomiarów konduktometrycznych były identyczne jak opisane w rozdziale 6.2.1. Sondy konduktometryczne umieszczono w analogicznych (jak w pomiarach fluorymetrycznych) punktach wewnątrz modelu (patrz rys. 6.1) i zastosowano tę samą technikę realizacji pomiaru (patrz rozdz. 6.2).

Jako znacznika, wprowadzanego impulsowo w początkowym przekroju reaktora, za pomocą rynienki (patrz fot. 6.15) użyto roztworu NaCl o stężeniach:

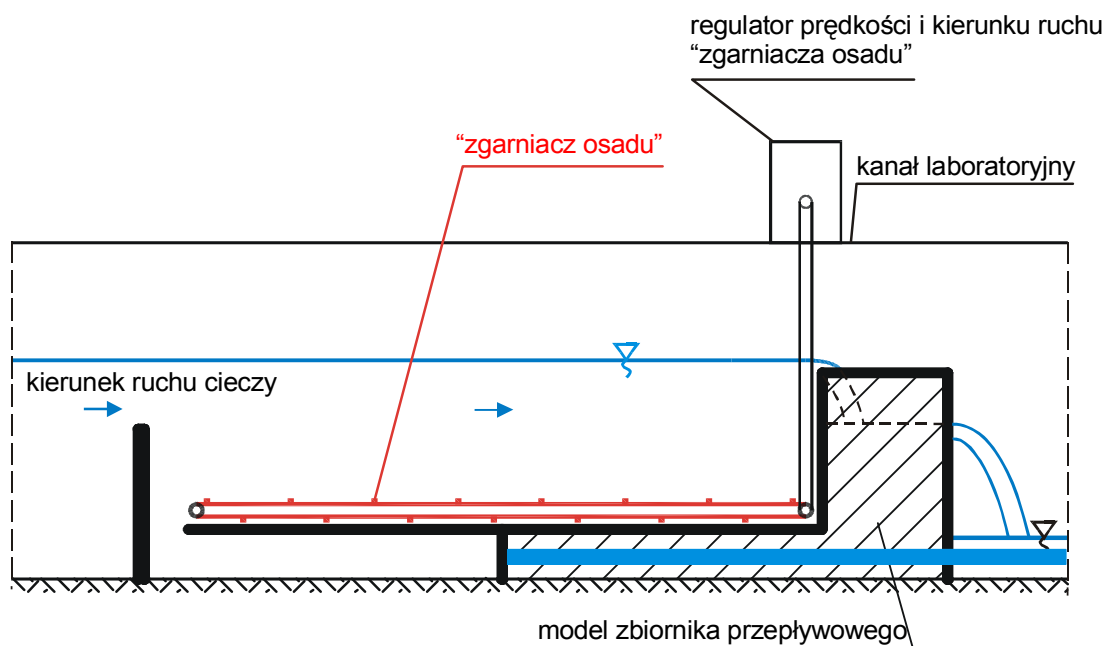
a) $C_0 = 300 \text{ g/dm}^3$,

b) $C_0 = 100 \text{ g/dm}^3$.

Roztwór ten barwiono nadmanganianem potasu w celu wizualizacji przebiegu procesu. Uzyskane w wyniku pomiarów wartości przewodności elektrycznej w [S/m], zostały przeliczone na wielkość stężenia za pomocą uprzednio wykonanych krzywych cechowania dla obu mierników (patrz rozdz. 6.6.2.1).

Badania wykonano dla podobnych jak w przypadku fluorymetrii proporcji wydatków $Q_R:Q_O$, a mianowicie: 1:2, 1:1 oraz 2:1. Sumaryczny wydatek przepływającej przez obiekt wody wynosił $Q = 1,68 \text{ l/s}$. Dla każdego rozpatrywanego przypadku wykonywano trzykrotny pomiar, a wyniki uśredniano.

Jako element dodatkowy postanowiono zbadać wpływ zgarniaczy osadu na parametry hydrauliczne reaktora. W tym celu wyposażono stanowisko badawcze w urządzenie imitujące zgarniacz osadu z dna zbiornika (patrz rys. 6.18 oraz fot. 6.16). Element ten składał się z zamocowanej na rolkach taśmy o szerokości zbliżonej do szerokości kanału. Taśma wprawiana była w ruch za pomocą urządzenia napędowego, sterowanego elektronicznie, umożliwiającego regulację prędkości i kierunku ruchu z dużą dokładnością. Zgarniacze osadu w osadnikach pracują z niewielkimi prędkościami (rzędu $10 \div 60 \text{ mm/s}$) i takie też prędkości zastosowano podczas przeprowadzania badań. Przebieg i metodyka pomiarów były identyczne jak dla stanowiska przed modyfikacją.



Rys. 6.18. Schemat komory modelu reaktora wyposażonej w „zgarniacz osadu”

Dane z pomiarów posłużyły następnie do wykreślenia krzywych rozkładu stężenia w obydwu przekrojach odpływowych z reaktora, będących próbą określenia jego dynamicznych charakterystyk pracy. Przykłady uzyskanych wykresów przedstawiono na rysunkach 6.19, 6.20 i 6.21.

6.5.3. Dyskusja wyników. Ocena dokładności metody konduktometrycznej

W ujęciu ogólnym pomiary konduktometryczne posiadają szereg zalet, takich jak prostota kalibracji i działania, niezawodność oraz powtarzalność a także możliwość ich stosowania w dużym zakresie temperatur i ciśnień. Nie bez znaczenia jest również przystępna cena zarówno sprzętu jak i stosowanych do pomiarów traserów (np. soli kuchennej). Do zasadniczych wad tych pomiarów można zaliczyć ich nieselektywność oraz znaczny wpływ temperatury na pomiar.

Analizując przebieg i wyniki wykonanych wstępnie na stanowisku laboratoryjnym badań rozpoznawczych, stwierdzono, iż zastosowanie metody konduktometrycznej, w badaniach o charakterze przepływowym prócz wymienionych wyżej wad wymaga rozwiązania kilku innych istotnych problemów.

Najpoważniejszą trudnością okazało się określenie stężenia stosowanego jako znacznik roztworu solanki. Problem stanowiły nie tylko możliwości samego sprzętu pomiarowego, lecz również właściwości traseru. Początkowo zastosowano impuls solanki o stężeniu $C_0 = 300$ g/l. Próby laboratoryjne wykazały jednak, iż stężenie to by-

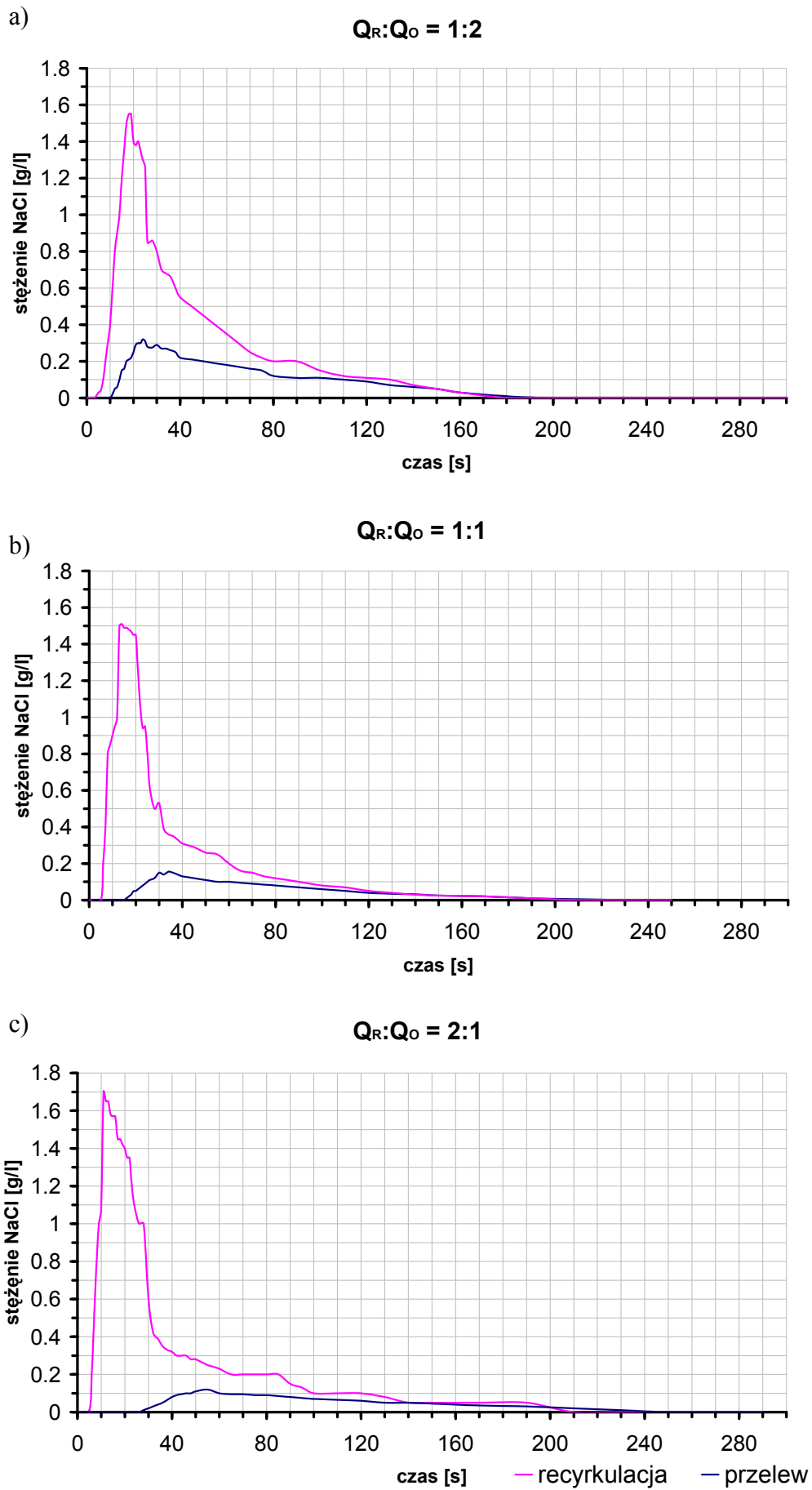
ło zdecydowanie zbyt duże, gdyż w przypadku soli znaczną rolę odgrywał jej ciężar. Powodował on, że traser nie był unoszony wraz z przepływającą wodą, ale opadał na dno [3]. Wyniki uzyskane z takich pomiarów nie odzwierciedlają prawidłowo pracy obiektu, gdyż niezależnie od zastosowanych parametrów przepływu (stosunek Q_R do Q_O), wyznaczony na ich podstawie obraz dynamiki obiektu praktycznie nie ulega zmianie (patrz rys. 6.19). Fala odpływająca szczeliną recyrkulacyjną zawsze pojawiała się już po kilku sekundach od rozpoczęcia eksperymentu. Za każdym razem była ona znacznie wyższa od tej odpływającej przelewem. Jej maksymalna wartość praktycznie nie zależała od zastosowanych proporcji wydatków $Q_R : Q_O$.

W kolejnym kroku, wykonano kilka serii badań z zastosowaniem trzykrotnie mniejszego stężenia traseru, czyli $C_0 = 100$ g/l [32]. W części tych badań uruchamiano taśmę symulującą zgarniacz osadu. Choć nie udało się wyeliminować całkowicie wpływu ciężaru solanki na wyniki badań, uzyskane z tej serii wykresy (patrz rys. 6.20) wykazały już pewną tendencję, porównywalną z rezultatami badań finalnych, fluorymetrycznych. Mianowicie parametry obu charakterystyk odpływowych (przelewowej oraz recyrkulacyjnej) zależały nieco od wzajemnych proporcji zastosowanych wydatków odpływowych. Pojawił się tu jednakże kolejny problem, związany ze słabnącą detekcją niewielkich już w tym przypadku stężeń znacznika w przekrojach odpływowych, zwłaszcza podczas rejestracji „ogona” fali. Tak więc bardzo trudne okazało się zoptymalizowanie stężenia traseru dla opisywanego tu rodzaju badań.

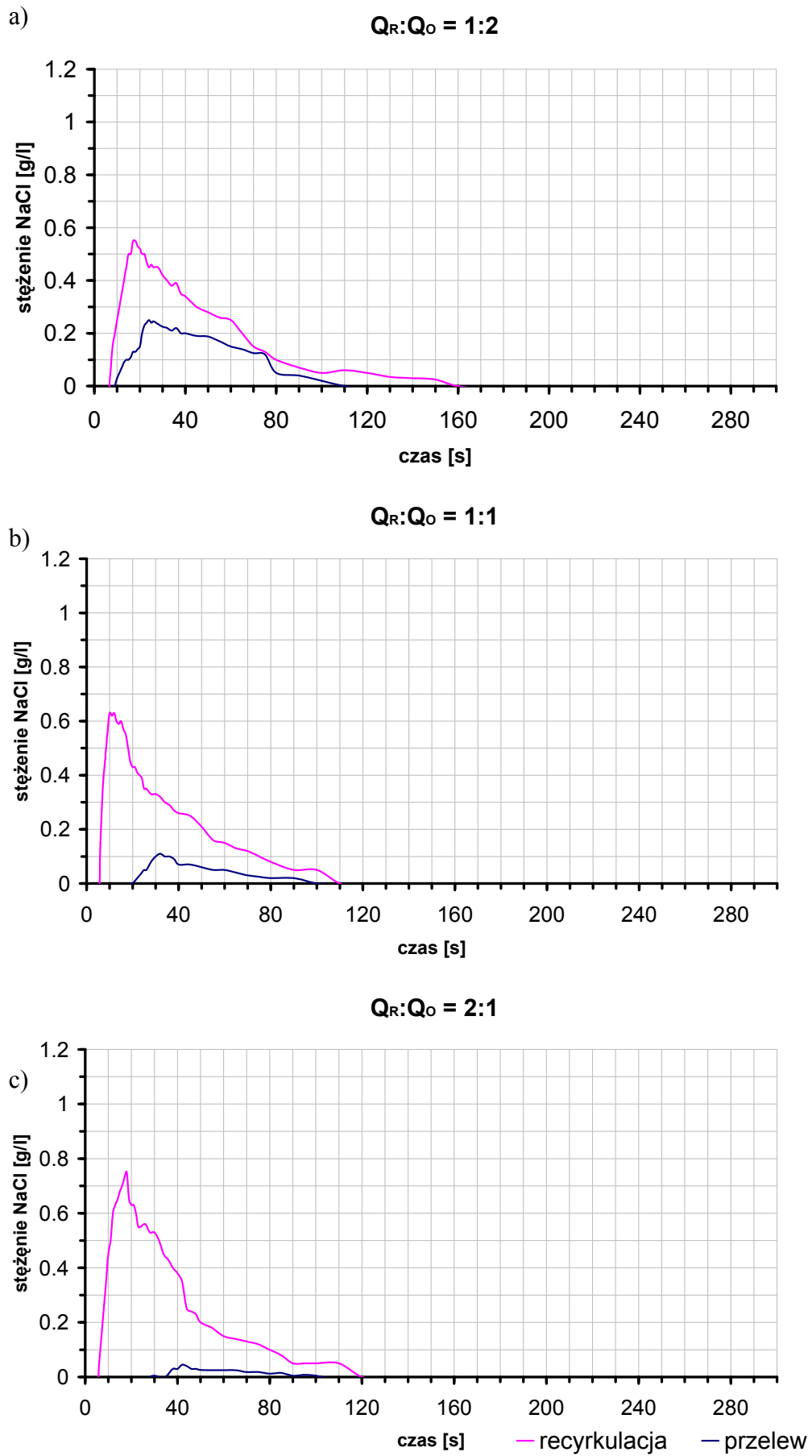
Wyniki pomiarów ze „zgarniaczem osadu” (patrz rys. 6.21) porównano z wykresami sporządzonymi na podstawie pomiarów bez tego elementu (rys. 6.20). Stwierdzo, że jego wpływ na charakterystyki odpływowe obiektu jest bardzo niewielki. Zaobserwowano jedynie w kilku przypadkach nieznaczne skrócenie czasu przepływu znacznika szczeliną recyrkulacyjną. Pozostałe parametry odpływu nie wykazały istotnych różnic. Zdecydowano zatem, iż w dalszych badaniach można pominąć wpływ zgarniacza na dynamikę obiektu.

Porównując jakość pracy sprzętu i uzyskiwanych danych z pomiarów konduktometrycznych oraz fluorymetrycznych, nie sposób pominąć kwestii czułości i bezwładności obu typów urządzeń. Fluorymetr okazał się w tej dziedzinie dużo lepszym miernikiem, jego precyzja i szybkość reakcji na zmianę stężenia, bardzo przecież w pomiarach przepływowych istotna, kilkakrotnie przewyższała parametry uzyskiwane przez konduktometrię.

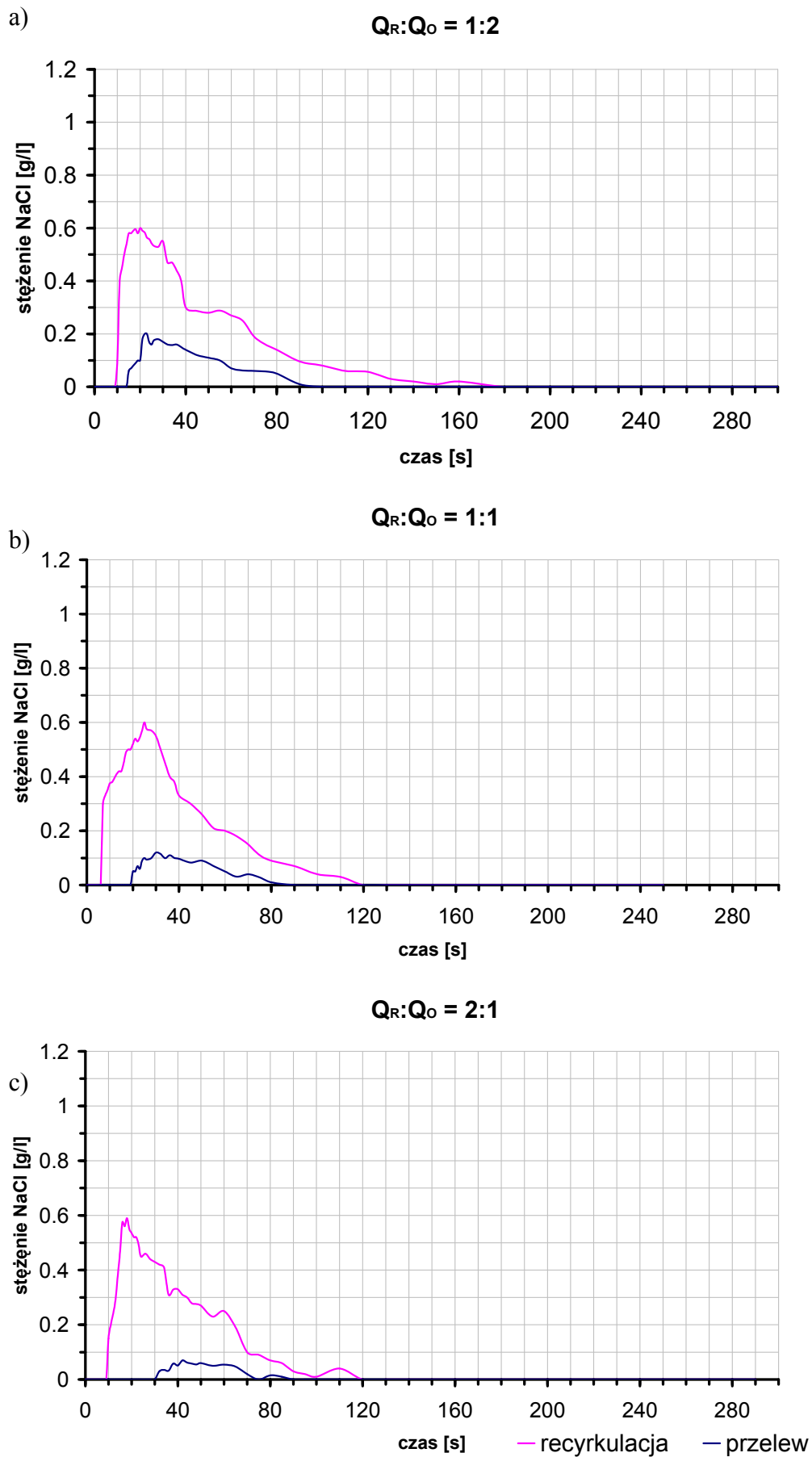
Wstępne doświadczenia wykonane z zastosowaniem roztworu soli metodą konduktometryczną nie dały wprawdzie wyników, mogących posłużyć do opracowania zadowalającego modelu opisu pracy reaktora przepływowego, niemniej stanowiły ważny etap w poszukiwaniu odpowiedniej metody pomiarów laboratoryjnych. Wykresy sporządzone na bazie pomierzonych parametrów przepływu wskazały kierunek dalszych badań i stanowiły źródło cennych wniosków dotyczących zarówno metodyki jak i samego rozpoznania charakterystyki hydraulicznej obiektu.



Rys. 6.19. Wyniki pomiarów konduktometrycznych: NaCl 300 g/l (opis w tekście)



Rys. 6.20. Wyniki pomiarów konduktometrycznych: NaCl 100 g/l (opis w tekście)



Rys. 6.21. Wyniki pomiarów konduktometrycznych ze „zgarńaczem osadu”:
NaCl 100 g/l (opis w tekście)

7. Matematyczny model reaktora

7.1. Wybór schematu numerycznego do opisu pracy reaktora

Aby rozwiązać w sposób teoretyczny konkretny problem techniczny, należy stworzyć jego model matematyczny, co uzyskuje się w trakcie formułowania zagadnienia. Na proces formułowania zagadnienia składają się trzy następujące elementy:

- dobranie zamkniętego układu równań fizyki matematycznej (zazwyczaj równań różniczkowych cząstkowych);
- wyznaczenie geometrycznej charakterystyki układu fizycznego (obszaru całkowania), dla którego poszukiwane jest rozwiązanie, wraz z informacjami o jego własnościach;
- określenie zestawu warunków granicznych, złożonych w ogólnym przypadku z warunków początkowych i brzegowych.

Problem, badany i opisywany w ramach niniejszej pracy należy do kategorii zagadnień skomplikowanych, opisywanych zestawem równań różniczkowych ze zmiennymi współczynnikami. W takich przypadkach jedynym skutecznym narzędziem teoretycznego rozwiązania problemu są metody numeryczne.

Dobierając schemat numeryczny należy pamiętać o jego właściwościach. Rozwiązanie numeryczne obarczone jest zawsze błędem wynikającym z pominięcia w rozwinięciu funkcji w szereg Taylora członów zawierających pochodne wyższych rzędów. Należy więc, przyjmując do rozwiązywania konkretnego zagadnienia schemat numeryczny, określić jego własności i poszukiwać takiej metody, która pozwoli wyeliminować lub zminimalizować błędy powstające w procesie numerycznego rozwiązania równania różniczkowego.

Matematyczny model rozpatrywanego w pracy przypadku reaktora przepływowego stanowi *2D płaski pionowy model transportu* (patrz rozdz.5.3.3). Równanie transportu, które w tym przypadku jest *równaniem adwekcji-dyversji*, przyjmuje postać (5.29). Zaś pole prędkości w reaktorze opisywane jest *równaniem biharmonicznym* (5.88). Do rozwiązania zarówno równania biharmonicznego jak i równania adwekcji-dyversji zastosowano *metodę różnic skończonych*. Sposoby aproksymacji poszczególnych członów oraz zastosowane do rozwiązania obu równań schematy numeryczne omówiono w rozdziale 7.2.

7.2. Metoda różnic skończonych

7.2.1. Sposoby aproksymacji pochodnych

Jak już wspomniano do opracowania matematycznego modelu reaktora recykulacyjnego zastosowano metodę różnic skończonych. Jest ona bardzo dobrze opisana w literaturze (np. [6, 18, 36, 42]), co w dużej mierze decyduje o jednolitości uzyskiwanych za jej pomocą rozwiązań szeregu zagadnień.

Metoda różnic skończonych polega na zastąpieniu równań różniczkowych odpowiednimi równaniami różnicowymi, które otrzymuje się poprzez aproksymację pochodnych w równaniu różniczkowym różnicami skończonymi. Te zaś wyprowadza się z rozwinięcia funkcji $f(x,t)$ w szereg Taylora wokół punktu aproksymacji (x_0, t_0) :

$$f(x_0 + \Delta x, t_0) = f(x_0, t_0) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta x^i}{i!} \left. \frac{\partial^i f}{\partial x^i} \right|_{x_0}^{t_0} \quad (7.1)$$

$$f(x_0, t_0 + \Delta t) = f(x_0, t_0) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta t^i}{i!} \left. \frac{\partial^i f}{\partial t^i} \right|_{x_0}^{t_0} \quad (7.2)$$

Formuły (7.1) i (7.2) stanowią tylko przykład rozwinięć w szereg Taylora. Analogicznie można wyprowadzić wyrażenia dla $x_0 - \Delta x$ oraz $t_0 - \Delta t$. W zależności od ilości uwzględnionych członów rozwinięcia można konstruować różne formuły aproksymujące pochodne różnych rzędów (ilorazy przednie, wsteczne, centralne, wielopunktowe symetryczne i niesymetryczne). Natomiast człony szeregu Taylora, które zostały odrzucone, stanowią tzw. błąd obcięcia, który decyduje o dokładności, z jaką aproksymowana jest pochodna.

Na przykład jeśli dokonamy aproksymacji pochodnej względem x , wówczas możemy zapisać wyrażenie (7.1) następująco:

$$f(x_0 + \Delta x, t_0) = f(x_0, t_0) + \Delta x \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0}^{t_0} + \frac{\Delta x^2}{2} \left. \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right|_{x_0}^{t_0} + O(\Delta x^3) \quad (7.3)$$

gdzie: $O(\Delta x^3)$ – reszta z rozwinięcia w szereg Taylora.

W celu rozwiązania równań tworzących przedstawiany tu model matematyczny, a mianowicie równania biharmonicznego (5.88) oraz równania adwekcji-dyferencji (5.29), zastosowano jawny schemat numeryczny [1, 42] z wykorzystaniem ilorazów

różnicowych dla pochodnych pierwszego, drugiego oraz czwartego rzędu. Oznaczając jako j poziom obliczeniowy wzdłuż osi X , jako i poziom obliczeniowy wzdłuż osi Z zaś jako k poziom czasowy obliczeń, użyto następujących wyrażeń:

- w przypadku aproksymacji pierwszych pochodnych zastosowano ilorazy różnicowe centralne o postaci:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong \frac{(\Delta f)_{i,j+1}^k - (\Delta f)_{i,j-1}^k}{2\Delta x} \quad (7.4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} \cong \frac{(\Delta f)_{i+1,j}^k - (\Delta f)_{i-1,j}^k}{2\Delta z} \quad (7.5)$$

z dokładnością $O(\Delta x^2)$,

- w przypadku aproksymacji drugich pochodnych ilorazy te wyglądały następująco:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \cong \frac{(\Delta f)_{i,j+1}^k - 2(\Delta f)_{i,j}^k + (\Delta f)_{i,j-1}^k}{\Delta x^2}, \quad (7.6)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \cong \frac{(\Delta f)_{i+1,j}^k - 2(\Delta f)_{i,j}^k + (\Delta f)_{i-1,j}^k}{\Delta z^2}, \quad (7.7)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2 \partial z^2} \cong \frac{\left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta x^2}\right)_{i,j+1}^k - 2\left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta x^2}\right)_{i,j}^k + \left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta x^2}\right)_{i,j-1}^k}{\Delta z^2} \quad (7.8)$$

z dokładnością $O(\Delta x^2)$,

- natomiast występujące w równaniu biharmonicznym wyrażenia czwartego rzędu przekształcono posługując się zależnościami:

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} = \frac{\partial^2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)}{\partial x^2}, \quad (7.9)$$

$$\frac{\partial^4 f}{\partial z^4} = \frac{\partial^2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right)}{\partial z^2}, \quad (7.10)$$

które dalej zastapiono formułami typu (7.6) i (7.7), uzyskując:

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} \cong \frac{\left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta x^2}\right)_{i,j+1}^k - 2\left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta x^2}\right)_{i,j}^k + \left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta x^2}\right)_{i,j-1}^k}{\Delta x^2} \quad (7.11)$$

$$\frac{\partial^4 f}{\partial z^4} \cong \frac{\left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta z^2}\right)_{i+1,j}^k - 2\left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta z^2}\right)_{i,j}^k + \left(\frac{\Delta^2 f}{\Delta z^2}\right)_{i-1,j}^k}{\Delta z^2}. \quad (7.12)$$

7.2.2. Zastosowane schematy numeryczne

Pole prędkości opisywane jest *równaniem biharmonicznym* (5.88). Do rozwiązania tego równania zastosowano *metodę różnic skończonych*, stosując przy aproksymacji członów z pochodnymi drugiego i czwartego rzędu schematy centralne. Otrzymany układ równań algebraicznych rozwiązano metodą iteracyjną.

W przypadku równania adwekcji-dyspersji 2D (5.29), szerokie zastosowanie znajdują bezpośrednie metody rozwiązania. Rozpatrywane równanie rozwiązywać można stosując oddzielne schematy dla członów: adwekcyjnego oraz dyspersyjnego. Jest to podstawa tzw. techniki dekompozycji i jest to dekompozycja ze względu na procesy fizyczne. Zagadnienie można także dekomponować względem zmiennych niezależnych (problemy trój- i dwuwymiarowe można rozkładać na szereg zadań jednowymiarowych). Metoda ta jest znana w literaturze pod nazwą „*splitting technique*” lub „*factorised steps*” i jest stosowana od wielu lat z dobrym rezultatem [11, 15, 36, 54]. W pracy wykorzystano wspomnianą tu technikę, każdy z rozpatrywanych członów równania ma bowiem inny charakter; i tak część adwekcyjna ma charakter hiperboliczny zaś dyspersyjna – paraboliczny.

7.2.2.1. Równanie biharmoniczne

W celu numerycznego rozwiązania równania biharmonicznego jego poszczególne elementy przybliżono formułami (7.8), (7.11) i (7.12). W wyniku takiego podejścia otrzymujemy równania algebraiczne aproksymujące równanie biharmoniczne w poszczególnych węzłach siatki obliczeniowej bazując na trzynastu sąsiadujących węzłach siatki. Równania tworzą układ, który można rozwiązać jedną ze znanych metod dokładnych. Ze względu na wielkość otrzymanego układu równań zdecydowanie skuteczniejsze są metody iteracyjne. W niniejszej pracy przyjęto metodę nadrelaksacji [54], stosując współczynnik nadrelaksacji $\omega = 1,44$. W metodzie tej przybliżenie wartości ψ w węźle (i,j) w kolejnych krokach iteracji (m) określamy zgodnie ze wzorem:

$$\psi_{i,j}^{(m+1)} = \psi_{i,j}^{(m)} + \frac{\omega}{4} r_{i,j}^{(m)} \quad (7.13)$$

gdzie człon $r_{i,j}$ wynika z przyjętej aproksymacji równania biharmonicznego w danym węźle (rozd. 7.2.5.1).

7.2.2.2. Równanie adwekcji

Do rozwiązania części adwekcyjnej równania (5.29) wykorzystano bezpośrednią metodę zachowawczą Laxa, w której dla przypadku dwuwymiarowego schemat różnicowy przyjmuje postać [42]:

$$\begin{aligned} f_{i,j}^{k+1} = & \frac{1}{4}(f_{i+1,j}^k + f_{i-1,j}^k + f_{i,j+1}^k + f_{i,j-1}^k) + \\ & - \frac{\Delta t}{2\Delta} v_x (f_{i+1,j}^k - f_{i-1,j}^k) - \frac{\Delta t}{2\Delta} v_z (f_{i,j+1}^k - f_{i,j-1}^k) \end{aligned} \quad (7.14)$$

Rozwiązanie numeryczne z zastosowaniem schematu jawnego pierwszego rzędu z krokiem w czasie Δt oraz z krokiem Δ w przestrzeni ($\Delta = \Delta x = \Delta z$, ponieważ do obliczeń zastosowano siatkę kwadratową - patrz rozdz. 7.2.3) zawsze obarczone jest błędami i stabilne warunkowo. Należy więc określić dokładność oraz stabilność przyjętej metody. Stosując metodę, polegającą na wprowadzeniu współczynnika wzmocnienia dla przestrzennej składowej Fouriera do schematu różnicowego oraz uwzględniając kryterium stabilności von Neumana [42], w celu otrzymania stabilnego rozwiązania musi być spełniona relacja:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta}{(v_x^2 + v_z^2)^{1/2} \sqrt{2}}. \quad (7.15)$$

Tak sformułowany warunek stabilności nakładany na krok czasowy zwany jest warunkiem Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego (CFL), odnoszącym się do równań typu hiperbolicznego 2D. Z warunku (7.15) wynika, że aby otrzymać stabilne rozwiązanie numeryczne należy wybrać krok czasowy mniejszy od najmniejszego, charakterystycznego dla danego zagadnienia czasu. W przypadku równania adwekcji jest to czas, jakiego potrzeba na przeniesienie się z prędkością v na odległość Δ . Warunek CFL zapewnia, że prędkość fizyczna v jest mniejsza od prędkości siatki $\Delta/\Delta t$.

7.2.2.3. Równanie dyspersji

Dla równań typu parabolicznego, a taki charakter ma dyspersyjna część równania (5.29), stosuje się takie same zasady podejścia różnicowego jak dla równań hiperbolicznych, ale inne algorytmy dają tu zadowalające efekty.

W pracy zastosowano prosty schemat bezpośredni pierwszego rzędu, którego algorytm przedstawia się następująco [42]:

$$\begin{aligned}
 f_{i,j}^{k+1} = & f_{i,j}^k + \frac{\Delta t}{\Delta^2} + [K_{XXi,j}(f_{i,j+1}^k + f_{i,j-1}^k - 2f_{i,j}^k) + \frac{1}{2}K_{XZi,j}(f_{i+1,j+1}^k - f_{i+1,j-1}^k - f_{i-1,j+1}^k + \\
 & - f_{i-1,j-1}^k) + K_{ZZi,j}(f_{i+1,j}^k + f_{i-1,j}^k - 2f_{i,j}^k) + \frac{1}{4}(K_{XXi,j+1} - K_{XXi,j-1} + K_{XZi+1,j} - \\
 & + K_{XZi-1,j})(f_{i,j+1}^k - f_{i,j-1}^k) + \frac{1}{4}(K_{XZi,j+1} - K_{XZi,j-1} + K_{ZZi+1,j} - K_{ZZi-1,j})(f_{i+1,j}^k - f_{i-1,j}^k)] \quad (7.16)
 \end{aligned}$$

Metoda ta ma dokładność pierwszego rzędu względem kroku czasowego, którego ograniczenie ze względu na stabilność wyznaczone jest wzorem:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta^2}{4D} \quad (7.17)$$

Warunek ten zapisać można również w innej postaci, a mianowicie:

$$C_d \leq 0.25 \quad (7.18)$$

gdzie:

$$C_d = \frac{D\Delta t}{\Delta^2} \quad (7.19)$$

jest dyfuzyjną liczbą Couranta.

Jako rezultat końcowy wprowadzenia ilorazów różnicowych w miejsce poszczególnych pochodnych równania różniczkowego otrzymano układ równań algebraicznych, który do domknięcia wymagał jeszcze zadania odpowiedniej ilości warunków brzegowych. Rozwiązanie tego układu w każdym punkcie dokonywania aproksymacji dało przybliżone rozwiązanie równania różniczkowego na każdym poziomie czasowym.

7.2.3. Obszar poszukiwania rozwiązania i jego dyskretyzacja

Ten element zagadnienia określany jest zawsze indywidualnie. Realne układy najczęściej mają skończone rozmiary. Jednakże niekiedy wygodnie jest traktować taki układ jako nieograniczony: względem wszystkich trzech wymiarów geometrycznych, lub częściowo – względem dwóch lub tylko jednego. Mamy wtedy zagadnienia

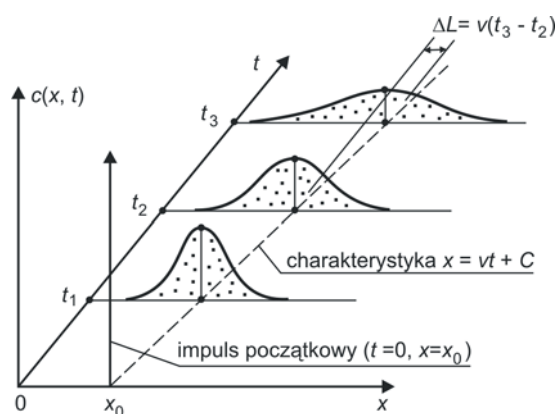
zachodzące odpowiednio: w nieograniczonej przestrzeni, na nieograniczonej powierzchni (zagadnienia płaskie) lub wzdłuż nieograniczonej linii.

Typowym przykładem jest tu klasyczne rozwiązanie równania adwekcji dla nieograniczonego strumienia jednokierunkowego i jednowymiarowego, przy stałej prędkości adwekcji v , gdy początkowy rozkład stężenia substancji rozpuszczonej ma charakter impulsu, usytuowanego w punkcie $x = 0$. Rozwiązanie to ma postać funkcji [50]:

$$c(x, t) = \frac{M}{2S\sqrt{D_e\pi t}} \exp\left[-\frac{(x - vt)^2}{4D_e t}\right] \quad (7.20)$$

gdzie: M – masa substancji, wprowadzonej impulsowo do strumienia,
 S – przekrój poprzeczny strumienia.

Geometryczną interpretację relacji (7.20) przedstawiono na rysunku 7.1.



Rys. 7.1. Rozwiązanie równania adwekcji-dyfuzji w obszarze nieograniczonym [50]

Jednakże posługiwanie się obszarami nieograniczonymi jest możliwe tylko wtedy, gdy szukamy rozwiązania w postaci analitycznej. Możliwość taka jest dość rzadka [10]. W praktyce powszechnie rozwiązujemy zagadnienia numerycznie, przy pomocy maszyn liczących. W takich przypadkach rozważany obszar musi być ograniczony (ze względu na ograniczoną pojemność pamięci komputera).

Stwierdzenie to pozwala przejść do zagadnienia określania *granic obszaru*. Aby zdefiniować układ fizyczny i scharakteryzować jego geometrię, konieczne jest wydzielenie obiektu lub zespołu obiektów z otoczenia. Tym samym definiuje się granicę, oddzielającą układ od otoczenia, która zwana jest też *brzegiem obszaru*. W najogólniejszym przypadku trójwymiarowym ma ona charakter powierzchni i może stanowić:

- *brzeg fizyczny*, wyznaczony przez powierzchnie, linie, punkty materialne (pokrywające się z nimi),
- *brzeg matematyczny*, jeśli oddzielona jest od reszty obszaru pewną niematerialną arbitralnie wyznaczoną powierzchnią lub linią geometryczną.

Granice matematyczne wyznaczamy najczęściej wtedy, gdy rozważany układ jest obszerny, co utrudnia lub wręcz uniemożliwia rozwiązanie zadania (na przykład z braku danych wejściowych).

Dokładny opis brzegu wymaga dodatkowo określenia jego rodzaju. W tym celu należy ustalić czy dany brzeg jest sztywny czy odkształcalny, ruchomy czy nieruchomy oraz przepuszczalny czy nie.

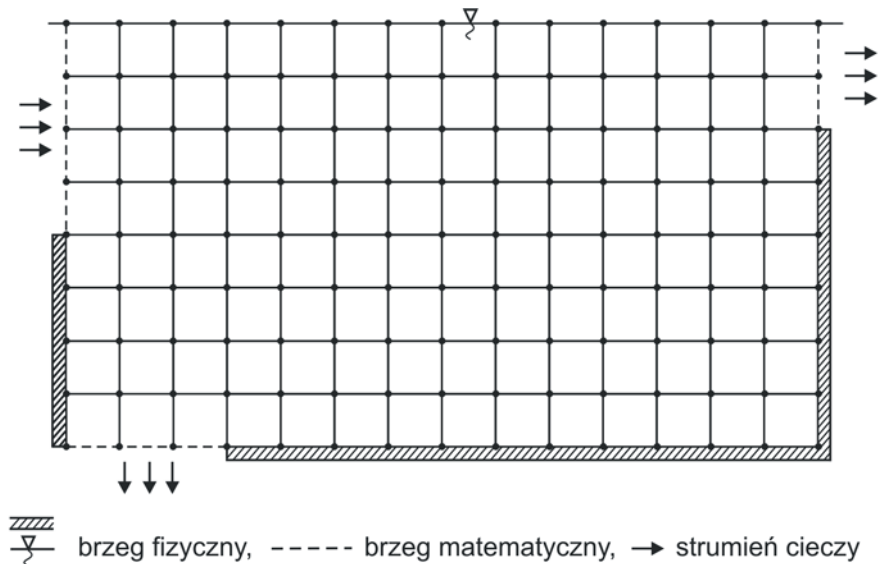
Kolejnym krokiem poprzedzającym zastosowanie metody numerycznej do rozwiązania zagadnienia opisanego równaniami fizyki matematycznej jest zastąpienie ciągłego obszaru rozwiązania *obszarem dyskretnym*. Polega ono na pokryciu wybranego obszaru punktami zwanymi *węzłami*. Właśnie w tych węzłach poszukujemy rozwiązania równania. Sposób dyskretyzacji obszaru rozwiązania zależy ściśle od rodzaju rozpatrywanego problemu oraz od wybranej metody numerycznej. I tak dla zagadnień przestrzennych dzielimy obszar na bryły, dla płaskich – na figury płaskie, natomiast dla przypadków jednowymiarowych otrzymujemy odcinki. Jeśli zastosujemy do rozwiązania metodę różnicową, wówczas rozmieszczamy węzły zazwyczaj w sposób regularny, zaś w metodzie elementów skończonych możemy tego podziału dokonać w sposób nieregularny.

Obok dyskretyzacji przestrzennej dokonuje się także dyskretyzacji w czasie. Ma ona zazwyczaj charakter regularny, czyli po przestrzeni czasowej poruszamy się ze stałym krokiem Δt .

Jako obszar rozwiązania zarówno równania biharmonicznego jak i adwekcji-dyferencji przyjęto przekrój modelu osadnika, dla którego przeprowadzono badania laboratoryjne, zachowując jego naturalne wymiary. Do obliczeń numerycznych zastosowano regularny podział obszaru z użyciem siatki kwadratowej o boku każdego z „oczek” siatki równym 1cm.

Granice fizyczne modelu utworzone są przez sztywne ścianki boczne i denne oraz swobodną powierzchnię przepływającej przez niego cieczy. Natomiast granice matematyczne stanowią poprzeczne przekroje: wlotowy i wylotowy.

Rysunek 7.2 przedstawia w sposób poglądowy dyskretyzację obszaru modelu laboratoryjnego oraz rodzaje przyjętych granic.



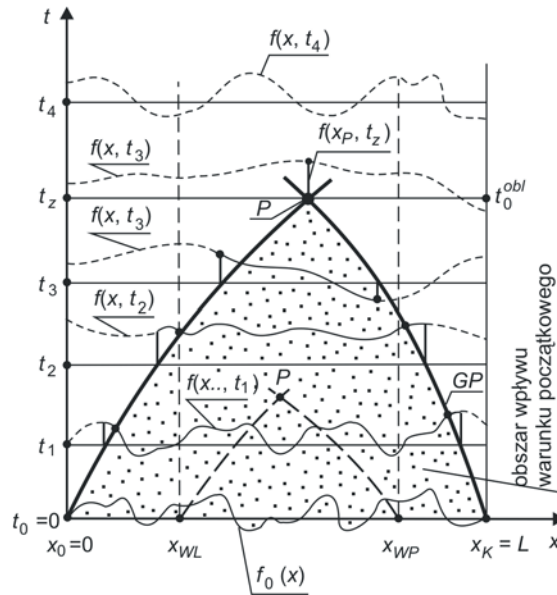
Rys.7.2. Granice fizyczne i matematyczne oraz sposób dyskretyzacji obszaru modelu reaktora przepływowego

7.2.4. Warunki graniczne

7.2.4.1. Warunki początkowe

Formułowanie warunków początkowych konieczne jest tylko wtedy, gdy mamy do czynienia z procesem nieustalonym, czyli zmiennym w czasie. Określają one wartość szukanej funkcji (lub kilku szukanych funkcji) w chwili początkowej $t = t_0$ (najwygodniej jest przyjąć $t_0 = 0$).

Określenie warunku początkowego bywa niejednokrotnie trudne, gdy brak odpowiednich danych archiwalnych, a układ ulega ciągłym przemianom. W takich przypadkach stosuje się często metodę przybliżonego stawiania warunku początkowego, która bazuje na tzw. Zasadzie zanikającej pamięci układu fizycznego [50]. Wykorzystuje się tu fakt, że wpływ zadanego warunku początkowego na rozwiązanie trwa tylko przez pewien czas t_z , od chwili t_0 do $t_0 + t_z$ (przykład – patrz rys.7.3). Możemy dzięki temu przyjąć przybliżony warunek początkowy (nawet dowolnie), a obliczenia traktować jako dokładne dopiero dla $t > t_0 + t_z$. Wartość t_z należy wyznaczyć metodą prób.



Rys. 7.3. Ilustracja „zasady zanikającej pamięci” dla równania hiperbolicznego [50]

W przypadku numerycznego rozwiązania zarówno równania biharmonicznego jak i adwekcji-dyspersji, konieczne było zadanie w całym obszarze obliczeniowym początkowych wartości poszukiwanych funkcji, odpowiednio funkcji prądu ψ (przyjęto $\psi_0 = 1$) oraz stężenia traseru C (przyjęto $C_0 = 0$).

7.2.4.2. Warunki brzegowe

Warunki brzegowe stanowią relacje matematyczne, które interesująca nas funkcja spełnia na brzegu obszaru, w którym poszukiwane jest rozwiązanie. Liczba tych warunków musi być równa rzędowi rozwiązywanego równania, a sposób ich postawienia zależy od typu równania (układu równań), opisujących badane zjawisko. Z tego względu ustalamy je indywidualnie dla konkretnych przykładów. Informacje opisywane przez warunki brzegowe mogą mieć jedną z trzech postaci:

- *warunek Dirichleta*, gdy w danym punkcie na brzegu obszaru określona jest wartość każdej z poszukiwanych funkcji,
- *warunek Neumanna*, gdy w danym punkcie brzegu określona jest wartość pochodnej szukanej funkcji, w kierunku normalnym do brzegu,
- *warunek Hankela*, gdy w danym punkcie określony jest związek pomiędzy wartością szukanej funkcji a jej pochodną normalną do brzegu.

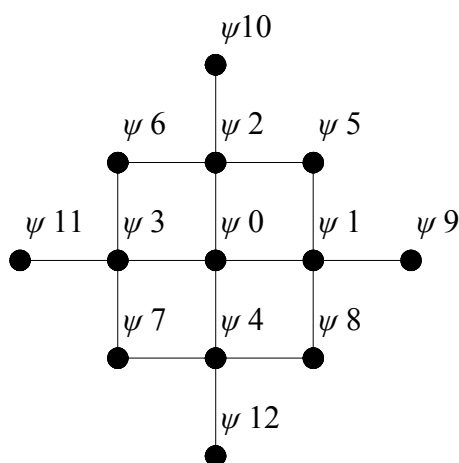
Rozwiązanie równania biharmonicznego wymagało zadania w każdym punkcie brzegu obszaru obliczeniowego dwóch warunków – wartości poszukiwanej funkcji ψ (warunek Dirichleta) oraz wartości pochodnej tej funkcji, w kierunku normalnym do brzegu w tym punkcie (warunek Neumanna).

Funkcja prądu ψ , zadana na brzegu obszaru, przyjmuje wartości od 0 do 100. Do symulacji komputerowej przyjmowano rozdzielenie wydatku cieczy, przepływającej przez modelowany obszar, na część odprowadzaną przelewem oraz „recyrkulowaną” w stosunku takim jak stosowany do badań, to jest: 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3.

7.2.5. Aproksymacja równań różniczkowych i ich rozwiązanie

7.2.5.1. Równanie biharmoniczne

Jak już powiedziano, w celu numerycznego rozwiązania równania biharmonicznego jego poszczególne elementy przybliżono formułami (7.8), (7.11) i (7.12). W równaniu tym występują pochodne czwartego rzędu, dlatego też podstawowy węzeł obliczeniowy bazuje na trzynastu sąsiadujących węzłach siatki (patrz rys. 7.4) [...].



Rys.7.4. Sposób dyskretyzacji obszaru obliczeniowego (podstawowy węzeł obliczeniowy dla równania czwartego rzędu)

Podstawiając wyrażenia aproksymujące do równania (5.88), a następnie zastępując poszczególne elementy odpowiednimi wartościami funkcji ψ na właściwym poziomie obliczeniowym, uzyskujemy aproksymacje równania biharmonicznego dla każdego typu węzła obliczeniowego. Przykładowo dla węzła ψ_0 , znajdującego się całkowicie wewnątrz obszaru obliczeniowego, tzn. mającego w swym otoczeniu wszystkie 12 pozostałych sąsiadujących z nim węzłów ze znanymi wartościami funkcji ψ , otrzymujemy formułę:

$$\Delta\Delta\psi = \frac{1}{\Delta^4} (20\psi_0 - 8(\psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4) + 2(\psi_5 + \psi_6 + \psi_7 + \psi_8) + (\psi_9 + \psi_{10} + \psi_{11} + \psi_{12})) = 0 \quad (7.21)$$

Jako wynik numerycznego rozwiązania równania (5.88) dla każdego badanego przypadku przepływu przez zbiornik, otrzymano wartości funkcji prądu ψ w węzłach siatki. Dokonanie interpolacji wartości ψ pomiędzy węzłami umożliwiło wykreślenie map rozkładu linii prądu w badanym obszarze i obserwacje ich zmian w zależności od zadanych warunków.

W następnym kroku wyznaczano wartość i kierunek wektora prędkości w każdym węźle modelowanego obszaru. Do tego celu wykorzystywano zależności (5.61) oraz (5.62) (patrz. rozdz. 5.4.3).

Otrzymane na drodze symulacji komputerowych wyniki przedstawiono i omówiono w rozdziale 7.3.

7.2.5.2. Równanie adwekcji-dyspersji

Wyznaczone w pierwszej fazie obliczeń numerycznych pole prędkości w obszarze reaktora stanowiło podstawę dalszej części symulacji komputerowych. Jej zadaniem było modelowanie procesu transportu masy, wprowadzanej do obszaru obliczeniowego, a następnie wyznaczenie krzywych rozkładu stężeń tejże masy w obu przekrojach wylotowych z reaktora.

Jako model matematyczny opisujący badane zjawisko przenoszenia masy, przyjęto anizotropowe równanie transportu (5.20). Po uwzględnieniu założeń przyjętych na drodze analizy warunków przepływu w modelu laboratoryjnym (patrz rozdz. 5.3.3), równanie transportu przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} + v_x \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + v_z \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_M + K_{xx} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + K_{xz} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_M + K_{zx} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + K_{zz} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (7.22)$$

Jak wynika z zależności (7.22) zastosowany do obliczeń model zjawiska uwzględnia jego anizotropię. Dlatego też w równaniu tym występują składowe współczynnika dyspersji: K_{xx} , K_{xz} oraz K_{zz} , (patrz rozdz. 5.3.3).

Rozwiązując równanie (7.22) numerycznie uzyskujemy obraz pola stężenia wprowadzonej do obszaru masy w każdym jego punkcie oraz na każdym poziomie czasowym:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{c}}{\partial t} = & K_{xx} \frac{\partial^2 \tilde{c}}{\partial x^2} + 2K_{xz} \frac{\partial^2 \tilde{c}}{\partial x \partial z} + K_{zz} \frac{\partial^2 \tilde{c}}{\partial z^2} + \left(\frac{\partial K_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial K_{xz}}{\partial z} \right) \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} + \\ & + \left(\frac{\partial K_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial K_{zz}}{\partial z} \right) \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} - v_x \frac{\partial \tilde{c}}{\partial x} - v_z \frac{\partial \tilde{c}}{\partial z} \end{aligned} \quad (7.23)$$

Przyjęte sposoby aproksymacji występujących w powyższej formule pochodnych przedstawiono w rozdziale 7.2.1.

Aby dokonać symulacji zjawiska transportu masy za pomocą programu komputerowego, konieczne było ustalenie wartości wszystkich współczynników i stałych, w nim występujących. Dobrano je w następujący sposób:

- współczynnik dyfuzji molekularnej D_M – przyjęto wartość literaturową $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$;
- czas trwania impulsu traseru T_I – zgodnie z rzeczywistym czasem dozowania znacznika w trakcie eksperymentów przyjęto 4s;
- stężenie impulsu traseru C_I – zgodnie z rzeczywistym stężeniem traseru dozowanego w trakcie eksperymentu przyjęto 0,17064 g/l;
- efektywne współczynniki dyspersji podłużnej i poprzecznej: K_L oraz K_T (patrz rozdz. 5.3.3) – doboru wartości tych współczynników dokonano eksperymentalnie, za punkt wyjścia przyjmując wartości i zależności między nimi wyznaczone przez Eldera [16], ostatecznie zastosowano $K_L = 0,00001 \text{ m}^2/\text{s}$ oraz $K_T = 0,0000033 \text{ m}^2/\text{s}$.

7.3. Rezultaty symulacji komputerowych

Podstawą wyznaczenia pola prędkości w modelowanym obszarze jest rozwiązanie równania biharmonicznego. Na rysunku 7.5 przedstawiono uzyskane za pomocą programu, rozwiązania numeryczne równania (5.88). Są to układy linii prądu dla różnych przypadków rozplywu, zgodnych z przypadkami badanymi w laboratorium.

Porównując przebiegi tychże linii (które równocześnie odzwierciedlają rozkład i wartości wektorów prędkości obszarze symulacji - patrz rys. 7.6 i 7.7) z zaobserwowanym i pomierzonym w trakcie badań laboratoryjnych stanem faktycznym, w następującym porządku:

- rys. 7.5a i 7.5b z rys. 6.17 ÷ 6.19,
- rys. 7.5c z rys. 6.20 ÷ 6.22,
- rys. 7.5d i 7.5e z rys. 6.23 ÷ 6.25,

można stwierdzić, iż zastosowany tu model opisu przepływu dobrze oddaje rzeczywistość dla większości rozpatrywanych w pracy przypadków.

Najlepszą zgodność wyników obliczeń i pomiarów uzyskano dla przepływów ze znacznym, większym niż 50% dopływem, poborem cieczy przewodem recyrku-

lacyjnym. Uznano zatem, że wyznaczone za pomocą modelu biharmonicznego rozkłady pola prędkości stanowią zadowalającą podstawę do przeprowadzenia dalszych symulacji komputerowych, których celem było rozwiązanie równania transportu masy w zbiorniku przepływowym zadaną właśnie wysoką wartością stopnia recyrkulacji.

W oparciu o przedstawione na rysunku 7.6 rozkłady linii prądu oraz wyznaczone na ich podstawie pola prędkości przeprowadzono numeryczne symulacje transportu masy impulsowo wprowadzonego do obszaru zbiornika znacznika.

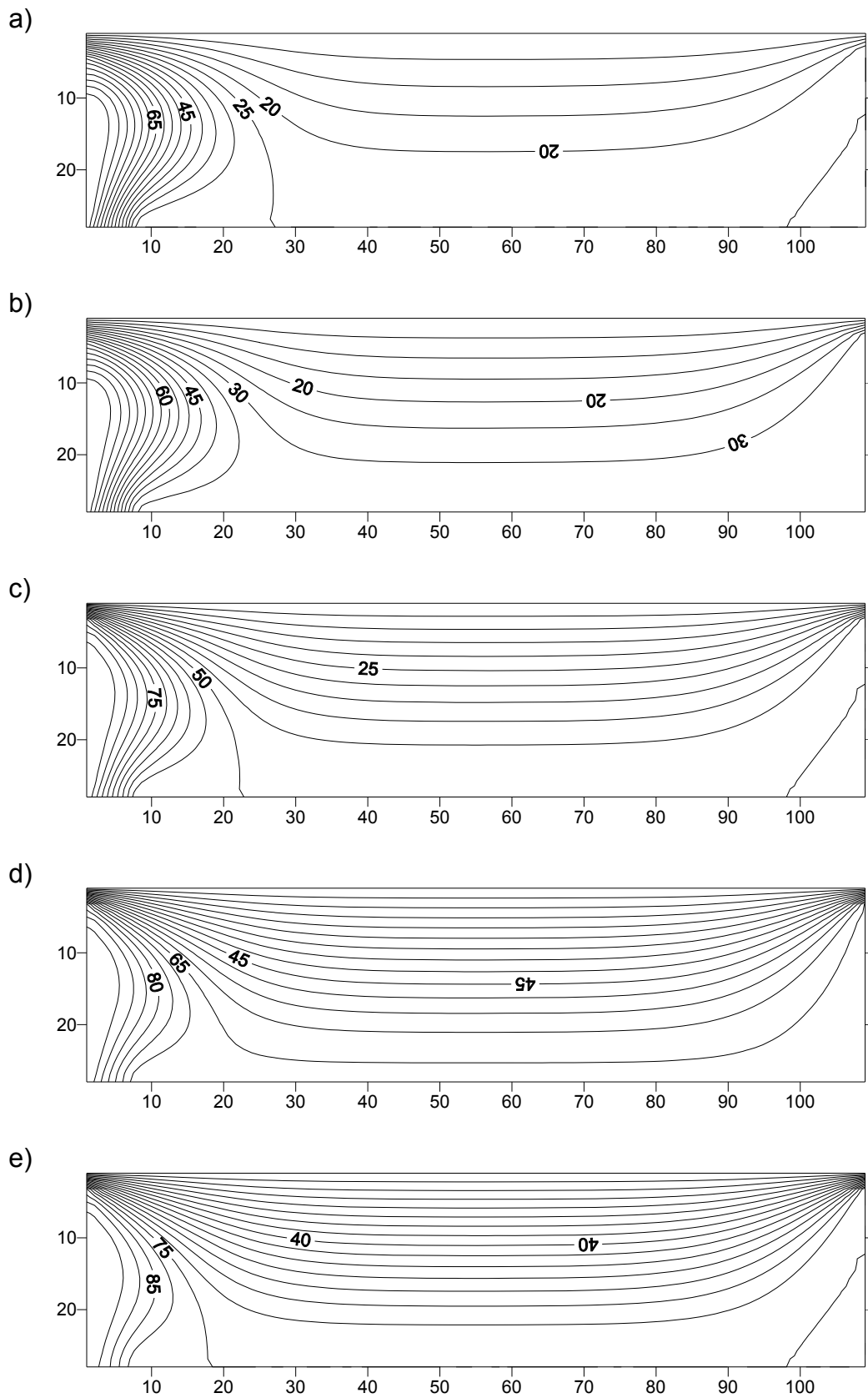
Ważnym etapem symulacji numerycznych było wyznaczenie współczynników dyspersji podłużnej i poprzecznej: K_L oraz K_T . Dokonano tego w procesie kolejnych przybliżeń. Obliczenia rozpoczęto od wartości wyznaczonych z formuł Eldera (5.32) i (5.39). Następnie zmniejszono wartości współczynników K_L oraz K_T aż do momentu uzyskania najbardziej zbieżnych z wynikami eksperymentu rezultatów. Rysunki 7.11, 7.12 i 7.13 przedstawiają wyniki pośrednie i końcowe procesu wyznaczania współczynników dyspersji. Po ich analizie przyjęto następujące wartości współczynników: $K_L = 0,00001 \text{ m}^2/\text{s}$, $K_T = 0,0000033 \text{ m}^2/\text{s}$.

Końcowym celem i rezultatem obliczeń numerycznych było wyznaczenie wykresów zmian stężenia znacznika w obydwu przekrojach pomiarowych (przelew i szczelina recyrkulacyjna) od momentu pojawienia się stężenia traseru w każdym z punktów pomiarowych aż do jego wygaśnięcia. **Krzywe te nazwać można dynamicznymi charakterystykami odpływowymi zbiornika laboratoryjnego.**

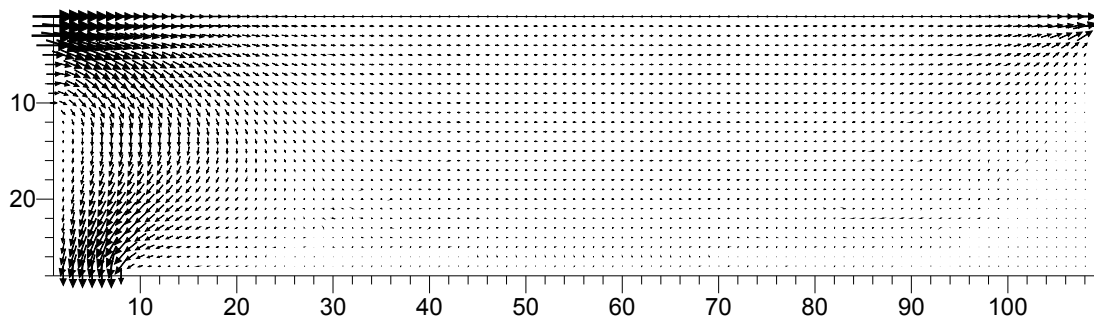
Otrzymane rezultaty zamieszczono na końcu rozdziału 7 na rysunkach 7.8, 7.9 i 7.10, zestawiając je z wynikami pomiarów empirycznych w celu dokonania weryfikacji modelu matematycznego.

Analizując uzyskane na drodze symulacji komputerowych dane i porównując je z wynikami pomiarów laboratoryjnych brano pod uwagę zasadnicze elementy obu charakterystyk odpływowych. Są to:

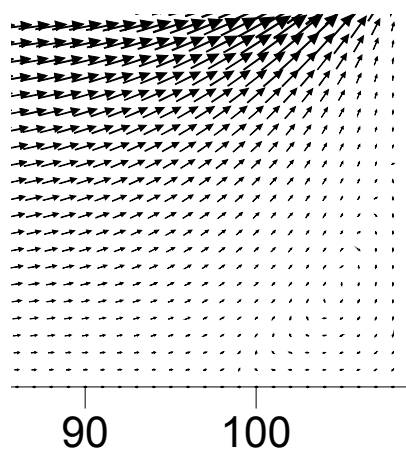
- czas rozpoczęcia poszczególnych fal odpływowych traseru oraz czas ich trwania;
- wartość maksymalnego stężenia traseru w każdym z przekrojów i czas jego wystąpienia;
- procentowy podział masy wprowadzonego traseru pomiędzy obydwa przekroje odpływowe.



Rys.7.5. Układ linii prądu w modelu reaktora recyrkulacyjnego.
 Stosunek $Q_R:Q_O$: a) 3:1, b) 2:1, c) 1:1, d) 1:2, e) 1:3



Rys. 7.6. Rozkład pola prędkości w modelu reaktora recyrkulacyjnego.
Stosunek $Q_R:Q_O = 3:1$



Rys. 7.7. Położenie wektorów prędkości w obszarze zawirowania w narożniku zbiornika recyrkulacyjnego. Stosunek $Q_R:Q_O = 3:1$

Wyniki analiz zebrano w tabeli 7.1. Wynika z nich, iż najlepszą zgodność wszystkich rozpatrywanych parametrów uzyskano dla przepływów z dużą recyrkulacją $Q_R:Q_O = 3:1$ (patrz rys. 7.8) oraz $Q_R:Q_O = 2:1$ (patrz rys. 7.9). Dla pozostałych przypadków, to znaczy dla strumienia recyrkulacyjnego o równej lub niższej wartości wydatku w stosunku do strumienia odpływającego przelewem, zauważyć można pewne rozbieżności wyników (patrz rys. 7.10). Wynikają one zapewne z ograniczonej dokładności przyjętych do rozwiązania metod komputerowych. Jednakże świadomie zdecydowano się na metody uproszczone wybierając akceptowalny kompromis pomiędzy dokładnością rozwiązania a prostotą metody.

Podsumowując proces weryfikacji modelu matematycznego stwierdzono, że podobnie jak w przypadku rozwiązania równania biharmonicznego, wyniki obliczeń transportu masy przez model laboratoryjny reaktora w szczególności dla przypadków, dotyczących przepływów ze znacznym poborem cieczy - recyrkulatu ($> 50\%$ dopływu do obiektu) cechują się zgodnością z eksperymentem, tym lepszą, im większy jest zastosowany stopień recyrkulacji.

Można wobec tego wnioskować, iż opracowany model matematyczny opisuje dobrze przepływ przez zbiornik laboratoryjny, rozdzielający strumień przepływającej przez niego cieczy i da się go zastosować do wyznaczenia dynamicznych charakterystyk badanego obiektu.

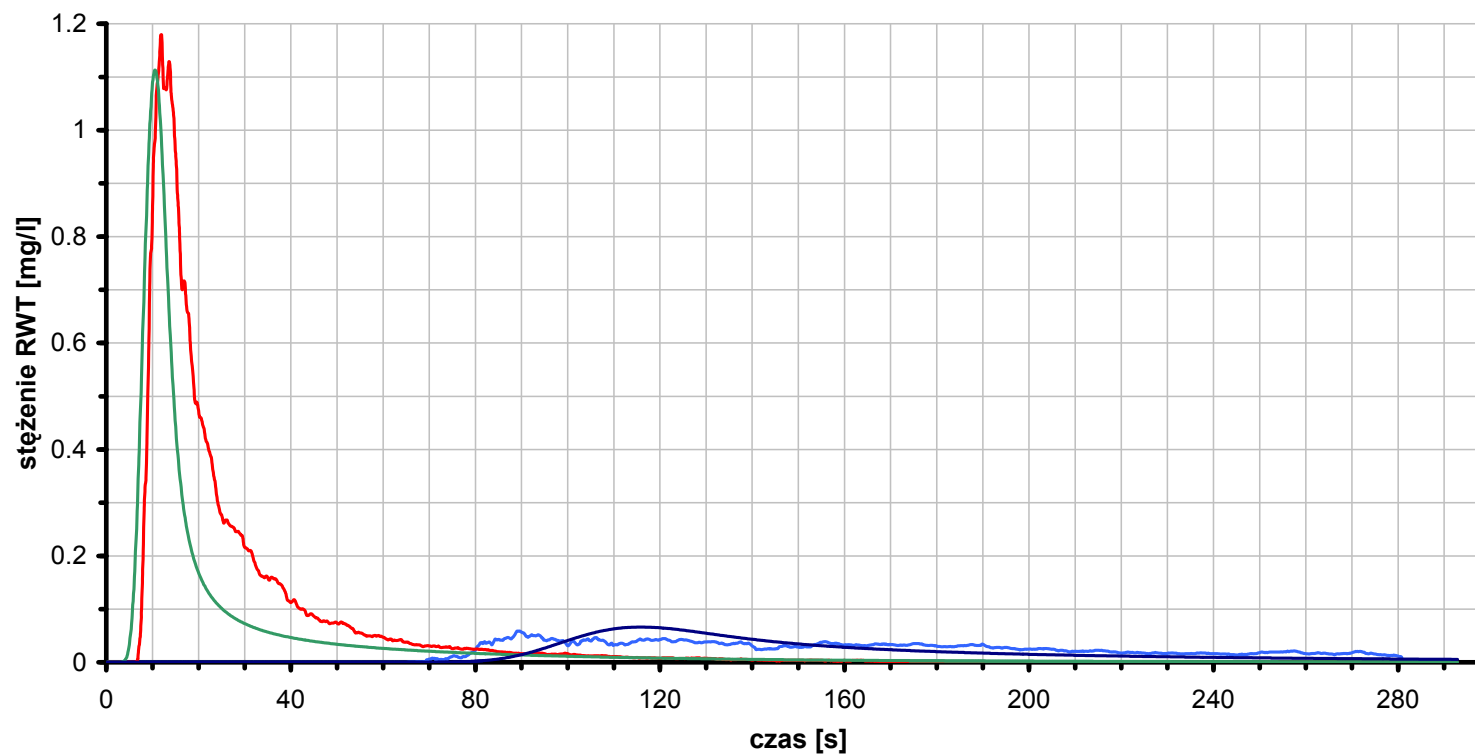
Z kolei z analizy tychże charakterystyk wynika, że zwiększanie poboru recyrkulatu do wartości przekraczających 50% wydatku dopływowego wyraźnie wpływa na procesy transportu substancji wprowadzonej do zbiornika. Zwiększa się prędkość pionowa w okolicy poboru cieczy, powodując, iż zdecydowana większość wpływającej do reaktora masy znacznika kieruje się niemal natychmiast do wylotu w dnie zbiornika. Taka sytuacja może być przyczyną niepożądanych zjawisk występujących w reaktorach przepływowych, których przykłady opisano w rozdziale 7.4.

Tab. 7.1. Zestawienie parametrów uśrednionych charakterystyk odpływowych dla modelu laboratoryjnego (pomierzonych i obliczonych) dla przepływów z poborem „recyrkulatu” $\geq 50\%$ dopływu

	Pomiar	Program	Pomiar	Program	Pomiar	Program
	$Q_R:Q_O = 3:1$		$Q_R:Q_O = 2:1$		$Q_R:Q_O = 1:1$	
t_{0R}	6,6	4,5	10	4,2	19,8	16,81
C_{maxR}	1,129	1,113	0,503	0,573	0,272	0,284
t_{maxR}	12	10,6	21,4	11,34	36,4	23,41
% C_R	91,3	89,2	79,7	77,4	69,8	53,9
t_{0O}	65,4	70,4	71,6	47,4	27,6	30,01
C_{maxO}	0,059	0,066	0,152	0,108	0,389	0,408
t_{maxO}	89,6	115,8	88,2	97,612	39,8	48,61
% C_O	8,7	10,8	20,3	22,6	30,2	46,1

- t_{0R} - czas rozpoczęcia przepływu znacznika przez szczelinę recyrkulacyjną
- C_{maxR} - maksymalne stężenie znacznika w szczelinie recyrkulacyjnej
- t_{maxR} - czas, w którym wystąpiło maksymalne stężenie znacznika w szczelinie recyrkulacyjnej
- % C_R - procentowy udział masy znacznika wypływającego szczeliną recyrkulacyjną w masie wprowadzonego impulsu
- t_{0O} - czas rozpoczęcia przepływu znacznika przez przelew
- C_{maxO} - maksymalne stężenie znacznika na przelewie
- t_{maxO} - czas, w którym wystąpiło maksymalne stężenie znacznika na przelewie
- % C_O - procentowy udział masy znacznika wypływającego przelewem w masie wprowadzonego impulsu

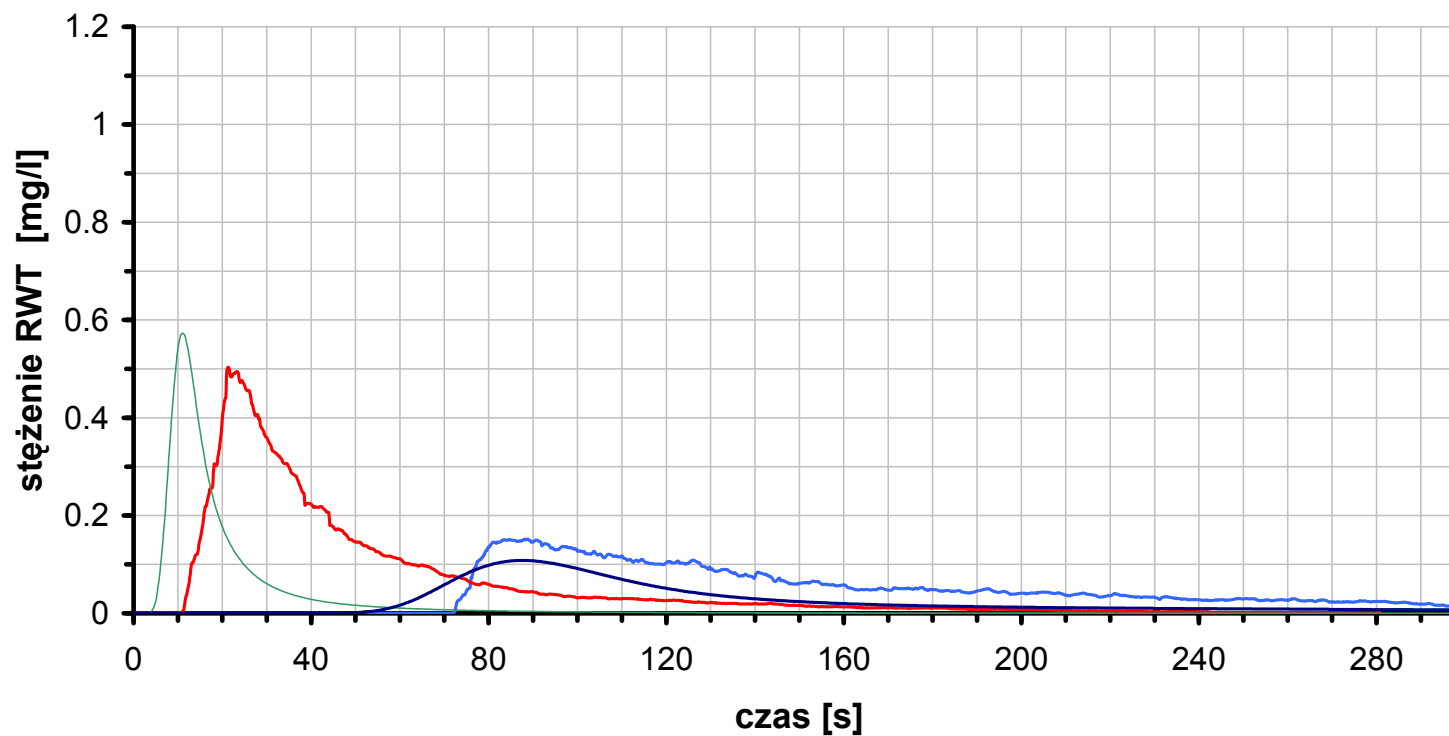
$$Q_R:Q_O = 3:1$$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie wyznaczona w laboratorium
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recykulacyjnej wyznaczona w laboratorium
- wartość stężenia traseru na przelewie obliczona za pomocą programu komputerowego
- wartość stężenia traseru w szczelinie recykulacyjnej za pomocą programu komputerowego

Rys. 7.8. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń komputerowych dla $Q_R:Q_O=3:1$ (opis w tekście)

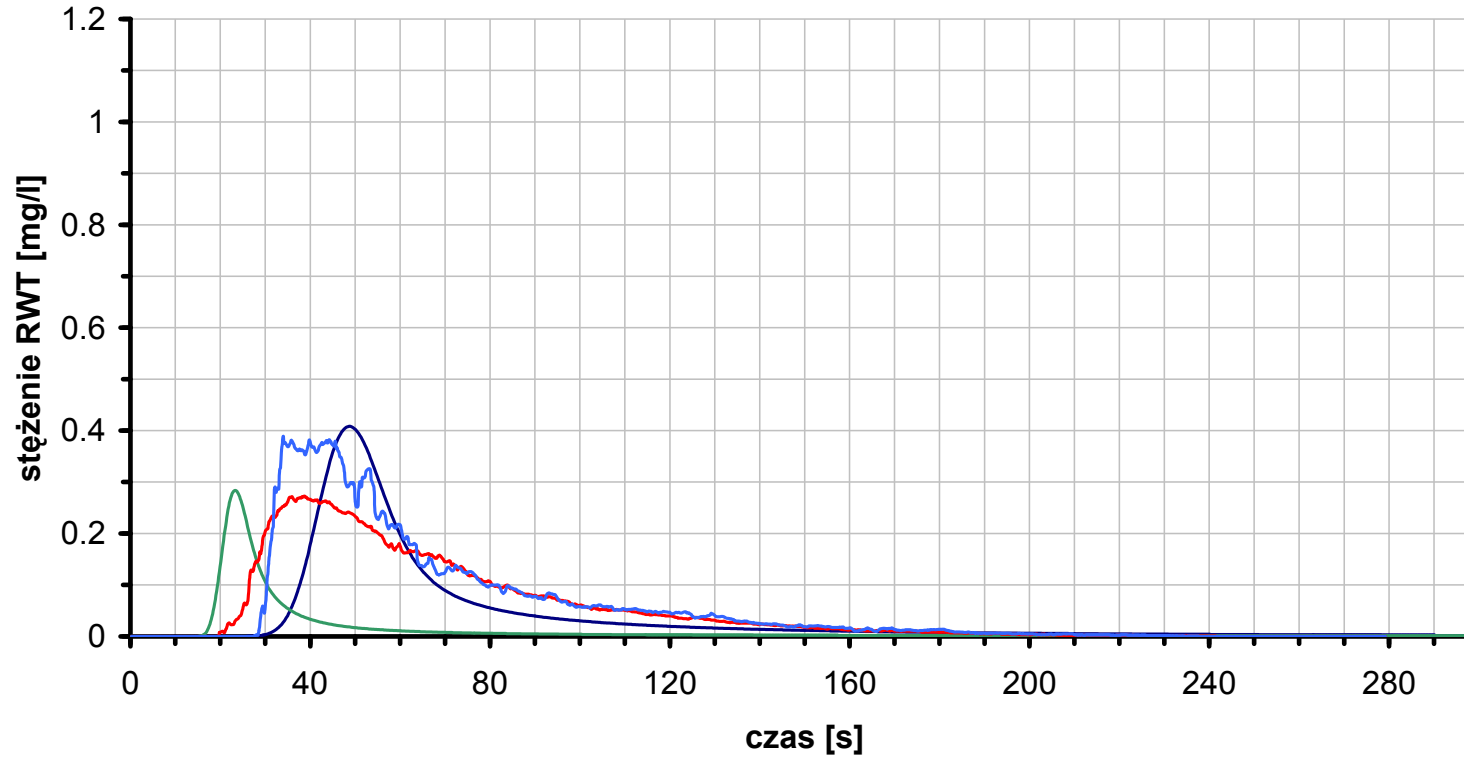
$$Q_R:Q_O = 2:1$$



- średnia wartość stężenia traseru na przelewie wyznaczona w laboratorium
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej wyznaczona w laboratorium
- wartość stężenia traseru na przelewie obliczona za pomocą programu komputerowego
- wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej za pomocą programu komputerowego

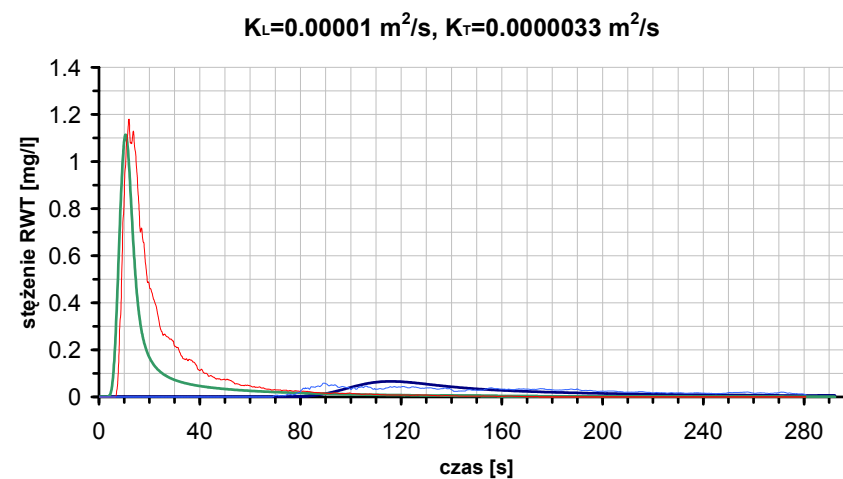
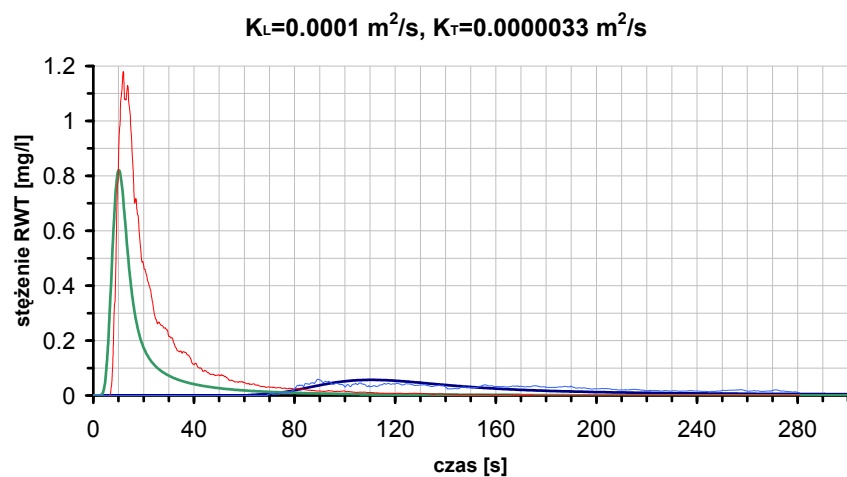
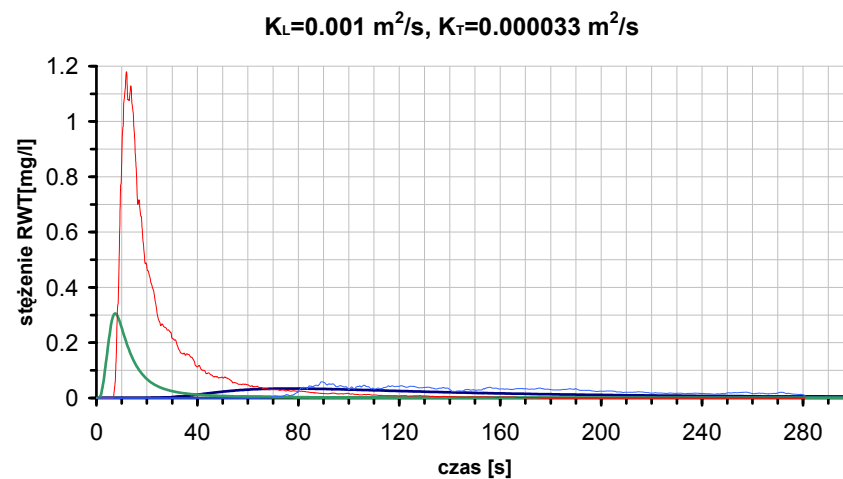
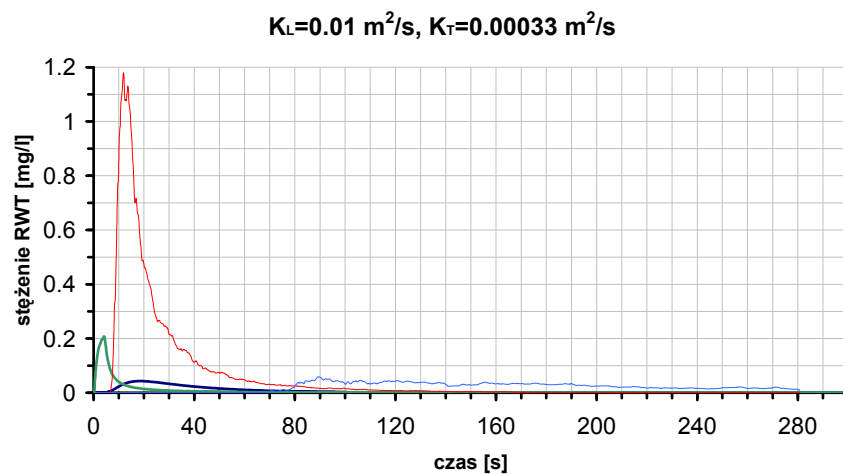
Rys. 7.9. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń komputerowych dla $Q_R:Q_O=2:1$ (opis w tekście)

$$Q_R:Q_O = 1:1$$



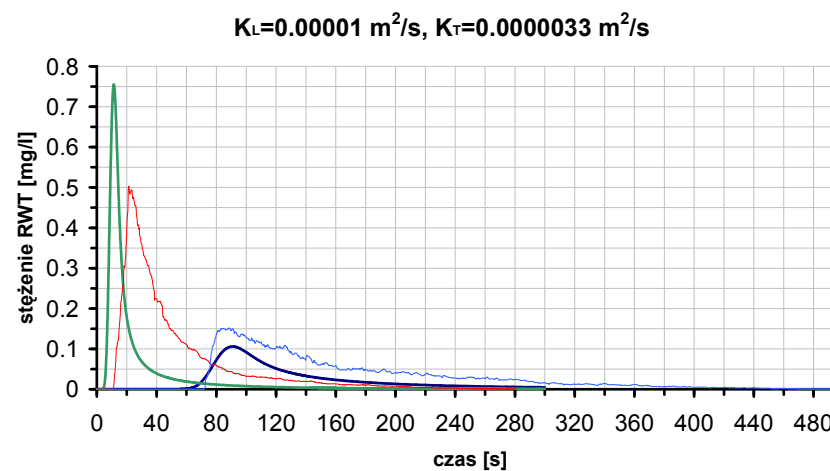
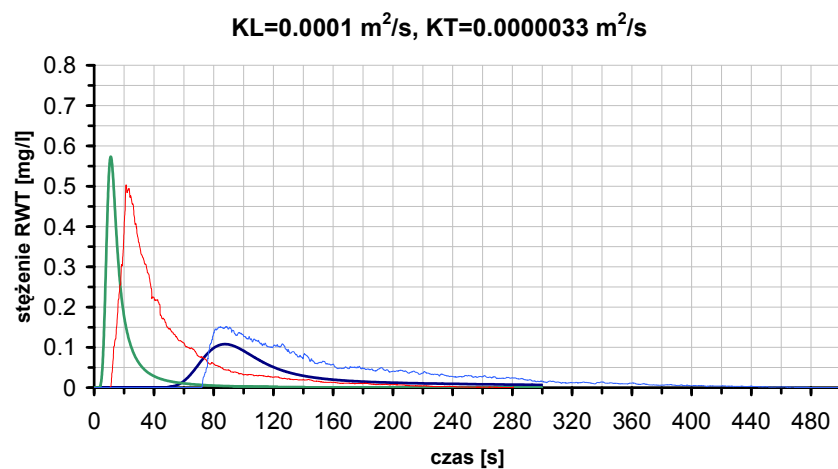
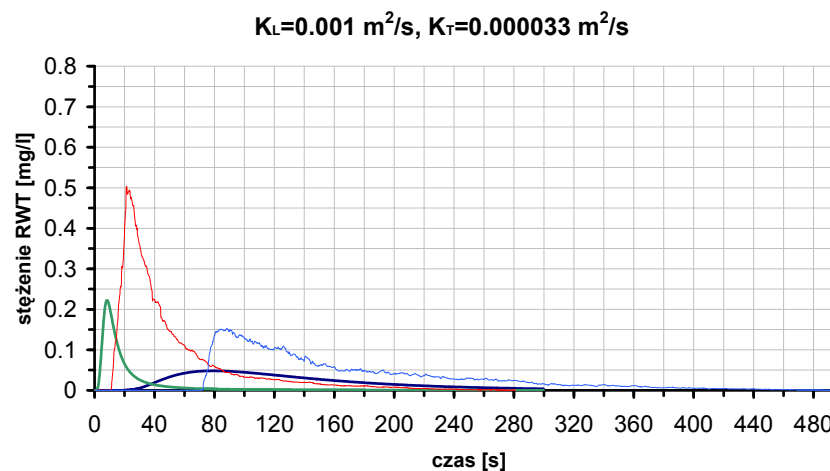
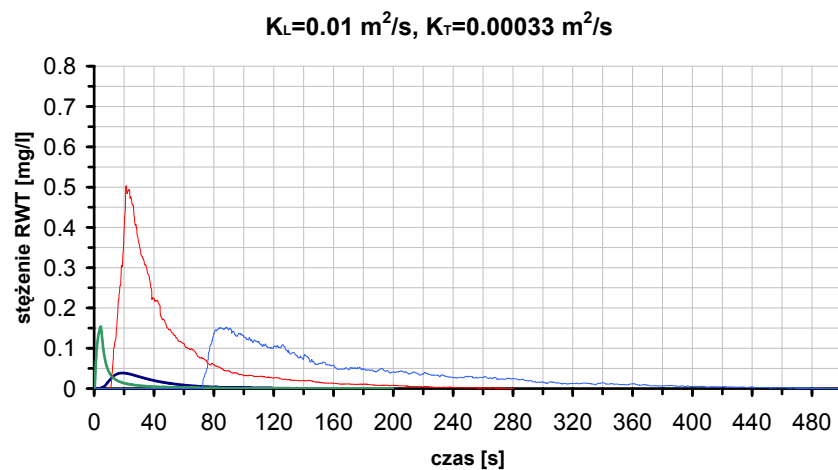
- średnia wartość stężenia traseru na przelewie wyznaczona w laboratorium
- średnia wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej wyznaczona w laboratorium
- wartość stężenia traseru na przelewie obliczona za pomocą programu komputerowego
- wartość stężenia traseru w szczelinie recyrkulacyjnej za pomocą programu komputerowego

Rys. 7.10. Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń komputerowych dla $Q_R:Q_O=1:1$ (opis w tekście)



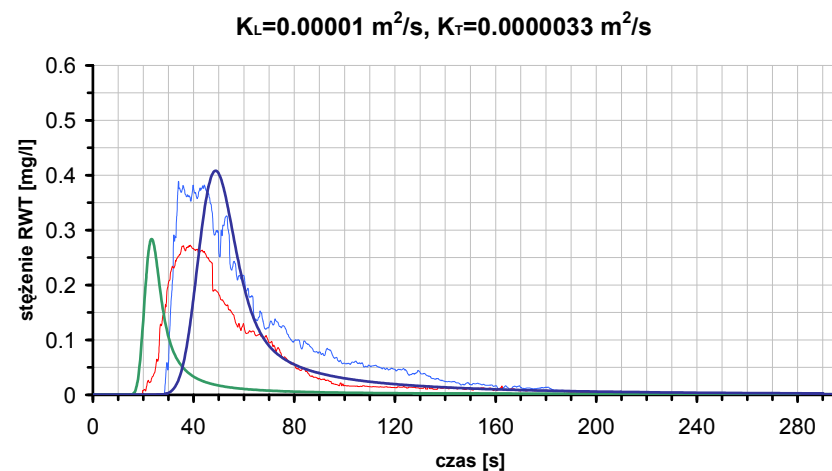
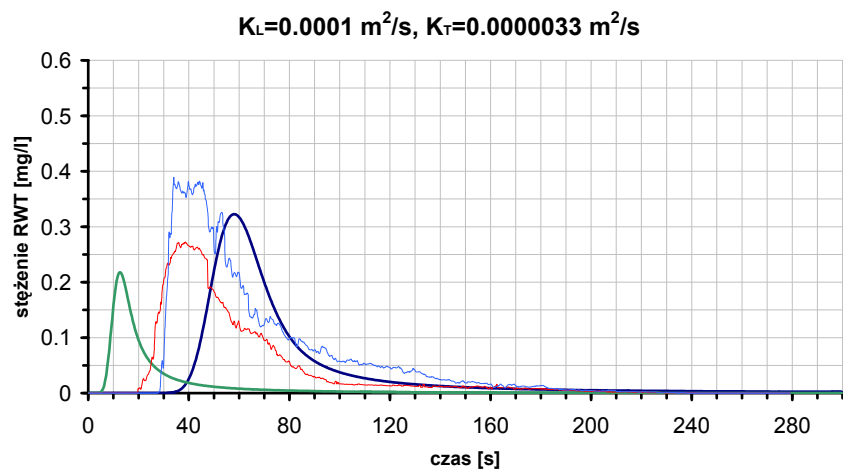
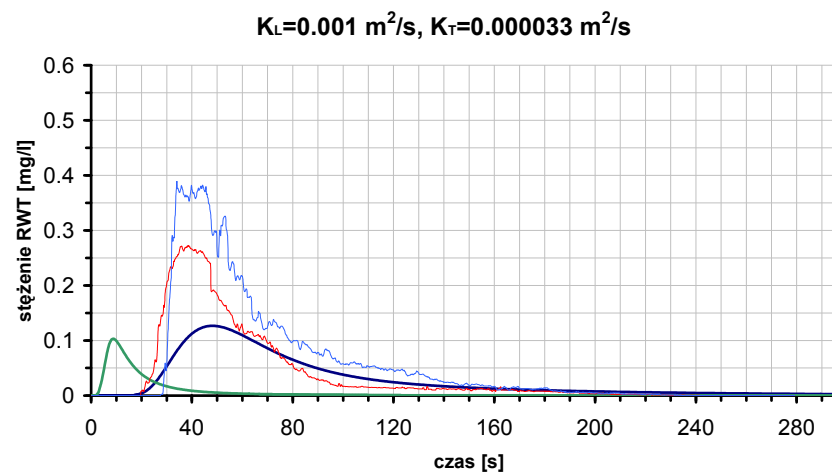
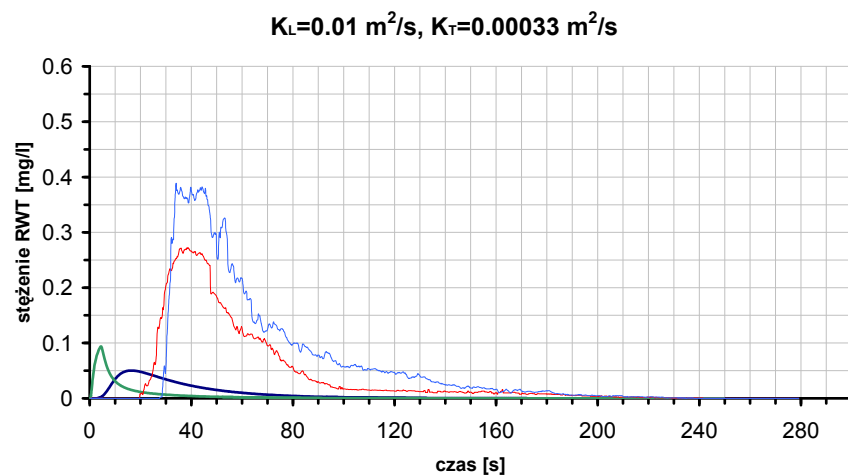
- średnia wartość stężenia trasera na przelewie
- średnia wartość stężenia trasera w szczelinie recyrkulacyjnej
- obliczona wartość stężenia trasera na przelewie
- obliczona wartość stężenia trasera w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 7.11. Wyznaczanie wartości współczynników dyspersji K_L i K_T dla $Q_R:Q_O=3:1$ (opis w tekście)



- średnia wartość stężenia trasera na przelewie
- średnia wartość stężenia trasera w szczelinie recyrkulacyjnej
- obliczona wartość stężenia trasera na przelewie
- obliczona wartość stężenia trasera w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 7.12. Wyznaczanie wartości współczynników dyspersji K_L i K_T dla $Q_R:Q_O=2:1$ (opis w tekście)



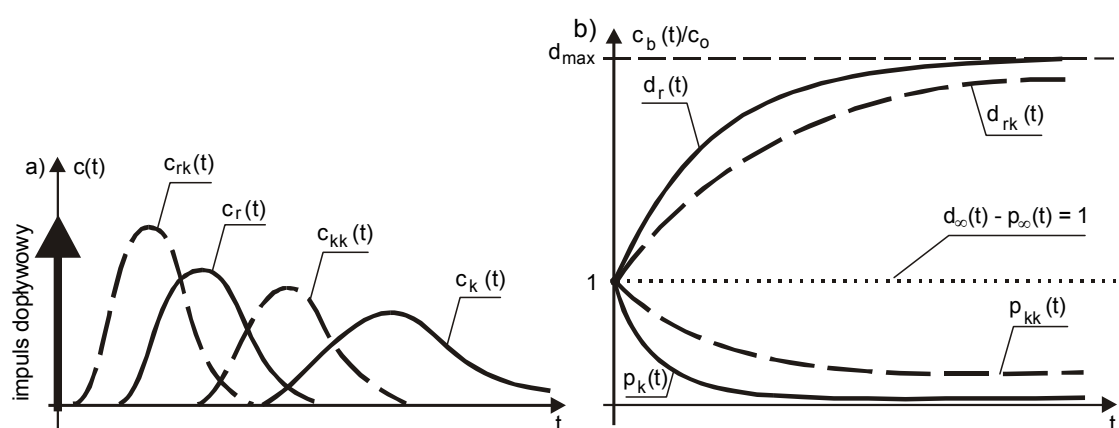
- średnia wartość stężenia trasera na przelewie
- średnia wartość stężenia trasera w szczelinie recyrkulacyjnej
- obliczona wartość stężenia trasera na przelewie
- obliczona wartość stężenia trasera w szczelinie recyrkulacyjnej

Rys. 7.13. Wyznaczanie wartości współczynników dyspersji K_L i K_T dla $Q_R:Q_O=1:1$ (opis w tekście)

7.4. Wyniki badań a problemy obserwowane podczas pracy osadników wtórnych

Aby powiązać charakterystykę dynamiczną osadnika z jego charakterystyką technologiczną (patrz rozdz. 4.2) oraz wykazać, że zbyt intensywna recyrkulacja może niekiedy generować w osadniku zjawiska takie jak „przebiecie hydrauliczne” czy nagłe wypłukiwanie osadu, radykalnie pogarszające jego funkcjonowanie, zaproponowano tu posłużenie się dwiema krzywymi – opisującą przebieg klarowania ścieków oczyszczonych oraz zagęszczanie osadu. Ich wykorzystanie, w połączeniu z krzywymi rozkładu czasu zatrzymania, pozwala na określenie efektywnego stężenia osadu w odpływie. Ma to ogromne znaczenie między innymi dla pracy komory osadu czynnego.

Opis funkcjonowania układu rozdzielającego strumień płynu roboczego na dwie części (jak to ma miejsce na przykład w osadnikach wtórnych), jak wykazano w niniejszej pracy jest zagadnieniem niełatwym. Jeśli chodzi o rozkłady stężenia, to zastosować można przedstawioną w pracy metodę (teoretyczną lub empiryczną) wyznaczania dwóch krzywych odpływowych $c_r(t)$ i $c_o(t)$ (patrz rys. 7.14a).



Rys. 7.14. Funkcjonalna charakterystyka reaktora pracującego z recyrkulacją [29]

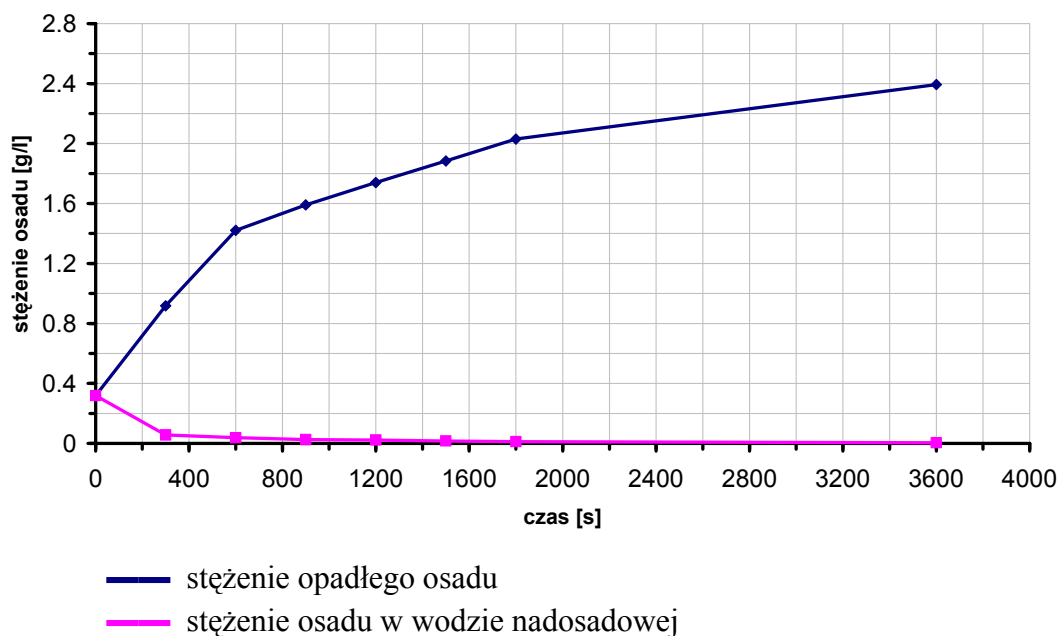
Bardziej złożony jest problem wyznaczania krzywych opisujących przebieg reakcji. W rozważanym przypadku dla strumienia odpływającego z reaktora (na przykład z osadnika wtórnego) potrzebna jest krzywa szybkości usuwania ze ścieków osadu $p_k(t)$, zaś dla strumienia recyrkulatu – krzywa zagęszczania osadu $d_r(t)$. Przykładowe przebiegi obu tych krzywych pokazano na rysunku 7.14b. Pozwalają one na wyznaczenie efektywnego stopnia zagęszczania recyrkulatu oraz efektywnego stopnia klarowania ścieków oczyszczonych [33].

Wyznaczono je w laboratoryjnych lejach Imhoffa, rejestrując parametry procesu sedymentacji specjalnie do tego celu przygotowanego osadu, uzyskanego w wyniku

koagulacji wody torfowej (patrz fot. 7.1, 7.2, 7.3). Wyniki przeprowadzonych w laboratorium badań zebrano w tabeli 7.2 oraz na rysunku 7.15.

Tab. 7.2. Wyniki badania zagęszczania osadu w lejach Imhoffa

Nr próby	Czas sedimentacji [s]	Stężenie masy w osadzie [g/l]	Stężenie masy w wodzie nadosadowej [g/l]
1	0	0,319	0,319
2	300	0,918	0,0565
3	600	1,421	0,0384
4	900	1,591	0,0253
5	1200	1,74	0,0230
6	1500	1,884	0,0160
7	1800	2,03	0,0123
8	3600	2,394	0,0043



Rys. 7.15. Wyniki laboratoryjnych pomiarów zagęszczania osadu



Fot. 7.1. Przygotowanie osadu do badań (koagulacja)



Fot. 7.2. Równoległe badanie zagęszczania osadu



Fot. 7.3. Przykładowe wyniki zagęszczania osadu (różnica w czasie zagęszczania - 10 minut)

Wyznaczenie krzywej zagęszczania osadu na podstawie badań wykonanych w laboratorium za pomocą lejów Imhoffa nie odzwierciedla w pełnym stopniu warunków panujących w obiekcie rzeczywistym. Dlatego model ten traktować należy jako metodyczny i posługiwać się nim jedynie do ogólnego wyznaczania parametrów pracy obiektów.

Dzięki zaproponowanej tu metodyce opisu efektywności reaktorów można przedstawić mechanizm „negatywnego sprzężenia zwrotnego”, pogarszającego rezultaty uzyskiwane na oczyszczalniach ścieków, pracujących metodą osadu czynnego.

Założmy więc, że w jakimś momencie zagęszczenie zawiesiny odprowadzanej z osadnika wtórnego staje się zbyt niskie, by utrzymać niezbędne jego stężenie w komorach napowietrzania. Oznacza to, że krzywa szybkości zagęszczania osadu ulega „spłaszczeniu” (patrz linia przerywana na rys. 7.14b). Jeżeli dla poprawy tego parametru obsługa oczyszczalni zwiększy wydatek recyrkulatu Q_R krzywa stężenia odpływowego zmieni kształt – ulegnie „zwężeniu” i przesunięciu ku początkowi osi $0t$, co obrazuje przerywana linia $c_{rk}(t)$ na rys. 7.14a. Oba te przesunięcia, już każde z osobna niekorzystne dla wyników pracy osadnika, nakładają się wzajemnie, jeszcze bardziej pogłębiając problemy eksploatacyjne.

Tymczasem należałoby w takiej sytuacji poprawić sedymentacyjne własności osadu, np. analizując hydrauliczne warunki pracy osadnika i wprowadzić takie zmiany w jego wyposażeniu (jak choćby różnego typu przegrody, czy przesłony), które przesunęłyby w lewo i „spłaszczyły” wykres funkcji $c_r(t)$.

Pamiętać też trzeba o drugim ze strumieni opuszczających osadnik. Może być mianowicie tak, że spadkowi stężenia osadu w recyrkulacji będzie towarzyszył jego wzrost w odpływie ścieków oczyszczonych – patrz linie $c_{kk}(t)$ oraz $p_{kk}(t)$ na rysunku 7.14.

Możliwy jest też inny wariant, gdy jakość odpływu przez dłuższy okres czasu nie pogarsza się, natomiast w układzie kumuluje się zalegający na dnie osad (którego nie jest w stanie wypłukać zbyt szybko płynący strumień recyrkulacyjny, nawet mimo pracy zgarniacza). Stan taki mógłby się utrzymywać nawet przez długi czas, ale (jak pokazują obserwacje rzeczywistych obiektów) w końcu możliwości retencji osadu ulegają wyczerpaniu i wtedy nagle (szczególnie podczas większych przepływów) zalegający osad zostaje wypłukany przez oba przekroje – odpływowy i recyrkulacyjny.

Nie można też wykluczyć, że oba wyżej omówione efekty będą występować łącznie (pogorszenie jakości ścieków sklarowanych z okresowym wymywaniem „chmury” osadu zalegającego w układzie).

Wspomniane wyżej problemy pojawiające się podczas eksploatacji obiektów takich jak osadniki wtórne stanowią tylko przykłady i nie wyczerpują wszystkich możliwych przypadków. Wspomniano o nich w tym miejscu w celu podkreślenia, iż najlepsze wyniki prac, zmierzających do coraz lepszego rozpoznania dynamiki procesów zachodzących z reaktorach, osiągnąć można prowadząc równoległe badania hydrauliczne oraz technologiczne.

8. Próba opisu przepływu z recyrkulacją z zastosowaniem innych modeli uproszczonych

8.1. Wstęp

Obok zastosowanych do badań oraz innych, wymienianych w niniejszej pracy sposobów opisu dynamicznych charakterystyk przepływu masy przez reaktor, warto wymienić również metody uproszczone, przybliżające rzeczywiste przebiegi krzywych w oparciu o oszacowanie najistotniejszych parametrów rozważanego zjawiska. Metody takie są używane np. w hydrologii, a stosowane funkcje aproksymujące mogą być różnego rodzaju, np. trójkątne, wykładnicze, uśredniające i inne [49].

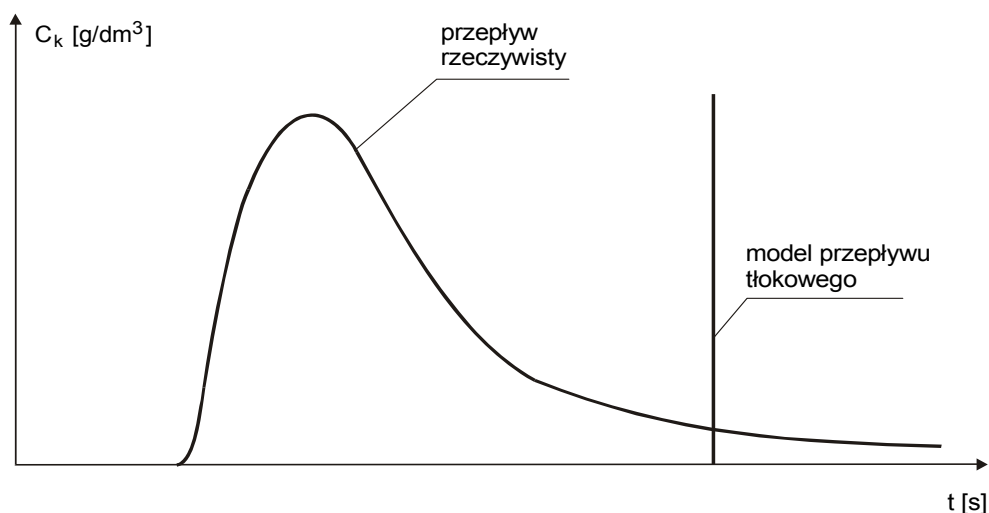
Poniżej przedstawiono próbę zastosowania do opisu przepływu z recyrkulacją jednej z takich metod, nazwanej przez autora „racjonalną” [52].

8.2. Metoda „racjonalna”

Metoda racjonalna polega na wyznaczeniu w oparciu o proste, lecz przyjęte w sposób racjonalny zależności, rozkładu funkcyjnego, ściśle powiązanego z geometrią i polem prędkości w zbiorniku, charakteryzującego przepływ masy przez obiekt w czasie.

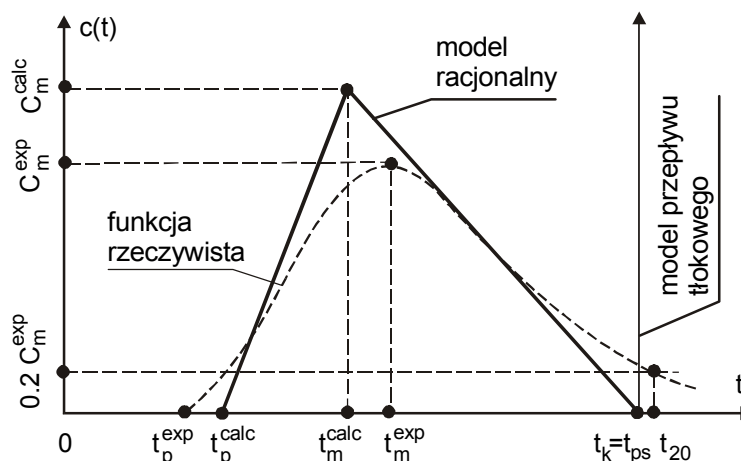
Rezultatem zastosowania tejże metody do omawianego zagadnienia jest trójkątny (lub bazujący na trójkącie) wykres rozkładu przepływu masy przez zbiornik, która to aproksymacja, pomimo znacznych uproszczeń w opisie zjawisk stanowi znacznie lepsze przybliżenie rzeczywistych procesów niż tradycyjnie stosowany model przepływu tłokowego.

Krzywa opisująca rzeczywisty przepływ masy przez reaktor ma charakter jak na rysunku 8.1.



Rys.8.1 Krzywa rzeczywistego odpływu ze zbiornika

Jednym z uproszczeń opisywanej tu metody jest założenie, iż część masy, której wypływ ze zbiornika obrazuje końcowy fragment krzywej, potocznie zwany „ogonem”, wynikający z zalegania masy w warstwie przyściennej i „martwych strefach”, stanowi pomijalnie mały procent całego impulsu. W efekcie zastosowania takiego założenia, krzywą o charakterze przedstawionym na rysunku 8.1 zastępujemy trójkątą aproksymacją, opartą na kilku charakterystycznych punktach jak na rysunku 8.2 [52].



Rys. 8.2. Ogólna koncepcja aproksymacji trójkątnej [52]

W celu ustalenia położenia owego trójkąta konieczne jest określenie (wyznaczenie) trzech charakterystycznych punktów na osi czasu, odpowiadających wartościom: czasu początkowego t_p , modalnego t_m (tj. czasu, w którym wykres odpływowy osiąga maksymalną wartość stężenia) i końcowego t_k oraz jednego punktu opisującego stężenie modalne (maksymalne) C_m , stanowiącego wysokość trójkąta. Trzy charakterystyczne punkty czasowe muszą pozostawać w ścisłej relacji z technicznie istotnymi parametrami reaktora.

Przykładowo czas początkowy może być związany z maksymalną wartością prędkości przepływu cieczy w reaktorze, czas modalny z pośrednimi wartościami tejże prędkości a czas zakończenia przepływu w przybliżeniu równy dwukrotnej wartości czasu modalnego. Natomiast stężenie modalne wyznaczyć można korzystając z równania zachowania masy, szacując ilość masy w poszczególnych elementach przepływającej przez zbiornik cieczy [52].

8.3. Zastosowanie metody „racjonalnej” do opisu przepływu z recyrkulacją

W poprzednich rozdziałach wykazano, iż funkcjonowanie zbiornika ze znaczną recyrkulacją, opisują dwie charakterystyki odpływowe. Każdą z nich można aproksymować, stosując opisane powyżej techniki.

W poszukiwaniu relacji mogących posłużyć do wyznaczenia punktów charakterystycznych obu wykresów aproksymujących posłużono się wynikami badań modelowych oraz symulacji komputerowych.

Dla ustalenia czasu, po którym wprowadzony do obiektu impuls masy pojawi się w każdym z przekrojów odpływowych wykorzystano fakt (potwierdzony tak teoretycznie jak i doświadczalnie), iż część wprowadzonej do reaktora masy, porusza się po najkrótszej drodze pomiędzy wlotem a wylotem z obiektu. Jako wartość prędkości osiąganą przez tę masę przyjęto maksymalny wynik z wykonanych (potwierdzonych obliczeniowo) pomiarów prędkości cieczy na danym odcinku. Tak więc dla wylotu w dnie zbiornika (recyrkulat) relacja, według której wyznaczono czas początkowy t_{pR} przyjmuje postać:

$$t_{pR} = H / v_R, \quad (8.1)$$

zaś dla odpływu przelewem:

$$t_{pO} = L / v_O. \quad (8.2)$$

Również punkt czasowy, określający przybliżone zakończenie przepływu porcji masy przez obiekt opisano dla obydwu strumieni odpływowych wzajemnie analogicznymi zależnościami. Mianowicie przyjmowano tu do sporządzania aproksymacji hipotetyczny czas wypływu całej wprowadzonej masy przez jeden bądź drugi wylot. Użyto zatem poniższych zależności:

$$t_{kR} = V / Q_R, \quad (8.3)$$

$$t_{kO} = V / Q_O. \quad (8.4)$$

W przypadku wyznaczania punktu dla czasu modalnego (odpowiadającego maksymalnemu stężeniu) dla obu typów krzywych wykorzystano wnioski z analizy wyników pomiarów. Mianowicie stwierdzono, iż maksymalne stężenie masa odpływowa osiągała w stosunkowo krótkim czasie od momentu jej pojawienia się na danym odpływie (w porównaniu z czasem całkowitego opuszczenia zbiornika). Przyjęto

zatem jako punkt modalny wartość czasu początkowego, czyli rozpoczęcia odpływu, to jest:

$$t_{mR} = t_{pR} = H / v_R, \quad (8.5)$$

oraz

$$t_{mO} = t_{pO} = H / v_O. \quad (8.6)$$

Nieco bardziej złożone okazało się opracowanie metody, służącej do analitycznego wyznaczenia, w ramach aproksymacji trójkątnej, wartości maksymalnego stężenia w przekrojach odpływowych. Jak poprzednio, również i w tym przypadku wykorzystano prawidłowości, którym podlegał podział strumienia cieczy przepływającej przez zbiornik laboratoryjny.

Mianowicie dla przepływów z niewielką recyrkulacją przyjęto, iż podział masy traseru następuje w proporcjach zgodnych z zadaniem podziałem wydatku cieczy przepływającej przez obiekt. Znaczy to, że masa traseru znajdująca się w strumieniu zmierzającym do odpływu recyrkulacyjnego w przypadku relacji $Q_R : Q_O = 1:3$ jest trzy razy mniejsza od masy opuszczającej zbiornik przelewem. Analogicznie postąpiono dla przypadku $Q_R : Q_O = 1:1$. Natomiast dla sytuacji, gdzie pobór recyrkulatu był znaczny, $Q_R : Q_O = 3:1$, eksperyment wykazał, iż podział masy następował w stosunku około 9:1, zatem taką proporcję zastosowano w obliczeniach.

Przyjmując wyżej opisane założenie jako roboczą prawidłowość, możliwe stało się obliczenie zarówno masy substancji, która powinna opuścić zbiornik przelewem jak i tej, wypływającej szczeliną recyrkulacyjną. Znając z kolei te wartości i stosując podane dalej zależności, można w nieskomplikowany sposób obliczyć wartość spodziewanego stężenia maksymalnego [52]:

$$M_0 = 0.5 Q C_m (t_k - t_p), \quad (8.7)$$

stąd

$$C_m = 2 M_0 / Q (t_k - t_p). \quad (8.8)$$

Opracowaną w wyżej przedstawiony sposób metodę racjonalną zweryfikowano, zestawiając ją porównawczo z doświadczalnie uzyskanymi (metodą fluorymetryczną) krzywymi odpływowymi. W tym celu wybrano kilka wyników pomiarów, różniących się między sobą stosunkiem podziału wydatku wpływającego do obiektu na strumienie wypływowe (patrz rys. 8.3):

- a) $Q_R:Q_O = 3:1$;
- b) $Q_R:Q_O = 1:1$;
- c) $Q_R:Q_O = 1:3$.

Następnie, wykorzystując zdefiniowane powyżej zależności, obliczono wszystkie punkty charakterystyczne i naniesiono otrzymane wyniki na wykresy, przedstawiające rzeczywiste, pomierzone, krzywe odpływu. Wybrane dane oraz wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 8.1 oraz na rysunku 8.3.

Jak wynika z analizy sporządzonych wykresów, aproksymacje z zastosowaniem metody racjonalnej odzwierciedlają rzeczywiste charakterystyki przepływu przez zbiornik w dobrym (akceptowalnym) stopniu. Większość punktów charakterystycznych znalazło się w pobliżu odpowiadających im wartości przepływów rzeczywistych. Krzywe generalnie zachowują tendencje i wzajemne proporcje zgodne ze stanem faktycznym, zarejestrowanym podczas wykonywania eksperymentów.

Tab. 8.1. Wartości poszczególnych parametrów przepływu wyznaczone za pomocą metody „racjonalnej”

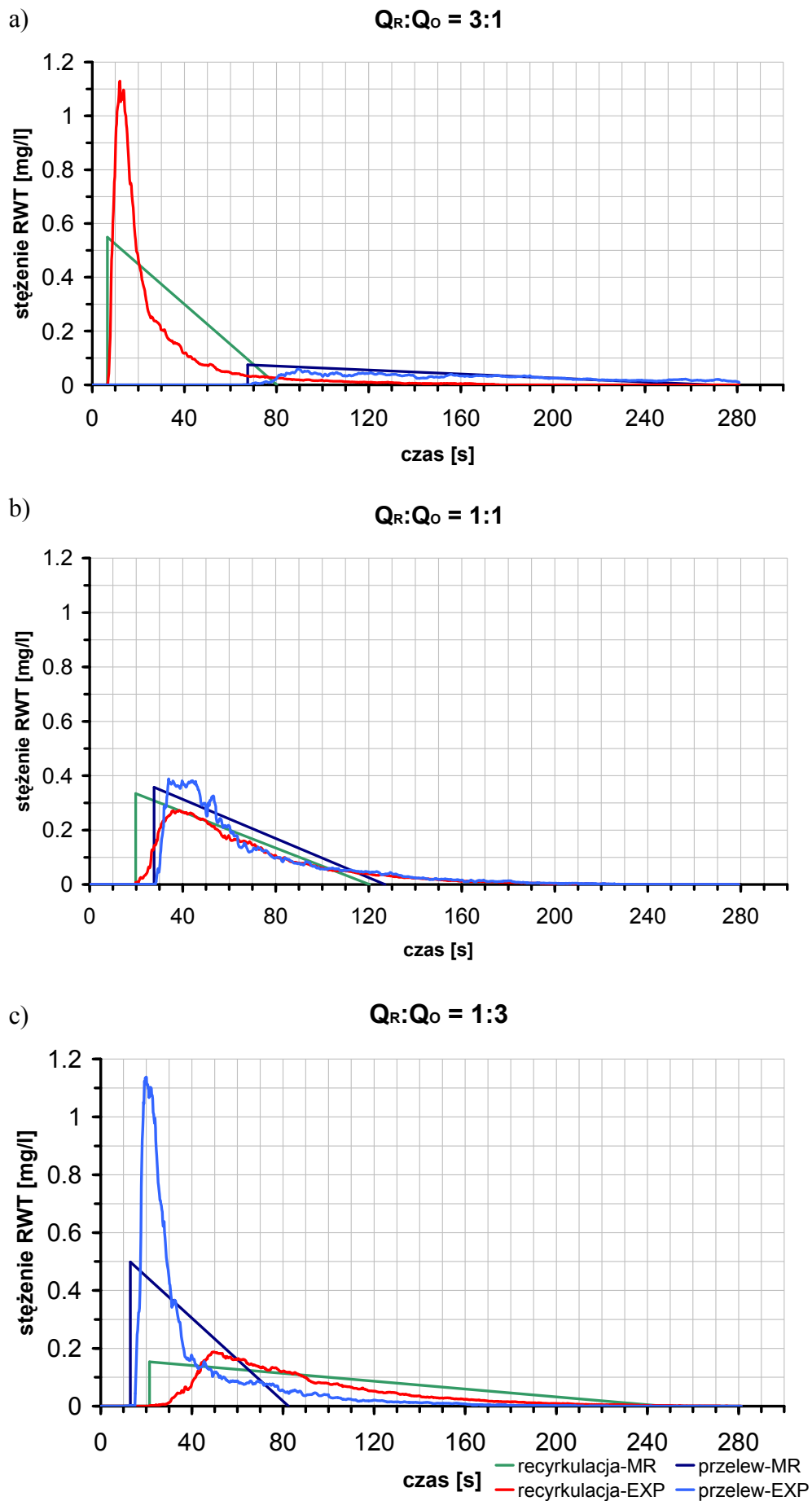
	Q	Q _R	Q _O	v _R	v _O	t _{pR}	t _{pO}	t _{mR}
	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[dm/s]	[dm/s]	[s]	[s]	[s]
P1	1,480	1,140	0,340	0,333	0,160	6,600	67,500	6,600
P2	1,480	0,760	0,720	0,111	0,390	19,802	27,692	19,802
P3	1,480	0,370	1,110	0,102	0,830	21,400	13,012	21,400
	t _{mO}	t _{kR}	t _{kO}	C _{maxR}	C _{maxO}	C ₀	M _R	M _O
	[s]	[s]	[s]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[mg]	[mg]
P1	67,500	80,242	269,047	0,549	0,075	0,000	23,036	2,559
P2	27,692	120,363	127,050	0,334	0,357	0,000	12,798	12,798
P3	13,012	247,232	82,410	0,153	0,498	0,000	6,399	19,197

P1- dane dla przepływu, gdzie $Q_R:Q_O = 3:1$

P2- dane dla przepływu, gdzie $Q_R:Q_O = 1:1$

P3- dane dla przepływu, gdzie $Q_R:Q_O = 1:3$

Można więc stwierdzić, iż metoda racjonalna pomimo znacznych uproszczeń, na których się opiera, stanowi lepsze przybliżenie i opis rzeczywistego przepływu masy przez obiekt reaktora niż metoda przepływu tłokowego, która w dodatku może być zastosowana tylko dla przepływu prostego, czyli bez recyrkulacji. W rozważanym przypadku, gdy zasadniczym czynnikiem kształtującym pole prędkości jest rozdział strumienia na dwie części (Q_R i Q_O), modelu przepływu tłokowego jak już wielokrotnie wspomniano nie da się zastosować w ogóle.



Rys. 8.3. Krzywe odpływowo wyznaczone metodą „racjonalną” (opis w tekście)
MR – metoda racjonalna, EXP - eksperyment

9. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona praca dotyczy zagadnień związanych z opisem hydraulicznych parametrów pracy reaktorów, w których następuje rozdzielenie strumienia cieczy, na przykład jako element wstępny procesu recyrkulacji. Z przeprowadzonej analizy literatury, dotyczącej tej problematyki wynikało, iż jest ona stosunkowo słabo opisana. Taki stan rzeczy wynika w głównej mierze z faktu stosowania w przeszłości niewielkich stopni recyrkulacji, nie mających znaczącego wpływu na dynamikę reaktora. Obecnie sytuacja w przeważającej liczbie przypadków różni się znacząco od tej sprzed kilkudziesięciu czy kilkunastu lat, a stosowane na przykład w osadnikach wtórnych oczyszczalni ścieków stopnie recyrkulacji, bardzo często przekraczają 100%. Przedstawiane w literaturze technicznej metody modelowania pracy reaktorów przepływowych oparte są na uproszczonych modelach, nie uwzględniających rozdzielenia strumienia przepływającej przez nie cieczy i wpływu tego zjawiska na dynamikę całego obiektu. Fakt ten w zestawieniu z wspomnianą już tendencją do stosowania coraz większych stopni recyrkulacji w niektórych obiektach rzeczywistych, uzasadnia podjęcie próby opracowania stosunkowo prostego modelu teoretycznego reaktora recyrkulacyjnego.

Jako przykład omawianego reaktora przepływowego przywoływano najczęściej osadnik wtórny oczyszczalni ścieków, dlatego też w rozdziale 2, 3 i 4 scharakteryzowano tego typu obiekty, ich dynamikę oraz stosowane uproszczone metody określania ich parametrów hydraulicznych.

Do opisu procesu transportu masy wewnątrz reaktora zastosowano dwuwymiarowy pionowy model oparty na równaniu adwekcji-dyversji, zaś do wyznaczania rozkładu pola prędkości – równanie biharmoniczne. Równania te wraz z szeregiem związanych z nimi zagadnień i formuł, jak na przykład podstawowe metody wyznaczania współczynników transportu, omówiono we wstępnej części rozdziału 5. Przedstawiono w nim także szczegółowo teoretyczną część opracowanego modelu reaktora jak i sposoby doświadczalnego opisu pracy takich obiektów. Dokładnie opisano wybrane do badań własnych metody eksperymentalne. Były to pomiary prędkości przepływu oraz konduktometryczna i fluorymetryczna metoda znacznikowa.

Zasadniczą część rozdziału 5 stanowi przedstawienie zaproponowanego sposobu teoretyczno-eksperymentalnego wyznaczania dynamicznych charakterystyk reaktorów recyrkulacyjnych. Podstawą tej metody jest założenie, iż rozdzielenie strumienia cieczy wewnątrz obiektu ma znaczący wpływ na jego dynamikę, jeśli wydatki obu strumieni odpływowych osiągają zbliżone do siebie wartości. Wykazano, że charakterystyki odpływowe tak pracującego reaktora różnią się od powszechnie stosowanych modeli uproszczonych na tyle, iż zastosowanie tych drugich nie jest w ogóle możliwe w przypadku znacznego stopnia recyrkulacji.

Kolejny, 6 rozdział w całości został poświęcony zaprezentowaniu przeprowadzonych w laboratorium własnych badań empirycznych. Przedstawiono w nim schematy i fotografie stanowiska laboratoryjnego, będącego modelem zbiornika przepływowego, zaprojektowanego i skonstruowanego specjalnie na potrzeby tej pracy. Omówiono szczegółowo jego elementy składowe, zasadę działania i zastosowaną znacznikową metodykę badań. Scharakteryzowano używane znaczniki: roztwór NaCl, roztwór Rodaminy WT oraz sprzęt pomiarowy: konduktometri i fluorometr.

Na wspomnianym stanowisku przeprowadzono w okresie czterech lat 6 różnych rodzajów badań, każde złożone z szeregu serii pomiarowych. Pierwsze badania miały charakter rozpoznawczy, weryfikujący wstępnie przyjęte założenia, metodykę, rozwiązania techniczne. Kolejne dwie serie bazujące na opracowanych wnioskach pozwoliły na szczegółową analizę zastosowanej metody konduktometrycznej, jej wad i zalet oraz przydatności do wypracowania ostatecznej postaci prezentowanego w niniejszej pracy rozwiązania. W trakcie tych pomiarów zbadano wpływ zgarniacza osadu na rozkład pola prędkości a tym samym charakterystyki dynamiczne obiektu. Pozostałe pomiary były już badaniami finalnymi, przeprowadzono je z użyciem wybranej ostatecznie metody – fluorometrii, a ich wyniki posłużyły do opracowania prezentowanej w pracy metody opisu elementów dynamiki reaktora i sformułowania końcowych wniosków.

Ta część pracy zawiera także informacje uzupełniające, takie jak dane i wyniki z przeprowadzonych kalibracji sprzętu pomiarowego oraz analizę błędów pomiarów.

Na zakończenie rozdziału 6 omówiono wyniki uzyskane podczas pomiarów laboratoryjnych, a uzyskane na ich podstawie wykresy, mogące pełnić rolę charakterystyk dynamicznych obiektu – modelu laboratoryjnego umieszczono na końcu rozdziału.

Równoległe do prac laboratoryjnych, prowadzono teoretyczne badania, opracowując matematyczny model (w postaci programu komputerowego) transportu masy w obszarze modelowanego reaktora. Temu etapowi poświęcono większą część rozdziału 7. Omówiono w nim niezbędne podstawy teoretyczne dotyczące zastosowanych metod numerycznego rozwiązania równań biharmonicznego oraz adwekcji-dyversji, których zasadniczy element stanowiła metoda różnic skończonych. Przedstawiono w skrócie przyjęte sposoby aproksymacji poszczególnych formuł oraz określania warunków granicznych i współczynników występujących w równaniach.

Przeprowadzono dyskusję zaprezentowanych wyników symulacji ze szczególną uwagą poświęconą ich weryfikacji za pomocą danych uzyskanych eksperymentalnie.

W końcowej części rozdziału 7 przedstawiono w formie uzupełnienia oraz komentarza do prezentowanych wyników propozycję doświadczalnego wyznaczenia krzywych kinetyki dwóch równoległe przebiegających reakcji: klarowania ścieków oraz zagęszczania usuwanego z nich osadu. Wykorzystano tu rezultaty własnych badań, wykonanych w ramach poszerzania wiedzy na temat różnego typu procesów zachodzących w reaktorach – zbiornikach przepływowych.

Całość pracy uzupełniono jeszcze rozdziałem 8, w którym zaprezentowano inną, uproszczoną metodę opisu pracy reaktorów przepływowych – metodę „racjonalną”. Wykorzystuje ona bardzo proste, podstawowe zależności oparte o geometrię i rozkład pola prędkości w obiekcie, a efektem jej zastosowania jest trójkątny wykres – charakterystyka pracy zbiornika. Metoda ta stanowi w niektórych, omawianych w pracy sytuacjach, lepsze przybliżenie rzeczywistych procesów niż tradycyjnie stosowany model przepływu tłokowego.

Podsumowując całość badań i ich wyniki, omówione w niniejszym opracowaniu, można wysunąć następujące wnioski:

- ✓ **Intensywność recyrkulacji r w zasadniczy sposób wpływa na funkcjonowanie reaktora; w szczególnym stopniu daje się to odnieść do tak ważnego elementu ciągu oczyszczania ścieków, jakim jest osadnik wtórny;**
- ✓ **Ze wzrostem „ r ” w osadniku wytwarza się coraz wyraźniejszy strumień ścieków na dystansie „wlot – odpływ recyrkulatu”, który może nabrać nawet charakteru „przebiecia hydraulicznego”;**
- ✓ **W pracy badano obiekt, w którym odpływ recyrkulatu znajduje się w jednym punkcie; w takim układzie szczególnego znaczenia nabiera działanie zgarniacza, który musi dostarczyć osad z dna do „wypłukującego” go strumienia;**
- ✓ **Gdy osad odbierany jest ruchomą ssawką sytuacja komplikuje się, ale i tu można spodziewać się zasysania ścieków sklarowanych, co rozcieńczy osad, obniżając jego stężenie mimo wzrostu „ r ”;**
- ✓ **Procesu recyrkulacji nie da się opisać powszechnie stosowanym modelem tłokowym; niezbędne są tu metody bardziej złożone;**
- ✓ **Za podstawowy należy uznać zaproponowany w pracy schemat, który tworzą:**
 - krzywe rozkładu stężenia znacznika w przekrojach odpływowych (ścieki i osad); znacznik wprowadzany jest impulsowo;
 - krzywa kinetyki reakcji;
 - krzywa stężenia końcowego, uwzględniająca zachodzące reakcje (w osadniku – klarowanie ścieków oraz zagęszczanie osadu);
- ✓ **Krzywe rozkładu stężenia można wyznaczyć**
 - teoretycznie,
 - empirycznie;
- ✓ **W ujęciu dokładnym obliczenia teoretyczne można wykonać korzystając z komercyjnych programów komputerowych; są one wszakże bardzo kosztowne;**
- ✓ **W pracy wykazano, że można tu zastosować także dużo tańsze metody uproszczone (równanie biharmoniczne, model „racjonalny”);**

- ✓ Patrząc realistycznie, trudno oczekiwać, aby metoda teoretyczna została powszechnie przyjęta w praktyce przez projektantów, szczególnie dla obiektów małych;
- ✓ Tym większego znaczenia nabiera metoda empiryczna, którą można zastosować do wyznaczenia charakterystyk obiektów już istniejących;
- ✓ Należy dążyć do rozpowszechnienia informacji o istnieniu takiej możliwości wśród osób kierujących pracą oczyszczalni ścieków; w przypadku, gdy konkretne obiekty nie spełniają oczekiwań, jako standardowy element działań zaradczych (obok analizy czynników chemiczno-biologicznych) należałoby przeprowadzać badania znacznikowe oraz analizę ich wyników; może ona doprowadzić do określenia metod poprawy sytuacji (np. zastosowanie różnego typu przegród lub kierownic, poprawiających warunki przepływowe).

Bibliografia

1. Andermann F.: *Tarcze prostokątne. Obliczenia statystyczne*, Arkady, Warszawa, 1966.
2. Bansal M.K.: *Dyspersion in Natural Streams*, Journal of Hydraulics Division 97, No HY11, pp.1867-1886, 1971.
3. Bever J., Stein A., Teichman H.: *Zaawansowane metody oczyszczania ścieków*, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz, 1997.
4. Bieniecki T.: *Rozpoznawcze badania dynamiki procesu recyrkulacji ścieków*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2003.
5. Bretsznajder S.: *Własności gazów i cieczy*, WNT, Warszawa, 1962 r.
6. Burzyński K., Granatowicz J., Piwecki T., Szymkiewicz R.: *Metody numeryczne w hydrotechnice*, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 1991.
7. Busenberg E., Plummer L.N.: *Dating Young Groundwater with Sulfur Hexafluoride: Natural and Anthropogenic Sources of Sulfur Hexafluoride*, Water Resources Research, Vol. 36, No. 10, 2000 r.
8. Chrzanowski W., Namieśnik J., Szpinek P i inni: *Nowe horyzonty i wyzwania w analityce i monitoringu środowiskowym*, CEEAM Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2003.
9. Cortuvo J.A., *Rhodamine WT and B*, Memo to J. Warnquist, dated Aug 2, 1988.
10. Crank J.: *The Mathematics of Diffusion*, Oxford, Clarendon Press, 1975.
11. Cunge J., Holly Jr F.M., Verwey A.: *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, London: Pitman, 1980.
12. Cussler E.J.: *Diffusion, Mass Transfer in Fluid Systems*, Cambridge university Press, USA, 1984.
13. Czernuszenko W.: *Dyfuzja i dyspersja w korytach otwartych*, Archiwum hydrotechniki, T.XXXIII, Z. 1-2, Gdańsk, 1986.
14. Dillon K.S. i inni: *The use of sulfur hexafluoride (SF6) as a tracer of septic tank effluent in the Florida keys*, Journal of Hydrology, Vol. 220, 1999.
15. Donea J.: *A Taylor-Galerkin Method for Convective Transport Problems*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 20, 101-119, 1984.
16. Elder J.W.: *The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear Flow*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 5, No. 4, pp. 544-560, 1959.
17. Europejska Współpraca w dziedzinie Akredytacji EA: *Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu*, Dokument EA-4/02, GUM, 2001.
18. Ferziger J.H., Peric M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, 2002.
19. Gańczarczyk J.: *Technologia ścieków miejskich*, Politechnika Śląska, Gliwice, 1966.
20. Gard A., Heiser J., Senum G., Sullivan T.M.: *Monitoring Subsurface Barrier Integrity Using Perfluorocarbon Tracers*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, No. 6, 1998.
21. Gulliver J.S., Hibbs D.E., Parkhill K.L.: *Sulfur Hexafluoride Gas Tracer Studies in Streams*, Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, No. 8, 1998.
22. Heidrich Z. i inni: *Urządzenia do uzdatniania wody. Zasady projektowania i przykłady obliczeń*, Arkady, Warszawa, 1987.

23. Hodel D.P.: *Fluorometric Procedures for Dye Tracing*, U.S. Geological survey, Washington, 1986.
24. Hofer M. i inni: *Tracers as Essential Tools for the Investigation of Physical and Chemical Processes in Groundwater Systems*, *Chimia* 51, Nr. 12, 1997.
25. Holly F.jr., Preissmann A.: *Accurate Calculation of Transport in two Dimensions*, *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, Vol. 103, No. 11, pp.1259-1277, 1977.
26. Ignatowska A., Kowalska A.: *Hydrauliczna analiza piaskownika napowietrzanego na G.O.Ś. Debogórze*, praca dyplomowa magisterska, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2000.
27. Imhoff K., Imhoff K.R.: *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*, poradnik, Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz, 1996.
28. James. A. i inni: *Modelowanie matematyczne w oczyszczaniu ścieków i ochronie wód*, Arkady, Warszawa, 1986.
29. Jurkiewicz H. i inni: *Aparatura do kontroli czystości wody. Analiza dokładności pomiaru, przykłady konstrukcji*, *Prace naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 1978.
30. Klaczyński E., Komorowska M., Majcherek H.: *Rola sedimentacji wtórnej w procesie biologicznego oczyszczania ścieków*, Warszawa, *Gaz, woda i Technika sanitarna* 7-8/2003.
31. Kondziela A., Sawicki J.M., Skuza M.: *Influence of Velocity Description on Dispersion of Reactor*, XXIV International School of Hydraulic, Jastrzębia Góra, 2004.
32. Kondziela A., Sawicki J.M.: *Hydrauliczna charakterystyka recyrkulacji w reaktorach*, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 3/2005.
33. Kondziela A., Sawicki J.M.: *Wpływ stopnia recyrkulacji na zagęszczenie osadu nadmierne*, *Ekologia i technika*, Nr 14/06, Gdańsk, 2006.
34. Koryta J., Dvorak J.: *Elektrochemia*, PWN, Warszawa, 1980.
35. Kowal A.L i inni: *Odnowa wody. Podstawy teoretyczne procesów*, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 1997.
36. LeVeque R.J.: *Finite Volume Method for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, New York, 2002.
37. Łomotowski J., Szpindor A.: *Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków*, Arkady, Warszawa, 2002.
38. Maciejewski M.: *Hydraulika systemów oczyszczania wody i ścieków oraz zbiorników wodociągowych*, IMGW, Warszawa, 1999.
39. Olańczuk-Neyman K.: *Laboratorium biologii sanitarnej*, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 1985.
40. Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R.: *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
41. Piotrowski I., Roman M.: *Urządzenia do oczyszczania wody i ścieków*, PWN, Warszawa, 1964.
42. Potter D.: *Metody obliczeniowe fizyki*, PWN, Warszawa 1981.
43. Praca zbiorowa: *Hydrauliczne metody modernizacji oczyszczalni ścieków*, Materiały Konf. Naukowo-Technicznej Hydro-Mod 2002, Gdańsk, 2002.
44. Praca zbiorowa: *Oczyszczanie ścieków*, Arkady, Warszawa 1983.

45. Praca zbiorowa: *Wytyczna ATV-DVWK-A131P – wymiarowanie jednostopniowych oczyszczalni ścieków z osadem czynnym*, Niemiecki zbiór reguł Atv-DVWK, Wydawnictwo Seidel Przywecki, Warszawa, 2000.
46. Puzyrewski R., Sawicki J.: *Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki*, PWN, Warszawa, 2000.
47. Rutherford J.C.: *River Mixing*, Chichester: John Wiley and Sons, 1994.
48. Sawicki J.M. i inni: *Hydraulika reaktorów stosowanych w inżynierii sanitarnej*, zeszyt monograficzny nr 1, Politechnika Gdańska 2005.
49. Sawicki J.M. i inni: *Hydraulika tranzytowych systemów inżynierii sanitarnej*, zeszyt monograficzny nr 2, Politechnika Gdańska 2006.
50. Sawicki J.M.: *Migracja zanieczyszczeń*, Gdańsk, Wydawnictwo PG 2003.
51. Sawicki J.M.: *Przepływy ze swobodną powierzchnią*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1998.
52. Sawicki J.M.: *Rational Determination of Dynamic Characteristics of Fluid-flow Reactors*, Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, Vol.52, No. 3, 2005.
53. Scheff P.A. i inni: *Indoor Air in a Middle School, Part I: Use of CO₂ as a Tracer for Effective Ventilation*, Applied Occupational and Environmental Hygiene, Vol. 15, Chicago 2000.
54. Szymkiewicz R.: *Metody numeryczne w inżynierii wodnej*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2007.
55. Szymkiewicz R.: *Solution of the Advection-Diffusion Equation Using the Spline Function and Finite Elements*, Communication in Numerical Method in Engineering, Vol. 9, 1993.
56. Turner Design: *CYCLOPS-7 Submersible Fluorometer*, User's manual, Ver. 1.3, 2004.
57. Wawrentowicz. D. i inni: *Oczyszczanie ścieków. Nowe trendy, modernizacja istniejących oczyszczalni i gospodarka osadowa*, Politechnika Białostocka, Rajgród, 1997.
58. Wilson J.F i inni: *Fluorometric Procedures for Dye Tracing*, U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, 1986.
59. *Zbiór wielkości fizykochemicznych*, PWN, Warszawa, 1966.
60. Zima P.: *Approximated Boundary Conditions of the Equation of Diffusion*, A. H. E. E. M., 2/2002.

Spis tabel

Tab.3.1. Wartości dopuszczalne dla osadników wtórnych o parametrach pośrednich z zakresu pomiędzy osadnikami wtórnymi o przepływie głównie poziomym i głównie pionowym [3]	19
Tab.5.1. Wartości współczynników transportu uzyskane za pomocą różnych formuł	41
Tab.5.2. Współczynniki dyfuzji molekularnej niektórych elektrolitów w wodzie (w temp. 20°C), 10^{-9} [m ² /s] [50]	42
Tab. 6.1. Wartości przygotowanych stężeń roztworów Rodaminy WT i odpowiadające im odczyty na czujniku kolorymetrycznym.....	76
Tab. 6.2. Zestawienie wzajemnych proporcji wydatków odpływowych stosowanych podczas eksperymentu w laboratorium	81
Tab. 6.3. Uśrednione wyniki pomiarów prędkości w wybranych punktach stanowiska pomiarowego (pomiarzy ze „zgarniaczem osadu” – patrz rozdz. 6.5)	85
Tab. 6.4. Zestawienie średnich błędów z serii pomiarowych	101
Tab. 6.5. Kalibracja konduktometru N5721	104
Tab. 6.6. Kalibracja konduktometru N5721M.....	104
Tab. 7.1. Zestawienie parametrów uśrednionych charakterystyk odpływowych dla modelu laboratoryjnego (pomierzonych i obliczonych) dla przepływów z poborem „recykulatu” $\geq 50\%$ dopływu.....	129
Tab. 7.2. Wyniki badania zagęszczania osadu w lejach Imhoffa	137
Tab. 8.1. Wartości poszczególnych parametrów przepływu wyznaczone za pomocą metody „racjonalnej”	145