

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Wydział Inżynierii Środowiska



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Jarosław Olszak

**Sedymencja zanieczyszczeń
w nieizotermicznym zbiorniku stacji filtracyjnej
oczyszczającej wodę sieciową
w systemach ciepłowniczych**

WARSZAWA

1999

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Środowiska
Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji

Rozprawa doktorska
mgr inż. Jarosława Olszaka

***Sedymentacja zanieczyszczeń w nieizotermicznym
zbiorniku stacji filtracyjnej oczyszczającej wodę sieciową w
systemach ciepłowniczych***

Promotor

Prof. dr hab. inż. Stanisław Mańkowski

Warszawa
1999

*Pragnę podziękować
Promotorowi
Panu Profesorowi Stanisławowi Mańkowskiemu
za pomoc i cenne uwagi w trakcie powstawania
niniejszej pracy*

SPIS TREŚCI

Spis oznaczeń.....	2
1. Wprowadzenie	4
2. Teza, cel i zakres pracy.....	6
3. Urządzenia do oczyszczania wody sieciowej	8
4. Koncepcja funkcjonowania układu do oczyszczania wody sieciowej	21
4.1. UKŁAD HYDRAULICZNY STACJI.....	22
4.2. FILTR	23
4.3. ZBIORNIK SEDYMENTACYJNY	26
4.4. UKŁAD WIBRACYJNY	28
4.5. UKŁAD STEROWANIA.....	28
5. Proces sedymentacji zawiesin - analiza zjawiska	31
5.1. OPADANIE GRAWITACYJNE POJEDYNCZEJ CZĄSTKI	31
5.2. OPADANIE ZBIORU CZĄSTEK	34
6. Zjawiska termiczne zachodzące w zbiorniku sedymentacyjnym.....	39
6.1. KONWEKCJA.....	40
PRZEWODZENIE	49
7. Model opadania zawiesin w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury.....	54
7.1. ZAŁOŻENIA DO CZĘŚCI MODELU OPISUJĄCEJ SEDYMENTACJĘ.....	54
ZAŁOŻENIA DO CZĘŚCI MODELU OPISUJĄCEJ PRZEPŁYW CIEPŁA	55
7.3. ZASTOSOWANIE METODY BILANSÓW ELEMENTARNYCH DO OPISU POLA TEMPERATURY W OSADNIKU SEDYMENTACYJNYM.....	57
7.4. WARUNKI POCZĄTKOWE.....	61
7.5. OPIS MODELU NUMERYCZNEGO DO OBLICZANIA SEDYMENTACJI ZANIECZYSZCZEŃ W WARUNKACH SILNEJ STRATYFIKACJI POLA TEMPERATURY	66
8. Badania doświadczalne.....	72
8.1. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO	72
8.2. ZAKRES BADAŃ I METODYKA POMIAROWA.....	73
9. Porównanie wyników doświadczalnych i modelowych.....	91
9.1. PORÓWNANIE ZMIERZONYCH I POLICZONYCH ROZKŁADÓW TEMPERATUR W ZBIORNIKU.....	91
9.2. PORÓWNANIE ZMIERZONYCH I MODELOWANYCH SPRAWNOŚCI SEPARACJI.....	97
10. Podsumowanie i wnioski.....	101
SPIS LITERATURY	103

Spis oznaczeń

Spis zawiera powtarzające się oznaczenia. Pozostałe oznaczenia znajdują pod poszczególnymi wzorami.

c_p	- [J/kg·K]
C_z	- stężenie zanieczyszczeń [kg/m ³]
D	- średnica zbiornika (cylindra) [m]
d	średnica cząstki [μm]
F	- pole powierzchni [m ²]
g	- przyspieszenie ziemskie [m/s ²]
H	- wysokość zbiornika (cylindra) [m]
K	- przewodność cieplna [W/K]
k	- współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]
l_0	- liniowy wymiar charakterystyczny [m]
m	- masa [kg]
Q	- ciepło [J]
S	- pole powierzchni rozgraniczającej elementy różnicowe [m ²]
T	- temperatura w skali bezwzględnej [K]
ΔT	- różnica temperatur [K]
t	- temperatura w skali Celsjusza [°C]
t_d	- temperatura wody w zbiorniku przed zrzutem [°C]
t_g	- temperatura zrzucanej wody [°C]
u	- prędkość [m/s]
u_t	- prędkość opadania cząstki [m/s]
u_z	- prędkość opadania cząstki w zawieszynie [m/s]
V	- objętość [m ³]

Litery greckie

α	- współczynnik wnikania (wymiany) ciepła [W/m ² ·K]
β	- współczynnik rozszerzalności objętościowej gazu [1/K]
η	- sprawność [%]

- φ - sferyczność bryły [-]
 λ - współczynnik oporów ruchu cząstki [-]
 μ - współczynnik lepkości dynamicznej [N·s·m²]
 ν - kinematyczny współczynnik lepkości [m²·s]
 ρ - gęstość [kg/m³]
 τ - czas [s]
 $\Delta\tau$ - długość kroku czasowego [s]

Indeksy

- c - cieczy
p - płynu
s - ciała stałego

Liczby kryterialne

$$Gr = \frac{gl_0^3 \beta \Delta T}{\nu^2} \quad - \text{liczba Grashofa}$$

$$Nu = \frac{al_0}{k} \quad - \text{liczba Nusselta}$$

$$Pe = Re Pr \quad - \text{liczba Pécleta}$$

$$Pr = \frac{\nu}{k / c_p} \quad - \text{liczba Prandtla}$$

$$Ra = Gr Pr \quad - \text{liczba Rayleigha}$$

$$Re = \frac{ul_0}{\nu} \quad - \text{liczba Reynoldsa}$$

1. Wprowadzenie

Ze względu na warunki klimatyczne, zaopatrzenie odbiorców w ciepło jest w Polsce ważnym zagadnieniem. Energia zużywana na ogrzanie budynków i podgrzanie wody użytkowej w sektorze komunalno-bytowym stanowi 40% bilansu energetycznego kraju [63]. Podejmowane w ostatnich latach próby restrukturyzacji systemu wytwarzania i dystrybucji energii, zaowocowały częściowym urynkowaniem usług ciepłowniczych, co umożliwiło poszczególnym producentom i dostawcom ciepła ustalanie własnych cen na rynkach lokalnych, w granicach określonych przez Urząd Regulacji Energetyki. Różnice pomiędzy kosztami wytwarzania energii, a co za tym idzie – cenami jej zbytu, w różnych miastach Polski są znaczne. Wynika to z faktu, że systemy ciepłownicze na obszarze kraju charakteryzują się bardzo zróżnicowanymi cechami technicznymi, ekonomicznymi i stanem organizacyjno-własnościowym.

Jednak aktualna sytuacja na rynku paliwowo-energetycznym spowodowana elementami gry rynkowej, zmusza właścicieli systemów wytwarzania i dystrybucji ciepła do podjęcia działań zmierzających do poprawy efektywności funkcjonowania i podwyższenia standardu świadczonych usług. Odbiorcy ciepła dążą do obniżenia kosztów ogrzewania budynków, wprowadzając m.in. zautomatyzowane węzły ciepłownicze. Są one wyposażone w urządzenia, które od strony zasilania wymagają wysokiej jakości wody sieciowej (w Polsce jakość wody jest określona jest normą PN-85/C-04601).

Tymczasem znajdujące się w wodzie obiegowej zanieczyszczenia mechaniczne, są jedną z głównych przyczyn awarii urządzeń ciepłowniczych, tj. sieci, węzłów, pomp itp. Podstawowym źródłem ich powstawania są procesy korozji przewodów oraz zmiany składu chemicznego wody, w wyniku czego tworzą się związki chemiczne nierozpuszczalne w wodzie (głównie sole wapnia i magnezu). Ponadto w przewodach występują również części stałe, wprowadzone do systemu w czasie jego montażu i remontów (otuliny spawalnicze, piasek itp.).

Ochrona przed szkodliwym oddziaływaniem zanieczyszczeń wody w systemach ciepłowniczych, może być prowadzona w dwóch zasadniczych kierunkach: usuwania płynących w wodzie cząstek stałych oraz uzdatniania wody obiegowej, przy jednoczesnym uszczelnianiu sieci, gdyż wysoka jakość wody sieciowej zależy przede wszystkim od szczelności systemu. Im mniejsze są ubytki wody, tym łatwiej jest utrzymać wymagane parametry, a woda uzupełniająca, potrzebna w niewielkich ilościach, może być dokładniej uzdatniona. Powstające w trakcie eksploatacji zanieczyszczenia wychwytywane są przez

dodatkowe urządzenia do oczyszczania wody, pracujące na przewodach rozprowadzających wodę.

Na rynku dostępnych jest wiele urządzeń do usuwania zanieczyszczeń mechanicznych z wody obiegowej, cechujących się różnorodnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi. W większości przypadków przeznaczone są one do ochrony wrażliwych elementów systemu ciepłowniczego i montuje się je przed wymiennikami ciepła, zaworami elektromagnetycznymi itp. Odmiennych rozwiązań wymagają urządzenia wykorzystywane do systemowego uzdatniania wody w dużych sieciach ciepłowniczych, o objętości zładu kilkadziesiąt tysięcy metrów sześciennych. Muszą charakteryzować się wysoką skutecznością oczyszczania, możliwością pracy przy dużych natężeniach przepływu (specyfika sieci ciepłowniczych), uniwersalnością zastosowania (zatrzymywanie różnych rodzajów zanieczyszczeń) oraz automatycznym trybem pracy (rosnące koszty utrzymania wykwalifikowanej kadry technicznej).

Niniejsza praca dotyczy procesów zachodzących w nowej technologii oczyszczania wody sieciowej z zanieczyszczeń mechanicznych, w której zastosowano stacje filtracyjne o dużej wydajności, z automatycznie sterowanym cyklem oczyszczania wkładów filtracyjnych. Technologia ta oraz stosowane w niej urządzenia procesowe, zostały opracowane w latach 1989-1995 w Instytucie Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

2. Teza, cel i zakres pracy

Tezą pracy jest zbadanie procesów sedymentacji zawiesiny składającej się z zanieczyszczeń mechanicznych, występujących w wodzie systemów energetycznych. Badane procesy sedymentacji zachodzą w ograniczonej przestrzeni, przy występowaniu zjawiska stratyfikacji pola temperatury oraz w warunkach hydraulicznych występujących w stacjach z filtrami tkaninowo-włókninowymi, czyszczonymi metodami wibracyjnymi.

Celem pracy jest osiągnięcie takiego stanu poznania tych procesów, który umożliwi optymalne projektowanie i eksploatację rozpatrywanych stacji filtracyjnych, dające możliwość osiągnięcia największej ich skuteczności oraz minimalizację kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Badania zostały przeprowadzone na prototypie stacji oczyszczania wody sieciowej, pracującym na magistrali ciepłowniczej zasilającej teren główny Politechniki Warszawskiej. Rozwiązanie eksploatacyjne przewiduje współdziałanie dwóch elementów: samoczyszczącego filtra tkaninowo-włókninowego i zbiornika sedymentacyjnego. Ocena działania filtra oraz automatycznego układu sterowania, została szczegółowo opisana w [49, 50, 52]. Z tej przyczyny w niniejszym opracowaniu położono nacisk na mało poznane zjawiska zachodzące w osadniku, stanowiącym w obrębie stacji, drugi etap oczyszczania wody sieciowej z zanieczyszczeń mechanicznych.

Ocenę skuteczności usuwania zanieczyszczeń w osadniku, przeprowadzono doświadczalnie, na stanowisku badawczym zlokalizowanym obok pracującej stacji. Warunki, jakie panowały podczas wykonywania pomiarów, były takie, jak podczas eksploatacji urządzenia. Na podstawie rozważań teoretycznych i przeprowadzonych obserwacji, wykonano model numeryczny zjawisk zachodzących w zbiorniku sedymentacyjnym. Model ten może służyć do doboru optymalnych parametrów pracy stacji oraz do konstruowania osadników o różnych pojemnościach, w zależności od wymagań eksploatacyjnych, co pozwala zaprojektować typoszereg stacji oczyszczania wody.

W pierwszej części pracy przedstawiono rodzaje zanieczyszczeń wody ciepłowniczej, źródła ich powstawania oraz wpływ na funkcjonowanie sieci ciepłowniczych. Scharakteryzowano zanieczyszczenia mechaniczne, opisano metody usuwania części stałych z obiegów ciepłowniczych i grzewczych, a także podano przykłady urządzeń dostępnych na polskim rynku oraz rodzaje materiałów filtracyjnych stosowanych w ciepłownictwie. Następnie szczegółowo opisano stację oczyszczania wody

sieciowej typu IOiW-ST/60, pracującą w trybie automatycznym, w skład której wchodzi badany osadnik.

Druga część obejmuje rozważania teoretyczne, dotyczące zjawisk zachodzących w zbiorniku. Zjawiska te można podzielić na dwie grupy. Pierwsza, to procesy mechaniczne, związane z opadaniem grawitacyjnym w wodzie ziaren o różnych średnicach; druga dotyczy zjawisk wymiany ciepła wewnątrz stygnącego osadnika oraz pomiędzy osadnikiem a otaczającym go powietrzem, w kontekście wpływu zmian temperatury wody na proces sedymentacji zanieczyszczeń.

W części trzeciej opisano model numeryczny, wykonany na podstawie dotychczasowych doświadczeń innych autorów oraz prac własnych, opisujący sedymentację cząstek o różnych średnicach w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatur. Następnie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych sprawności osadnika, pomiary zmian pola temperatur wewnątrz zbiornika oraz wyniki analizy zanieczyszczeń zatrzymanych na stacji oczyszczania wody. Wyniki modelowania porównano z wynikami doświadczalnymi.

Na zakończenie pracy, w oparciu o wyniki badań oraz wykonane obliczenia, sformułowano wnioski dotyczące zjawiska sedymentacji zanieczyszczeń w zbiorniku:

- na podstawie eksperymentów określono rzeczywistą skuteczność osadnika, w zakresie odseparowywania od wody zanieczyszczeń mechanicznych występujących w sieciach ciepłowniczych, co pozwala w sposób optymalny projektować i eksploatować urządzenie procesowe badanych stacji filtracyjnych;
- wykazano zadowalającą zgodność pomiędzy wynikami pomiarów i wartościami obliczonymi za pomocą modelu numerycznego, wobec czego model może służyć do celów projektowych.

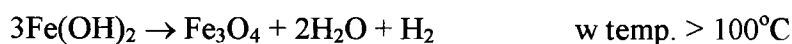
Przeprowadzone badania teoretyczne i fizyczne uzupełniły stan wiedzy na temat opracowanej wcześniej nowej technologii oczyszczania wody w sieciach ciepłowniczych i kotłowych, pozwalając z większą świadomością wykorzystywać procesy zachodzące w urządzeniach stacji filtracyjnej.

3. Urządzenia do oczyszczania wody sieciowej

3.1. Zanieczyszczenia w sieciach ciepłowniczych

Zanieczyszczenia wody powstające w trakcie eksploatacji systemów ciepłowniczych, są jedną z głównych przyczyn awarii urządzeń sieciowych. Podstawowym źródłem powstawania zanieczyszczeń są procesy korozji metalowych przewodów oraz zmiany składu chemicznego wody, czego wynikiem jest tworzenie związków chemicznych nierozpuszczalnych w wodzie (przede wszystkim soli wapnia i magnezu). Procesy te, prócz przyspieszenia zużycia instalacji, są przyczyną wzrostu chropowatości ścianek wewnętrznych przewodów, co powoduje dodatkowe straty ciśnienia i konieczność zwiększenia wysokości podnoszenia pomp obiegowy (dodatkowy pobór mocy). Szczególnie wrażliwe na działanie zanieczyszczeń stałych, są wymienniki ciepła i urządzenia regulacji automatycznej.

W przewodach ciepłowniczych wypełnionych wodą, produktami korozji są związki żelaza, powstające zgodnie z reakcjami [14]:



Powstający w przewodach magnetyt (Fe_3O_4) ma barwę czarną. Osadza się na powierzchniach wewnętrznych rur. Warstwa magnetytu może stanowić ochronę stali przed dalszą korozją (pasywacja powierzchni) pod warunkiem, że jest szczelna i nie ulega niszczeniu, tzn. gdy warunki przepływu wody w sieci są w stabilne. W warunkach eksploatacyjnych taka sytuacja występuje bardzo rzadko, gdyż zazwyczaj ciągłym zmianom podlegają zarówno temperatura wody, jak i natężenie przepływu oraz ciśnienie panujące w sieci. Warstwa magnetytu ulega wymywaniu. Od ścianek odrywają się drobnoziarniste cząstki w kształcie nieregularnych płytek, które krążą wraz ze strumieniem wody. Małe rozmiary tych cząstek (1 - 20 μm wg [51], średnio 0,9 μm wg [14], średnio 0,65 - 1,3 μm wg [10]) powodują, iż nie są one zatrzymywane przez najczęściej stosowane inercyjno-siatkowe urządzenia do oczyszczania wody. Szlam magnetytowy osadza się w miejscach, gdzie spada prędkość wody lub występują zakłócenia przepływu, powodując zatykanie zaworów zwrotnych i odcinających oraz zakłócając pracę przepływomierzy wirnikowych.

Prócz oddziaływania fizycznego na urządzenia sieciowe, związki żelaza mają silne działanie katalityczne intensyfikujące procesy korozyjne. Według [14] pod wpływem tlenu, który przedostaje się do wody obiegowej, tworzą się uwolnione tlenki żelaza ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) mające barwę ciemnobrązową, przy czym w warstwie stykającej się bezpośrednio z powierzchnią przewodu znajdują się związki żelaza dwuwartościowego (Fe^{+2} w magnetycie), zaś w warstwie zewnętrznej - związki żelaza trójwartościowego (Fe^{+3} w Fe_2O_3). Im większa ilość tlenu rozpuszczonego w wodzie, tym większa jest zawartość jonów Fe^{+3} . Na początku sezonu grzewczego głównym składnikiem osadów są sole żelaza Fe^{+3} , natomiast po pewnym czasie wzrasta ilość soli żelaza dwuwartościowego. Mimo, iż po długotrwałej eksploatacji woda obiegowa nie zawiera tlenu, to proces korozji zachodzi nadal, ponieważ jony Fe^{+3} , jako nośniki tlenu, umożliwiają utlenianie atomów żelaza:

$$2\text{Fe}^{+3} + \text{Fe} \rightarrow 3\text{Fe}^{+2}.$$

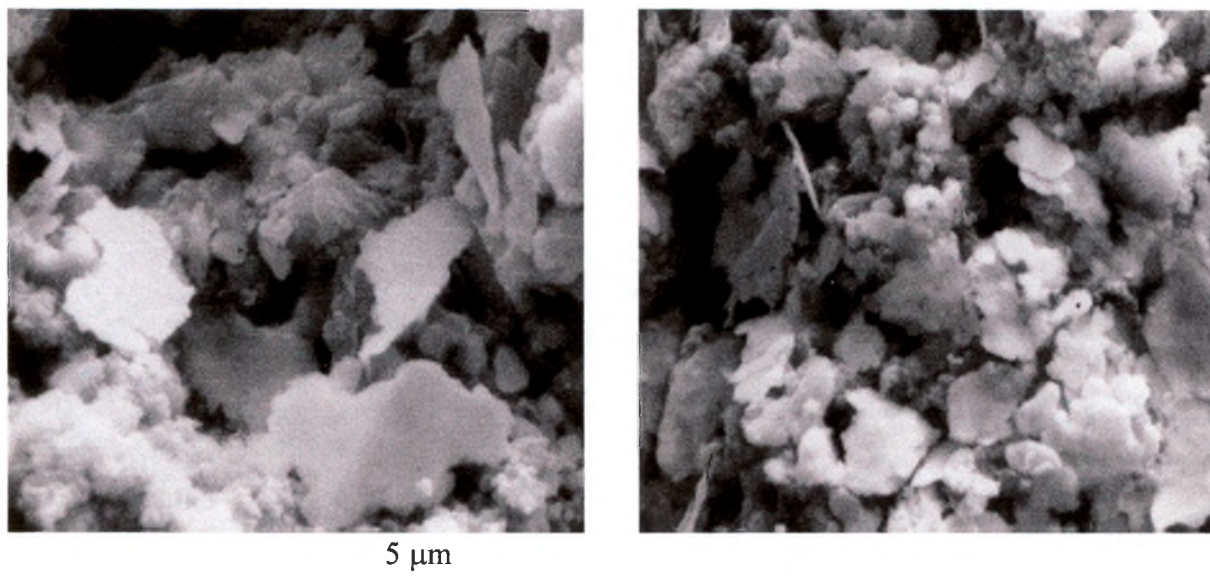
Analiza chemiczna odmulin zatrzymanych w urządzeniach oczyszczających sieci ciepłowniczej [2, 10, 37] wykazała, że zawartość żelaza w osadach wynosi ponad 60% masy zanieczyszczeń, dochodząc do 93,5%.

Prócz związków żelaza, które stanowią większość wśród zanieczyszczeń sieci ciepłowniczej, występują także słabo rozpuszczalne sole wapnia, magnezu i manganu oraz krzemionka SiO_2 . Sporadycznie mogą pojawiać się zanieczyszczenia grube w postaci fragmentów żużli i sopli pospawalniczych. Związki magnezu występują w wodzie ciepłowniczej w postaci bardzo drobnych kryształów, osadzających się na powierzchniach przewodów. Związki wapnia występują w postaci zawiesiny o cząstkach mniejszych niż 50 μm [14].

Przeprowadzono szereg badań osadu zatrzymanego na urządzeniach oczyszczających [3, 10, 11, 32, 36, 37, 38 51], obejmującą analizę frakcyjną zanieczyszczeń. Badania te wykazały, iż skład poszczególnych frakcji ziaren różni się znacznie, w zależności od miejsca i czasu poboru prób oraz zastosowanej metodyki badań. W nowo oddanych magistralach ciepłowniczych i w przewodach, gdzie prowadzone były remonty, przeważają zanieczyszczenia grube ($>100 \mu\text{m}$) i średnie ($> 10 \mu\text{m}$), co świadczy o obecności zanieczyszczeń pochodzących z poza sieci: zanieczyszczeń montażowych i krzemionki z mas formierskich do odlewania grzejników (w przypadku stosowania węzłów hydroelewatorowych lub mieszań pompowych). Natomiast, gdy w zatrzymanych zanieczyszczeniach zawartość cząstek ferromagnetycznych (czyli magnetytu) jest mała można przypuszczać, że w wodzie sieciowej jest wysokie stężenie tlenu, spowodowane

niewłaściwym odgazowaniem wody uzupełniającej lub przedostawaniem się do sieci ciepłowniczej wody wodociągowej. W takich warunkach magnetyt utlenia się do Fe_2O_3 [37].

W sieciach pracujących przez dłuższy czas, woda obiegowa charakteryzuje się znaczącym udziałem zanieczyszczeń drobnych, wykazujących własności ferromagnetyczne. Świadczy to, że dominującym zanieczyszczeniem jest magnetyt. W szczelnych sieciach ciepłowniczych, zabezpieczonych przed przenikaniem tlenu do wody i przedostawaniem się zanieczyszczeń zewnętrznych, szlam magnetytowy stanowi ponad 90% ogólnej masy zanieczyszczeń. Na fotografii 3.1. przedstawiono zdjęcia zanieczyszczeń, zatrzymanych w lutym 1999 r. na filtrze włókninowym oczyszczającym wodę w kolektorze zasilającym teren główny Politechniki Warszawskiej.



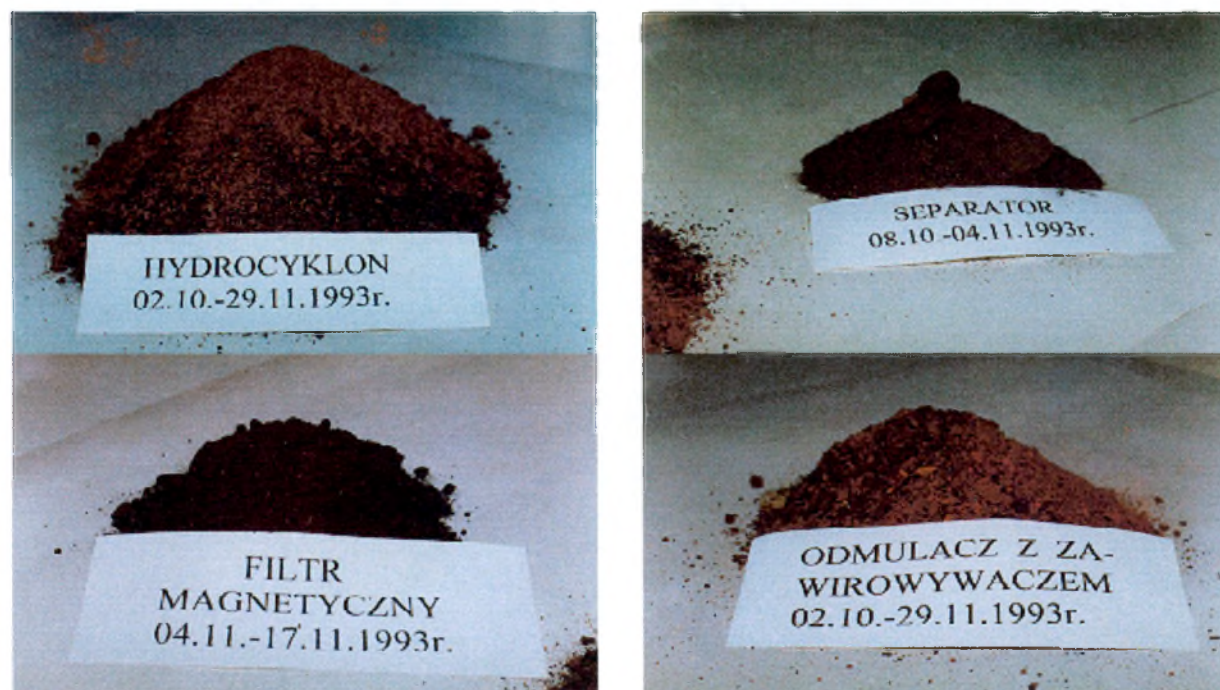
Fotografia 3.1. Zanieczyszczenia wody sieciowe powiększone 5000 razy (próbki pobrane przez autora w lutym roku 1999)

Autorzy pracy [37] przeprowadzili dodatkowo pomiary stężeń zanieczyszczeń płynących w systemach ciepłowniczych dwóch miastach wojewódzkich. Badania wykazały, że stężenie zawiesiny, płynącej w przewodach podczas stabilnej pracy sieci w pierwszym mieście, zawiera się w granicach $0,250\text{-}0,310 \text{ mg/dm}^3$, zaś w drugim mieście - $0,642\text{-}0,805 \text{ mg/dm}^3$. Na początku sezonu grzewczego lub przy gwałtownych zmianach parametrów pracy sieci, wartości te mogły okresowo wzrastać do poziomu kilku czy kilkudziesięciu mg/dm^3 . Taki okresowy skok zawartości zanieczyszczeń w wodzie jest zjawiskiem charakterystycznym dla sieci ciepłowniczych. Spadek temperatury zewnętrznej powoduje gwałtowne zwiększenie zapotrzebowania na ciepło, co wymusza wzrost

natężenia przepływu nośnika ciepła oraz jego temperatury. Na początku sezonu grzewczego, chmura cząstek jest porywana przez wodę z dna przewodów, gdzie zanieczyszczenia osadziły się w miesiącach letnich. Część ziaren jest wychwytywana w urządzeniach oczyszczających, a część pozostaje w obiegu i po ustabilizowaniu się przepływu - osiada na dnie przewodów.

Polska norma PN-85/C-04601, określa dopuszczalną zawartość zawiesiny ogólnej w wodzie obiegowej na 5 mg/dm^3 . Wielkość ta jest dotrzymana w polskich systemach ciepłowniczych przez znaczną część roku. Nie wynika to, bynajmniej, z dbałości właścicieli sieci o stan instalacji i o jakość przesyłanej wody, lecz z faktu, iż przyjęta wartość jest mocno zawyżona w stosunku do krajów prowadzących od lat politykę oszczędzania energii. Przykładowo w Danii, gdzie sieć ciepłownicza jest nowoczesna i w pełni zautomatyzowana, określono dopuszczalny poziom zanieczyszczeń na $0,5 \text{ mg/dm}^3$. Tak więc w polskich warunkach należy raczej opierać się na przepisach duńskich lub fińskich, które, w odróżnieniu od normy polskiej, zostały stworzone z myślą o zapewnieniu bezawaryjnej pracy wrażliwych elementów systemu ciepłowniczego.

Na zdjęciu 3.2. pokazano zanieczyszczenia, usunięte z obiegu przez urządzenia pracujące w sieci ciepłowniczej w Warszawie w 1993 r. [36].



Fotografia 3.2. Zanieczyszczenia wody sieciowej zatrzymane w różnych rodzajach odmulaczy [36]

Jak już wspomniano, zanieczyszczenia mechaniczne płynące w sieciach ciepłowniczych mają różny skład chemiczny, przy wielkości ziaren wahającej się od części mikrometra do kilku milimetrów. Uszczelnienie sieci powoduje, że w ogólnej masie zanieczyszczeń, zmniejsza się udział zanieczyszczeń, a przybywa zanieczyszczeń o ziarnach średnich i drobnych, powstałych w skutek reakcji żelaza, wapnia, magnezu i manganu z tlenem zawartym w wodzie. Ponadto w sieciach ciepłowniczych występuje stałe zjawisko mechanicznego rozdrabniania cząstek, charakterystyczne dla tzw. „młynów hydraulicznych”. Dodatkowe zastosowanie systemów odgazowania wody i zmniejszenie zawartości w niej tlenu, prowadzi do sytuacji, gdy w zanieczyszczeniach przeważa magnetyt.

Usuwanie z obiegu zanieczyszczeń o różnych rozmiarach, powstających w różnorodnych warunkach powoduje konieczność stosowania takich urządzeń, które skutecznie oczyszczą wodę. W sieciach dopiero co oddanych do użytku lub tam, gdzie do instalacji przedostają się zanieczyszczenia zewnętrzne (odcinki wymagające częstych remontów), niezbędne jest zamontowanie urządzeń przeznaczonych do zatrzymywania zarówno zanieczyszczeń grubych, jak również średnich i drobnych. W uszczelnionych sieciach, gdzie cząstki grube zostały usunięte z obiegu, punkt ciężkości przy oczyszczaniu wody przesunęła się w kierunku zanieczyszczeń drobnych, o rozmiarach kilku mikrometrów. Dotychczasowe badania prowadzone w systemach grzewczych i ciepłowniczych, pozwoliły wypracować różnorodne rozwiązania konstrukcyjne urządzeń przeznaczonych do usuwania zanieczyszczeń mechanicznych. Zatrzymywanie cząstek ciał stałych jest, obok usuwania rozpuszczonych związków żelaza i manganu, podstawowym procesem wstępnego uzdatniania wody na potrzeby obiegu grzewczych i ciepłowniczych.

Do usuwania z obiegu zanieczyszczeń mechanicznych stosuje się urządzenia wykorzystujące zjawiska:

- grawitacyjne (w osadnikach) - osiadanie cząstek pod wpływem siły ciężkości;
- magnetyczne (w odmulaczach magnetycznych i elektromagnetycznych) - wychwytywanie produktów korozji żelaza wykazujących właściwości ferromagnetyczne;
- inercyjne (w hydrocyklonach) - separacja zanieczyszczeń pod wpływem siły odśrodkowej, wywołanej spiralnym ruchem wody;

- filtracyjne (w filtrach) - zatrzymywanie ziaren na powierzchni lub wewnątrz złoża filtracyjnego, albo materiału o strukturze kanalikowej lub porowatej.

Bardzo często w urządzeniach stosuje się rozwiązania wykorzystujące dwa lub więcej z wymienionych powyżej zjawisk.

3.2. **Przegląd urządzeń stosowanych do oczyszczania wody obiegowej**

Od początku lat dziewięćdziesiątych, po wprowadzeniu w Polsce elementów wolnego rynku w zakresie gospodarowania energią cieplną, zarówno producenci jak i odbiorcy ciepła są zainteresowani obniżeniem kosztów eksploatacji urządzeń i zmniejszeniem strat energii. Rachunek ekonomiczny wymusza dążenie do optymalnego wykorzystania istniejących systemów, co jest związane z ich przebudową i rozbudową. Zastosowanie nowoczesnych urządzeń automatycznego sterowania procesami wytwarzania, dystrybucji i wykorzystania ciepła, pozwala zaoszczędzić ponad 20% energii. Wymaga to jednak utrzymania wody obiegowej o odpowiednich własnościach fizyko-chemicznych. Obowiązujące w Polsce liberalne przepisy dotyczące normy jakości wody (wzorowane *nota bene* jeszcze na radzieckich wytycznych) sprawiają, że woda w polskich sieciach ciepłowniczych spełnia wymagania prawne. Mimo tego, coraz częściej właściciele sieci decydują się na oczyszczanie wody obiegowej do poziomu zawiesin $< 1 \text{ mg/dm}^3$, by sprostać wymogom stawianym przez producentów armatury regulacyjnej.

Działanie w kierunku zastosowania i utrzymania w systemach wody o odpowiedniej jakości, można realizować poprzez:

- ograniczenie źródeł powstawania osadów przez zapewnienie szczelności sieci (doprowadzenie do stanu 1 - 2 wymian objętości zładu w ciągu roku),
- uzdatnianie wody uzupełniającej (zatrzymywanie zanieczyszczeń mechanicznych oraz odżelazianie i odmanganianie wody),
- ciągłe usuwanie zanieczyszczeń płynących w wodzie obiegowej, poprzez stosowanie odmulaczy instalowanych w węzłach i na magistralach ciepłowniczych.

Odpowiedzią projektantów i producentów na wzrost zapotrzebowania w Polsce na urządzenia do usuwania zanieczyszczeń mechanicznych z wody sieciowej, była szeroka oferta odmulaczy, przeznaczonych do zastosowania w węzłach, instalacjach wody uzupełniającej, jak i na przewodach magistrali ciepłowniczych [9, 13, 17 22, 25, 26, 29, 37, 38, 43 48, 50 ,51, 53, 54, 59, 62]. W tabeli 3.1. przedstawiono wybrane odmulacze, dostępne na polskim rynku.

Tabela 3.1. Wybrane urządzenia do oczyszczania wody dostępne na polskim rynku.

Rodzaj odmulaczy	Producent	Typ	Zatrzymywane cząstki
magnetyczne	Heco International (Dania)	TM	> 1 μm
elektromagnetyczne	Kraftwerk Union (Niemcy)	EMF	> 0,1 μm
hydrocyklony	Wilo (Niemcy)	WPS	
	BWT (Niemcy)	BEWAPUR	
	Infracorr (Polska)	IHM, IOW	> 10 μm
filtry siatkowe	Heco International (Dania)	LSS TS GF, HG, DVS KS/AKS	1000-10000 μm ^{*)} 25-2500 μm 2000-10000 μm 50-3000 μm (samoczysz.)
	Hans Sasserath	DRUFI	90 μm (samoczysz.)
	Honeywell (USA)	F 74, F 76, HS 10	20-200 μm
	POLNA (Polska)	FS-1, FS-3	
	BWT (Niemcy)	Uni, Diago, Combi, Mini, Bewapur, RF-A, RF-M, KF	50 μm lub 90 μm
filtry workowe	Heco International (Dania)	TP	1-100 μm
	BWT (Niemcy)	KTF	
	Klinger (Niemcy)	AES, AES-F	40 lub 100 μm
filtry ceramiczne	Caleffi	Caleffi	50 μm
filtry szcztkowe	JUDO Wasseraufbereitungs (Niemcy)	Heifi-Vent	
sedymentacyjno-siatkowe	PP-U Termen (Polska) FUC Thermo (Polska)	FO	
inercyjno-siatkowe	Infracorr (Polska) Secespol (Polska)	IOW	> 10 μm
magnetyczno-siatkowe	PP-U Termen (Polska) FUC Thermo (Polska)	FOM	
	Infracorr (Polska)	IFM	
	Salmson (Francja)	CLEANSON	> 40 μm
workowo - magnetyczne	Heco International (Dania))	TM-P	1-100 μm (worek) > 1 μm (magnesy-cz. ferro.)
	Promar (Polska)	KKF	> 5 μm
workowo-magnetyczno-siatkowe	Heco International (Dania)	Micro-line 1050	1-100 μm (worek) 25-1000 μm (siatka) > 1 μm (magnesy-cz. ferro)
magnetyczno-inercyjno-sedymentacyjne	Z.M. „ATeS” (Polska)	OISm	> 1 μm (cząstki ferromagn.)
magnetyczno-siatkowo-sedymentacyjne	Spaw Test (Polska)	OISm, MOS	> 1 μm (cząstki ferromagn.)

^{*)} zakres np. 1000-10000 μm oznacza, że można montować siatki (worki) o różnych średnicach oczek w podanym zakresie

Oferowane rozwiązania konstrukcyjne pozwalają dobrać urządzenia do zastosowania w różnych miejscach systemu rozprowadzania ciepła. Odmulacze montuje się:

- na przewodach dostarczających wodę uzupełniającą,
- w obiegu instalacyjnym niskoparametrowym,
- na przewodach doprowadzających wodę o wysokich parametrach do węzłów cieplnych,
- na wybranych odcinkach sieci rozdzielczej,
- na przewodach magistralnych (głównie w źródłach ciepła).

Odmulacze są zwykle produkowane w typoszeregach, co umożliwia dobranie takiej wersji urządzenia, która będzie odpowiadała wymaganemu natężeniu przepływu czynnika w przewodzie - od ok. $1 \text{ m}^3/\text{h}$ do kilku tysięcy m^3/h .

Na doprowadzeniu wody uzupełniającej stosuje się systemy odżelaziania i odmanganiania wody oraz filtry siatkowe, ceramiczne i szczotkowe. Wychwytyją one zanieczyszczenia rzędu kilkunastu - kilkudziesięciu mikrometrów, ograniczając przedostawanie się do wody obiegowej zanieczyszczeń zewnętrznych.

W obiegach instalacyjnych na przewodach powrotnych stosuje się odmulacze, które wychwytyją zanieczyszczenia płynące w kierunku węzła od strony urządzeń armatury grzewczej. Zapobiegają zatykaniu mechanizmów wchodzących w skład węzła oraz osadzaniu zanieczyszczeń w grzejnikach i zaworach przygrzejnikowych. Ze względu na fakt, że w obiegu instalacyjnym rzadko pojawiają się zanieczyszczenia frakcji grubych z poza obiegu, szczególny nacisk kładzie się tutaj na zatrzymanie zanieczyszczeń drobnoziarnistych. Dlatego najczęściej spotyka się odmulacze wykorzystujące zjawiska magnetyczne oraz filtry siatkowe z wkładami o drobnych oczkach (ok. $250\text{-}300 \text{ oczek}/\text{cm}^2$).

Odmulacze montowane na przewodach doprowadzających wodę od strony sieci do węzłów cieplnych, zabezpieczają urządzenia w węźle. Skuteczna ochrona precyzyjnych mierników i zaworów, wymaga stosowania rozwiązań zatrzymujących cząstki mechaniczne w szerokim przedziale frakcyjnym. W tych przypadkach najczęściej wykorzystuje się odmulacze inercyjno-siatkowe, magnetyczno-inercyjno-sedymentacyjne i magnetyczno-inercyjne. Siatki filtracyjne oraz zastosowanie ruchu wirowego cieczy, pozwala skutecznie przechwycić grube i średnie ziarna powyżej wielkości ok. $20 \mu\text{m}$, a wykorzystanie dodatkowo pola magnetycznego zapewnia zatrzymywanie cząstek ferromagnetycznych o rozmiarach większych od $1 \mu\text{m}$.

Znacznie rzadziej jako zabezpieczenie węzłów cieplnych stosuje się hydrocyklony mimo, iż tego typu urządzenia cechuje prosta budowa, niezawodność i duża skuteczność zatrzymywania zanieczyszczeń grubych i średnich oraz cząstek drobnych powyżej $4 \mu\text{m}$.

Na odcinkach sieci rozdzielczej i na przewodach magistrali ciepłowniczych montuje się odmulacze mające na celu reuzdatnianie wody ciepłowniczej. Urządzenia instalowane są na odgałęzieniach bocznych, z uwagi na dużą średnicę przewodów głównych i przepływ rzędu kilku tysięcy metrów sześciennych wody na godzinę. Część strumienia głównego, zwykle 3%-15%, za pomocą pompy kierowana jest do odgałęzienia bocznego, na którym zainstalowano odmulacz. Oczyszczona woda trafia z powrotem do obiegu głównego. Takie rozwiązanie sprawia, że nie powstają dodatkowe opory przepływu i pozwala prowadzić ciągle uzdatnianie wody sieciowej, bez konieczności przerywania pracy obiegu głównego na czas czyszczenia odmulacza. Zwykle jako urządzenia boczniowe stosuje się te rozwiązania, które dają możliwość zatrzymywania ziaren o frakcjach zarówno grubych, jak i drobnych, czyli filtry workowe, filtry workowo-magnetyczne oraz odmulacze magnetyczno-siatkowo-sedymentacyjne.

Przy omawianiu problemów związanych z usuwaniem zanieczyszczeń mechanicznych z wody, należy zwrócić uwagę na dwa ściśle ze sobą powiązane aspekty, a mianowicie skuteczność zatrzymywania cząstek oraz częstotliwość czyszczenia odmulacza. Zadaniem konstruktorów jest osiągnięcie jak najwyższej skuteczności oczyszczania w jak najszerszym przedziale frakcyjnym. Powoduje to jednak szybkie zatykanie odmulaczy i konieczność czyszczenia, za każdym razem, gdy opory przepływu wzrosną powyżej dopuszczalnego poziomu. Przykładowo instrukcja obsługi odmulaczy magnetyczno-inercyjno-sedymentacyjnych przewiduje wykonanie czyszczenia co 10-15 dni (z wyjątkiem pierwszego miesiąca eksploatacji). Fotografia 3.3. przedstawia wkłady magnetyczne do filtrów czyste i po okresie 2 tygodniowej eksploatacji.



Fotografia 3.3.

Wkłady do filtrów magnetycznych: czyste i zanieczyszczone [36]

Znacznie skuteczniejsze filtry workowo-magnetyczno-siatkowe firmy Heco, zainstalowane w Katowickiej Spółdzielni Mieszkaniowej, są czyszczone 2 razy w tygodniu, przy zastosowanej włókninie o granicy filtracji 50 μm . Jednak, gdy woda sieciowa jest mocno zanieczyszczona, konieczność płukania urządzeń może występować co kilka lub kilkanaście godzin.



Fotografia 3.4.

*Wkłady filtra włókninowego:
zanieczyszczony i czysty [36]*

Konstruktorzy odmulaczy i projektanci sieci, zmniejszenie pracochłonności procesu czyszczenia, przy zachowaniu wysokiej skuteczności zatrzymywania cząstek, realizują dwoma metodami. Pierwsza z nich, to stosowanie kilku stopni oczyszczania; natomiast druga polega na konstruowaniu odmulaczy samoczyszczących.

Stosowanie kilku stopni oczyszczania polega na instalowaniu szeregowo na przewodzie kilku urządzeń. Pierwszy stopień ma za zadanie wychwycić frakcje najgrubsze. Tą rolę bardzo dobrze spełniają filtry siatkowe o oczkach rzędu setek mikrometrów lub nawet milimetrów, w przypadku dużego zanieczyszczenia sieci. Odmulacze inercyjno-siatkowe o drobniejszych oczkach lub hydrocyklony, na drugim stopniu wychwytyują cząstki średnie. Ostatni stopień, to odmulacze magnetyczne lub filtry workowe o drobnych porach, zatrzymujące cząstki bardzo drobne - szlam magnetytowy. Dobór i ustawienie urządzeń zależy oczywiście od tego, w jakim stopniu chcemy oczyścić wodę obiegową.

Trójstopniowa stacja oczyszczania pracuje na boczniku sieci rozdzielczej DN 300, zasilanej z EC Siekierki w Warszawie. Oczyszczanie wstępne następuje na odmulaczach inercyjno-siatkowych. Podstawowy stopień oczyszczania - to multihydrocyklony, natomiast oczyszczanie dodatkowe realizowane jest na filtrach workowo-magnetycznych, które decydują o wysokiej skuteczności zatrzymywania zanieczyszczeń, lecz wymagają częstego czyszczenia (na początku sezonu grzewczego co 3-4 dni, pod koniec - raz na 2 tygodnie) [3].

Ciekawe rozwiązanie, polegające na połączeniu kilku rodzajów urządzeń, zaproponowali autorzy pracy [37]. Prototypowa stacja „Tester-1” została zbudowana jako urządzenie diagnostyczne, w celu umożliwienia oceny zanieczyszczenia wody i doboru odpowiedniej technologii odmulania. Przeznaczona do zainstalowania na boczniku przewodu głównego magistrali ciepłowniczej, składa się z czterech stopni oczyszczania, umieszczonych szeregowo: odmulacza inercyjno-siatkowego, hydrocyklonu i filtra włókninowego. Dodatkowo osad zatrzymany w hydrocyklonie jest kierowany do osadnika z wkładem magnetycznym. Takie ustawienie pozwala oszacować także zawartość cząstek ferromagnetycznych płynących w sieci.

Odmulacze samoczyszczące projektuje się z tą myślą, by uniknąć pracochłonnego demontażu urządzenia w celu wyczyszczenia jego wnętrza. Jak do tej pory niewiele rozwiązań znalazło zastosowanie w praktyce. Najpopularniejsza jest metoda płukania filtrów siatkowych w przeciwrządzie. Polega ona na zamknięciu zaworu na zasilaniu i otworzeniu zaworu czyszczącego. Takie ukierunkowanie wody sieciowej, sprawia, że płynie ona przeciwnie, niż podczas filtracji. Pod wpływem ciśnienia panującego w sieci, zanieczyszczenia są spłukiwane z siatki i odprowadzane przez zawór czyszczący. Innym sposobem jest wykorzystanie samoczynnie oczyszczających się bębnowych sit obrotowe, czy, jak zaproponowała firma Heco w filtrach siatkowych typu KS/AKS, rozwiązanie polegające na zgarnianiu zanieczyszczeń zgromadzonych na siatce, za pomocą ruchomych pierścieni wprawianych w ruch za każdym razem, gdy spadek ciśnienia na filtrze przekroczy zadaną wielkość. Zanieczyszczenia opadają na dno odmulacza, skąd przez zawór czyszczący są usuwane na zewnątrz.

Dokonując przeglądu odmulaczy stosowanych w ciepłownictwie i ogrzewnictwie, należy więcej uwagi poświęcić materiałom filtracyjnym stosowanym w filtrach workowych. Konstrukcja tego rodzaju odmulaczy w zasadzie nie będzie ulegać większym zmianom, a wielkość zatrzymywanych cząstek oraz skuteczność oczyszczania już teraz można swobodnie dobierać w szerokim zakresie średnic, stosując materiały filtracyjne o różnych rozmiarach porów. W przyszłości wykorzystanie nowych materiałów pozwoli uzyskać wysoką

skuteczność zatrzymywania nawet bardzo małych ziaren. Tym bardziej, że w miarę uszczelniania sieci, wzrastać będzie udział zanieczyszczeń drobnych o rozmiarach 0,1 – 0,3 μm , a więc filtry workowe będą spełniać coraz istotniejszą rolę.

3.3. *Materiały filtracyjne stosowane w ciepłownictwie*

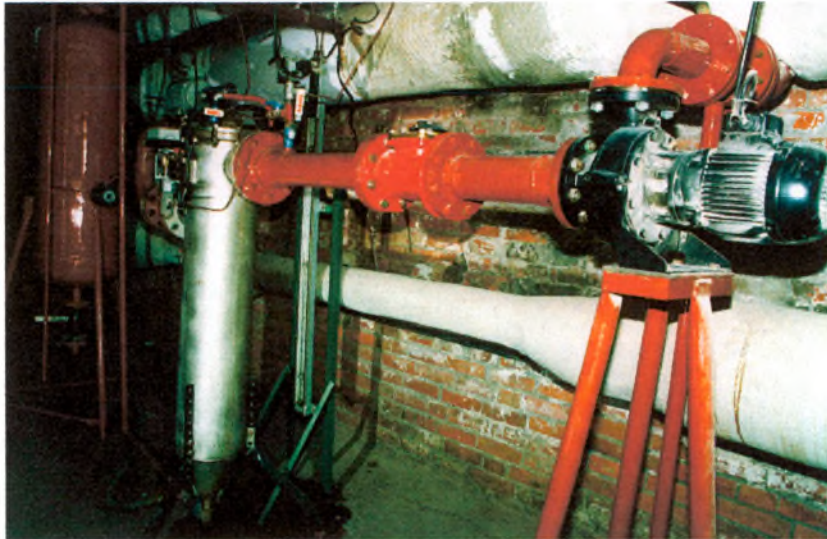
Dotychczas materiały filtracyjne znalazły szerokie zastosowanie do oczyszczania gazów i cieczy w technologiach mikrofiltracji. Wykorzystywane są zarówno do odpylania spalin w ciepłowniach i elektrociepłowniach, jak i do uzdatniania powietrza, w zakładach wykorzystujących nowoczesne technologie produkcji (przemysł elektroniczny, optyczny, farmaceutyczny, spożywczy i in.). Wymagania stawiane materiałom filtracyjnym są bardzo wysokie, zarówno co do skuteczności, jak i rozmiarów zatrzymywania ziaren. Postęp w dziedzinie wytwarzania układów scalonych i związana z nim miniaturyzacja ścieżek, wymaga eliminowania ziaren pyłu o średnicy mniejszej od 0,015 μm (mikrofiltracja).

Podczas filtracji wody w obiegach grzewczych i ciepłowniczych, wymagania stawiane materiałom filtracyjnym są nieco inne. Specyfika procesu filtracji wody sieciowej polega na oczyszczaniu bardzo dużych strumieni objętości wody o temperaturze dochodzącej do 130 °C. Zwykle wykorzystuje się włókniny z włókien celulozowych, bawełnianych, wełnianych, wiskozowych oraz najczęściej - z polipropylenu i polietylenu. Materiały te mają objętościową strukturę, w której średnica porów zmniejsza się w każdej kolejnej warstwie. Taka budowa sprawia, że większe cząstki zatrzymywane są na warstwach zewnętrznych, a mniejsze - głębiej. Proces filtracji zachodzi więc w całej objętości, zapewniając wysoką skuteczność zatrzymywania ziaren. Ponadto włókniny te charakteryzują się małymi oporami przepływu, odpornością biologiczną i chemiczną oraz stabilnością wymiarów [14]. Złożoność procesu zatrzymywania zanieczyszczeń na włókninach filtracyjnych sprawia, że zatrzymywane są cząstki o rozmiarach mniejszych, niż minimalna średnica porów (próg filtracji).

W filtrach workowych używa się włóknin filtracyjnych o minimalnych średnicach porów 1, 5, 10, 25, 50 lub 100 μm . W silnie zanieczyszczonych układach wody sieciowej, stosuje się materiały o progu filtracji 50 lub 100 μm , a do reuzdatniania wody w systemach szczelnych i pozbawionych zanieczyszczeń zewnętrznych - 5 lub 10 μm . Włókniny o progu filtracji 1 μm są wykorzystywane w przypadku uzdatniania wody w obiegach kotłowych.

Do oczyszczania wody w sieciach ciepłowniczych używa się najczęściej włóknin polipropylenowych i polietylenowych, które cechuje dobra odporność mechaniczna i termiczna. Filtry polietylenowe znajdują zastosowanie w sieciach o temperaturze wody do 100°C, natomiast polipropylen zachowuje swoje właściwości w temperaturze 140°C.

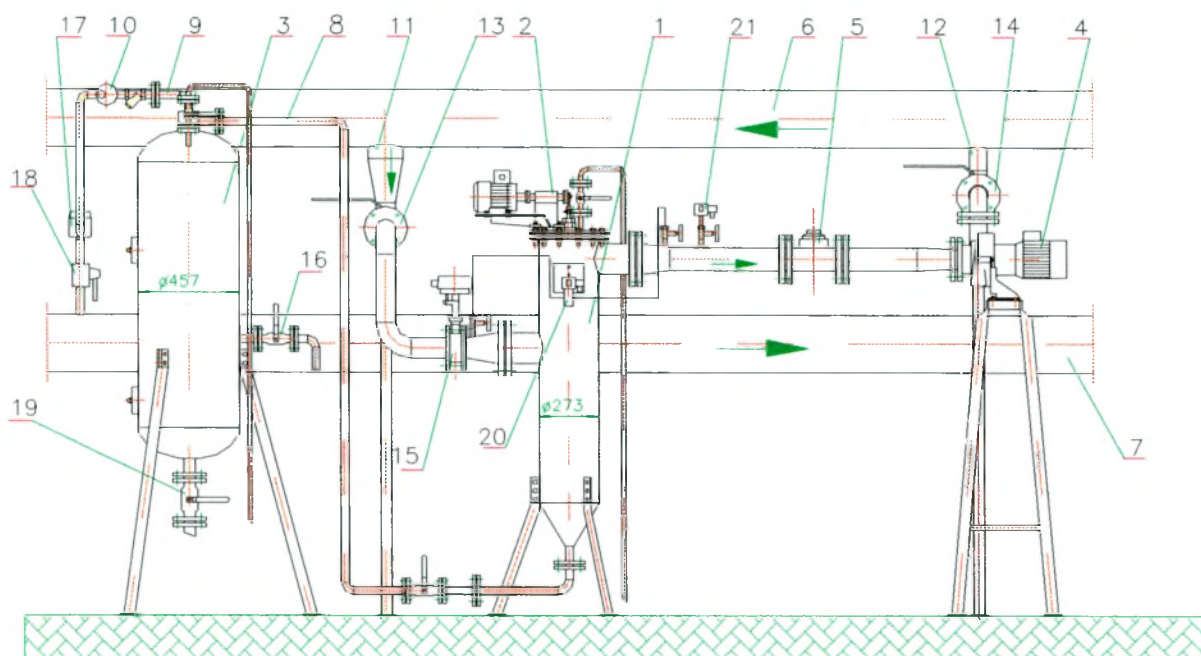
Wieloletnie badania prowadzone w Instytucie Ogrzewnictwa i Wentylacji PW oraz doświadczenia eksploatacyjne, pozwoliły stworzyć innowacyjne rozwiązanie, polegające na zastosowaniu samoczyszczących filtrów workowych, sterowanych automatycznie. Efektem prac jest automatyczna stacja oczyszczania wody sieciowej typu IOiW - ST/60, urządzenie łączące skuteczność zatrzymywania zanieczyszczeń z ciągłością procesu filtracji. Poniższa fotografia przedstawia ogólny widok stacji podczas pracy w kanale ciepłowniczym.



Fotografia 3.5. Stacja oczyszczania wody sieciowej typu IOiW-ST/60 zlokalizowana w kanale magistrali ciepłowniczej obsługującej teren główny Politechniki Warszawskiej

4. *Koncepcja funkcjonowania układu do oczyszczania wody sieciowej*

Automatyczna stacja oczyszczania wody sieciowej, została zamontowana w węźle cieplnym magistrali wody sieciowej DN 250, zasilającej teren główny Politechniki Warszawskiej. Uruchomiona została w grudniu 1995 r. i pracowała w czterech kolejnych sezonach grzewczych 1995/96, 1996/97, 1997/98, 1998/99. W pierwszym roku eksploatacji stacja działała w cyklu półautomatycznym (automatyczne wyłączanie stacji po przekroczeniu zadanej wartości spadku ciśnienia oraz ręczne sterowanie procesem czyszczenia). Następnie urządzenie zmodernizowano, co umożliwiło bezobsługową pracę stacji. Rysunek poglądowy stacji IOiW-ST/60 przedstawia rysunek 4.1.



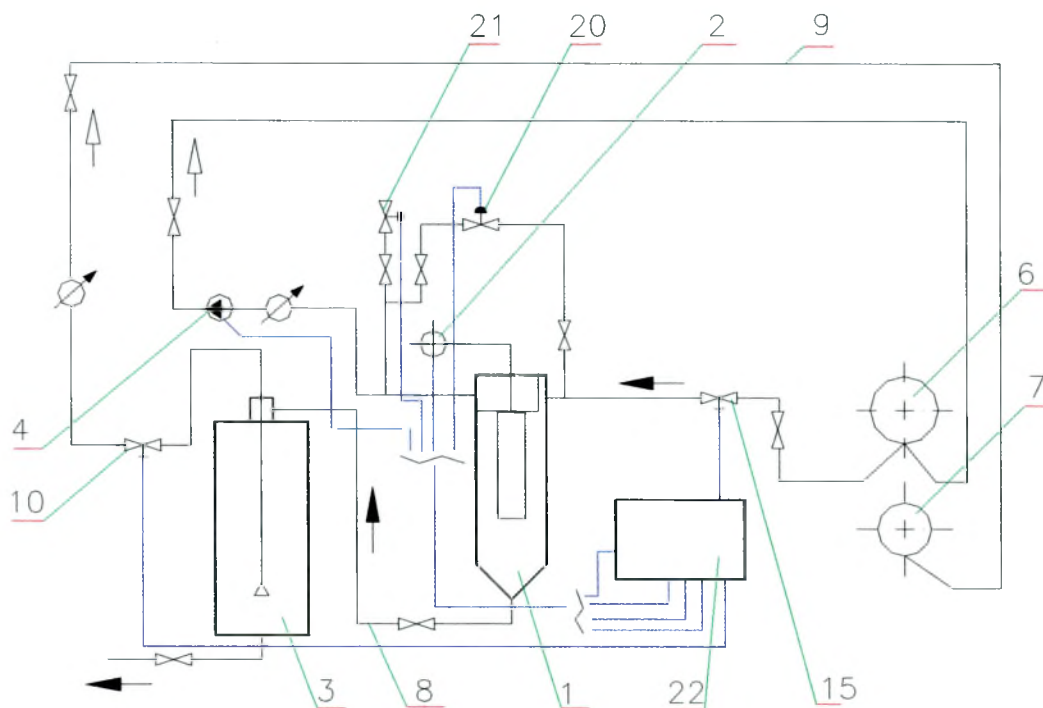
Rysunek 4.1. Rysunek poglądowy stacji oczyszczania wody IOiW-ST/60. Oznaczenia: 1-filtr, 2-generator drgań, 3-zbiornik sedymentacyjny (osadnik), 4-pompa obiegowa, 5-wodomierz, 6-magistrala zasilająca DN250, 7-magistrala powrotna DN250, 8-przewód przetwarzający zanieczyszczenia do zbiornika podczas płukania filtra, 9-przewód odprowadzający czystą wodę ze zbiornika do sieci, 10-zawór elektromagnetyczny, 11-przylącze doprowadzające wodę do filtra, 12-przylącze odprowadzające przefiltrowaną wodę do sieć, 13, 14-zawory odcinające, 15-zasuwa odcinająca, 16-zawór kontrolny, 17-wodomierz, 18-zawór regulacyjny, 19-zawór spustowy zbiornika, 20-presostat różnicy ciśnień, 21-presostat zabezpieczający.

Drugi egzemplarz stacji IOiW-ST/60 został zainstalowany na kolektorze zasilającym DN 600, ciepłowni „Północ” w Radomiu, gdzie pracuje od września 1998 r.

W niniejszej pracy wykorzystane zostały wyniki badań przeprowadzonych na prototypie stacji, znajdującym się na terenie Politechniki Warszawskiej.

4.1. Układ hydrauliczny stacji

Stację zainstalowano na bocznym odgałęzieniu magistrali. Woda zasilająca stację pobierana jest z upustu magistrali zasilającej, wspawanego w dolną część przewodu. Po oczyszczeniu woda kierowana jest do tego samego przewodu. Przez stację przepływa od 50 do 60 m³/h wody sieciowej. Przy przepływie rzeczywistym 120 - 150 m³/h w magistrali w sezonie grzewczym, daje to 30 - 50 % strumienia wody oczyszczanego przez stację. Poniżej pokazano schemat funkcjonowania stacji (rysunek 4.2.).



Rysunek 4.2. Schemat funkcjonowania stacji oczyszczania wody IOiW-ST/60. Oznaczenia: 1-filtr, 2-generator drgań, 3-zbiornik sedymentacyjny (osadnik), 4-pompa obiegowa, 6-magistrala zasilająca DN250, 7-magistrala powrotna DN250, 8-przewód przetłaczający zanieczyszczenia do zbiornika podczas płukania filtra, 9-przewód odprowadzający czystą wodę ze zbiornika do sieci, 10-zawór elektromagnetyczny, 15-zasuwa odcinająca, 20-presostat różnicy ciśnień, 21-presostat zabezpieczający, 22-automat sterujący.

Woda sieciowa, zasysana przez pompę obiegową (4), napływa na włókninowy wkład filtracyjny (1), który zatrzymuje niesione zanieczyszczenia. Po przefiltrowaniu, woda przepływa z powrotem do magistrali (6). Zatrzymywanie zanieczyszczeń na filtrze trwa do chwili, gdy opory hydrauliczne na filtrze, mierzone za pomocą presostatu różnicy ciśnień (20), przekroczą dopuszczalną wartość. Automat sterujący (22) powoduje wyłączenie się pompy, zamknięcie zaworu klapowego (15), otwarcie zaworu odcinającego (10). Rozpoczyna się proces czyszczenia wkładu filtracyjnego.

Czyszczenie filtra polega na strząsaniu za pomocą wibracji zanieczyszczeń osadzonych na włókninie, przy jednoczesnym płukaniu wkładu filtracyjnego strumieniem wody skierowanym przeciwnie, niż strumień wody podczas pracy stacji. Zawiesina zawierająca zanieczyszczenia zatrzymane na filtrze, kierowana jest do osadnika (3). W czasie zrzutu zawiesiny do zbiornika, czysta woda nie miesza się z wodą zanieczyszczoną, dzięki występowaniu zjawiska stratyfikacji. Do magistrali powrotnej (7) tłoczone jest tyle czystej wody, ile wpłynęło do osadnika sedymentacyjnego podczas czyszczenia filtra.

Zbiornik sedymentacyjny zaprojektowano w taki sposób, że następuje w nim grawitacyjne opadanie cząstek stałych znajdujących się w wodzie. Po pewnym czasie, gdy zanieczyszczenia osiadają na dnie, a w pozostałej objętości zbiornika pozostaje oczyszczona woda, zbiornik jest gotowy do przyjęcia kolejnego zrzutu zawiesiny.

Gdy proces czyszczenia wkładu filtracyjnego zostanie zakończony, regulator sterujący zamyka zawór odcinający (10), otwiera zawór klapowy (15) i załącza pompę obiegową. Stacja oczyszczania kontynuuje filtrowanie wody sieciowej. [49, 50]

W celu zapobieżenia pracy pompy w przypadku braku wody w przewodzie (awaria, prace remontowe na magistrali), zainstalowano presostat zabezpieczający (21), który powoduje automatyczne wyłączanie pompy, gdy ciśnienie wody w przewodzie spadnie poniżej zadanej wartości.

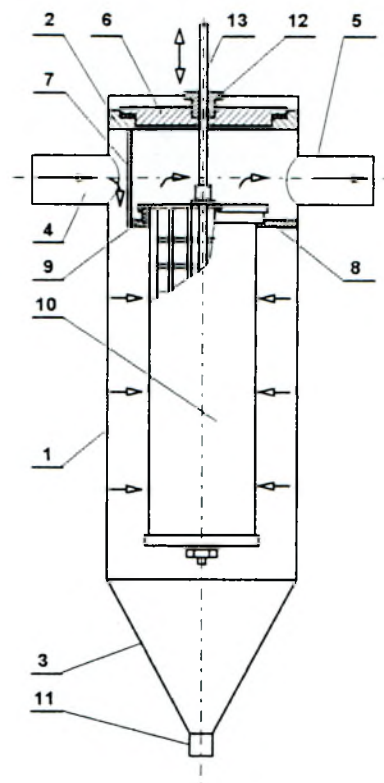
4.2. Filtr

Filtr z samooczyszczającym się wkładem włókninowym ma kształt walca o średnicy wewnętrznej ok. 250 mm i wysokości ok. 1,2 metra (rysunek 4.3). Od góry zamknięty jest płaską zdejmowaną pokrywą z wywierconym otworem, przez który przechodzi trzpień łączący wkład filtracyjny z generatorem drgań. Dno filtra ma kształt stożka, z wierzchołką którego odchodzi króciec spustowy. Woda dopływa do filtra króćcem dopływowym, przechodzi przez wkład filtracyjny i opuszcza zbiornik króćcem odpływowym. Pomędzy

wkładem filtracyjnym a poziomą przegrodą znajduje się pierścień uszczelniający, który oddziela wodę zanieczyszczoną od przefiltrowanej.

Rysunek 4.3. Filtr włókninowy.

Oznaczenia: 1-zbiornik, 2-dno płaskie, 3-dno stożkowe, 4-króciec doprowadzający, 5-króciec odprowadzający, 6-pokrywa, 7-przegroda pionowa, 8-przegroda pozioma, 9-pierścień uszczelniający, 10-wkład filtracyjny, 11-króciec spustowy, 12-dławica, 13-trzpień. [50]



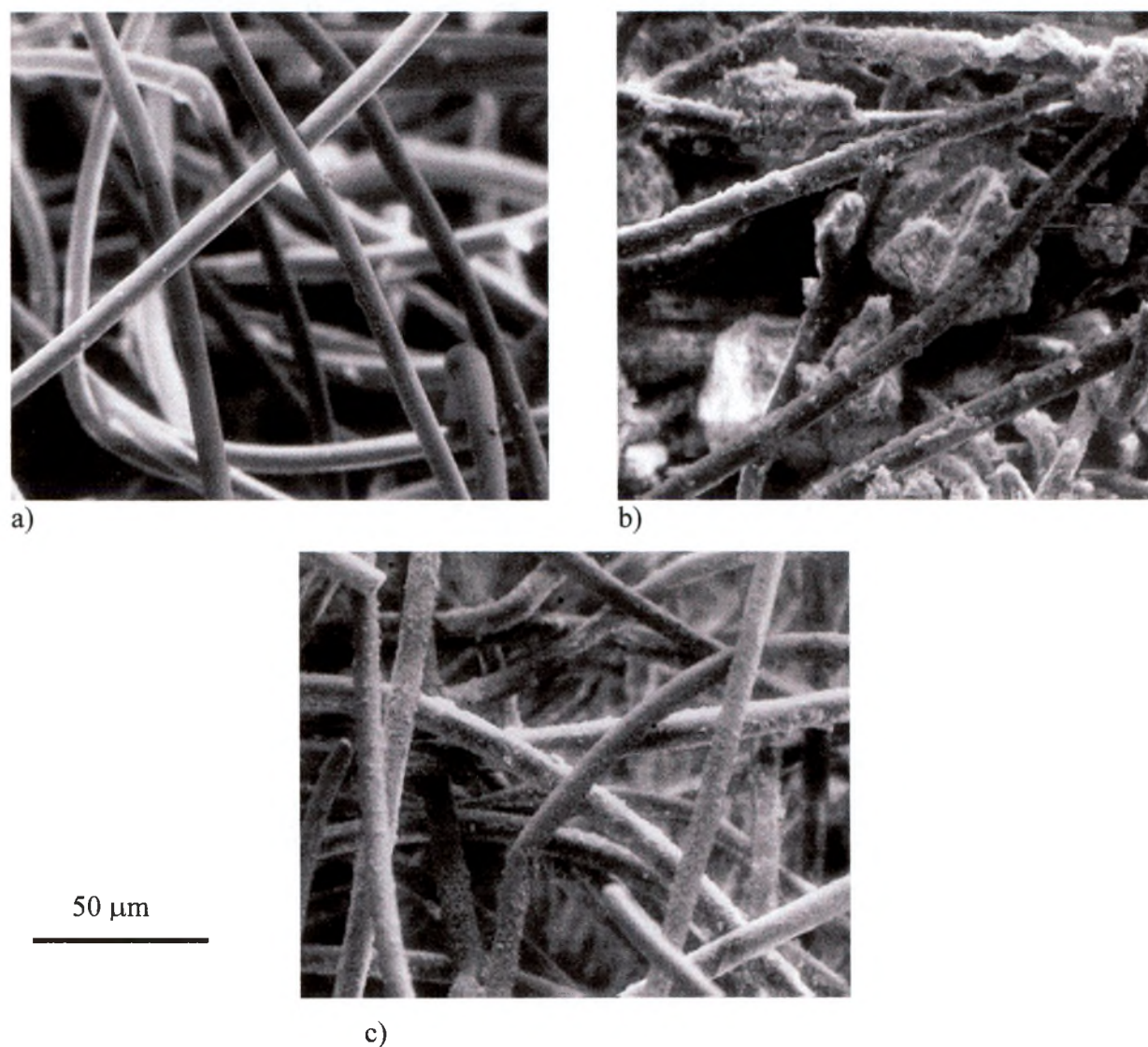
Wkład filtracyjny składa się z dwóch warstw materiałów:

- 1) podkładu nośnego wykonanego z tkaniny polietylenowej typu X44 produkcji belgijskiej,
- 2) polietylenowej włókniny filtracyjnej typu IPE1444.

Dobór odpowiednich materiałów filtracyjnych pozwala zatrzymywać zanieczyszczenia o minimalnych rozmiarach 5 μm . Badania eksploatacyjne wykazały, że w rzeczywistości na filtrze osadzają się także zanieczyszczenia o rozmiarach mniejszych od 1 μm .

W ciągu kilku lat eksploatacji urządzenia przeprowadzono próby z różnymi rodzajami włóknin, przeznaczonych do zatrzymywania zanieczyszczeń o wymiarach ziaren większych od 5 μm , wykonanymi z polipropylenu lub polietylenu. Stosowano między innymi:

- 1) polską włókninę typu S-23,
- 2) włókninę, z której wykonywane są filtry workowe duńskiej firmy „Heco”,
- 3) włókniny produkcji niemieckiej firmy „WERKE GmbH”: włókninę typu PF-30 oraz jej wytrzymalszą odmianę oznaczoną symbolem PF-30/W, włókninę FCW oraz włókninę IPE 1444.



Fotografia 4.1. Włóknina IPE 1444 (powiększenie 500 razy): a) czysta; b) zanieczyszczona; c) po płukaniu (próbki włókniny pobrane przez autora ze stacji zlokalizowanej w kanale ciepłowniczym PW)

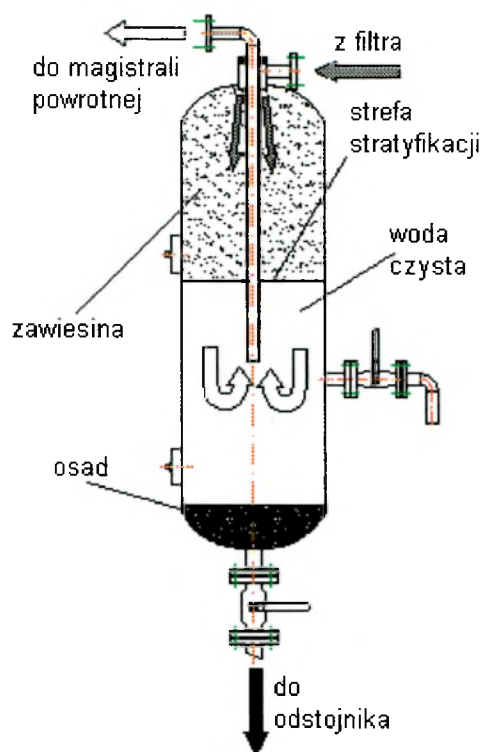
Wielokrotne badania różnorodnych materiałów pozwoliły dobrać włókninę filtracyjną o niskich kosztach eksploatacyjnych, wysokiej odporności na działanie strumienia gorącej wody oraz dobrych właściwościach regeneracyjnych, niezbędnych podczas samooczyszczania wkładu filtracyjnego w trakcie wibracji. Takie warunki spełnia włóknina IPE 1444. Fotografia 4.1. przedstawia wygląd włókniny IPE 1444, powiększonej 500 razy, w stanie czystym, zanieczyszczonej – przed czyszczeniem oraz zanieczyszczonej – po płukaniu.

Włóknina ta została wyprodukowana z myślą o odpylaniu gazów spalinowych. Można ją nabyć w powszechnie dostępnych punktach sprzedaży. Wykazuje ona wysoką wytrzymałość mechaniczną przy obciążeniu przepływem $60 \text{ m}^3/\text{h}$ wody na 1 m^2 włókniny, w temperaturze do $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (warunki pracy stacji). Ponadto każdorazowo po zakończeniu procesu

czyszczenia, opory przepływu mierzone na filtrze spadają do jednej wartości, co świadczy o dobrych właściwościach regeneracyjnych materiału.

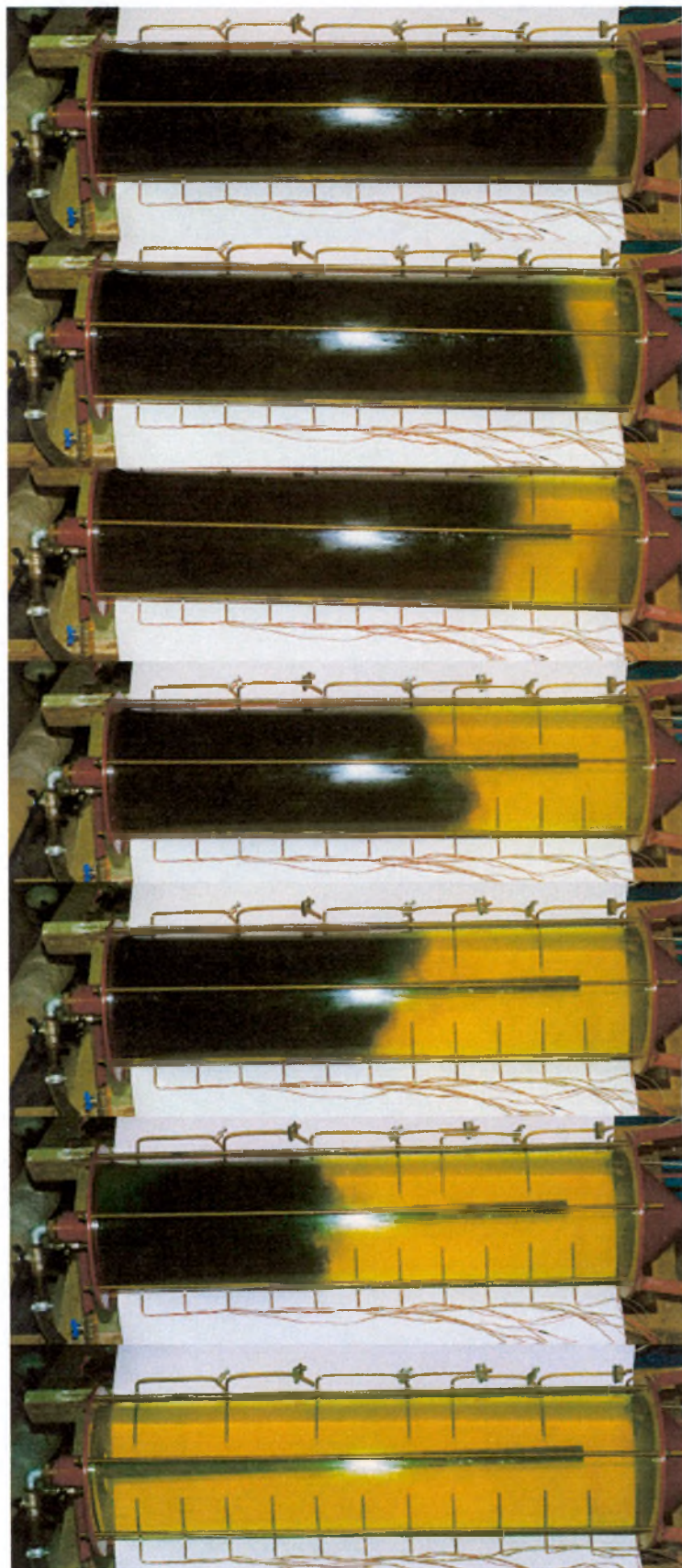
4.3. Zbiornik sedymentacyjny

Zbiornik sedymentacyjny (rysunek 4.4.) jest jednym z podstawowych elementów automatycznej stacji oczyszczania wody sieciowej. Składa się z cylindrycznego, szczelnego zbiornika o pojemności 220 dm³, wysokości 1,4 m i średnicy 0,45 m, do którego w trakcie płukania i wibracji, przetłaczana jest z filtra zanieczyszczona woda.



Rysunek 4.4.
Schemat zjawisk zachodzących w zbiorniku sedymentacyjnym podczas zrzutu zanieczyszczeń

Osadnik zaprojektowano w ten sposób, że wpływająca, gorąca zawiesina, zawierająca cząstki zatrzymane na filtrze włókninowym, nie miesza się ze znajdującą się w zbiorniku oczyszczoną i zimną już wodą. W trakcie zrzutu zanieczyszczeń doprowadzona woda wypiera taką samą objętość wody oczyszczonej, która trafia do kolektora powrotnego magistrali ciepłowniczej. Następnie króćce doprowadzający i odprowadzający są zamykane, a w zbiorniku zachodzi oczyszczanie wody z zanieczyszczeń stałych, z wykorzystaniem procesu sedymentacji. Przebieg procesu zrzutu zanieczyszczeń do zbiornika, zobrazowano na fotografii 4.2., będącej wynikiem przeprowadzonych badań modelowych, opisanych w rozdziale 8.



Fotografia 4.2. Zrzut zanieczyszczeń do zbiornika (zdjęcia wykonane przez autora na stanowisku badawczym)

Sedymentacja zachodzi w warunkach silnej stratyfikacji termicznej, gdyż w górnej części osadnika znajduje się doprowadzona woda gorąca, natomiast w dolnej - woda zimna. Równocześnie ma miejsce stygnięcie zbiornika, w skutek wymiany ciepła z otoczeniem. Po pewnym czasie opadające cząstki ciała stałego gromadzą się na dnie osadnika i zbiornik zawierający oczyszczoną i schłodzoną wodę, jest gotowy na przyjęcie następnej partii zanieczyszczeń.

Częstotliwość płukania filtra, czyli czas pomiędzy kolejnymi zrzutami zanieczyszczeń, zależy od szybkości gromadzenia się cząstek na wkładzie filtracyjnym, a więc od stopnia zanieczyszczenia wody sieciowej. Gdy stężenie zanieczyszczeń w sieci jest wysokie, odbywa się on co kilkanaście godzin, zaś przy mniejszym zanieczyszczeniu - co kilka lub kilkanaście dni.

Po przeprowadzeniu kilkudziesięciu czy kilkuset czyszczeń filtra, zachodzi potrzeba usunięcia zanieczyszczeń zatrzymanych w osadniku. W tym celu należy otworzyć króciec spustowy w dnie zbiornika i opróżnić zbiornik, a po skończonym czyszczeniu - napęlnić go wodą.

4.4. Układ wibracyjny

Wibracja powoduje zrzucenie z wkładu filtracyjnego zatrzymanych na nim zanieczyszczeń, które są równocześnie usuwane ze zbiornika filtra. Mechaniczny generator drgań łączy się za pomocą przekładni z trzpieniem dochodzącym do kosza, na którym jest zamocowany wkład filtracyjny. Wibracja odbywa się w płaszczyźnie pionowej, z częstotliwością 1460 drgań na minutę, ze skokiem regulowanym w zakresie 4 – 8 mm. Czas wibracji, potrzebny do skutecznego oczyszczenia wkładu, określono na podstawie badań na 60 - 90 sekund.

4.5. Układ sterowania

Projektując automatyczny układ sterowania stacją przyjęto założenie, że czynności manualne związane z eksploatacją urządzenia ograniczą się w ciągu roku do jednego przeglądu technicznego, związanego z jej demontażem i wymianą wkładu filtracyjnego. Jedynie usuwanie zanieczyszczeń ze zbiornika sedymentacyjnego wymagać będzie okresowej obecności jednej osoby.

W układzie sterującym zastosowano sterownik swobodnie programowalny typu XL20 firmy Honeywell, współpracujący z czujnikiem różnicy ciśnienia (presostatem różnicowym) oraz następującymi urządzeniami wykonawczymi:

- kłapą regulacyjną DN80,

- zaworem elektromagnetycznym DN32,
- wodomierzem DN32,
- generatorem drgań,
- pompą obiegową.

Presostat różnicowy mierzy spadek ciśnienia na filtrze. W chwili, gdy zanieczyszczenie wkładu filtracyjnego jest tak duże, że różnica ciśnień przekroczy zadaną wartość (np. 0,5 bar), sterownik wyłącza stację i rozpoczyna się proces czyszczenia filtra.

Zaprogramowano kolejno następujące po sobie działania, składające się na cykl samooczyszczania filtra:

1) wyłączenie stacji i rozpoczęcie oczyszczania:

- wyłączenie pompy obiegowej,
- zamknięcie kłapy regulacyjnej (po wyłączeniu pompy),
- załączenie generatora drgań i otwarcie zaworu elektromagnetycznego (po zamknięciu kłapy);

2) zakończenie oczyszczania i uruchomienie stacji:

- wyłączenie generatora drgań i zamknięcie zaworu elektromagnetycznego,
- otwarcie kłapy regulacyjnej (po wyłączeniu generatora drgań),
- załączenie pompy obiegowej (po otwarciu kłapy).

Objętość wody przeznaczanej do płukania filtra, która następnie zostaje zrzucana do zbiornika sedymentacyjnego, może być kontrolowana w dwojaki sposób. Metoda pierwsza polega, ustawieniu czasu otwarcia zaworu elektromagnetycznego; gdy znana jest różnicę ciśnień w kolektorach zasilającym i powrotnym, bez problemu można obliczyć natężenie przepływu wody. Wadą tego rozwiązania jest jednak to, że w przypadku wystąpienia większej niż zwykle różnicy ciśnień, do osadnika zostanie przetłoczona zbyt duża objętość wody, a konsekwencji - przelanie zanieczyszczeń do sieci. Bezpieczniej jest ustawić moment zamknięcia zaworu w zależności od objętości zrzucanej wody. Wiąże się to z włączeniem do systemu sterowania dodatkowego urządzenia - wodomierza DN32, umieszczonego na przewodzie odprowadzającym wodę z osadnika do kolektora. Taki wariant jest jednak wskazany z uwagi na zapewnienie skuteczności działania stacji.

Przewidziano także możliwość ręcznego sterowania stacją. Każde z urządzeń może być wyłączane lub załączane ręcznie. [49]

Analizując pracę automatycznej stacji oczyszczania wody sieciowej IOiW-ST/60, dochodzi się do wniosku, że na mechanizm usuwania zanieczyszczeń z wody sieciowej,

składają się dwa następujące po sobie procesy. Pierwszym z nich jest filtracja, polegająca na zatrzymywaniu płynących cząstek na włókninowym wkładzie filtracyjnym. Drugi proces – to odseparowanie tych cząstek w osadniku sedymentacyjnym na skutek osiadania grawitacyjnego. Skuteczność oczyszczania całego układu można więc zapisać zależnością:

$$\eta_{\text{układu}} = \eta_{\text{filtra}} \cdot \eta_{\text{osadnika}} \quad (4.1)$$

Skuteczność zatrzymywania zanieczyszczeń na filtrze zależy od właściwości zastosowanego materiału filtracyjnego. W osadniku natomiast, skuteczność zależy od tego, w jakim stopniu woda, odprowadzana z powrotem do sieci, jest wolna od zanieczyszczeń. Separacja cząstek w wyniku opadania grawitacyjnego jest procesem długotrwałym, jednak ze względu na konieczność zapewnienia ciągłej pracy stacji przy dużym zanieczyszczeniu wody w sieci, samooczyszczenie filtra musi zachodzić co kilka godzin. Należy więc, dla przyjętego kształtu i wymiarów geometrycznych zbiornik, jak również dla rodzaju włókniny i powierzchni wkładu filtracyjnego, określić minimalny czas pomiędzy płukaniem, by nie nastąpiło wtórne zanieczyszczenie wody sieciowej w wyniku zbyt krótkiego czasu sedymentacji cząstek w zbiorniku.

5. Proces sedymentacji zawiesin - analiza zjawiska

5.1. Opadanie grawitacyjne pojedynczej cząstki

W osadniku sedymentacyjnym stacji, zachodzi separacja cząstek stałych z cieczy pod wpływem siły ciężkości. Jest to więc sedymentacja grawitacyjna, w której bilans sił działających na pojedynczą cząstkę w płynie nieruchomym lub poruszającym się ruchem laminarnym wg Gawrońskiego [23] ma postać:

$$V_s(\rho_s + \alpha_d \rho_c) \frac{du_s}{d\tau} = V_s \rho_s g + (-V_s \rho_c g) + \frac{-\lambda F_s \rho_c u_s^2}{2} \quad (5.1)$$

Wyraz z lewej strony tego równania oznacza siłę bezwładności, natomiast wyrazy z prawej strony opisują kolejno: siłę ciężkości, siłę wyporu i siłę oporu ośrodka.

W systemie idealnym końcowa prędkość sedymentacji osiągana jest stosunkowo szybko [1, 31] i mamy do czynienia z ruchem jednostajnym, w którym $du_s/dt = 0$. Cząstka kulista o średnicy d_s porusza się wtedy swobodnie z prędkością opadania określoną zależnością [1, 15, 23, 31]:

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_s(\rho_s - \rho_c)g}{3\lambda\rho_c}} \quad (5.2)$$

Do określenia prędkości swobodnego opadania u_t konieczna jest znajomość wartości współczynnika oporu λ , którego wartość jest zmienna i zależy od wielu czynników. Jednakże dla opadającej cząstki kulistej można przyjąć, że λ jest funkcją liczby Reynoldsa zdefiniowanej równaniem:

$$\text{Re} = \frac{u_t d_s \rho_c}{\mu} \quad (5.3)$$

Liczba Reynoldsa jest kryterium rodzaju ruchu. W zależności od wielkości Re można określić, z jakim rodzajem ruchu mamy do czynienia: laminarnym (uwarstwionym), burzliwym, czy przejściowym.

Tabela 5.1. Rodzaje ruchu w zależności od liczby Reynoldsa.

<i>Ruch laminarny</i>	<i>Ruch przejściowy</i>	<i>Ruch burzliwy</i>
<ul style="list-style-type: none"> • $10^{-4} < \text{Re} < 0,4$, a w przybliżeniu do $\text{Re} < 2,0$ wg. [16, 25] • $10^{-4} < \text{Re} < 0,4$ wg. [23] • $\text{Re} < 1$ wg. [22] • $\text{Re} < 0,3$ wg. [24] 	<ul style="list-style-type: none"> • $0,3 < \text{Re} < 1000$ wg. [24] • $0,4 < \text{Re} < 1000$ wg. [25] 	<ul style="list-style-type: none"> • $1000 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5$ wg. [16, 23, 24, 25] • $\text{Re} > 1000$ wg. [22]

Dla ruchu laminarnego współczynnik oporu wynosi $\lambda = \frac{24}{\text{Re}}$, a prędkość opadania

cząstki opisuje równanie Stokesa:

$$u_t = \frac{d_s^2 g (\rho_s - \rho_c)}{18\mu}, \quad (5.4)$$

którego zakres stosowalności Wójcik [61] określa na $\text{Re} < 0,2$ i $d_s \leq 100 \mu\text{m}$,

lub równanie Ossena [8]:

$$u_t = \frac{8}{3d_s\rho_c} \left\{ \left[\mu^2 + \frac{1}{24} d_s^3 \rho_c (\rho_s - \rho_c) g \right]^{1/2} - \mu \right\} \quad (5.5)$$

opisujące ruch cząstek o dowolnej średnicy.

Dla ruchu burzliwego, współczynnik oporu ma wartość stałą $\lambda = 0,44$. Prędkość opadania cząstki liczona jest ze wzoru Newtona:

$$u_t = 1,74 \sqrt{\frac{d_s g (\rho_s - \rho_c)}{\rho_c}}. \quad (5.6)$$

W przypadku ruchu przejściowego, stosuje się zależność $\lambda = \frac{18}{\text{Re}^{0,6}}$, co daje to opis prędkości opadania cząstki w postaci równania Allena:

$$u_t = 0,2 \left[\left(\frac{\rho_s - \rho_c}{\rho_c} \right) g \right]^{0,72} \frac{d_s^{1,18}}{\left(\frac{\mu}{\rho_c} \right)^{0,45}}. \quad (5.7)$$

Kowal [31] zaleca stosowanie równania Allena dla zakresu $0,4 < \text{Re} < 500$, a z pewnym błędem do wartości $\text{Re} < 1000$. Natomiast Gawroński [23] radzi korzystać z równania Allena dla $2,0 < \text{Re} < 500$, przy Re od 0,4 do 2,0 zaleca stosować w przybliżeniu równanie ruchu laminarnego, zaś przy Re od 500 do 1000 - równanie ruchu burzliwego.

Gawroński [23] podaje również przykładowe zależności na współczynnik oporu λ dla cząstki kulistej poruszającej się ruchem przejściowym (tabela 5.2).

Tabela 5.2. Przykładowe korelacje na współczynnik oporu cząstek w ruchu przejściowym [23]

Re	Zależność
1-10 ³	$\lambda=18,5\text{Re}^{-0,6}$
3-400	$\lambda=24\text{Re}^{-1} + 4\text{Re}^{-0,5}/3$
0,1-10 ⁴	$\lambda=24\text{Re}^{-1} + 3\text{Re}^{-0,5} + 0,34$
0,5-10 ³	$\lambda=24\text{Re}^{-1} + 6\text{Re}^{-0,5} + 0,28$

Wzory Stokesa, Allena i Newtona należą do najczęściej stosowanych zależności opisujących prędkość opadania cząstki. Prócz nich istnieje szereg innych wzorów, w tym wzory uniwersalne, stosowane dla całego zakresu liczby Reynoldsa ($\text{Re} < 3 \cdot 10^3$), jak np.:

- wzór Kaskasa [60, 61]:

$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\text{Re}^{0,6}} + 0,4 \quad (5.8)$$

- wzór Brauera [60]:

$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{5,48}{\text{Re}^{0,573}} + 0,36 \quad (5.9)$$

Powyższe rozważania dotyczą przypadku, gdy opadająca cząstka ma kształt kulisty. Dla cząstki o innym kształcie, współczynnik oporu ośrodka λ będzie zależny nie tylko od liczby Reynoldsa, ale także od sferyczności bryły φ , definiowanej jako stosunek powierzchni kuli o objętości cząstki rzeczywistej do powierzchni tej cząstki $\varphi = V_{cz}/F_{cz}$, czyli $\lambda = f(\text{Re}, \varphi)$. Dla naszych rozważań jest to o tyle ważne, iż cząstki magnetytu mają kształt nieregularnych blaszek (patrz podrozdział 3.1.).

Dla uwarstwionego ruchu cząstek nie kulistych współczynnik oporu ośrodka można wyznaczyć z zależności [15, 46]:

$$\lambda = \frac{24}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{0,843 \cdot \lg \frac{\varphi}{0,065}} \quad (5.10)$$

Natomiast współczynnik oporu w ruchu burzliwym bryły nie kulistej wyraża się wzorem [15, 46]:

$$\lambda = 5,31 - 4,87\varphi \quad (5.11)$$

Dla ruchu przejściowego określonego przedziałem $0,05 < Re < 2000$, Serwiński w [46] zaleca przyjmować wartość współczynnik λ z wykresów lub tablic, podając przykładowe wartości dla różnych Re i φ .

Tabela 5.3. Zależność współczynnika oporu ośrodka λ od liczby Reynoldsa Re i sferyczności φ dla nie kulistych cząstek izometrycznych [46]

$\varphi \backslash Re$	1	10	100	400	1000
0,670	28	6	2,2	2,0	2,0
0,806	27	5	1,3	1,0	1,1
0,846	27	4,5	1,2	0,9	1,0
0,946	27	4,5	1,1	0,8	0,8
1,000	26,5	4,1	1,07	0,6	0,46

Obliczenie sferyczności cząstki o nieregularnych kształtach jest trudne, a niekiedy niemożliwe. W takim przypadku Adamski w [1] zaleca przyjmowanie współczynnika φ w wysokości 0,85.

5.2. Opadanie zbioru cząstek

5.2.1. Rodzaje zawiesin

Zawiesiną nazywamy układ dwufazowy, składający się z cząstek ciała stałego zawieszonych w cieczy. Własności ciała stałego, takie jak kształt cząstek, ich zastępczy wymiar i rozkład charakteryzujący stan rozproszenia (dyspersji) cząstek, własności powierzchniowe oraz gęstość, mają duży wpływ na zachowanie się zawiesiny podczas sedymentacji [4].

Zawiesiny zawierające poniżej 10% objętości ciała stałego uważa się zazwyczaj za rozcieńczone, natomiast powyżej 70% - za zagęszczone. Kształt cząstki może być izometryczny - o rozmiarach wzajemnie współmiernych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, bądź - nieizometryczny. Wielkość rozmiarów cząstek określana jest za pomocą średnicy (dla cząstek kulistych lub odpowiednio zdefiniowanej średnicy zastępczej). Cząstki o rozmiarach powyżej 100 μm noszą nazwę gruboziarnistych, a poniżej 30 μm - drobnoziarnistych [6].

Zawiesiny zawierające ziarna o takim samym kształcie i takich samych rozmiarach nazwano monodispersyjnymi, a wszystkie inne - polidispersyjnymi. Ziarna zawiesiny

polidispersyjnej traktuje się jako zbiory i opisuje za pomocą tzw. charakterystyk zbioru [6]. W praktyce, gdy mamy do czynienia z zawiesiną, w której stosunek cząstki średnic największej cząstki do najmniejszej jest mniejszy od 6:1, traktujemy ją jako monodispersyjną i przyjmujemy, że wszystkie cząstki sedymentują z jednakową prędkością [5, 6].

5.2.2. Sedymentacja zawiesin

Sedymentacja zawiesin jest to zjawisko zakłóconego opadania cząstek ciała stałego w płynie i polega na tym, że na ruch każdej cząstki wpływa obecność opadających cząstek sąsiednich [5]. Według Ciborowskiego [15] „sedymentacja polega na zagęszczaniu zawiesin pod działaniem siły ciężkości”. Orzechowski [42] definiuje sedymentację jako proces opadania zawiesiny cząstek w cieczy lub gazie, który czasem jest tylko procesem zagęszczania zawiesin.

Podczas sedymentacji występuje opadanie zakłócone cząstek (nazywane też przez Macheja „opadaniem skrępowanym” [35]), w którym na ruch każdej cząstki wpływa obecność sąsiednich ziaren. Wpływ ten ma miejsce już przy odległości między cząstkami równej dziesięciu jej średnicom, co odpowiada objętościowemu stężeniu ciała stałego w zawiesinie mniejszemu niż 0,1% [42].

W procesach oczyszczania wody opadanie zakłócone występuje przy objętościowym stężeniu zawiesin $> 0,22\%$, co odpowiada wagowemu stężeniu około $6,0 \text{ g/dm}^3$ zawiesin nieorganicznych lub około $2,5 \text{ g/dm}^3$ zawiesin organicznych [31, 42].

W praktyce przyjmuje się, że hydrodynamiczne oddziaływanie sąsiednich ziaren można pominąć przy udziałach objętościowych mniejszych od 1%. Wartość ta jest traktowana jako wartość graniczna pomiędzy opadaniem swobodnym i zakłóconym [5, 42].

Podczas opadania cząstek w zawiesinie występują dwa zjawiska, które nie zachodzą w trakcie osadzania pojedynczego ziarna. Po pierwsze - sąsiednie cząstki wypierają do góry ciecz, czyli rozważana cząstka opada w przeciwnym kierunku, a nie w cieczy nieruchomej; po drugie - prędkość opadania cząstki w zawiesinie zmniejsza się wskutek wzrostu oporu ośrodka, spowodowanego obecnością cząstek sąsiednich.

5.2.3. Obliczanie prędkości sedymentacji zawiesiny monodispersyjnej

Wielokrotnie próbowano określić warunki sedymentacji zawiesin monodispersyjnych. Pierwsze próby polegały na modyfikacjach równania Stokesa, w którym wprowadzano parametry zawiesiny [5, 6, 15, 35, 42]:

$$u_z = \frac{d_s^2 g(\rho_s - \rho_z)}{18\mu_z} \quad (5.12)$$

Zarówno gęstość jak i lepkość zależą od porowatości zawiesiny ε , czyli objętościowej zawartości cieczy w zawieszynie:

$$\rho_z = \rho_s(1 - \varepsilon) + \rho_c \varepsilon \quad (5.13)$$

$$\mu_z = \mu_c / f(\varepsilon) \quad (5.14)$$

Po wstawieniu powyższych wyrażeń do równania (5.12) otrzymamy następującą zależność:

$$u_z = \frac{d_s^2 g(\rho_s - \rho_c) \cdot \varepsilon^2}{18\mu} f(\varepsilon) = u_t \varepsilon^2 f(\varepsilon) \quad (5.15)$$

Przykładem opisu ruchu cząstki w zawieszynie, stworzonym na bazie równania Stokesa, jest równanie Steinoura [4, 5, 15, 42]:

$$u_z = u_t \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)} \quad \text{dla ruchu uwarstwionego.} \quad (5.16)$$

Richardson i Zaki badali sedymentację monodispersyjnych zawiesin gruboziarnistych ($> 100 \mu\text{m}$) i wyznaczyli zależność pomiędzy prędkością opadania zawiesiny a swobodną prędkością opadania pojedynczej cząstki [4, 5, 6, 42]:

$$u_z = u_t \varepsilon^n \quad (5.17)$$

przy czym wykładnik n oblicza się w oparciu o liczbę Archimedesza Ar .

Prędkość sedymentacji zawiesiny próbowano opisywać stosując model przepływu cieczy przez warstwę ziarnistą. W ten sposób powstało równanie Carmana - Kozeny'ego [5, 6]:

$$\frac{u_z}{u_t} = \frac{\varepsilon^3}{2K(1-\varepsilon)} \quad \text{dla ruchu uwarstwionego,} \quad (5.18)$$

gdzie stała Kozeny'ego $K = 3 \div 6$,

uproszczone przez Wójcika w [60]:

$$\frac{u_z}{u_t} = \frac{\varepsilon^3}{0,818 Ar^{0,035}} \quad (5.19)$$

Dla tego modelu także Khan i Richardson wyznaczyli zależności między liczbami Archimedeasa i Reynoldsa [5, 6]:

- dla ruchu uwarstwionego ($Ar < 3,6$)

$$Ar = 18Re_z \varepsilon^{-4,8} \quad (5.20)$$

- dla ruchu przejściowego ($3,6 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$)

$$Ar = \left(2,07\varepsilon^{-0,27n} + 0,33Re_z^{0,37} \varepsilon^{-,64n} \right)^{3,45} Re_z^{0,93} \quad (5.21)$$

- dla ruchu burzliwego ($Ar > 8,3 \cdot 10^4$)

$$Ar = \frac{1}{3} Re_z^2 \varepsilon^{-4,8} \quad (5.22)$$

Model komórkowy, w którym przyjęto, iż każda cząstka znajduje się jakby w komórce, w środku kulistej otoczki cieczy, stanowił podstawę rozważań Happela. Na drodze teoretycznej otrzymał on równanie na prędkość zawiesiny cząstek [4, 5, 6]:

$$\frac{u_z}{u_t} = \frac{3 - 4,5(1 - \varepsilon)^{1/3} + 4,5(1 - \varepsilon)^{5/3} - 3(1 - \varepsilon)^2}{3 + 2(1 - \varepsilon)^{5/3}} \quad \text{dla ruchu uwarstwionego.} \quad (5.23)$$

Na podstawie przeglądu różnych wzorów oraz wykorzystując dane doświadczalne otrzymane przez różnych autorów dla 12 zawieszin, Barnea i Mizrahi opracowali równanie korelacyjne [5, 6]:

$$\frac{u_z}{u_t} = \frac{\varepsilon^2}{\left[1 + (1 - \varepsilon)^{1/3} \right] \exp \left[\frac{5(1 - \varepsilon)}{3\varepsilon} \right]} \quad \text{dla ruchu uwarstwionego.} \quad (5.24)$$

Wnioski z prac Barnea i Mizrahi, wykorzystał Zimmels, który opracował wzór pozwalający obliczyć prędkość opadania cząstek w zawieszinie dla wszystkich rodzajów ruchu [4, 5]:

$$u_z = \varepsilon \left(\frac{-\alpha_2 + \sqrt{\alpha_2^2 + 4\alpha_1\alpha_3^{0,5}}}{2\alpha_1} \right)^2 \quad (5.25)$$

gdzie

$$\alpha_1 = 0,63(d\rho_c)^{0,5}$$

$$\alpha_2 = 4,8\mu_c^{0,5} \exp \left[\frac{5(1 - \varepsilon)}{6\varepsilon} \right]$$

$$\alpha_3 = \frac{4d_s^2(\rho_s - \rho_c)\varepsilon g}{3 \left[1 + (1 - \varepsilon)^{1/3} \right]}$$

Z wzorów opisanych w niniejszym podrozdziale wynika wniosek, że w przypadku modelowania zjawiska sedymentacji zawiesin monodispersyjnych, w miejsce prędkości opadania swobodnego u_t podstawia się mniejszą od niej prędkość u_z .

5.2.4. Obliczanie prędkości sedymentacji zawiesiny polidispersyjnej

Zawiesiny polidispersyjne składają się z cząstek, które opadają z różną prędkością. Do opisu ruchu zawiesin polidispersyjnych potrzebne jest, inaczej niż w przypadku zawiesin monodispersyjnych, określenie dodatkowych zmiennych określających rozkłady własności sedymentujących ziaren.

W praktyce najczęściej zawiesiny polidispersyjne opisane są przez [6]:

- rozkład średnic cząstek i jednakową ich gęstość (gdy materiał jednorodny został rozdrobniony),
- jednakową średnicę cząstek i rozkład ich gęstości (gdy niejednorodny, rozdrobniony materiał poddany został klasyfikacji i wybrano jedną frakcję),
- jeden rozkład średnic cząstek i jeden rozkład ich gęstości (gdy materiał niejednorodny został rozdrobniony),
- wiele rozkładów średnic cząstek i ich gęstości (gdy różne niejednorodne materiały zostały rozdrobnione).

Do badania zjawisk zachodzących podczas sedymentacji zawiesiny polidispersyjnej stosuje się różnorodne modele. I tak np. Bandrowski [6] i Smith [47] opierają swe badania na modelu komórkowym Happela, stworzonym do opisu jednakowych cząstek kulistych. Każda cząstka znajduje się w kulistej otoczce cieczy, na powierzchni której naprężenie styczne jest równe zeru. Opadanie zakłócone powoduje, że otoczki ulegają zniekształceniu, gdy w czasie ruchu stykają się ze sobą.

Doheim i inni [19] opracowali model ruchu zawiesiny opierając się na równaniu Richardsona i Zaki. Weryfikując wyniki modelowania badaniami eksperymentalnymi, otrzymali dla zawiesin polidispersyjnych 7,5% zgodność wartości prędkości obliczonych i zaobserwowanych.

Natomiast Adamski w [1], przy projektowaniu osadników sedymentacyjnych, stosuje uproszczoną procedurę określania końcowej prędkości sedymentacji. Opiera się ona na metodzie kolejnych przybliżeń przy założeniu, że w pierwszym kroku prędkość opisana jest równaniem Stokesa. Oszacowana w ten sposób wielkość prędkości sedymentacji jest wystarczająca do potrzeb projektowania urządzeń technicznych.

6. Zjawiska termiczne zachodzące w zbiorniku sedymentacyjnym

Procesy zachodzące w zbiorniku sedymentacyjnym, dające w końcowym efekcie oddzielenie cząstek stałych zanieczyszczeń od wody można podzielić na dwie kategorie: mechaniczne i termiczne. Procesy mechaniczne, czyli sedymentacja zawieszin, zostały omówione w poprzednim rozdziale. Sposoby opisanie zjawiska swobodnego opadania ziaren w płynie, sprowadzają się do wyznaczenia prędkości opadania w zależności od parametrów cząstki i własności ośrodka. W przypadku automatycznej stacji oczyszczania, ośrodkiem tym jest woda, której parametry (gęstość i lepkość) zmieniają się wraz ze zmianą temperatury. Stygnięcie zbiornika powoduje ochładzanie wypełniającej go wody i, wraz upływem czasu, zmianę warunków, w jakich zachodzi odseparowanie cząstek stałych.

Badania eksperymentalne i analiza procesów cieplnych pozwoliły wywnioskować, jakie zagadnienia należy brać pod uwagę, rozpatrując przebieg stygnięcia zbiornika od momentu zakończenia zrzutu zanieczyszczeń.

Doprowadzenie do górnej części zbiornika gorącej wody, powoduje powstanie zróżnicowanego temperaturowo ośrodka, przy czym w pobliżu dna zbiornika tworzy się warstwa wody o temperaturze, jaka panowała w zbiorniku przed rozpoczęciem zrzutu (t_z), zaś najwyższą część osadnika zajmuje woda mająca temperaturę zbliżoną do tej, jaka przepływa przez filtr (t_g). Środkowa część wypełniona jest warstwami, których temperatury zawierają się w przedziale od t_z do t_g . Ponieważ gęstość wody maleje ze wzrostem temperatury, uwarstwienie ośrodka powstałe po zrzucie zanieczyszczeń jest źródłem stateczności struktury. Mamy więc do czynienia ze stratyfikacją stateczną [44].

Taki temperaturowo-stratyfikowany ośrodek dąży do wyrównania temperatury układu, poprzez wymianę ciepła, która może być realizowana w drodze przewodzenia (przekazywanie energii przez bezpośrednio stykające się cząstki lub atomy) lub konwekcji (przenoszenie energii przez przepływ i mieszanie się strumieni cieczy o różnej temperaturze). Przy czym w przypadku stratyfikacji statecznej, gdy różnice temperatur pomiędzy poszczególnymi warstwami są niewielkie, transport ciepła w skutek ruchów konwekcyjnych praktycznie nie zachodzi.

Przepływ ciepła w opisanym układzie termodynamicznym będzie miał charakter nieustalony, gdyż pole temperatur w zbiorniku, będzie z upływem czasu ulegało zmianie.

Zjawisko stratyfikacji pola temperatur w pionowym cylindrycznym zbiorniku, było badane i opisane w licznych publikacjach (m. in. [27, 28, 39, 40, 56]), przy okazji prac nad

zaprojektowaniem zbiornika do magazynowania ciepła, będącego częścią systemu grzewczego wykorzystującego energię promieniowania słonecznego. Zasada działania takiego układu, opiera się na założeniu, że woda podgrzana podczas dnia, jest przechowywana w dużym, cylindrycznym, zaizolowanym termicznie zbiorniku, w którym dzięki stratyfikacji statycznej nie następuje mieszanie warstw wody o różnych temperaturach. Dzięki temu możliwe jest korzystanie po zachodzie słońca ze zmagazynowanej w ciągu dnia ciepłej wody.

Wyniki badań pozwoliły określić, które zjawiska mają decydujący wpływ na proces wymiany ciepła w układzie. I tak, w przypadku cylindrycznego zbiornika, w którym nie następuje wymiana masy wody z innymi układami, otoczonego przez powietrze (czyli sytuacja jaka ma miejsce po zakończeniu zrzutu zanieczyszczeń), są to:

- 1) konwekcyjna wymiana ciepła pomiędzy wodą a ściankami zbiornika,
- 2) konwekcyjna wymiana ciepła pomiędzy zbiornikiem a otoczeniem,
- 3) przewodzenie ciepła przez ścianki zbiornika,
- 4) przewodzenie ciepła w wodzie.

Przepływ ciepła w wymienionych wyżej zjawiskach zachodzi przy wykorzystaniu konwekcji i przewodzenia, które są (obok promieniowania) podstawowymi formami wymiany ciepła, szeroko opisanymi w literaturze. Prowadzi to w efekcie do powszechnie przyjętego sposobu rozwiązywania zadania przewodzenia ciepła w ciałach, omywanych przez płyn odbierający/oddający ciepło. Sposób ten polega na rozdzieleniu dwóch zjawisk: przewodzenia ciepła wewnątrz omywanego ciała oraz przejmowania ciepła w płynie na drodze konwekcji. Przy czym ważny jest zazwyczaj globalny efekt konwekcji, określony współczynnikiem wnikania ciepła, wprowadzanym następnie jako warunek brzegowy do zagadnienia przewodzenia ciepła [24].

6.1. Konwekcja

Konwekcja, występująca jedynie w cieczech i gazach, jest wynikiem przepływu substancji; przenoszenie ciepła następuje wskutek przemieszczania i mieszania się strug płynu.

Konwekcję można podzielić na wymuszoną i swobodną. Konwekcja wymuszona zachodzi wtedy, gdy ruch płynu jest wywołany siłami zewnętrznymi. Z konwekcją swobodną mamy do czynienia w przypadku, kiedy wymiana ciepła pomiędzy ciałem stałym a płynem, następuje w wyniku ruchu płynu wywołanego różnicą temperatur płynu i

powierzchni ciała stałego. Różnica temperatur w płynie powoduje zmiany jego gęstości i ruch konwekcyjny płynu na skutek sił wyporu.

Do opisu konwekcyjnej wymiany ciepła stosuje się współczynnik wnikania (wymiany) ciepła α , który można opisać zależnością [46]:

$$\alpha = \frac{dq}{dA(t_s - t_p)} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}] \quad (6.1)$$

gdzie:

dq - elementarny strumień ciepła przepływający przez powierzchnię dA [J/s]

dA - elementarna powierzchnia [m^2]

t_s - temperatura ciała stałego [$^{\circ}\text{C}$]

t_p - temperatura płynu [$^{\circ}\text{C}$].

Wyznaczenie współczynnika wymiany ciepła na drodze teoretycznej jest możliwe poprzez rozwiązanie układu równań różniczkowych bilansu substancji, pędu i energii, przy określeniu odpowiednich warunków jednoznaczności. Brodowicz w [12] podaje następujące teoretyczne metody wyznaczania współczynnika α :

- wyznaczanie współczynnika wnikania z rozwiązania równania energii (dla przypadków wnikania ciepła do powierzchni cylindrycznej od strony wewnętrznej oraz do powierzchni płaskiej przy jej wzdłużnym opływie);
- wyznaczanie współczynnika wnikania na podstawie analogii między wymianą pędu i ciepła (dla przypadków wnikania ciepła do powierzchni cylindrycznej od strony wewnętrznej).

Najczęściej jednak, dla potrzeb obliczenia przepływu ciepła stosuje się zależności oparte na wynikach eksperymentalnych, z których większość otrzymano w prowadząc badania na modelach fizycznych. Wyniki podawane są zwykle w postaci równań kryterialnych, wykorzystujących bezwymiarowe liczby podobieństwa.

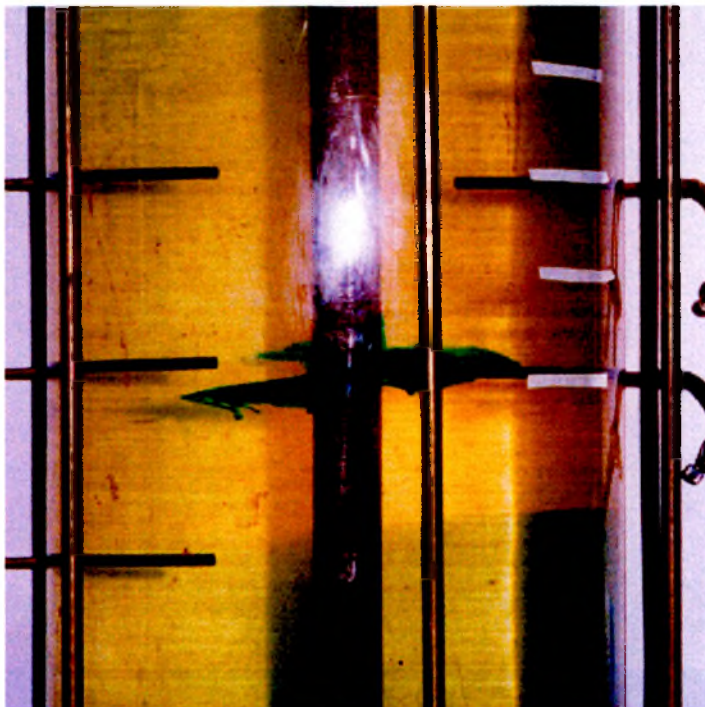
W zbiorniku sedymentacyjnym po zakończeniu czyszczenia filtra, rozpoczyna się proces stygnięcia osadnika. Znajdująca się w nim woda o temperaturze wyższej, niż temperatura otoczenia, przekazuje ciepło ściankom zbiornika, które ulegają ochłodzeniu w wyniku kontaktu z otaczającym zbiornik powietrzem. Obydwa etapy wymiany ciepła zachodzą na drodze konwekcji, jednakże ruchy konwekcyjne na styku powierzchni woda-wewnętrzna powierzchnia ścianek zbiornika, są niewielkie i zjawisko można traktować jako przewodzenie ciepła pomiędzy dwiema nieruchomymi substancjami o różnych parametrach cieplnych.

Brak znaczących ruchów konwekcyjnych na styku powierzchni woda–wewnętrzna powierzchnia ścianek, w warunkach stratyfikacji statecznej, wynika z następujących założeń:

- 1) w zbiorniku po zakończeniu zrzutu zanieczyszczeń nie występują siły zewnętrzne – nie wystąpi więc konwekcja wymuszona;
- 2) po zakończeniu zrzutu, w zbiorniku powstaje stratyfikacja stateczna wody, co wyklucza powstanie ruchów konwekcyjnych wywołanych różnicą gęstości ośrodka;
- 3) różnica temperatur pomiędzy stalowymi ściankami zbiornika a wodą jest bardzo mała, ze względu na dobre przewodzenie ciepła przez stal i szybkie zrównywanie temperatury ścianek z temperaturą wody; brak gradientu temperatur na styku woda – stal powoduje brak ruchów cieczy wywołanych konwekcją swobodną.

Brak ruchów konwekcyjnych w termicznie stratyfikowanym ośrodku wykazali doświadczalnie Hollands i Lightstone w swojej pracy [27], którzy obserwowali zachowanie strugi barwnika wprowadzonego do zbiornika z wodą, w który panowała stratyfikacja stateczna.

Przeprowadzono również obserwacje własne, które w pewnym stopniu potwierdzają te spostrzeżenia. Do zbiornika pomiarowego po zrzucie gorącej wody, wprowadzano porcje barwnika, których zachowanie obserwowano w miarę upływu czasu. Stabilność warstw wody i brak ruchów konwekcyjnych, zanotowano w dolnej i środkowej części zbiornika pomiarowego. Wygląd strugi barwnika, wprowadzonej na wysokości 42 centymetrów od dna tuż po zrzucie, przedstawiono na fotografii 6.1., natomiast po upływie około 60 minut od chwili zrzutu – na fotografii 6.2.



*Fotografia 6.1.
Struga barwnika tuż po
wstrzyknięciu na
wysokość 42 cm od dna
(zdjęcie z archiwum
autora)*



*Fotografia 6.2.
Struga barwnika 60 minut
po wstrzyknięciu na wys.
42 cm od dna
(zdjęcie z archiwum autora)*

W dolnej i środkowej części zbiornika, wprowadzony barwnik pozostawał na poziomie, na którym został wprowadzony, choć stopniowo ulegał rozmyciu w skutek działania siły Coriolisa.

Natomiast barwnik wprowadzony do górnej części zbiornika, gdzie temperatura wody była najwyższa, ulegał rozmyciu zarówno w kierunku poziomym i pionowym. Rozmywanie strugi barwnika w pionie, kończyło się na wysokości, gdzie następował strefa

gwałtownego spadku temperatury wody (tzw. strefa przejściowa – patrz podrozdział 8.2.1.).



*Fotografia 6.3.
Struga barwnika
wstrzyknięta do górnej
części zbiornika na
wysokość 92 cm od dna
zbiornika
(zdjęcie z archiwum
autora)*

Powyższa fotografia przedstawia strugę barwnika wprowadzoną na wysokości 92 cm od dna zbiornika. Barwnik zaczyna się rozprzestrzeniać. Zielone zabarwienie wody w górnej części zbiornika pochodzi z rozmycia wcześniej wstrzykniętej porcji barwnika na wysokości 112 centymetrów. Po pewnym czasie, barwnik pochodzący z obu strug wypełnił górną część zbiornika – od ok. 75 cm do górnego dna, co dokładnie pokrywało się z występowaniem warstwy wody gorącej.

Wykonany w późniejszym okresie model numeryczny, zakłada pominięcie ruchów konwekcyjnych w osadniku. Zmniejsza to dokładność obliczeń, ale nie wpływa w sposób znaczący na opis zmian pola temperatur w zbiorniku.

Dlatego też zdecydowano się nie uwzględniać zjawiska ruchów konwekcyjnych w strefie wody gorącej, mimo, iż w rzeczywistości one występują.

Natomiast oddawanie ciepła do powietrza przez zewnętrzną powierzchnię osadnika, jest związane z silnymi ruchami konwekcyjnymi. Obserwacja warunków panujących w miejscu zamontowania stacji, wykazała, że może następować przepływ powietrza (wymuszony np. różnicami ciśnień w kanale) lub jego stagnacja. I tak, w

przypadku stacji zamontowanej w kanale magistrali ciepłowniczej na terenie Politechniki Warszawskiej, zaobserwowano znaczny ruch powietrza w kanale (zmierzone wartości prędkości strumienia omywającego zbiornik dochodziły do 0,8 m/s). Drugi egzemplarz stacji, pracujący w ciepłowni „Północ” w Radomiu, zlokalizowany jest w hali kotłowej, gdzie znaczących ruchów powietrza nie zaobserwowano.

Tak więc, w przypadku zbiornika sedymentacyjnego możliwe są dwa warianty wymiany ciepła pomiędzy zbiornikiem, a otaczającym go powietrzem:

- 1) przypadek konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej, polegający na oddawaniu ciepła przez pionowy cylinder, w wyniku różnicy temperatur pomiędzy zbiornikiem a otoczeniem;
- 2) przypadek równoczesnego zachodzenia konwekcji swobodnej i konwekcji wymuszonej (konwekcja mieszana), gdy pionowy cylinder o temperaturze wyżej od temperatury otoczenia, jest omywany przez poruszający się strumień powietrza.

Zagadnienia te rozwiązuje się poprzez wyznaczenie współczynnika wymiany ciepła za pomocą liczb kryterialnych, co sprowadza się w większości przypadków do obliczenia liczby Nusselata i znając k oraz l_0 - wyliczenia α :

$$\alpha = \frac{k \cdot Nu}{l_0} \quad (6.2)$$

gdzie

l_0 - liniowy wymiar charakterystyczny, równy wysokości cylindra przy konwekcji wymuszonej lub jego średnicy - przy konwekcji swobodnej.

W przypadku konwekcji swobodnej, schładzanie zbiornika, a więc zmiana temperatury jego ścianek, powoduje wraz z upływem czasu zmniejszanie się wartości współczynnika wymiany ciepła α . W danej chwili i na określonej wysokości będzie on jednakowy dla całego obwodu zbiornika. Natomiast w konwekcji wymuszonej, α będzie w przybliżeniu stały w czasie, a będzie się zmieniał na obwodzie zbiornika. Jednakże do celu określenia warunków stygnięcia osadnika, potrzebna jest wartość średnia współczynnika przejmowania ciepła dla całego obwodu cylindrycznego zbiornika.

6.1.2. Przejmowanie ciepła od pionowego cylindra przy konwekcji swobodnej

Konwekcję swobodną można podzielić na konwekcję swobodną w przestrzeni nieograniczonej, gdy ciało stałe znajduje się w przestrzeni wypełnionej przez płyn oraz konwekcję swobodną w przestrzeni ograniczonej, zachodzącą w szczelinach i wąskich

kanałach. Ponieważ rozpatrywane zagadnienie dotyczy stygnięcia zbiornika w powietrzu w pomieszczeniu, zachodzi przypadek konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej.

Do obliczenia wartości współczynnika wnikania ciepła w przypadku pionowego cylindra, stosuje się równania kryterialne, w których liczba Nusselta uzależniona jest od liczb Grashofa i Prandtla:

- zależności Touloukiana, Hawkinsa i Jakoba [58]:

$$Nu = 0,726Ra^{1/4} \quad \text{dla } 2 \cdot 10^8 < Ra < 4 \cdot 10^{10} \quad (6.3)$$

$$Nu = 0,0674(Gr \cdot Pr^{1,29})^{1/3} \quad \text{dla } 4 \cdot 10^{10} < Ra < 10^{12}. \quad (6.4)$$

- kryterium Michiejewa (dla walców i płyt w położeniu poziomym i pionowym) [21]:

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad \text{dla } Ra < 10^{13} \quad (6.5)$$

Tabela 6.1. Wartości współczynników C i n w równaniu (6.5)

Ra	C	n
$10^3 - 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	1/3

Autorzy pracy [21] uznają, że jeżeli płyn omywający pionowy cylinder charakteryzuje się liczbą Prandtla $Pr > 0,7$ i spełniony jest warunek

$$\frac{HD}{Gr^{1/4}} < 0,025 \quad (6.6),$$

to cylinder można traktować jako płaszczyznę poziomą, i stosować zależności kryterialne Holmana:

$$Nu = 0,54Ra^{1/4} \quad \text{dla } 10^5 < Ra < 2 \cdot 10^7 \quad (6.7)$$

$$Nu = 0,15Ra^{1/3} \quad \text{dla } 2 \cdot 10^7 < Ra < 3 \cdot 10^{10}. \quad (6.8)$$

Wyznaczenie liczby Nusselta dla pionowego cylindra, Minkowycz i Sparrow uzależnili od wyliczenia Nu dla pionowej płyty o długości równej wysokości cylindra [7]:

$$Nu = Nu_{płyty} \left[1 + 1,43 \left(\frac{H}{DGr^{1/4}} \right)^{0,9} \right] \quad (6.9)$$

lub [57]

$$Nu = Nu_{płyty} \left[1 + 1,3 \left(\frac{H}{DRa^{1/4}} \right)^{0,9} \right] \quad (6.10)$$

gdzie [57]

$$Nu_{\text{płyty}} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\} \quad \text{dla } Gr < 10^4. \quad (6.11)$$

6.1.2. Przejmowanie ciepła od pionowego cylindra przez omywający go płyn

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych różnych autorów powstały zależności kryterialne, które pozwalają określić średnie wartości liczb Nusselta dla całego obwodu walca. W zależnościach tych liczba Nusselta uzależniona jest od liczb Reynoldsa i Prandtla:

- wzory Żukauskasa [58] dla $0,71 < Pr_p < 350$:

$$Nu = (0,43 + 0,5Re^{0,5}) Pr_p^{0,38} \left(\frac{Pr_p}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad \text{dla } 5 < Re < 10^3, \quad (6.12)$$

$$Nu = 0,25Re^{0,6} Pr_p^{0,38} \left(\frac{Pr_p}{Pr_s} \right)^{0,25} \quad \text{dla } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5, \quad (6.13)$$

gdzie Pr_p - liczba Prandtla dla powietrza o temperaturze otoczenia

Pr_s - liczba Prandtla dla powietrza o temperaturze powierzchni walca.

- zależności Churchilla i Bernstaina [58] dla $Pr_p < 0,2$:

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/3} Pr_p^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr_p} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5} \quad \text{dla } 10^2 < Re < 2 \cdot 10^4 \text{ i } 4 \cdot 10^5 < Re < 4 \cdot 10^7 \quad (6.14)$$

$$Nu = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/3} Pr_p^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr_p} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000} \right)^{1/2} \right] \quad \text{dla } 2 \cdot 10^4 < Re < 4 \cdot 10^5 \quad (6.15)$$

- równanie Hilperta [46]:

$$Nu = A \cdot Re^B \quad (6.16)$$

Tabela 6.2. Wartości współczynników A i B w równaniu (6.16) dla gazów

<i>Re</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
1 - 4	0,891	0,33
4 - 40	0,821	0,385
40 - 4 000	0,615	0,466
4 000 - 40 000	0,174	0,618
40 000 - 250 000	0,0239	0,805

- zależność Holmana [7]:

$$Nu = C \cdot Re^n Pr^{1/3} \quad (6.17)$$

Tabela 6.3. Wartości współczynników C i n w równaniu (6.17)

<i>Re</i>	<i>C</i>	<i>n</i>
0,4 - 4	0,919	0,33
4 - 40	0,911	0,385
40 - 4 000	0,683	0,466
4 000 - 40 000	0,193	0,618
40 000 - 400 000	0,0266	0,805

- formuła Whitakera [57]:

$$Nu = \left(0,4Re^{1/2} + 0,06Re^{2/3}\right) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu_{\infty}}{\mu_s}\right)^{1/4} \quad (6.18)$$

dla $0,7 < Pr < 300$ i $10 < Re < 10^5$;

- zależność Brodowicza [12] dla gazów:

$$Nu = 0,43 + 0,48Re^{1/2} \quad \text{dla } Re < 500 \quad (6.19)$$

$$Nu = 0,46Re^{1/2} + 0,00128Re \quad \text{dla } Re > 500 \quad (6.20)$$

Natomiast bezpośrednio wartość współczynnika α przy opływie pionowego cylindra przez strumień gazu, można wyznaczyć z równania Schrancka [45]:

$$\alpha = \left(4,65 + 0,35 \frac{t}{100}\right) \frac{u^{0,61}}{D^{0,39}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (6.21)$$

gdzie

t - temperatura gazu [$^{\circ}\text{C}$]

u - prędkość strumienia gazu [m/s]

D - średnica cylindra [m].

Równanie (6.21) jest stosowane do obliczania przybliżonej wartości współczynnika przewodzenia ciepła, gdy czynnikiem omywającym cylinder jest powietrze lub spaliny.

Przewodzenie

Przewodzenie ciepła polega na przekazywaniu energii przez bezpośrednio zderzające się drobiny i atomy lub dyfuzję swobodnych elektronów [53]. W czystej postaci zachodzi w ciałach stałych; przewodzeniu ciepła w płynach towarzyszy zazwyczaj ruch płynu wywołany konwekcją.

6.2.1. Prawa rządzące przewodzeniem ciepła

Kiedy mamy do czynienia z różnicami temperatur w układzie termodynamicznym, zachodzi proces przewodzenia ciepła. Podstawą jego opisu jest prawo Fouriera, opublikowane w roku 1822 przez francuskiego naukowca Józefa Fouriera. Zaproponował on zależność, zgodnie z którą ilość przewodzonego ciepła jest proporcjonalna do gradientu temperatury. Dla jednokierunkowego przepływu ciepła obowiązuje zapis:

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx} \quad (6.22)$$

lub

$$\dot{q}_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (6.23)$$

gdzie:

q_x - ilość przewodzonego ciepła [W]

$\dot{q}_x = \frac{q_x}{A_x}$ strumień przewodzonego ciepła [W/m²]

A_x - powierzchnia przepływu ciepła [m²]

k - współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK].

Jeżeli przewodzenie ciepła zachodzi w trzech kierunkach, otrzymujemy następujący wektorowy zapis prawa Fouriera w prostokątnym układzie współrzędnych:

$$\dot{q} = -k \text{grad}T = -k \left(\vec{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -k \nabla T \quad (6.24)$$

gdzie:

∇ - operator nabra

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - wektory jednostkowe w kierunku osi współrzędnych.

Współczynnik przewodzenia ciepła k jest różny dla różnych substancji. Ponadto dla określonego ciała, zależy od jego temperatury i, w przypadku gazów, ciśnienia. Wartości k zmieniają się w granicach: od 0,005 do 0,5 W/mK dla gazów i rośnie ze wzrostem temperatury gazu; od 0,09 do 0,7 W/mK dla cieczy i maleje ze wzrostem temperatury cieczy (z wyjątkiem wody i gliceryny); od 0,02 do 420 W/mK dla ciał stałych [24].

Prawo Fouriera pozwala wyznaczyć strumień ciepła w dowolnym punkcie układu pod warunkiem, że dane jest pole temperatury; samo w sobie nie daje jednak możliwości jego opisanie. Dlatego do opisu zjawisk przewodzenia ciepła stosuje się równania, powstałe z połączenia prawa Fouriera z pierwszą zasadą termodynamiki, mówiącą, że wzrost energii układu równy jest sumie ciepła przyjętego przez układ i pracy wykonanej nad układem:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt} + \frac{dW}{dt} \quad (6.25)$$

W przypadku przewodzenia ciepła efekty pracy są nieznaczne [57], w wyniku czego pierwsza zasada termodynamiki upraszcza się do wyrażenia:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dQ}{dt}, \quad (6.26)$$

które można uszczegółowić:

$$\begin{array}{l} \text{przyrost} \\ \text{energii ciała} \end{array} = \begin{array}{l} \text{ciepło dostarczone} \\ \text{z zewnątrz (netto)} \end{array} + \begin{array}{l} \text{ciepło wytworzone} \\ \text{wewnątrz ciała.} \end{array}$$

6.2.2. Wyznaczanie pola temperatury

Połączenie prawa Fouriera i bilansu energii daje w efekcie równanie Fouriera-Kirchhoffa opisujące pole temperatury dla nieruchomych izotropowych ciał stałych [7, 24, 30, 53, 57]:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_v \quad (6.27)$$

gdzie

c_p - ciepło właściwe

ρ - gęstość substancji

\dot{q}_v - objętościowa wydajność źródła ciepła;

lub w zapisie wektorowym:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \cdot \text{grad}T) + \dot{q}_v = \nabla(k\nabla T) + \dot{q}_v \quad (6.28)$$

Dla stałych wartości k , c_p i ρ oraz przy braku wewnętrznych źródeł ciepła, równanie (6.27) przybiera uproszczoną formę:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6.29)$$

gdzie $a = \frac{k}{\rho c_p}$ jest współczynnikiem wyrównywania temperatury.

Do wyznaczenie pola temperatury za pomocą równania Fouriera-Kirchhoffa, w przypadku nieustalonego przewodzenia ciepła, wymagana jest znajomość warunków początkowych i brzegowych.

Warunek początkowy musi określać rozkład pola temperatury w rozpatrywanym układzie w chwili początkowej, czyli dla $t = t_0$ musi być znana postać funkcji $T = T_0(x, y, z)$.

Warunki brzegowe opisują wielkości, od których zależy przepływ ciepła na powierzchni ciała. Stosuje się cztery rodzaje warunków brzegowych [24, 53, 57]:

- I. Dany jest rozkład temperatury na powierzchni ciała. Ponieważ wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią ciała a płynem zachodzi na drodze intensywnej konwekcji, można przyjąć, że temperatura powierzchni równa jest temperaturze płynu.
- II. Dany jest rozkład strumieni ciepła na powierzchni ciała:

$$\dot{q}_s = k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (6.30)$$

gdzie

\dot{q}_s - strumień ciepła dopływający do powierzchni

$\frac{\partial T}{\partial n}$ - składowa gradientu temperatury w ciele stałym w kierunku zewnętrznej

normalnej do jego powierzchni.

- III. Dana jest temperatura T_F strugi płynu omywającego powierzchnię oraz współczynnik α wnikania ciepła:

$$\alpha(T_F - T_s) = k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (6.31)$$

Warunek ten jest najlepszym przybliżeniem rzeczywistej wymiany ciepła na powierzchni ciała, gdy zachodzi konwekcyjna wymiana ciepła na tej powierzchni.

Przy dużych liczbach Biota, gdy $Bi = \frac{\alpha l_0}{k} \rightarrow \infty$, warunek brzegowy III rodzaju przechodzi w warunek brzegowy I rodzaju [24].

IV. Występuje styk dwóch ciał przewodzących ciepło i opór przenikania ciepła w miejscu styku.

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} = k_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_2} \quad (6.32)$$

oraz

$$k_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} = \frac{T_2 - T_1}{r_k} \quad (6.33)$$

gdzie r_k jest oporem przenikania ciepła na jednostkę powierzchni.

6.2.3. Metody rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła

Metody rozwiązywania zagadnień przewodzenia ciepła można podzielić na analityczne i numeryczne.

W wyniku zastosowania **metody analitycznej**, otrzymujemy analityczną postać rozwiązania równania różniczkowego przewodzenia ciepła, przy określonych warunkach brzegowych i początkowym – dla zagadnień nieustalonych. Podstawowe metody analityczne to [24]:

- rozdzielenie zmiennych,
- przekształcenia całkowite,
- metoda funkcji całkowych,
- metoda funkcji Greena,
- przekształcenia konforemne.

Zaletą metod analitycznych jest uzyskanie rozwiązań ogólnych, które można zastosować do wielokrotnej analizy otrzymanych wyników w zależności od różnych czynników wpływających na temperaturę oraz możliwość zastosowania funkcji wynikowej jako elementu składowego do analitycznego rozwiązywania bardziej złożonych zagadnień. Zasadniczą wadą tych metod jest natomiast wąski zakres stosowalności w odniesieniu do geometrii układu przewodzącego ciepło (płyta, walec, kula, żebro). Konieczność stosowania licznych założeń upraszczających powoduje bardzo duże trudności przy wystąpieniu nieliniowości (np. uwzględnienie wpływu temperatury na parametry cieplne materiału).

Metody numeryczne są metodami przybliżonymi, w których wynik otrzymuje się nie w postaci wzorów matematycznych, lecz w postaci rozkładu wartości liczbowych dotyczących konkretnego przypadku. Rozwiązania obliczeniowe tych metod opierają się na podstawowych prawach fizyki (prawo ciągłości przepływu, prawo zachowania energii,

prawo zachowania pędu, podstawowe prawa transportu). Uwzględnienie kolejnych zagadnień w rozwiązaniu, nie ma istotnego wpływu na stopień trudności rozwiązania [53].

Można wyróżnić następujące metody numeryczne [24, 53]:

- metoda bilansów elementarnych,
- metoda różnic skończonych,
- metoda elementów skończonych,
- metoda elementów brzegowych,
- metody statystyczne.

W metodach numerycznych rozpatrywany układ traktowany jest jako dyskretny, gdzie dyskretyzacji podlegają zmienne przestrzeni i czasu. Dyskretyzację można przeprowadzić przed zbudowaniem modelu matematycznego lub po stworzeniu modelu zakładającego ciągłość przestrzenną i czasową.

Pierwszy sposób wykorzystano w metodzie bilansów elementarnych, gdzie wykorzystuje się podstawowe prawa zachowania oraz prawa fenomenologiczne (np. prawo przewodzenia ciepła Fouriera) – nie wymaga to przyjęcia założenia ciągłości ośrodka. Drugi sposób znalazł zastosowanie w metodach różnic skończonych, elementów skończonych i elementów brzegowych, gdzie dyskretyzuje się równania słuszne dla ośrodków ciągłych (np. równanie Fouriera-Kirchhoffa) [53].

7. Model opadania zawiesin w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury

Do opisu zjawiska sedymentacji zawiesiny w cylindrycznym pionowym zbiorniku, użyto modelu składającego się z dwóch części, z których jedna dotyczy ruchu cząstek w płynie, natomiast druga - zagadnień wymiany ciepła. We wzorach na prędkość opadania cząstek ciała stałego w płynie pojawiają się zwykle dwa parametry ośrodka, których wielkość, w przypadku wody, zmienia się znacząco w zakresie temperatur od 10°C do 90°C (czyli w zakresie występującym w zbiorniku sedymentacyjnym). Są to gęstość wody ρ_c oraz współczynniki lepkości dynamicznej μ i kinematycznej ν . Te parametry, wykorzystane w modelu opisującym ruch ziaren w zbiorniku wypełnionym wodą, wymagają okresowej korekty, w miarę stygnięcia ośrodka. Właśnie celem części termicznej modelu, jest określenie przebiegu zmian pola temperatur w osadniku.

7.1. Założenia do części modelu opisującej sedymentację

Opierając się na pomiarach stężeń zanieczyszczeń na stanowisku badawczym oraz na badaniach fizykochemicznych pobranych próbek, ustalono następujące właściwości zawiesiny, odprowadzanej do osadnika sedymentacyjnego w trakcie płukania filtra:

- a) cząstki wchodzące w skład zawiesiny można traktować jako jednorodny rozdrobiony materiał;
- b) największe zmierzone stężenie zanieczyszczeń w zbiorniku na stanowisku badawczym wynosiło 3,064 g/dm³; zaś największe policzone stężenie średnie wyniosło 3,774 g/dm³ (patrz tabela 8.2)
- c) największe zaobserwowane rozmiary cząstek dochodziły do 420 μ m;
- d) cząstki zawiesiny mają nieregularny, trudny do sparametryzowania kształt.

Biorąc pod uwagę powyższe obserwacje oraz zmiany gęstości i lepkości wody dla temperatur od 10°C do 90°C, wysnuto następujące wnioski:

1. Zawiesinę należy traktować jako polidispersyjną. Jest ona zbiorem cząstek charakteryzujących się różnymi rozmiarami i jednakową gęstością;
2. W osadniku sedymentacyjnym występuje opadanie swobodne cząstek, gdyż najwyższe zaobserwowane stężenie zawiesiny jest prawie dwukrotnie mniejsze, niż stężenie graniczne dla opadania skrępowanego (patrz podrozdział 5.2.2.);

3. Maksymalna wartość liczby Reynoldsa wystąpi w wodzie o najwyższej temperaturze dla ziaren o największych rozmiarach, i nie przekroczy wartości $Re = 200$ (dla cząstek $500 \mu\text{m}$, $Re = 195$).

Dało to w efekcie podstawę do przyjęcia następujących założeń do modelu, w części opisującej opadanie zawiesiny:

1. Ze względu na fakt, iż cząstki magnetytu mają kształt nieregularnych blaszek, przyjęto za [1] sferyczność ziaren $\varphi = 0,85$; w dalszych rozważaniach rozmiary cząstek będą charakteryzowane za pomocą średnicy zastępczej d_z .
2. Do wyznaczenia prędkości opadania ziaren wykorzystano równanie (5.2), które zmodyfikowano w następujący sposób:
 - w przypadku poruszania się cząstek ruchem uwarstwionym podstawiono wyrażenie na obliczenie współczynnika oporu ośrodka dla ruchu laminarnego (5.10), co efekcie dało następującą zależność dla cząstek o $\varphi = 0,85$ (wzór własny):

$$u_t = 0,941 \frac{d_s^2 (\rho_s - \rho_c) g}{18\mu} \quad \text{dla } Re < 0,4 \quad (7.1)$$

- w przypadku cząstek opadających ruchem przejściowym, współczynnik oporu ośrodka określono na podstawie danych zawartych w tabeli 5.3., uzyskując następującą funkcję aproksymującą współczynnik λ dla $\varphi = 0,85$ (wzór własny):

$$\lambda = \frac{25}{Re} + 1,6 \quad \text{dla } 0,4 \leq Re < 200, \quad (7.2)$$

w wyniku czego otrzymano wzór na prędkość opadania cząstek w ruchu przejściowym:

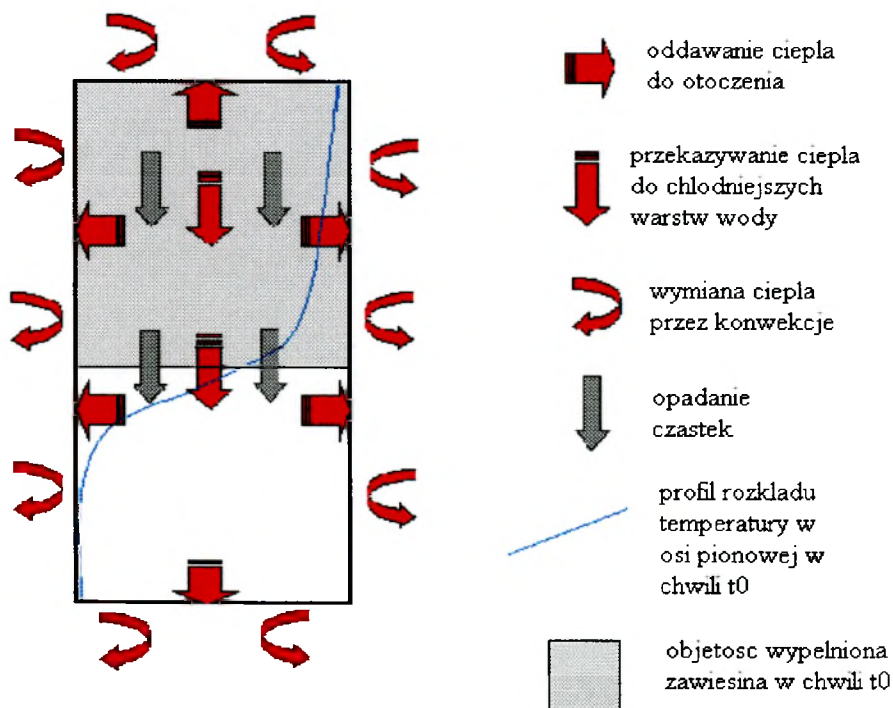
$$u_t = \frac{\mu}{d_s \rho_c} Re = \frac{\mu}{d_s \rho_c} \left[\sqrt{61 + 0,83 \frac{d_s^3 g \rho_c (\rho_s - \rho_c)}{\mu^2}} - 7,81 \right] \quad (7.3)$$

Założenia do części modelu opisującej przepływ ciepła

Opierając się na pracach z zakresu opisu stratyfikacji pola temperatury w cylindrycznych zbiornikach wypełnionych wodą [27, 28, 39, 40, 44, 56] oraz na badaniach własnych, wyciągnięto następujące wnioski:

1. Można przyjąć, że temperatura powietrza otaczającego osadnik jest stała i równa średniej temperaturze panującej w pomieszczeniu.
2. Gorąca woda znajdująca się w zbiorniku po zrzucie zanieczyszczeń, ulega ochłodzeniu, ostatecznie osiągając temperaturę powietrza otaczającego zbiornik. W związku z tym zmieniają się właściwości fizyczne wody zależne od temperatury.
3. Ciepło jest oddawane przez zbiornik do powietrza na drodze konwekcji. W przypadku konwekcji wymuszonej, do obliczeń można przyjąć średnią wartość współczynnika przejmowania ciepła α dla całego obwodu zbiornika w danej chwili. W przypadku konwekcji swobodnej współczynnik α w danej chwili jest jednakowy dla całej powierzchni zewnętrznej zbiornika.
4. Wymianę ciepła pomiędzy wodą a wewnętrzną powierzchnią ścian osadnika, można traktować jak przewodzenie ciepła pomiędzy dwiema nieruchomymi substancjami o różnych parametrach cieplnych (pominięto ruchy konwekcyjne – podrozdział 6.1.).
5. W zbiorniku nie występują wewnętrzne źródła ciepła.

Na rysunku 7.1. schematycznie pokazano podstawowe zjawiska, jakie zachodzą w osadniku po zrzucie zanieczyszczeń.



Rysunek 7.1. Schemat zjawisk zachodzących w osadniku sedymentacyjnym

Na podstawie powyższych wniosków opracowano założenia do modelu przekazywania ciepła w osadniku sedymentacyjnym:

1. Współczynnik przejmowania ciepła α , w przypadku braku przepływu powietrza, będzie dotyczył tylko konwekcji swobodnej i będzie wyznaczany w danej chwili dla określonej wysokości zbiornika z:
 - kryterium Michiejewa (wzór 6.5).
2. W przypadku występowania wymuszonego ruchu powietrza wokół zbiornika, współczynnik α będzie sumą wartości wyliczonych z:
 - kryterium Michiejewa (wzór 6.5 – konwekcja swobodna) oraz
 - z równania Schrancka (wzór 6.21 – konwekcja wymuszona).
3. W zbiorniku zachodzi nieustalone przewodzenie ciepła, bez wewnętrznych i powierzchniowych źródeł ciepła, przy występowaniu warunku brzegowego III rodzaju.
4. Wpływ temperatury na własności cieplne ośrodka, wyklucza zastosowanie metod analitycznych, w związku z tym zachodzi konieczność wykorzystania jednej z metod numerycznych.

Po przeprowadzonych analizach zdecydowano się na zastosowanie metody bilansów elementarnych, ze względu na dogodną interpretację fizyczną oraz metodykę postępowania, która kładzie nacisk na fizyczną stronę problemu i nie wymaga zagłębiania się w matematyczną ścisłość rozważań.

7.3. Zastosowanie metody bilansów elementarnych do opisu pola temperatury w osadniku sedymentacyjnym

Matematyczny model przepływu ciepła w osadniku sedymentacyjnym, powstał w głównej mierze przy wykorzystaniu pracy pod redakcją Szarguta „*Modelowanie numeryczne pól temperatury*” [53]. Korzystano również z opracowania pod redakcją Gduli „*Przewodzenie ciepła*” [24].

Przedstawione w niniejszym podrozdziale zależności wyznaczono dla założeń opisanych w podrozdziale 7.2.

Metoda bilansów elementarnych oparta jest na pojęciu oporu przepływu ciepła, wynikającym z prawa Fouriera (6.24). Polega na podzieleniu rozpatrywanego układu na pewną liczbę elementów geometrycznych (elementów różnicowych) i sporządzeniu dla

nich bilansów cieplnych. Każdemu elementowi przypisany jest węzeł znajdujący się w jego środku ciężkości (rysunek. 7.2a).

Strumień ciepła pomiędzy węzłami i oraz j , w których panuje temperatura T_i oraz T_j dany jest wzorem:

$$\dot{Q}_{ij} = K_{ij}(T_j - T_i) \quad (7.4)$$

przy czym dla przypadku, gdy odcinek łączący węzły jest prostopadły do płaszczyzny podziału (taka sytuacja nastąpi w przypadku pionowego cylindra):

$$K_{ij} = \frac{S_{ij} k_{ij}}{L_{ij}} \quad (7.5)$$

gdzie:

K_{ij} - przewodność cieplna (odwrotność oporu przepływu ciepła) pomiędzy węzłami i oraz j [W/K]

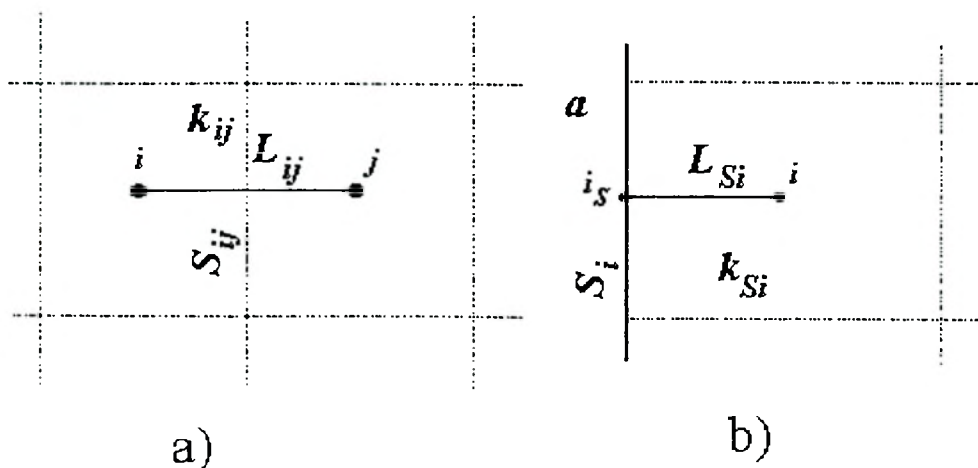
S_{ij} - pole powierzchni rozgraniczającej elementy i oraz j [m²]

k_{ij} - średni współczynnik przewodzenia ciepła na odcinku i, j [W/mK]

L_{ij} - odległość pomiędzy węzłami i, j [m]

j - numery węzłów sąsiadujących z i -tym węzłem.

Na środku powierzchni zewnętrznej elementów różnicowych stykających się z otoczeniem (elementy brzegowe), wprowadza się powierzchniowe węzły pomocnicze, które ułatwiają określenie wymiany ciepła między powierzchnią zewnętrzną ciała a otoczeniem (rysunek 7.2b).



Rysunek 7.2. Elementy różnicowe: a) wewnętrzne, b) brzegowe.

Strumień ciepła oddawany z powierzchni zewnętrznej do otoczenia przez i-ty element różnicowy, gdy znany jest współczynnik wnikania ciepła α , opisuje zależność:

$$\dot{Q}_{S_i} = K_{F_i} (T_{F_i} - T_i) \quad (7.6)$$

gdzie

T_{F_i} - temperatura płynu stykającego się z powierzchnią S_i ,

K_{F_i} - przewodność cieplna pomiędzy płynem a i-tym węzłem elementu różnicowego [W/K], dana wzorem:

$$\frac{1}{K_{F_i}} = \frac{1}{K_{S_i}} + \frac{1}{K_{F_{S_i}}} = \frac{L_{S_i}}{S_i k_{S_i}} + \frac{1}{S_i \alpha} \quad (7.7)$$

gdzie:

K_{S_i} - przewodność cieplna pomiędzy powierzchnią elementu różnicowego brzegowego a węzłem tego elementu [W/K]

$K_{F_{S_i}}$ - przewodność cieplna pomiędzy płynem a powierzchnią elementu różnicowego [W/K]

L_{S_i} - odległość pomiędzy powierzchnią a węzłem elementu różnicowego [m]

S_i - powierzchnia zewnętrzna i-tego elementu różnicowego [m²]

k_{S_i} - średni współczynnik przewodzenia ciepła na odcinku pomiędzy powierzchnią a węzłem elementu różnicowego [W/mK]

α - współczynnik wnikania ciepła [W/m²K]

Chwilowy bilans energii elementu różnicowego dla warunków panujących w osadniku sedymentacyjnym, będzie miał postać:

$$V_i \rho_i \frac{di_i}{d\tau} = \sum_j \dot{Q}_{j_i} + \dot{Q}_{S_i} \quad (7.8)$$

gdzie

V_i - objętość i-tego elementu,

ρ_i - gęstość i-tego elementu,

i_i - entalpia właściwa i-tego elementu.

Wykorzystując wzory (7.4) i (7.6) otrzymamy:

$$V_i \rho_i \frac{di_i}{d\tau} = \sum_j K_{j_i} T_j + b_i K_{F_i} T_{F_i} - \left(\sum_j K_{j_i} + b_i K_{F_i} \right) T_i \quad (7.9)$$

gdzie

- $b_i = 1$ - dla elementów różnicowych brzegowych,
 $b_i = 0$ - dla elementów różnicowych wewnętrznych.

W przypadku nieustalonego przewodzenia ciepła w ciele nieruchomym, można we wzorze (7.9) zastąpić pochodną $di_i/d\tau$ ilorazem różnicowym

$$\frac{di_i}{d\tau} = \frac{i_{i,\tau+1} - i_{i\tau}}{\Delta\tau} \quad (7.10)$$

otrzymując równanie różnicowe.

W przypadku skończonej pojemności cieplnej (gdy nie ma przemian fazowych) można otrzymać równanie różnicowe, zastępując pochodną $di_i/d\tau$ wyrażeniem:

$$\frac{di_i}{d\tau} = c_p \frac{T_{i,\tau+1} - T_{i\tau}}{\Delta\tau}, \quad (7.11)$$

przy czym dla (7.10) i (7.11):

$\Delta\tau$ - długość odcinka czasu;

τ - moment początkowy w danym odcinku czasu;

$\tau+1$ - moment końcowy w danym odcinku czasu.

Możliwe są trzy sposoby rozwiązania równania różnicowego powstałego przez wstawienie ilorazu różnicowego (7.11) po lewej stronie równania (7.9):

1. **Metoda ilorazu różnicowego przedniego**, w której po prawej stronie równania (7.9) występują temperatury w momencie początkowym danego kroku czasu. Można ją stosować także wtedy, gdy współczynnik przewodzenia ciepła zależy od temperatury. Nie ma konieczności rozwiązywania układu równań różnicowych. Zaletą metody jest prostota rozwiązania, wadą – ograniczenie dopuszczalnej długości odcinka czasu $\Delta\tau$.
2. **Metoda ilorazu różnicowego wstecznego**, w której po prawej stronie równania (7.9) występują temperatury w końcowym momencie rozpatrywanego kroku czasu. Konieczne jest rozwiązywanie układu równań liniowych. Nie stawia ona ograniczeń w stosunku do $\Delta\tau$, natomiast obliczenia są znacznie bardziej skomplikowane, niż w pierwszej metodzie.
3. **Metoda ilorazu różnicowego centralnego** (metoda Cranka-Nicolsona), polegająca na wprowadzeniu w węzłach średnich arytmetycznych temperatur z chwil τ oraz $\tau+1$. Pozwala to na zwiększenie dokładności rozwiązań. Jednakże w przypadku, gdy

współczynnik przewodzenia ciepła zależy od temperatury, istnieje konieczność zmuszonego rozwiązywania układu równań różnicowych w każdym kroku czasu.

Do opisu zjawiska przewodzenia ciepła w zbiorniku, zdecydowano się wykorzystać metodę ilorazu różnicowego przedniego.

Po zastosowaniu zależności (7.11) i przekształceniu wzoru (7.9), otrzymuje się równanie:

$$T_{i,\tau+1} = p_{ii}T_{i\tau} + \sum_j p_{ij}T_{j\tau} + p_{Fi}T_{Fi\tau}, \quad (7.12)$$

w którym:

$$p_{ii} = 1 - \frac{\Delta\tau}{V_i \rho_i c_{pi}} \left(b_i K_{Fi} + \sum_j K_{ij} \right) \quad (7.13)$$

$$p_{ij} = \frac{\Delta\tau}{V_i \rho_i c_{pi}} K_{ij} \quad (7.14)$$

$$p_{Fi} = \frac{\Delta\tau}{V_i \rho_i c_{pi}} b_i K_{Fi}. \quad (7.15)$$

Przy czym warunek ograniczający długość kroku czasowego przyjętego do obliczeń jest następujący:

$$\Delta\tau \leq \min \left(\frac{V_i \rho_i c_{pi}}{b_i K_{Fi} + \sum_j K_{ij}} \right), \quad (7.16)$$

W praktyce oznacza to policzenie prawej strony nierówności (7.16) dla każdego z węzłów w chwili τ_0 i wybranie najmniejszej wartości – jako maksymalnej dopuszczalnej długości kroku czasu.

7.4. Warunki początkowe

Warunki początkowe w modelu dotyczą dwóch zjawisk: przepływu ciepła i sedymentacji zawiesin. Do pierwszej grupy należą:

- 1) podział zbiornika na elementy różnicowe,
- 2) początkowy rozkład temperatury wody w zbiorniku.

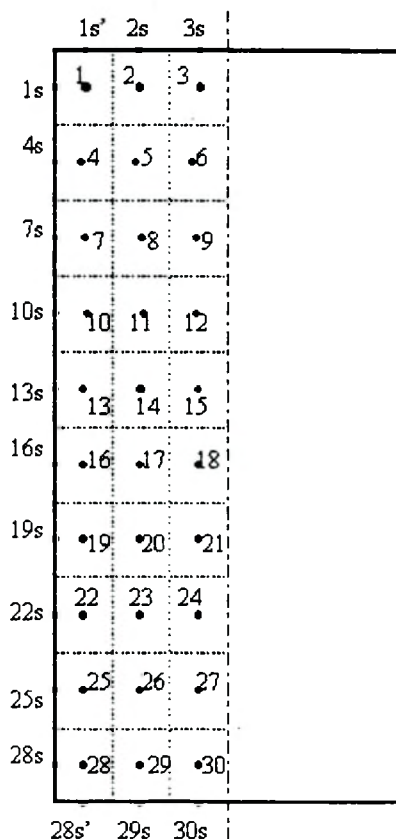
Natomiast warunki początkowe związane z sedymentacją zawiesin, są następujące:

- 1) objętość zawiesiny odprowadzanej do zbiornika w trakcie płukania filtra i stężenie zawiesiny,
- 2) analiza frakcyjna oraz gęstość zanieczyszczeń.

Wszystkie warunki początkowe zostały dobrane tak, by móc je swobodnie określić w normalnych warunkach pracy stacji, bez konieczności montowania dodatkowych przyrządów.

7.4.1. Podział zbiornika sedymentacyjnego na elementy różnicowe

Wykorzystując metodę bilansów elementarnych, dokonano podziału zbiornika sedymentacyjnego na elementy (rysunek 7.3.). Założono dwuwymiarowy model przepływu ciepła, w którym ciepło przepływa w kierunku równoległym do osi symetrii zbiornika oraz w kierunku ścian zbiornika. Przyjęto, iż w trzecim wymiarze (odpowiadającemu kierunkowi prostopadłemu do płaszczyzny rysunku) przewodzenie ciepła nie zachodzi. W celu uproszczenia procesu obliczeniowego, rozważaniom poddano jedynie połowę zbiornika przyjmując, że w drugiej, symetrycznej, zachodzą identyczne jakościowo i ilościowo procesy. W związku z czym, wyniki ilościowe otrzymane w wyniku modelowania numerycznego zjawisk zachodzących w rozpatrywanej części, należy dwukrotnie zwiększyć.



Rysunek 7.3. Przykładowy podział różnicowy zbiornika sedymentacyjnego.

Ponadto przy obliczeniach pominięto przewodzenie ciepła w stalowych ściankach, osadnika, gdyż straty ciepła dla grubości ścianek 5 mm i współczynnika przewodzenia ciepła 40 W/mK, odpowiadają stratom ciepła w warstwie wody o grubości 0,08 mm.

7.4.2. Rozkład początkowy temperatury wody w zbiorniku

W przypadku przepływu ciepła warunek początkowy musi opisywać rozkład temperatury wody w zbiorniku. W modelu przyjęto, w chwili początkowej rozkład temperatury jako jednowymiarowy, w którym temperatura jest funkcją wysokości położenia w osi zbiornika $t_0 = f(z)$. Wynika to z założenia, iż bezpośrednio po zakończeniu zrzutu i powstaniu układu statecznie stratyfikowanego, temperatura wody na danej wysokości jest stała, gdyż proces przewodzenia ciepła w kierunku ścianek zbiornika dopiero co się rozpoczął.

Korzystając z wyników prac nad zjawiskiem stratyfikacji statecznej, opisanych przez Pieńkowskiego w pracy [44], jako formułę aproksymacyjną przyjęto równanie przybliżające rozkład temperatury w postaci funkcji:

$$t_0(z) = S_1 th[n(z - h_{wr})] + S_2 \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.17)$$

gdzie:

$t_0(z)$ - temperatura wody w zbiorniku na wysokości z od dna zbiornika, w chwili τ_0 ,

S_1, S_2 - stałe o wymiarze [K],

n - parametr modelujący nachylenie („spłaszczenie”) krzywej rozkładu temperatury [m^{-1}],

z - umiejscowienie punktu na osi pionowej od dna zbiornika w [m]

h_{wr} - wysokość od dna zbiornika w [m] warstwy rozdzielającej wodę gorącą od zimnej.

Następnie opierając się na badaniach doświadczalnych pomiaru temperatury w zbiorniku na stanowisku badawczym, uzyskano dyskretną postać funkcji rozkładu temperatury w osi zbiornika w chwili τ_0 , dzięki czemu określono współczynniki w równaniu (7.17) w następujący sposób (wzory własne):

$$\text{a) } S_2 = \frac{t_g + t_d}{2} \quad (7.18)$$

gdzie:

t_g - temperatura wody w zbiorniku w najwyższej warstwie (równa w przybliżeniu temperaturze wody sieciowej),

t_d - temperatura wody w zbiorniku w najniższej warstwie (równa w przybliżeniu temperaturze otaczającego powietrza).

$$b) S_1 = t_g - S_2 = \frac{t_g - t_d}{2} \quad (7.19)$$

c) $n = 5$ - na podstawie badań eksperymentalnych na stanowisku pomiarowym,

$$d) h_{wr} = H \left(-1,33 \frac{V_z}{V} + 1,25 \right) \quad (7.20)$$

na podstawie badań eksperymentalnych na stanowisku pomiarowym,

gdzie

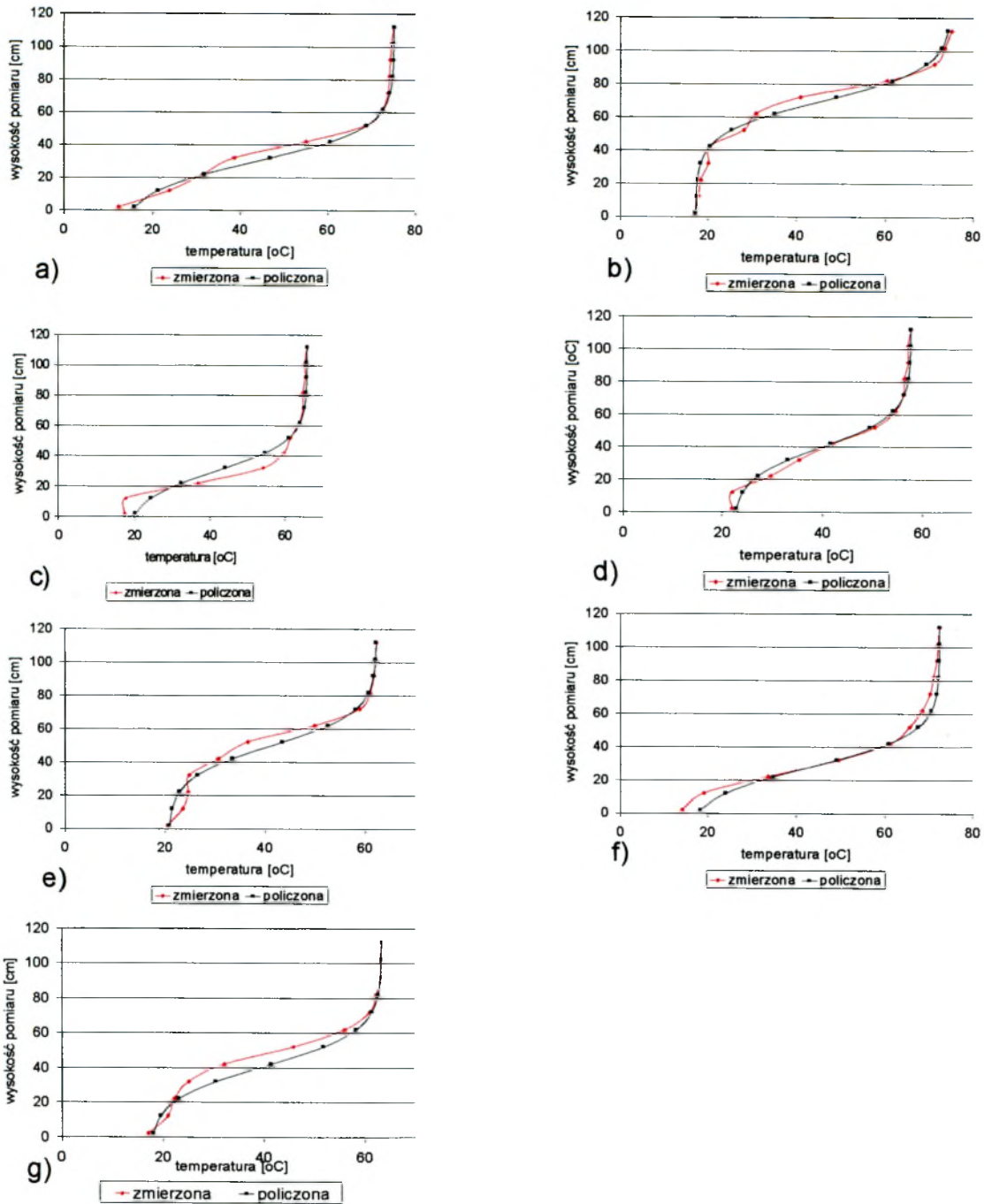
H - wysokość zbiornika [m],

V_z - objętość wody doprowadzonej do zbiornika w trakcie czyszczenia filtra [m³],

V - objętość zbiornika [m³].

Na rysunku 7.4. pokazano zestawienie wartości temperatury wyliczonych na podstawie równania (7.17) z wartościami zmierzonymi w chwili początkowej dla siedmiu cykli pomiarowych.

Na przedstawionych wykresach można zaobserwować, że teoretyczny rozkład temperatur w zbiorniku pomiarowym w chwili τ_0 , opisany funkcją (7.17), wykazuje dużą zgodność z pomierzonymi wartościami temperatury wody.



Rysunek 7.4. Aproksymacja rozkładu temperatury w chwili t_0 za pomocą funkcji (7.17):
 a) zrzut I; b) zrzut II; c) zrzut III; d) zrzut IV; e) zrzut V; f) zrzut VI; g) zrzut VII

7.4.3. Objętość zawiesiny zrzucanej do zbiornika w trakcie płukania filtra

Wielkość ta jest niezbędna do wyznaczenia w zbiorniku warstwy rozdzielającej wodę gorącą od zimnej (wzór (7.20)), jak również do określenia ilości zrzucanych zanieczyszczeń, gdy znane jest średnie stężenie zawiesiny.

Objętość zrzutu odczytujemy ze wskazań wodomierza zainstalowanego na przewodzie łączącym zbiornik sedymentacyjny z magistralą powrotną (patrz rysunek 4.2.).

Stężenie zawiesiny określamy metodą wagową, pobierając w trakcie zrzutu próbkę zawiesiny, wykorzystując do tego celu przewód odpowietrzający, znajdujący się w górnej części osadnika. Ilość zanieczyszczeń liczymy z zależności:

$$m_z = C_z \cdot V_z. \quad (7.21)$$

7.4.4. Analiza frakcyjna oraz gęstość zanieczyszczeń

Udział wagowy cząstek o różnych rozmiarach, jest niezbędny do określenia szybkości oczyszczania wody w osadniku z cząstek zanieczyszczeń stałych. Wyznacza się go na podstawie analizy frakcyjnej zanieczyszczeń. Próbkę do oznaczeń pobiera się poprzez zawór odpowietrzający zbiornika sedymentacyjnego w trakcie zrzutu zanieczyszczeń. Do potrzeb modelu konieczna jest znajomość maksymalnie 26 przedziałów średnic, wraz z odpowiadającymi im zastępczymi średnicami reprezentatywnymi (środkami przedziałów) oraz odpowiadające im procentowo udziały wagowe.

Gęstość zanieczyszczeń konieczna jest do obliczenia prędkości opadania poszczególnych frakcji (wzory (7.1) i (7.3)). Wyznacza się ją znając skład chemiczny zanieczyszczeń. Próbkę zawiesiny do wyznaczenia masy właściwej pobiera się po zakończeniu sedymentacji, poprzez zawór spustowy zbiornika sedymentacyjnego.

7.5. Opis modelu numerycznego do obliczania sedymentacji zanieczyszczeń w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury

Program obliczający sedymentację zanieczyszczeń w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury napisano w języku Visual C++.

Przepływ ciepła w zbiorniku sedymentacyjnym liczony jest w oparciu o metodę bilansów elementarnych. Elementy różnicowe mają kształt prostokątów, ułożonych w trzech kolumnach i m rzędach (poziomach). Każdemu elementowi przypisana jest określona objętość V_i , zależna od rozmiarów zbiornika i szczegółowości podziału

poziomego. Powierzchnie rozgraniczające poszczególne elementy S_{ij} oraz powierzchnie zewnętrzne S_i , również zależą od tych samych wielkości.

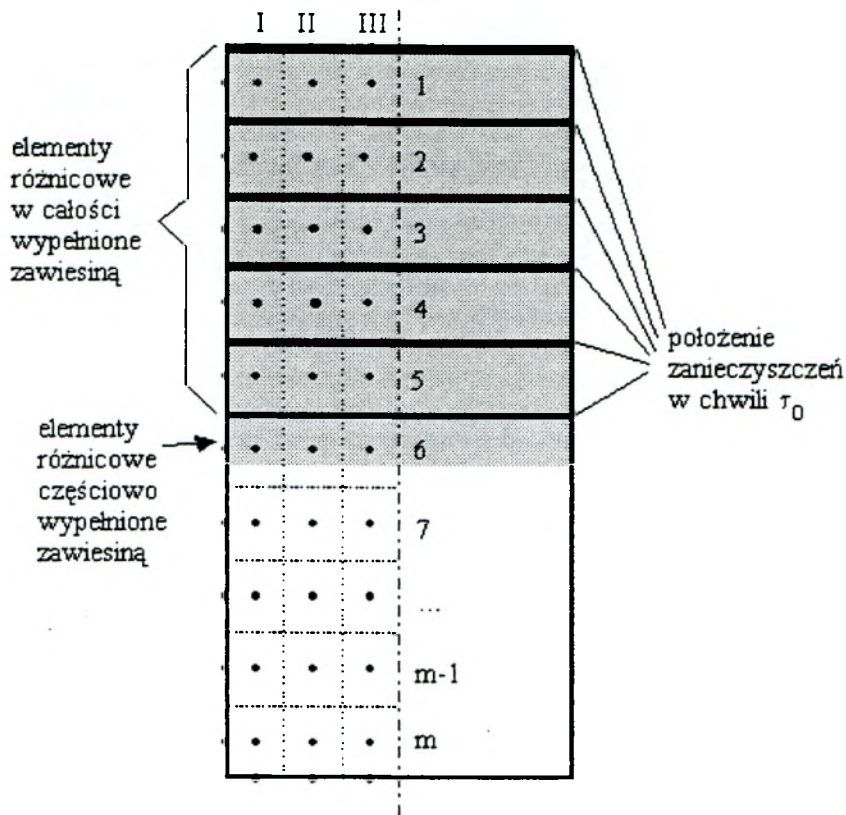
Dane wejściowe do programu:

- 1) wymiary zbiornika: wysokość H i średnica D [m]
- 2) objętość zrzucanej wody V_z [dm³]
- 3) temperatura powietrza t_p [°C]
- 4) temperatura zrzucanej wody t_g [°C]
- 5) temperatura wody w zbiorniku t_d [°C]
- 6) prędkość powietrza omywającego zbiornik u_p [m/s]
- 7) gęstość zanieczyszczeń ρ_s [kg/m³]
- 8) stężenie zanieczyszczeń C_z [g/dm³]
- 9) liczba przedziałów frakcyjnych n (maks. 26)
- 10) średnice zastępcze reprezentatywne (średki przedziałów) d_s [μm] (maks. 500 μm)
- 11) udziały wagowe frakcji p_{ds} [%] ($\sum p_{ds}=100\%$)
- 12) wymagana ilość odseparowanych cząstek (skuteczność) η [%]

Wynikiem obliczeń jest czas τ_z , po jakim zsedymetuje zadana część zanieczyszczeń, czyli czas po jakim osadnik uzyska sprawność odseparowania cząstek η . Dynamika opadania przedstawiana jest na wykresie $\eta_\tau = f(\tau)$. Dodatkowo program podaje wartości temperatury w czasie stygnięcia zbiornika, w na różnych wysokościach od dna.

7.5.1. Opis części sedymentacyjnej

W czasie zrzutu zanieczyszczeń, do osadnika wpływa określona ilość gorącej zawiesiny V_z . Wypełnia ona po kolei objętość elementów różnicowych, poczynając od góry cylindra, natomiast dolna jego część pozostanie wypełniona wodą chłodną. Zazwyczaj powstanie taka sytuacja, że po wypełnieniu w całości kolejnych poziomów, pozostanie pewna objętość zawiesiny, która częściowo wypełni trzy elementy różnicowe. Taki stan rzeczy ilustruje rysunek 7.5.



Rysunek 7.5. Rozkład zawiesiny w zbiorniku w chwili początkowej

Ilość ogółu zanieczyszczeń, jakie znalazły się w określonym elemencie różnicowym, jest proporcjonalna do tego, jaka część całkowitej objętości zawiesiny znalazła się w danym elemencie. Dla elementów całkowicie wypełnionych, obliczana jest z zależności:

$$x_i = \frac{V_i}{V_z} \quad (7.22)$$

dla trzech elementów częściowo wypełnionych, zależność jest następująca:

$$x_i = \frac{V_z - \sum V_i}{V_z} \cdot \frac{V_{icz}}{V_{cz}} \quad (7.23)$$

gdzie

$\sum V_i$ - łączna objętość elementów całkowicie wypełnionych zawiesiną,

V_{cz} - objętość poziomu częściowo wypełnionego zawiesiną,

V_{icz} - objętość i-tego elementu położonego w rzędzie częściowo wypełnionym zawiesiną.

przy czym $\sum x_i = 1$ (dla wartości policzonych ze wzorów (7.22) i (7.23)).

Ponieważ przyjmuje się, że zawiesina jest jednorodna, to w każdym elemencie różnicowym zostają zachowane proporcje pomiędzy udziałami poszczególnych frakcji. W każdym elemencie różnicowym zajmowanym przez zawiesinę, znajdzie się n zbiorów cząstek, gdzie n oznacza liczbę przedziałów frakcyjnych charakteryzujących zawiesinę. Każdemu z tych zbiorów przypisany jest jego udział $x_i \cdot p_{ds}$ (gdzie p_{ds} oznacza udział procentowy ziaren o średnicy zastępczej d_s) w ogólnej masie zanieczyszczeń zrzuconych do zbiornika, przy czym:

$$\sum_i \sum_{ds} x_i p_{ds} = 100\% \quad (7.24)$$

W celu uproszczenia obliczeń przyjęto, że wszystkie cząstki znajdujące się w chwili początkowej w objętości danego elementu różnicowego, zlokalizowane są na jego górnej płaszczyźnie. Oznacza to, że wszystkie zanieczyszczenia z danego poziomu mają do przebycia jednakową odległość E_i do dna zbiornika.

Dla każdego zbioru cząstek liczona jest prędkość opadania u_z w danym kroku czasowym $\Delta\tau$. Jest ona zależna od średnicy zastępczej d_s oraz gęstości i lepkości wody. W zależności od drogi, jaką przebył zbiór cząstek w danym kroku czasowym ($e_{\Delta\tau} = u_z \cdot \Delta\tau$), następny krok czasowy rozpocznie w tym samym elemencie lub znajdzie się w jednym z elementów poniżej. Jeżeli droga jaką przebyły cząstki od chwili t_0 jest większa lub równa odległości E_i , to uznajemy, że zbiór cząstek osiadł na dnie i w kolejnym kroku czasowym nie jest rozpatrywany.

7.5.2. Opis części termicznej

Właściwości fizyczne wody, gęstość i lepkość, zależne są od temperatury, a ta zmienia się z wysokością zbiornika oraz w czasie. Oznacza to, że prędkość opadania ziaren jest zależna od położenia cząstki i dynamiki stygnięcia zbiornika. W związku z tym dla każdego elementu różnicowego w danym kroku czasowym, dla obliczonej temperatury wody, określane są gęstość wody i współczynnik lepkości dynamicznej. Wartości odczytane z „*Tablic właściwości termofizycznych*” [20] są aktualizowane co 10°C . Podobnie aktualizowany jest współczynnik przewodzenia ciepła dla wody.

Początkowy rozkład temperatur w osadniku liczony jest ze wzoru (7.17). Temperaturę wody w danym elemencie różnicowym, dla kolejnego kroku czasowego policzono z zależności (7.12). Warunek brzegowy, jednakowy dla wszystkich ścian zbiornika jest wyznaczany jako suma współczynników wymiany ciepła α , liczonych dla konwekcji swobodnej i wymuszonej. Przy czym dla konwekcji swobodnej α jest zmienny

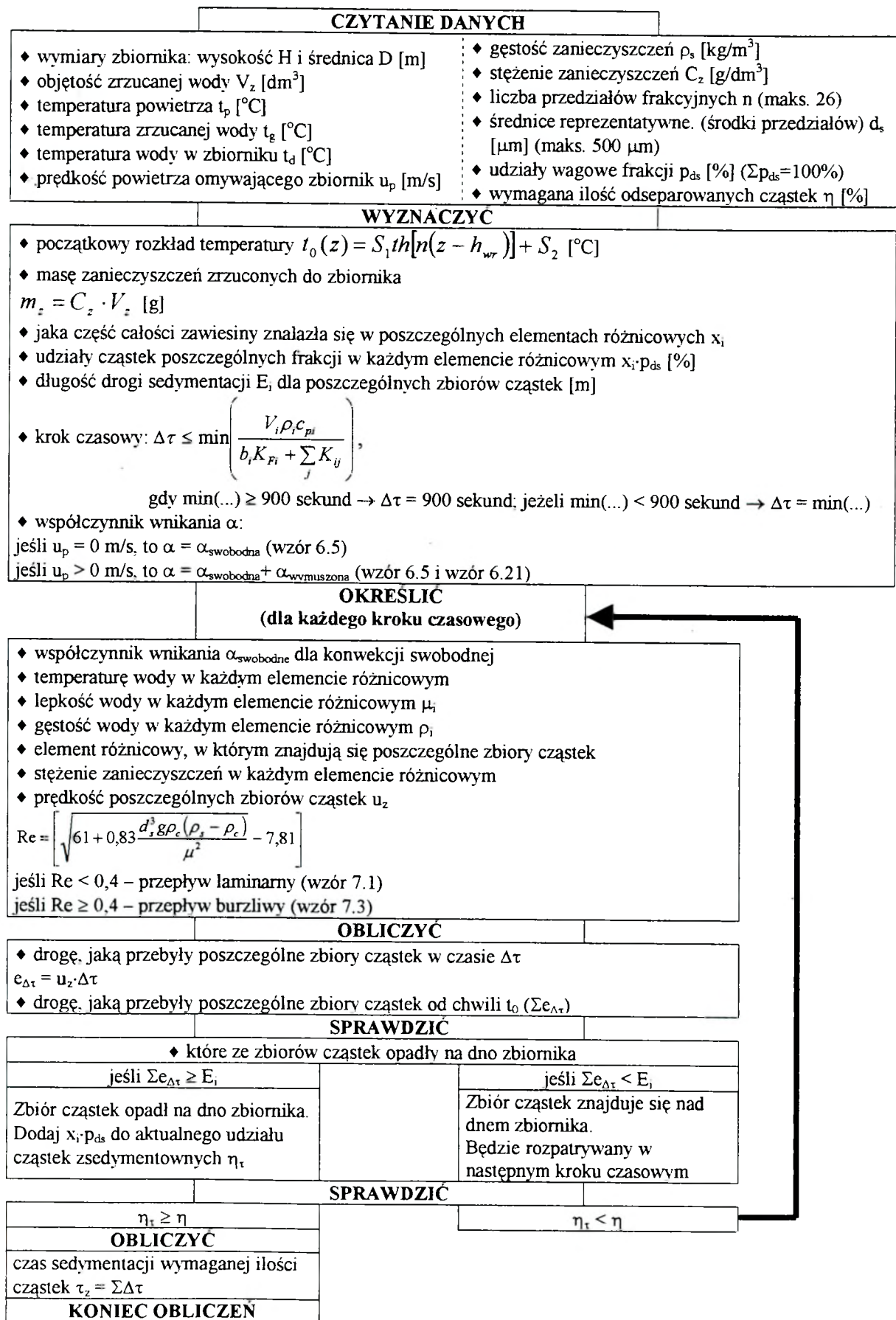
w czasie (zależy od temperatury ścianek zbiornika), natomiast dla konwekcji wymuszonej – jest stały (zakładamy stałą prędkość strumienia powietrza w czasie stygnięcia zbiornika).

Dodatkowo założono, że na skutek stygnięcia wody, w górnej części zbiornika powstanie poduszka powietrza o grubości 1,5 centymetra.

7.5.3. Algorytm programu liczącego sedymentację zanieczyszczeń w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury

Schemat programu liczącego sedymentację zawiesiny polidispersyjnej w warunkach stratyfikacji pola temperatur, przedstawia rysunek 7.6.

Weryfikację modelu numerycznego i jego przydatność do obliczeń inżynierskich, wykonano na podstawie badań przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym.



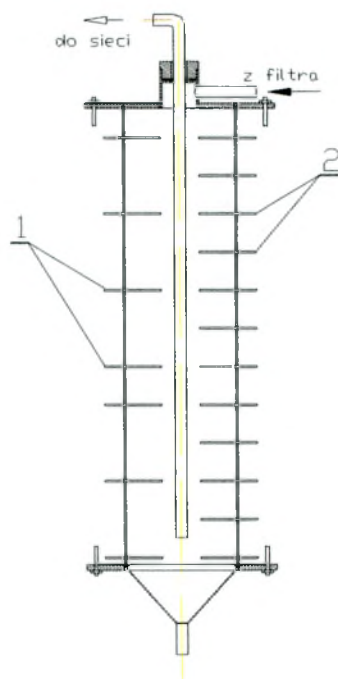
Rysunek 7.6. Algorytm obliczania czasu sedymentacji wymaganej ilości zanieczyszczeń

8. *Badania doświadczalne*

8.1. *Opis stanowiska badawczego*

Zbiornik pomiarowy, na którym przeprowadzono pomiary rozkładu pola temperatury oraz pobierano próbki do badań stężeń zawiesiny, został zaprojektowany tak, by uzyskać warunki zbliżone do panujących w rzeczywistym osadniku sedymentacyjnym stacji oczyszczania wody sieciowej. Składa się z obudowy w kształcie walca, dna i pokrywy.

Walec o wysokości 1,2 m i średnicy wewnętrznej 0,28 metra, wykonany jest z przezroczystego tworzywa sztucznego o grubości ścianki 5 mm. W walcu zamontowano 12 czujników temperatury oraz 7 przewodów do poboru próbek zawiesiny (rysunek 8.1.).



Rysunek 8.1.

Schemat zbiornika

pomiarowego. Oznaczenia: 1-

przewody do poboru próbek

zawiesiny, 2-czujniki

temperatury.

Dolna część zbiornika pomiarowego składa się ze stalowej obręczy, do której przyspawano dno ze stalowej blachy uformowanej na kształt stożka. Wierzchołek stożka zakończony jest króćcem do przeznaczonym do opróżniania zbiornika.

Pokrywa zbiornika pomiarowego zbudowana jest ze stali i ma kształt koła. W jej środku znajduje się króciec, do którego dochodzi przewód doprowadzający zawiesinę z filtra. Wewnątrz króćca, w jego osi symetrii zamontowano przewód odprowadzający wodę ze zbiornika. Przewód ma długość 1,2 m. Biegnie w osi zbiornika i kończy się 0,15 m nad dolną krawędzią walca.

8.2. Zakres badań i metodyka pomiarowa

Stanowisko pomiarowe zainstalowano w kanale ciepłowniczym Politechniki Warszawskiej, w pobliżu automatycznej stacji oczyszczania wody sieciowej. W celu przeprowadzenia pomiarów, zanieczyszczoną wodę z płukania filtra zamiast do zbiornika sedymentacyjnego stacji, kierowano dodatkowym przewodem do zbiornika pomiarowego. Konstrukcja stanowiska badawczego oraz zastosowanie bezpośredniego zrzutu zanieczyszczonej wody do zbiornika pomiarowego dały możliwość przeprowadzenia pomiarów w warunkach bardzo zbliżonych do warunków rzeczywistych.

Pełny cykl pomiarowy obejmował:

- 1) płukanie filtra włókninowego i zrzut określonej objętości zanieczyszczonej wody do zbiornika pomiarowego;
- 2) pomiar temperatury cieczy w zbiorniku, który wykonywano za pomocą 12 czujników rozmieszczonych w zbiorniku na różnych wysokościach;
- 3) pobór próbek zawiesiny z siedmiu przewodów umieszczonych na różnej wysokości zbiornika;
- 4) odseparowanie części stałych z pobranych próbek zawiesiny i zważenie ich.

W wyniku tak przeprowadzonego cyklu pomiarowego otrzymano każdorazowo:

- zmienny w czasie rozkład temperatur wody w przekroju pionowym zbiornika pomiarowego;
- zmieniający się w czasie rozkładu stężeń zawiesiny w przekroju pionowym zbiornika pomiarowego.

Ponadto po zakończeniu cyklu pomiarowego przeprowadzano dokładne płukanie zbiornika i zbieranie zanieczyszczeń z jego wnętrza. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie następujących oznaczeń:

- 1) wykonanie analizy frakcyjnej zanieczyszczeń;
- 2) określenie masy zebranych zanieczyszczeń w stanie powietrzno-suchym;
- 3) przeprowadzenie analizy chemicznej zatrzymanych zanieczyszczeń.

W sumie wykonano 7 cykli pomiarowych dla siedmiu zrzutów zanieczyszczeń, oznaczonych kolejno cyframi rzymskimi od I do VII. W trakcie zrzutów woda gorąca była przetłaczana do wystudzonego zbiornika; sedymentacja odbywała się w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury z jednoczesnym stygnięciem zbiornika. W tabeli 8.1. podano zakres badań przeprowadzonych w poszczególnych cyklach pomiarowych.

Tabela 8.1. Zakres badań przeprowadzonych dla poszczególnych cykli pomiarowych

Zrzut	Data	Objętość zrzutu	Przeprowadzone badania				
			rozkład temperatury	rozkład stężeń	masa zanieczyszczeń	analiza chemiczna	Analiza frakcyjna
I	13.12.1996	60 dm ³	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
II	31.01.1997	40 dm ³	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie
III	11.04.1997	60 dm ³	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
IV	07.05.1997	55 dm ³	Tak	Tak	Tak	Tak	Nie
V	22.10.1998	48 dm ³	Tak	Tak	Tak	Nie	Nie
VI	22.03.1999	58 dm ³	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak
VII	29.03.1999	50 dm ³	Tak	Tak	Tak	Tak	Tak

8.2.1. Pomiar temperatury

Do pomiaru temperatury wykorzystano rezystory termometryczne Pt1000 firmy „CZAKI THERMO-PRODUCT”, które umieszczono w miedzianych osłonach tak, iż rezystory znalazły się w odległości 8 cm od ścianki zbiornika. Czujniki zamontowane zostały w pionie w odstępach co 0,1 m. Pierwszy czujnik znajdował się na wysokości 2 cm nad dolną krawędzią walca, a ostatni - 8 cm poniżej górnej pokrywy zbiornika – w sumie 12 sztuk.

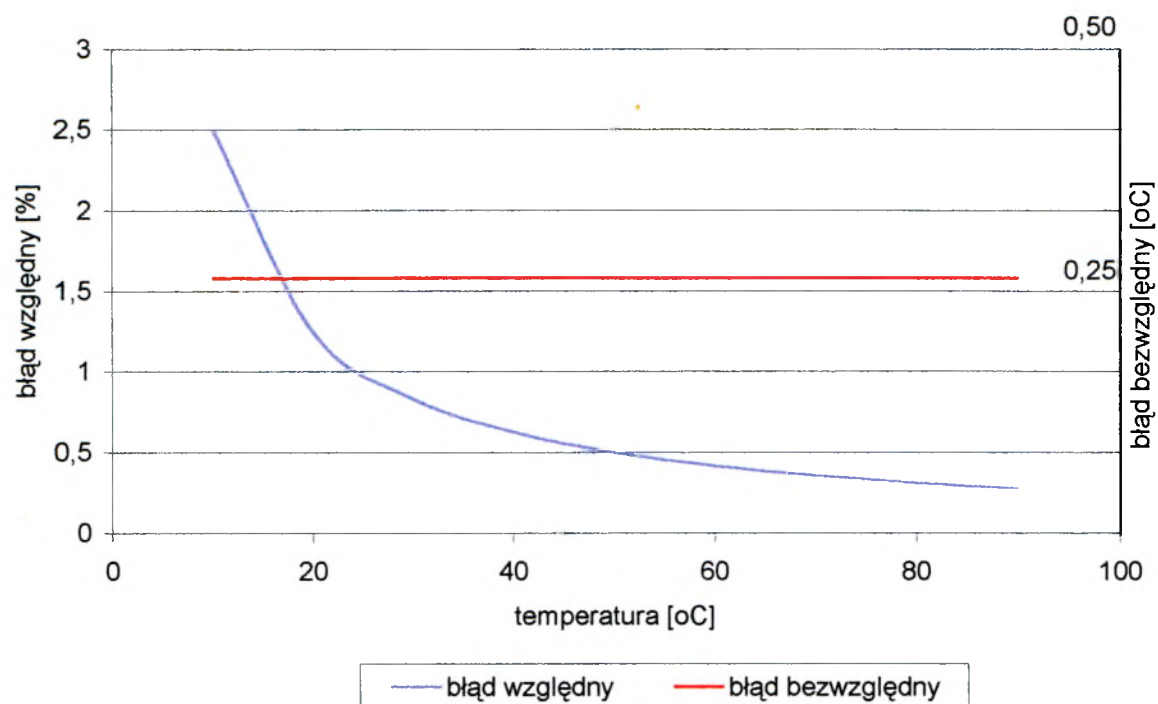
Rezystory Pt1000, wykorzystane przy pomiarze temperatury wody w zbiorniku, mają charakterystykę oporności zbliżoną do liniowej i czułość 3,85Ω/1K w przedziale temperatur od 0°C do 100°C [16]. Pomiar temperatury polegał na odczycie oporności w rezystorach Pt1000 z dokładnością do 1 Ω, a następnie przeliczenie wartości oporu na temperaturę z następującej zależności:

$$t = \frac{R - 1000}{3,85} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (8.1)$$

R - oporność [Ω]

1000 - wartość oporu w rezystorze Pt1000 w temp. 0°C [Ω].

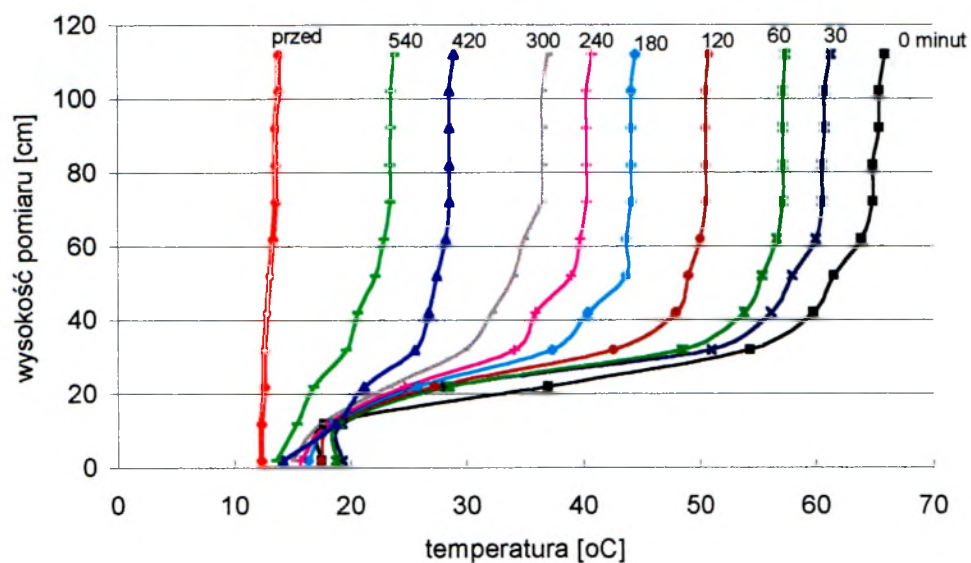
Błąd bezwzględny pomiaru był stały i wynosił 0,26 °C, natomiast błąd względny malał wraz ze wzrostem mierzonej temperatury (patrz wykres 8.1.).



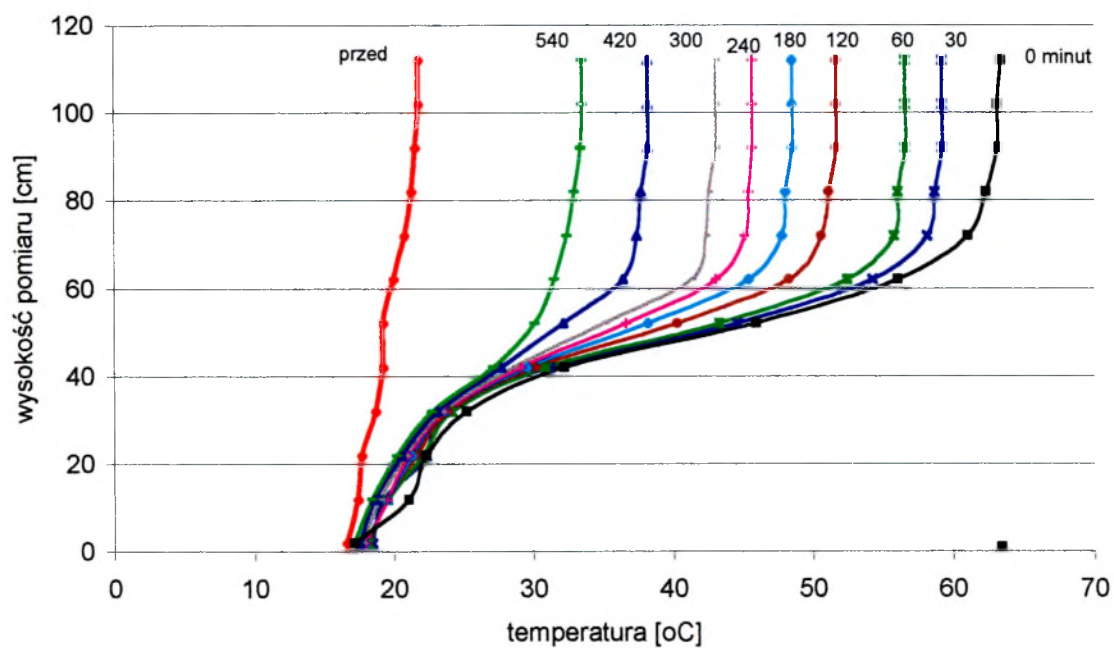
Wykres 8.1. Błędy pomiaru temperatury w zbiorniku

Pierwszy pomiar temperatury w cyklu pomiarowym przeprowadzono bezpośrednio po zakończeniu zrzutu zanieczyszczeń, a następne - po 15, 30 i 60 minutach od zakończenia zrzutu i dalej co godzina, aż do 9 godzin po wykonaniu zrzutu.

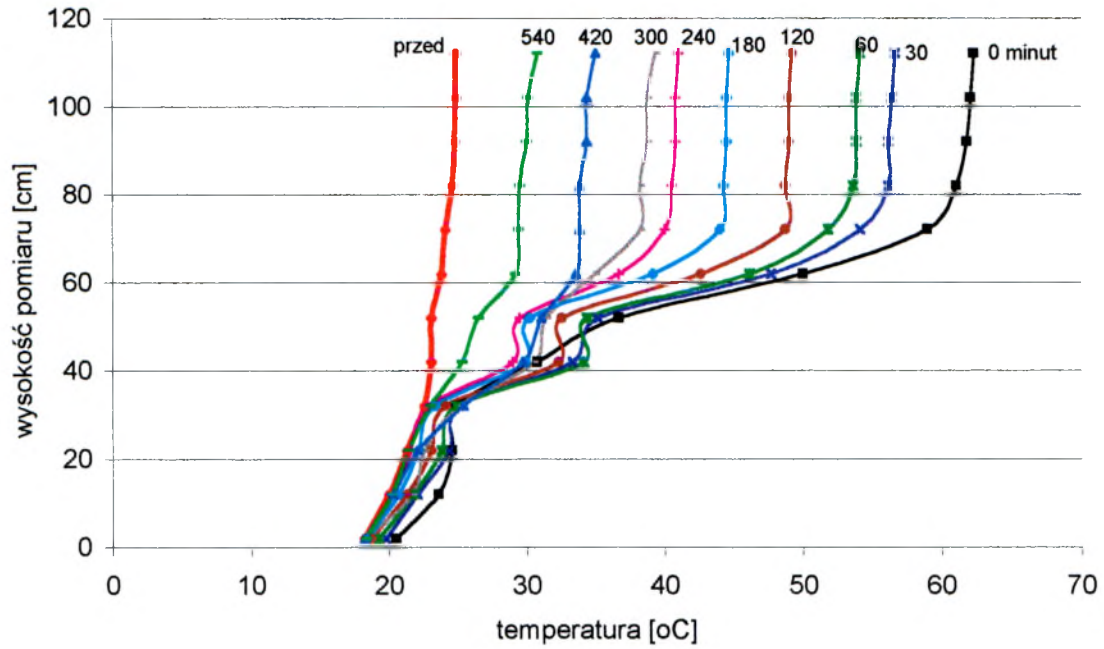
Rozkład temperatur w przekroju pionowym zbiornika, przedstawiono za pomocą wykresów dla pomiarów przeprowadzonych w poszczególnych zrzutach. Wybrano cztery przypadki, w których do osadnika zrzucono różne objętości gorącej wody: 60 dm^3 , 50 dm^3 , 48 dm^3 i 40 dm^3 . W pozostałych zrzutach dla takich samych objętości, rozkład temperatur wody w zbiorniku był podobny. Na wykresach zaznaczono różnymi kolorami profile rozkładu temperatury wody w zbiorniku, w różnych momentach cyklu pomiarowego. Czerwona linia na każdym wykresie oznacza temperaturę na różnych wysokościach cylindra, przed rozpoczęciem zrzutu. Taki stan osiąga zbiornik po wystygnięciu.



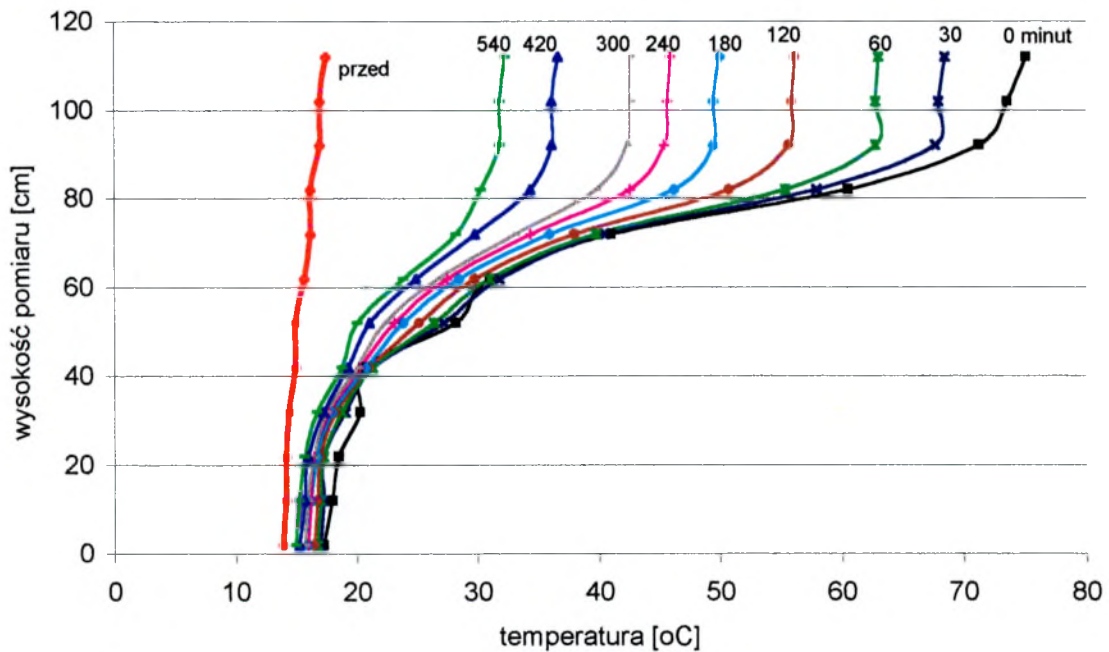
Wykres 8.2. Rozkład temperatur w zbiorniku pomiarowym (zrzut III – 60 litrów)



Wykres 8.3. Rozkład temperatur w zbiorniku pomiarowym (zrzut VII – 50 litrów)



Wykres 8.4. Rozkład temperatur w zbiorniku pomiarowym (zrzut V – 48 litrów)



Wykres 8.5. Rozkład temperatur w zbiorniku pomiarowym (zrzut II – 40 litrów)

Wykresy od 8.2. do 8.5. ilustrują przypadki stygnięcia zbiornika pomiarowego po przeprowadzeniu zrzutu zanieczyszczeń zatrzymanych na filtrze włókninowym. Gorąca woda po przepłukaniu filtra, napełnia cylinder – poczynając od części górnej. Po

zakończeniu zrzutu powstaje pionowo zróżnicowany rozkład temperatury, na wykresach oznaczony kolorem czarnym. Następnie zbiornik, oddaje ciepło do otoczenia i stygnie. Dąży do stanu przed rozpoczęciem zrzutu, czyli do osiągnięcia temperatury powietrza.

Rozkład temperatur w zbiorniku w chwili τ_0 , pozwala zaobserwować trzy różne strefy:

- 1) **strefa wody gorącej**, w górnej części zbiornika, gdzie temperatura wody jest najwyższa i niewiele się zmienia z obniżeniem wysokości pomiaru – w tej strefie znajduje się woda o temperaturze zbliżonej do temperatury wody w sieci;
- 2) **strefa przejściowa**, znajdująca się w środkowej części cylindra, gdzie nastąpiło zmieszanie wpływającej wody ciepłej, z chłodną wodą znajdującą się w zbiorniku – w tej strefie można zaobserwować znaczny spadek temperatury, wraz z obniżeniem wysokości pomiaru;
- 3) **strefa wody zimnej**, w pobliżu dna zbiornika, gdzie woda ma najniższą temperaturę, zbliżoną do temperatury powietrza – jest to warstwa, do której w czasie zrzutu dotarła tylko niewielka ilość gorącej wody.

Strefę wody gorącej widać najwyraźniej w tych przypadkach, gdzie objętość zrzucanej wody była największa – około 60 litrów (zrzut I, III i VI). Ma ona ponad 60 cm grubości. Natomiast w tych zrzutach strefa zimnej wody praktycznie nie występuje. Widać ją za to najlepiej (ma około 40 cm) w przypadku zrzutu II, gdzie do zbiornika przetłoczono 40 dm³ gorącej wody. W tym wypadku warstwa gorącej wody ma grubość jedynie 20 cm. Strefa przejściowa za każdym razem stanowi 30 – 40 centymetrową warstwę.

Podział na te trzy zasadnicze strefy temperaturowe, zostaje zachowany w trakcie stygnięcia zbiornika. Przy czym różnice między strefami stopniowo ulegają zmniejszeniu. Wynika to ze zróżnicowanej dynamiki stygnięcia wody w cylindrze – najszybciej stygnie warstwa gorącej wody.

Świadczy to o tym, że w wyniku doprowadzenia do zbiornika wypełnionego zimną wodą, pewnej objętości wody gorącej, powstaje pionowe uwarstwienie temperaturowe wody, którego stabilny charakter wraz z upływem czasu zostaje zachowany.

W tabeli 8.2. przedstawiono porównanie dynamiki stygnięcia warstwy wody gorącej dla różnych zrzutów oraz wyszczególniono czynniki, które miały wpływ na szybkość przekazywania ciepła przez zbiornik do otoczenia (prędkość strumienia powietrza i jego temperatura).

Tabela 8.2. Porównanie warunków stygnięcia wody w zbiorniku pomiarowym

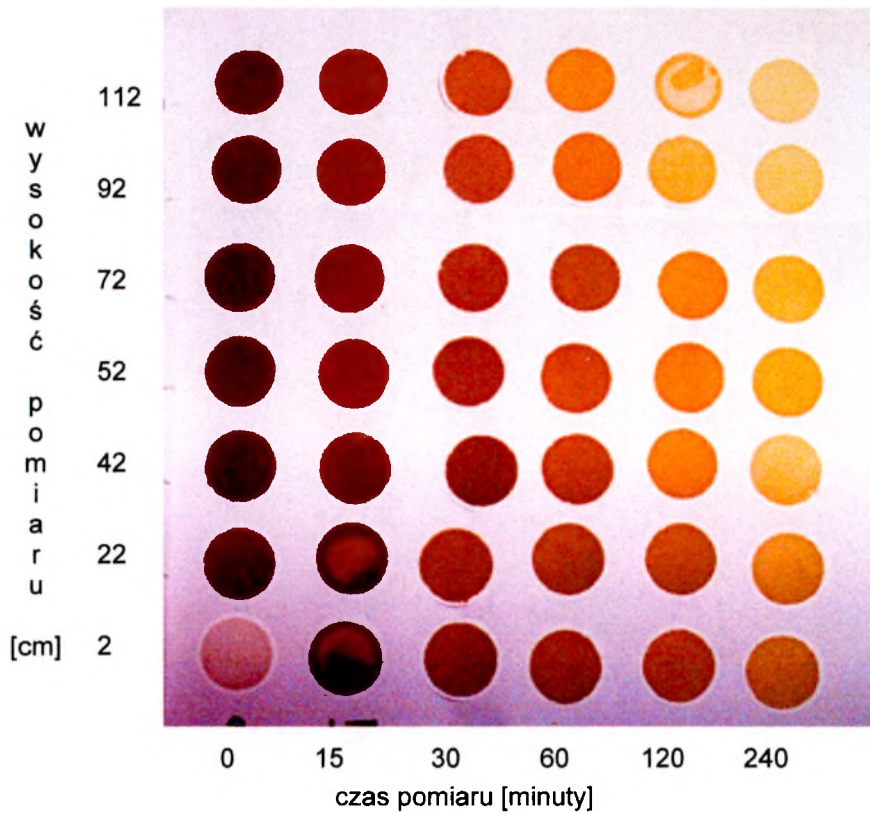
Zrzut nr	Objętość zrzutu	Najwyższa temp. wody w chwili τ_0	Najwyższa temp. wody w chwili $\tau=9$ godz.	Δt po 9 godzinach	Warunki zewnętrzne	
					temperatura powietrza	prędkość powietrza
I	60 dm ³	75,1 °C	33,3 °C	41,8 °C	11 °C	0,6 m/s
II	40 dm ³	75,1 °C	32,3 °C	42,8 °C	15 °C	0,6 m/s
III	60 dm ³	65,9 °C	23,8 °C	42,1 °C	13 °C	0,7 m/s
IV	55 dm ³	57,7 °C	30,1 °C	27,6 °C	19 °C	0,5 m/s
V	48 dm ³	62,3 °C	30,8 °C	31,5 °C	20 °C	0,7 m/s
VI	58 dm ³	72,5 °C	32,7 °C	39,8 °C	15 °C	0,4 m/s
VII	50 dm ³	63,1 °C	33,5 °C	29,6 °C	18 °C	0,3 m/s

Temperatura zawiesiny zrzucanej do zbiornika pomiarowego, zależała od temperatury wody w kolektorze zasilającym. Najniższa była w przypadku zrzutu IV (57,7°C), a najwyższa w zrzutach I i II (75,1°C). W sześciu przypadkach (prócz III), temperatura wody po 9 godzinach stygnięcia zbiornika, spadła do wartości od 30,1 do 33,5°C, mimo różnicy temperatury początkowej dla poszczególnych zrzutów dochodzącej do 17,4°C. W przypadku zrzutu III, temperatura wody w górnej warstwie spadła do 23,8°C. Analizując wielkość spadku temperatury wody gorącej po 9 godzinach, można zaobserwować, że dynamika stygnięcia wody w zbiorniku jest większa dla wyższej temperatury początkowej, mniejszej objętości zrzutu, niższej temperatury otoczenia i większej prędkości powietrza chłodzącego zbiornik.

8.2.2. Pomiar stężeń zawiesiny

Do pomiaru stężeń zawiesiny zastosowano metodę wagową. W trakcie cyklu pomiarowego pobierano próbki zawiesiny o objętości 25 cm³, z siedmiu przewodów rozmieszczonych na wysokości 2, 22, 42, 52, 72, 92 i 112 cm nad dolną krawędzią walca zbiornika. Pierwsze próbki pobierano bezpośrednio po zakończeniu zrzutu zanieczyszczeń, a następne po 15, 30, 60, 120 i 240 minutach od pobrania pierwszych próbek. W ten sposób w jednym cyklu pomiarowym otrzymywano w sumie 42 próbki zawiesiny. Próbki te następnie odsączano z wody za pomocą sączków laboratoryjnych, których masę w stanie suchym oznaczono wcześniej. Sączki laboratoryjne wraz ze znajdującymi się na nich zanieczyszczeniami wazono w stanie suchym. Na fotografii 8.1. pokazano sączki z jednego cyklu pomiarowego, po odsączeniu próbek zawiesiny i wysuszeniu.

Wykres 8.6. obrazuje błędy pomiarów stężeń przy zastosowaniu metody wagowej.



Fotografia 8.1. Sączi z zatrzymanymi zanieczyszczeniami – zrzut VII

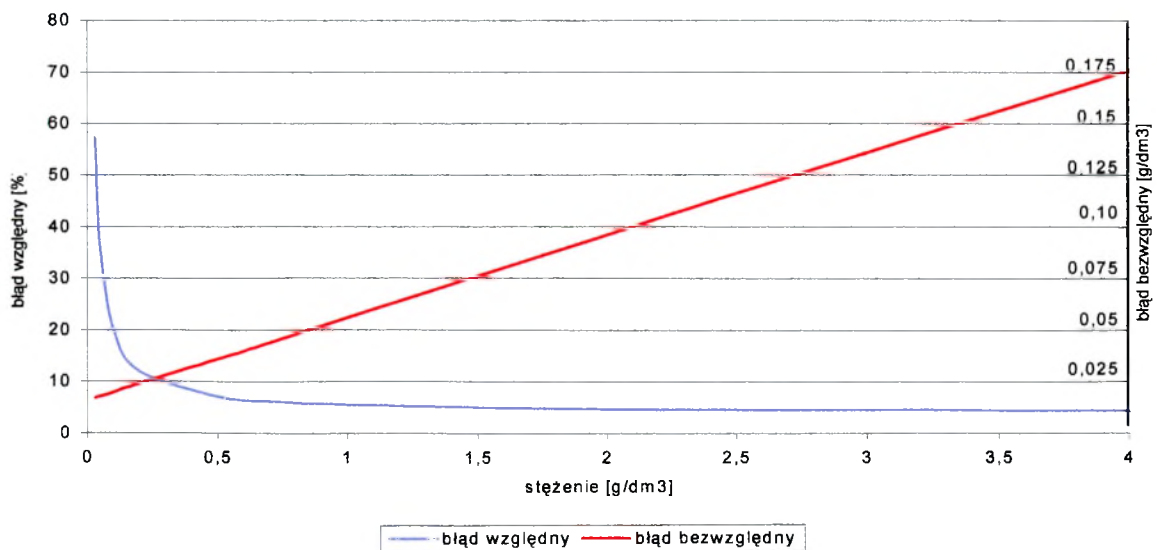
Stężenia zawiesiny w pobranych próbkach obliczono z zależności:

$$C_z = \frac{(m_z - m_c)}{0,025} \quad [\text{g/dm}^3] \quad (8.2)$$

m_z - masa sącza z zanieczyszczeniami [g]

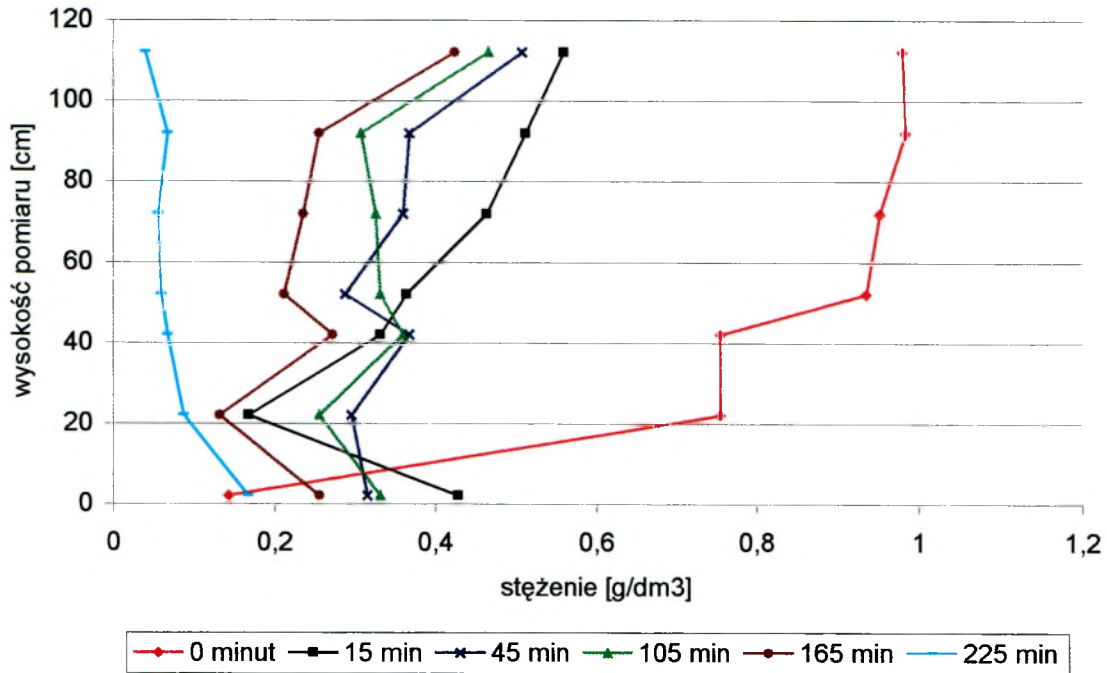
m_c - masa sącza czystego [g]

0,025 - objętość próbki [dm^3]

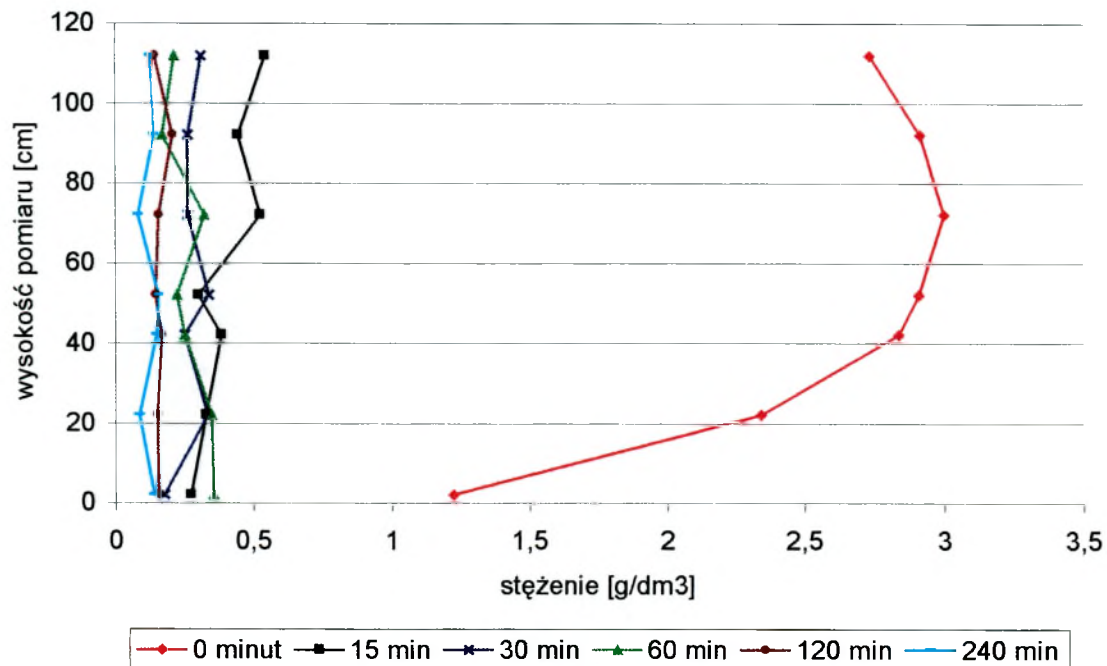


Wykres 8.6. Błędy pomiaru stężeń zawiesiny

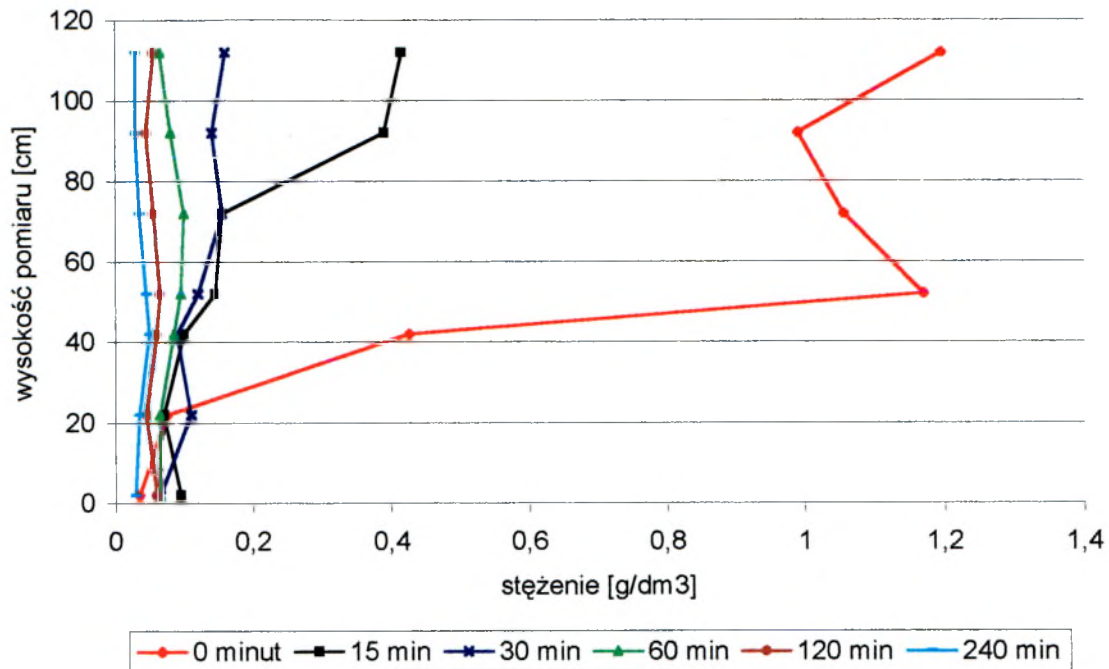
Rozkład stężeń zawiesiny w przekroju pionowym zbiornika, przedstawiono za pomocą wykresów dla wybranych czterech cykli pomiarowych. W pozostałych trzech przypadkach rozkłady stężeń wyglądały podobnie.



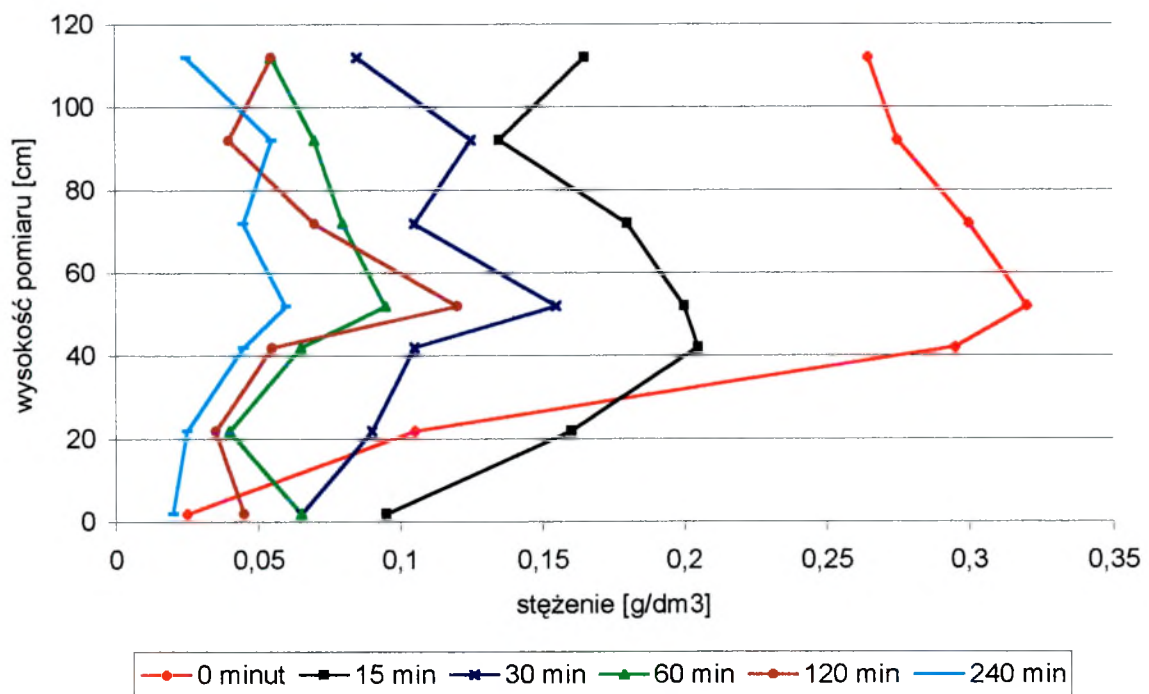
Wykres 8.7. Stężenia zawiesiny w zbiorniku pomiarowym (zrzut I)



Wykres 8.8. Stężenia zawiesiny w zbiorniku pomiarowym (zrzut IV)



Wykres 8.9. Stężenia zawiesiny w zbiorniku pomiarowym (zrzut z V)



Wykres 8.10. Stężenia zawiesiny w zbiorniku pomiarowym (zrzut VI)

Wykresy od 8.7. do 8.10. przedstawiają wyniki pomiarów, obrazujące zmieniający się z upływem czasu rozkład stężeń zawiesiny na różnych wysokościach od dna zbiornika, w warunkach stratyfikacji pola temperatury. Analizując wykresy można zaobserwować, że

stężenie zanieczyszczeń w zbiorniku gwałtownie spadło w ciągu pierwszych 15 minut, a z upływem czasu zmniejszało się znacznie wolniej.

W celu zobrazowania dynamiki zmiany stężeń, wykonano wykres 8.11., który pozwala porównać, po jakim czasie od chwili τ_0 zsedymetowała określona część zanieczyszczeń, w każdy z siedmiu cykli pomiarowych. Przebieg poszczególnych funkcji wyznaczono w sposób dyskretny, posługując się następującą zależnością:

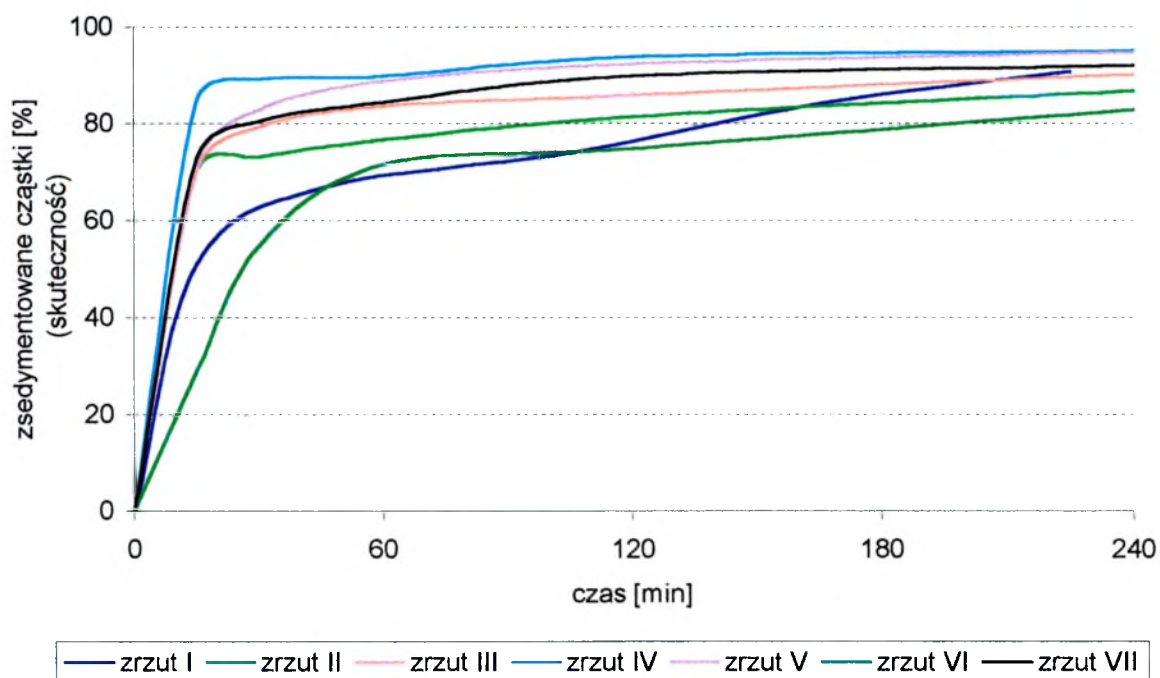
$$\eta_{\tau} = \frac{m_{\tau_0} - m_{\tau}}{m_{\tau_0}} \cdot 100\%, \quad (8.3)$$

gdzie:

η_{τ} - udział cząstek, które opadły na dno zbiornika do chwili τ [%];

m_{τ_0} - masa zanieczyszczeń w zbiorniku w chwili początkowej, wyznaczona metodą stężeniową [g] (patrz podrozdział 8.2.3.);

m_{τ} - masa zanieczyszczeń w zbiorniku w chwili τ , wyznaczona metodą stężeniową [g].



Wykres 8.11. Porównanie przebiegu opadania zanieczyszczeń

Na wykresie 8.11. zobrazowano przebieg dynamiki opadania zanieczyszczeń w zbiorniku (zmiany sprawności) dla poszczególnych zrzutów, natomiast szczegółowe dane znajdują się w tabeli 8.3.

Tabela 8.3. Zestawienie zmierzonych sprawności osadnika

Zrzut nr	Sprawność			
	po 15 minutach	po 60 minutach	po 120 minutach	po 240 minutach
I	51,0 %	66,8 % ^{*)}	74,0 % ^{**)}	90,8 % ^{***)}
II	70,2 %	76,7 %	81,5 %	86,8 %
III	70,2 %	83,7 %	85,9 %	90,2 %
IV	84,6 %	89,9 %	93,8 %	95,2 %
V	71,4 %	88,9 %	92,3 %	94,8 %
VI	28,9 %	71,7 %	75,0 %	82,9 %
VII	72,6 %	84,5 %	89,9 %	92,1 %

^{*)} po 45 minutach

^{**)} po 105 minutach

^{***)} po 225 minutach

Dla pięciu przypadków, w pierwszych 15 minutach na dno zbiornika opadło 70,2% i więcej zanieczyszczeń (prócz zrzutów I i VI). Następnie dynamika opadania zawiesiny malała tak, iż w przeciągu 2 godzin (od 120 do 240 zsedymetowało tylko kilka procent zanieczyszczeń (wyjątek stanowi zrzut I). Ostatecznie we wszystkich przypadkach po 4 godzinach skuteczność wyniosła ponad od 82,9% (VI), dochodząc do ponad 95% (IV).

Powyższe porównania należy traktować orientacyjnie z uwagi na fakt, że za każdym razem był inny skład frakcyjny zrzucanych zanieczyszczeń (patrz podrozdział 8.2.4.). Jednakże te obserwacje świadczą o wysokiej skuteczności odseparowywania cząstek stałych w zbiorniku sedymentacyjnym.

8.2.3. Określenie masy zanieczyszczeń w zbiorniku pomiarowym

Masę zanieczyszczeń zrzucanych do zbiornika określano dwiema metodami:

- 1) wagową – polegającą na zważeniu zanieczyszczeń osadzonych na dnie zbiornika i dodaniu do nich masy zanieczyszczeń pobranych w 42 próbkach; jest to metoda dokładna (błąd bezwzględny wynosi 0,43 g; maksymalny błąd względny występuje w przypadku zrzutu VI i wynosi 3,02 %);
- 2) stężeniową – w której masę zanieczyszczeń zrzucanych do zbiornika oblicza się w oparciu o stężenia zawiesiny zmierzone w chwili t_0 ; jest to metoda przybliżona (na błędy wynikające z pomiaru stężeń zawiesiny, nakłada się błąd wynikający z przyjęcia zmierzonego stężenia jako reprezentatywnego dla tej objętości zawiesiny w zbiorniku, która znajduje się w pobliżu jednego z siedmiu punktów poboru prób).

Tabela 8.4. Porównanie wyników metody wagowej i stężeniowej oraz wyznaczenie średniego stężenia zawiesiny

Nr zrzutu	Masa zanieczyszczeń [g]		Różnica: $(\frac{m.stęż. - m.wag.}{m.wag.})100\%$	Objętość zrzuconej zawiesiny [dm ³]	Średnie stęż. zawiesiny [g/dm ³]
	Metoda wagowa	Metoda stężeniowa			
I	67,92	64,42	- 5,2 %	60	1,132
II	91,83	108,25	17,9 %	40	2,226
III	165,19	166,95	1,1 %	60	2,783
IV	207,60	207,65	0,02 %	55	3,774
V	51,50	56,17	9,1 %	48	1,126
VI	21,23	18,39	-13,4 %	58	0,366
VII	67,96	61,97	- 8,8 %	50	1,359

Zamieszczone w tabeli 8.4. porównanie wyników dwóch metod, daje możliwość wyeliminowania błędów grubych w czasie pomiarów stężeń. Jeżeli wynik otrzymany metodą stężeniową odbiega znacznie od wielkości z metody wagowej, oznacza to iż pomiary stężeń zostały przeprowadzone w sposób nieprawidłowy.

Z danych zawartych w tabeli wynika, iż największa różnica pomiędzy wynikami metody wagowej oraz stężeniowej wystąpiła w przypadku zrzutu II i wyniosła 17,9 %. Jest to wielkość, którą można uznać za dopuszczalną. Wobec tego wszystkie wyniki pomiarów stężeń uznano za poprawne.

Średnie stężenia zawiesiny w chwili τ_0 (masa zanieczyszczeń w chwili τ_0 /objętość zrzutu), wahały się od 0,366 g/dm³ w przypadku zrzutu VI, do 3,774 g/dm³ dla zrzutu IV. Należy zwrócić uwagę, że w zrzutach II, III i IV, stężenia są relatywnie wyższe, niż w późniejszych zrzutach. Może to wynikać z faktu, że pierwsze cztery pomiary zostały przeprowadzone przed zmianą rodzaju włókniny filtracyjnej. W połowie roku 1997, ze względu na niską wytrzymałość mechaniczną, zdecydowano się zastąpić dotychczas używaną włókninę, materiałem IPP 1444. Następne zrzuty zostały przeprowadzone, gdy filtr pracował na tej właśnie włókninie.

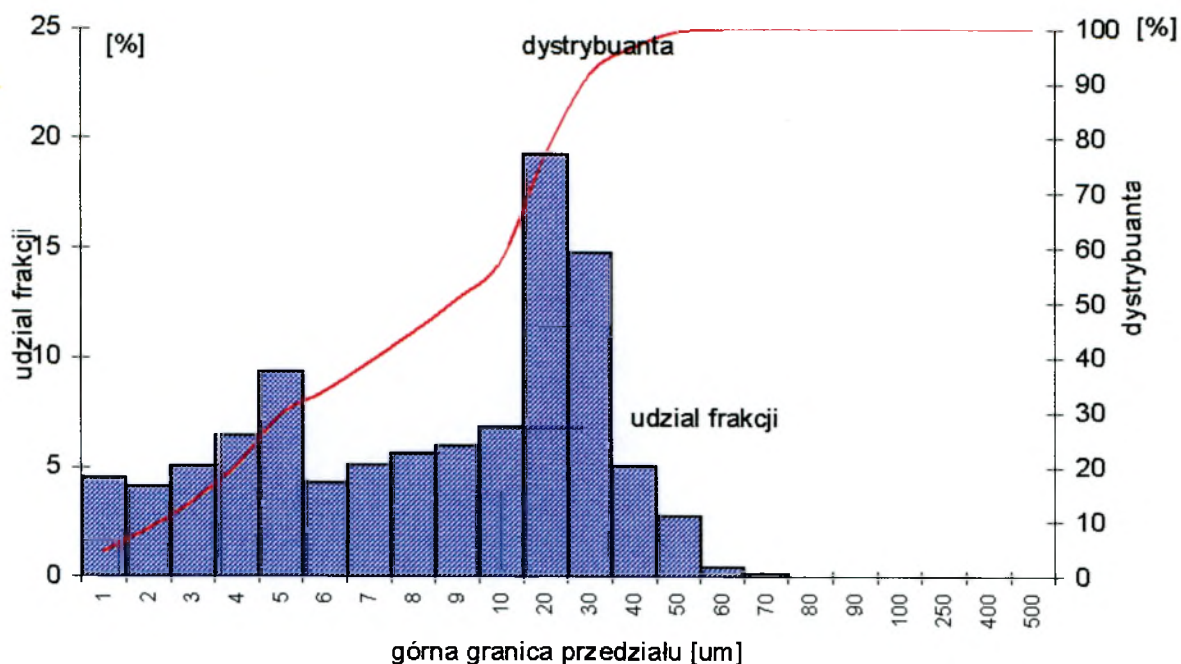
8.2.4. Analiza frakcyjna zanieczyszczeń

W trakcie cyklu pomiarowego pobierano próbkę zawiesiny o objętości około 100 cm³, w celu wykonania analizy frakcyjnej zatrzymanych zanieczyszczeń.

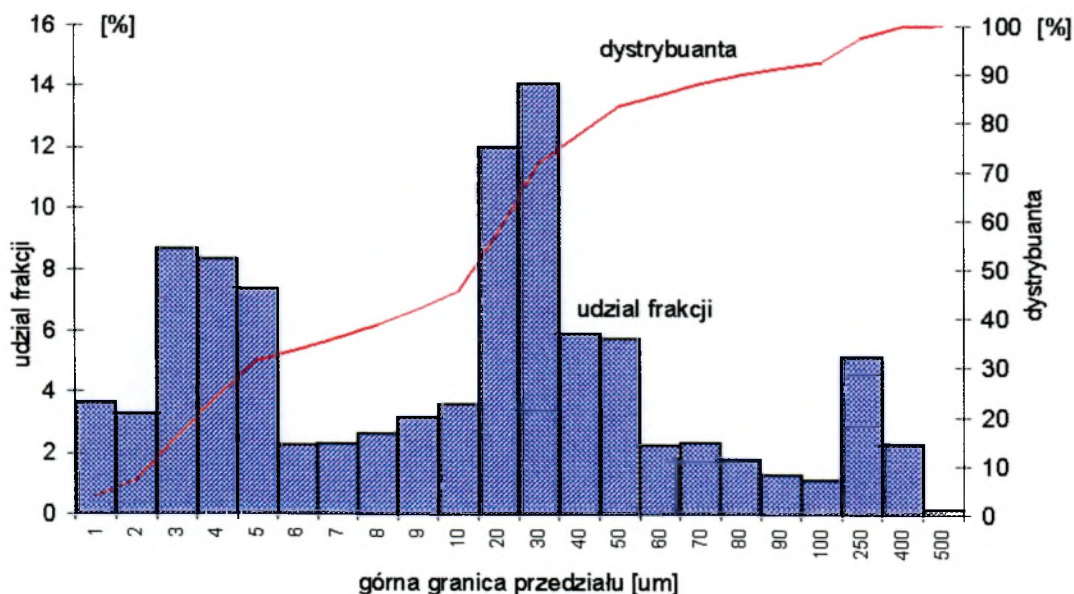
Analizę frakcyjną wykonywano w Zakładzie Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Państwowego Instytutu Geologicznego. Korzystano z licznika cząstek

"Laser-Particle-Sizer" firmy FRITSCH (RFN), który mierzy cząstki w zakresie średnic od 0,1 μm do 1250 μm , w 400 klasach wymiarowych [55]. Przed pomiarem każda próbka była poddawana mieszaniu za pomocą ultradźwięków i mieszadła mechanicznego.

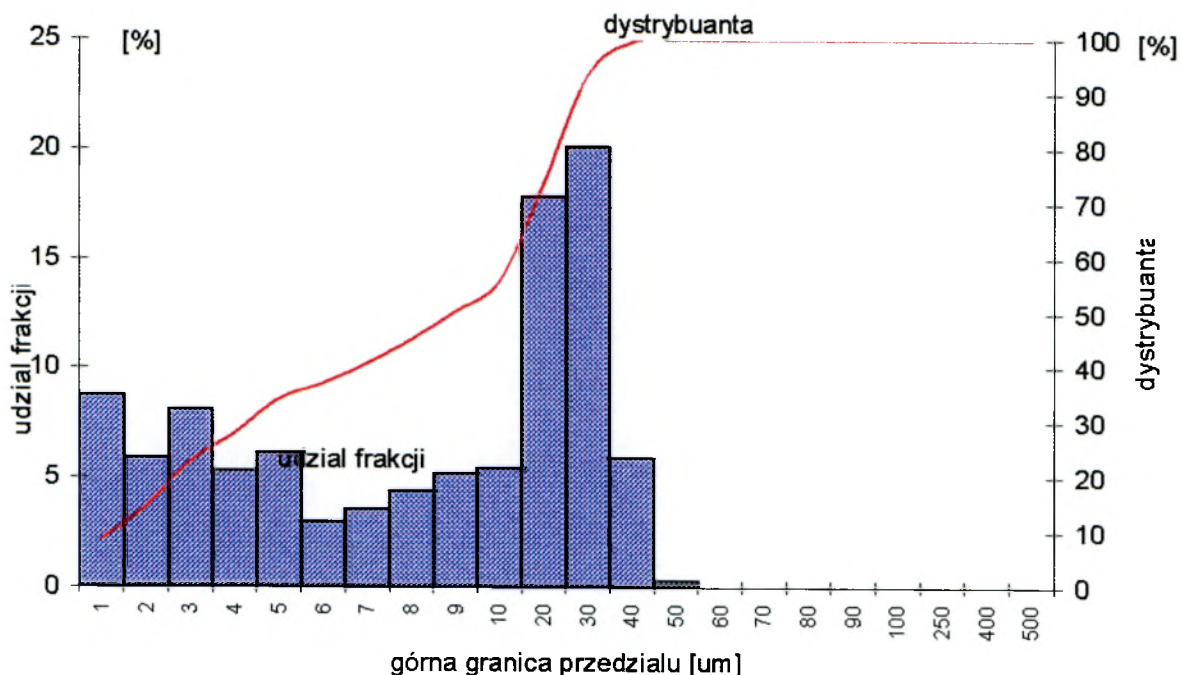
Wyniki pomiarów otrzymano w postaci udziałów procentowych zanieczyszczeń o określonych średnicach zastępczych, dla których wykonano także histogramy i wyznaczono dystrybuantę rozkładu (wykresy od 8.12. do 8.15.).



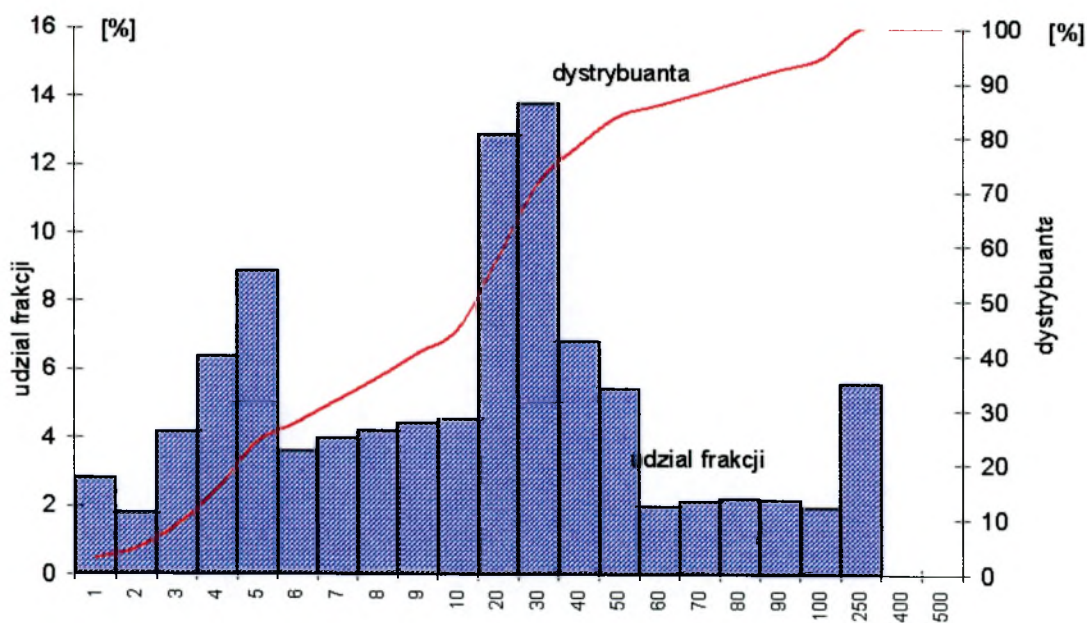
Wykres 8.12. Udział ziaren różnych frakcji w zawieszynie (zrzut I)



Wykres 8.13. Udział ziaren różnych frakcji w zawieszynie (zrzut III)



Wykres 8.14. Udziel ziaren r3nych frakcji w zawieszinie (zrzut VI)



Wykres 8.15. Udziel ziaren r3nych frakcji w zawieszinie (zrzut VII)

Por3wnanie przedstawionych rozklad3w frakcyjnych pozwala stwierdzić, że we wszystkich przypadkach występuje duży udziel dla ziaren o średnicach zastępczych 20 – 30 µm. oraz ziaren o średnicach zastępczych w zakresie 2 – 5 µm. W przypadku pomiaru III, występuje znacząca zawartość frakcji grubej, natomiast w zrzutach I i VI – frakcja gruba nie występuje.

W tabeli 8.5. zestawiono udział procentowy frakcji grubej (powyżej 100 μm), średniej (10 – 100 μm) i drobnej (< 10 μm).

Tabela 8.5. Zestawienie udziału cząstek różnych grup frakcyjnych

Nr zrzutu	Udział frakcji [%]			Razem
	drobnej	średniej	grubej	
I	57,50	42,50	0,00	100%
III	45,56	46,73	7,71	100%
VI	55,86	44,14	0,00	100%
VII	44,93	49,49	5,58	100%

Można zauważyć, że we wszystkich przypadkach udział zanieczyszczeń frakcji drobnej i średniej stanowi blisko 100% całości zanieczyszczeń, przy czym udziały wahają się w zakresie 40-60%. Natomiast frakcja gruba występuje jedynie w przypadku zrzutów III i VII, lecz nie przekracza 8% masy zanieczyszczeń.

8.2.5. Analiza chemiczna zanieczyszczeń

Analizę fizykochemiczną zanieczyszczeń dla pobranych próbek wykonano w Instytucie Systemów Inżynierii Środowiska w Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. W zakres analizy chemicznej wchodziło określenie składu chemicznego osadu. Oznaczono zawartości żelaza, magnezu, wapnia i manganu. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 8.7.

Tabela 8.7. Skład chemiczny zanieczyszczeń

Nr zrzutu	Zawartość związków [%]					Razem
	żelaza	magnezu	wapnia	manganu	inne	
I	97,49	0,09	0,37	0,42	1,63	100%
II	93,68	0,13	0,43	0,44	5,32	100%
III	95,79	0,14	0,34	0,25	3,48	100%
IV	98,12	0,24	0,26	0,64	0,74	100%
VI	79,56	4,51	13,80	1,18	0,95	100%
VII	77,68	4,20	11,35	1,06	5,71	100%

Analiza chemiczna zanieczyszczeń zatrzymanych na filtrze włókninowym, a następnie odseparowanych w osadniku, została przeprowadzona na próbek pobranych w sześciu różnych zrzutach. W pierwszych czterech przypadkach (próbki pobierane od

grudnia 1996 do maja 1997) wykazała bardzo dużą zawartość związków żelaza: od 93,68% (II) do 98,12% (IV) masy zanieczyszczeń. Związki magnezu, wapnia i manganu stanowiły każdorazowo około 1% całości. Reszta zanieczyszczeń – to inne, nie badane substancje (w tym krzemionka). Analiza zanieczyszczeń pobranych w marcu 1999 r. w dwóch ostatnich zrzutach (VI i VII), wykazała nieco inny ich skład chemiczny. Zawartość żelaza jest wysoka, lecz niższa niż w pozostałych przypadkach i wynosi około 80%. Spadek zawartości związków żelaza i wzrost udziałów soli wapnia, magnezu i manganu (łącznie o kilkanaście procent), może świadczyć o tym, że w ciągu dwóch lat usunięto znaczną część zanieczyszczeń będących wynikiem procesów korozji przewodów, a nowe zanieczyszczenia w sieci pochodzą głównie z wody uzupełniającej nieuzdatnionej, zawierającej znaczne ilości związków Ca, Mg i Mn. Natomiast niska zawartość krzemionki w masie zanieczyszczeń świadczy o tym, że sieć ciepłownicza, która zasila teren główny Politechniki Warszawskiej, jest zabezpieczona przed przedostawaniem się do niej zanieczyszczeń zewnętrznych.

Wyniki analizy chemicznej zanieczyszczeń zatrzymanych w stacji oczyszczania wody sieciowej, posłużyły do wyznaczenia średniej gęstości ziaren opadających w zbiorniku sedymentacyjnym. Założono, że związki żelaza płynące w wodzie sieciowej, to magnetyt Fe_3O_4 oraz hematyt Fe_2O_3 , natomiast magnez, mangan i wapń występują w postaci węglanów i siarczanów. Posiłkując się danymi zawartymi w poradniku chemicznym [64], określono gęstości poszczególnych związków wchodzących w skład zanieczyszczeń (tabela 8.8.).

Tabela 8.8. Gęstości związków chemicznych wchodzących w skład zanieczyszczeń wody sieciowej

<i>Związek chemiczny</i>	<i>Gęstość [g/cm³]</i>	<i>Związek chemiczny</i>	<i>Gęstość [g/cm³]</i>
Hematyt Fe_2O_3	5,12	Siarczan manganawy $MnSO_4$	3,235
Magnetyt Fe_3O_4	5,20	Węglan manganawy $MnCO_3$	3,125
Siarczan magnezu $MgSO_4$	2,66	Siarczan wapnia $CaSO_4$	2,96
Węglan magnezu $MgCO_3$	2,96	Węglan wapnia $CaCO_3$	2,93
		Krzemionka SiO_2	2,65

Następnie policzono średnią gęstość zanieczyszczeń wody sieciowej, przyjmując założenie, że „inne zanieczyszczenia” mają gęstość krzemionki. Uzyskano następujące gęstości zanieczyszczeń (tabela 8.9.):

Tabela 8.9. Gęstości zanieczyszczeń w poszczególnych zrzutach

<i>Nr zrzutu</i>	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>VI</i>	<i>VII</i>
<i>Gęstość [g/cm³]</i>	5,06	4,88	4,97	5,10	4,68	4,51

Uzyskane wyniki pomiarów i przeprowadzone badania, zostały wykorzystane do określenia warunków początkowych przy tworzeniu numerycznego modelu sedymentacji zanieczyszczeń w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury. Następnie zaś pozwoliły na weryfikację opracowanego modelu.

9. Porównanie wyników doświadczalnych i modelowych

Porównanie wyników doświadczalnych i modelowych, przeprowadzono w dwóch etapach. Pierwszy dotyczył weryfikacji części termicznej modelu i obejmował porównanie zmian pola temperatury wody w zbiorniku, obliczonych za pomocą modelu opartego na metodzie bilansów elementarnych.

W drugim etapie porównania wyników doświadczalnych i obliczeniowych, dokonano sprawdzenia poprawności modelu pod względem wyliczania zmiennej w czasie sprawności odseparowywania zanieczyszczeń od wody.

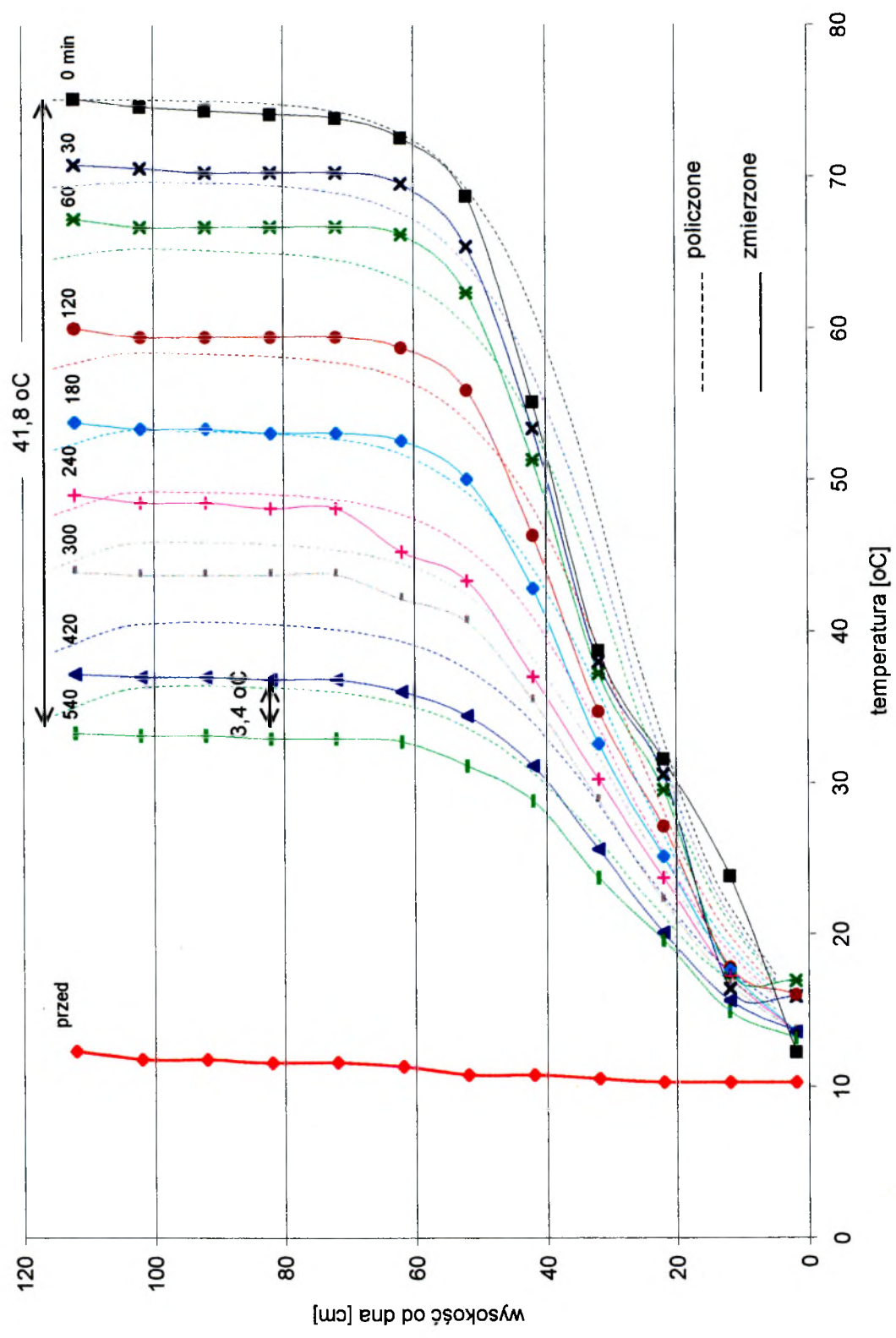
9.1. Porównanie zmierzonych i policzonych rozkładów temperatur w zbiorniku

Porównanie wielkości temperatury zmierzonych i modelowanych, wykonano dla siedmiu przypadków zrzutów nieizotermicznych. Jako dane wejściowe do programu liczącego zmiany temperatury wody w zbiorniku, przyjęto wartości podane w tabeli 9.1.

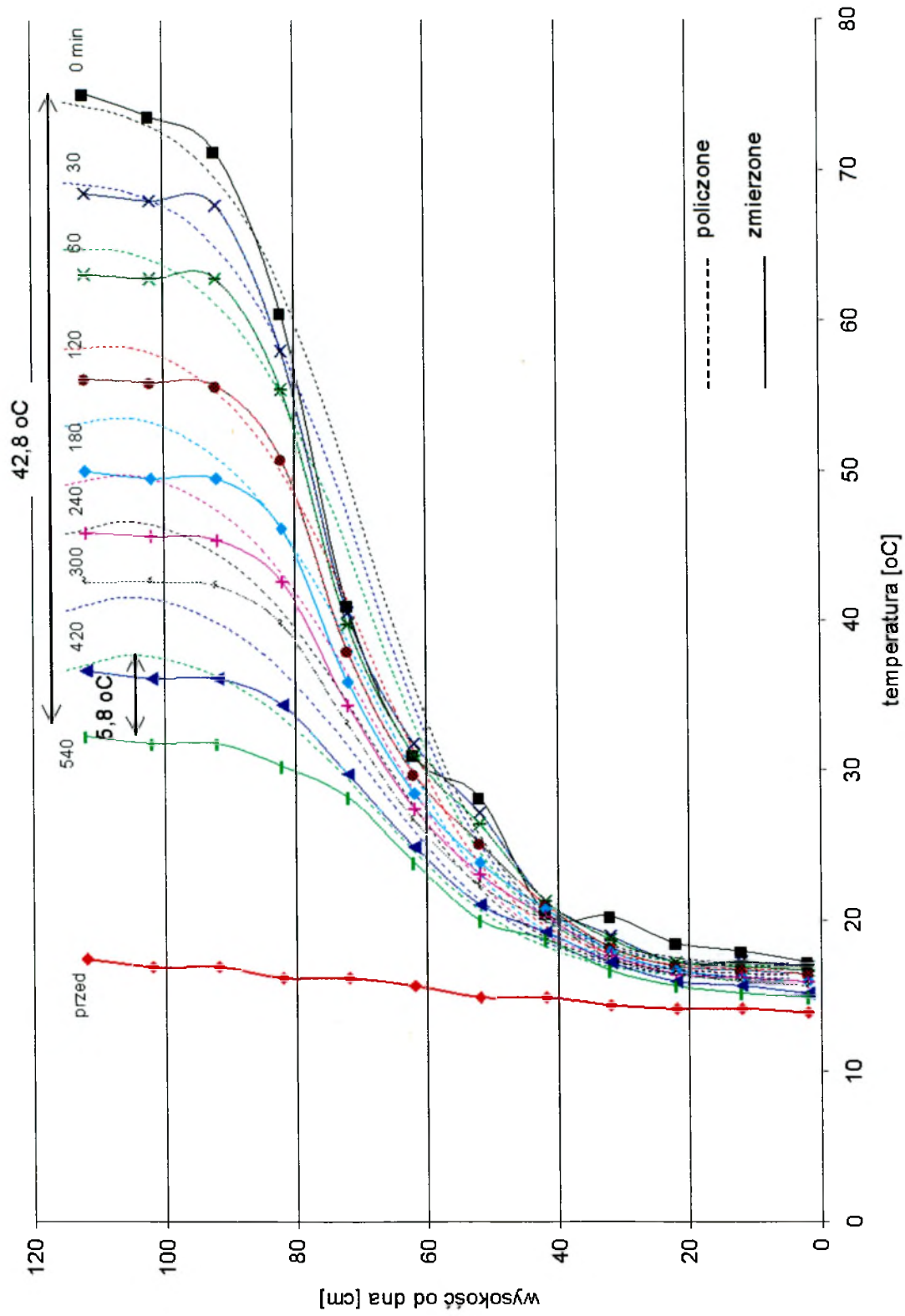
Tabela 9.1. Porównanie warunków stygnięcia wody w zbiorniku pomiarowym

Zrzut nr	Objętość zrzutu	Temp. wody zrucanej	Temperatura wody w zbiorniku	Warunki zewnętrzne	
				temperatura powietrza	prędkość powietrza
I	60 dm ³	75,1 °C	12 °C	11 °C	0,6 m/s
II	40 dm ³	75,1 °C	17 °C	15 °C	0,6 m/s
III	60 dm ³	65,9 °C	14 °C	13 °C	0,7 m/s
IV	55 dm ³	57,7 °C	22 °C	19 °C	0,5 m/s
VII	48 dm ³	62,3 °C	21 °C	20 °C	0,7 m/s
VIII	58 dm ³	72,5 °C	15 °C	15 °C	0,4 m/s
IX	50 dm ³	63,1 °C	19 °C	18 °C	0,3 m/s

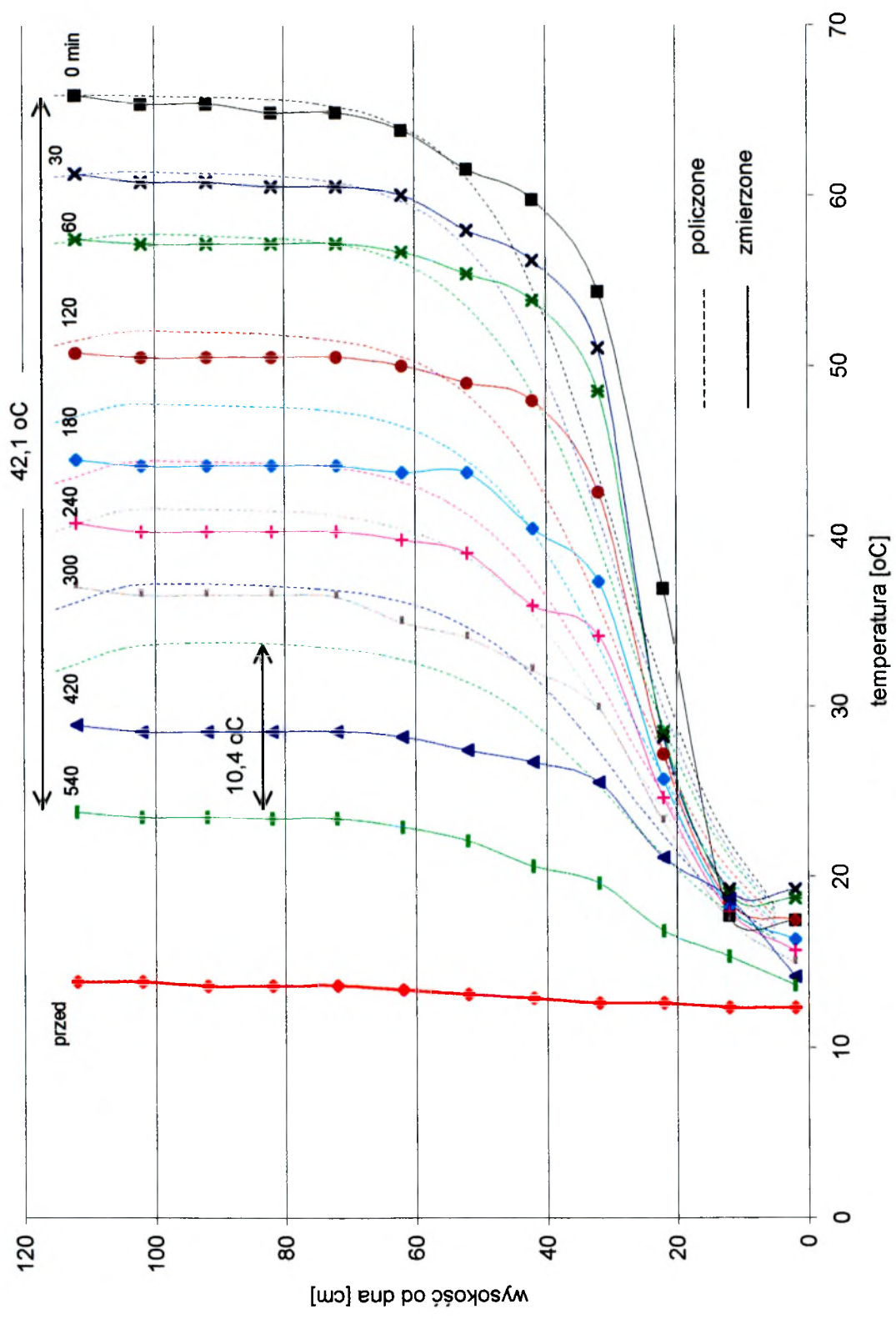
Na wykresy (od 9.1. do 9.4.) przedstawiające zmierzone wartości temperatur w czterech wybranych cyklach pomiarowych, naniesiono dodatkowo wyniki wyliczone za pomocą modelu numerycznego. Na rysunkach zaznaczono maksymalną różnicę pomiędzy wartościami zmierzonymi i modelowanymi, dla strefy wody gorącej (ta warstwa stygnie najszybciej).



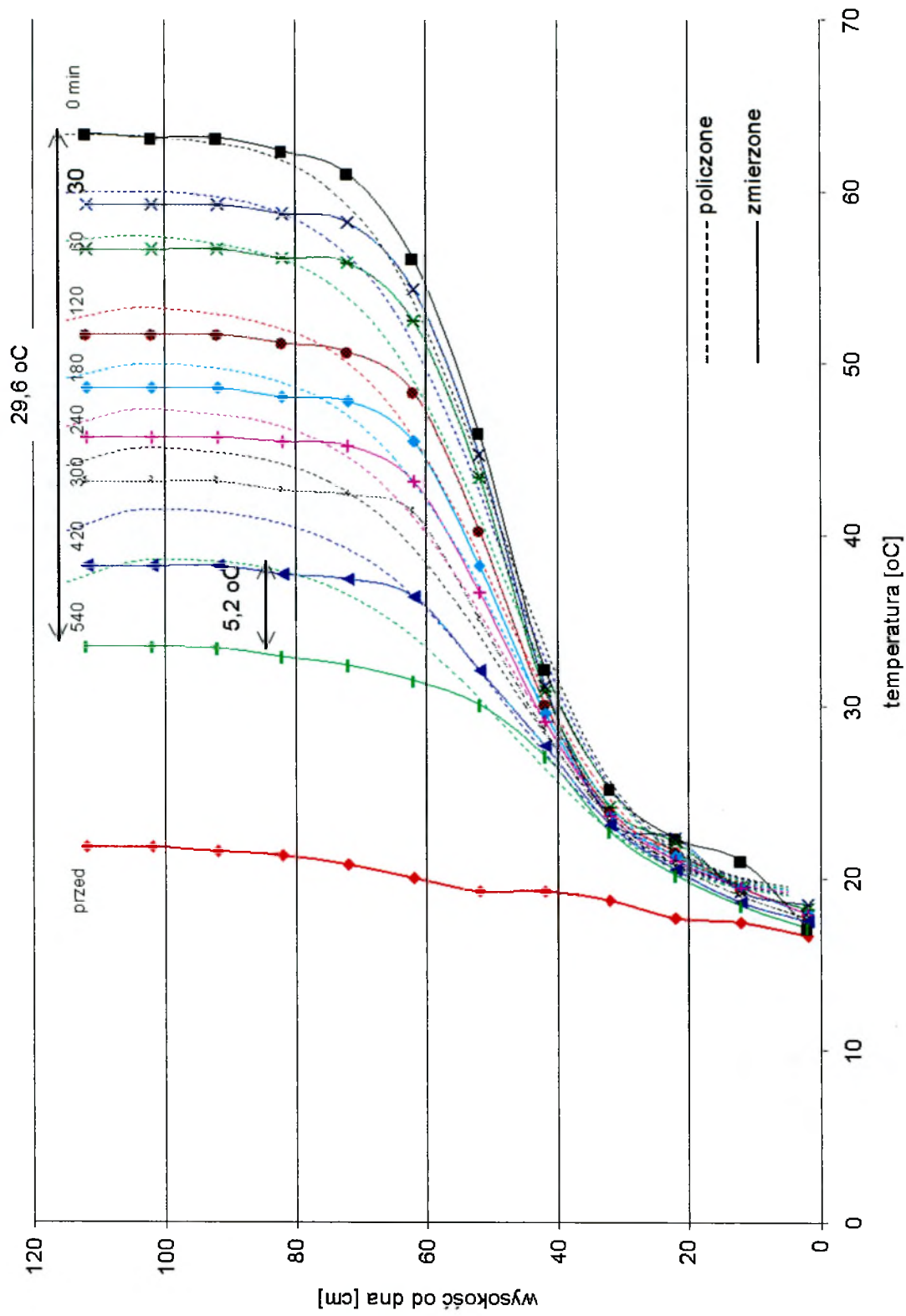
Wykres 9.1. Porównanie wartości temperatur wody w zbiorniku: zmierzonych i modelowanych (zrzut I)



Wykres 9.2 Porównanie wartości temperatur wody w zbiorniku: zmierzonych i modelowanych (zrzut II)



Wykres 9.3. Porównanie wartości temperatur wody w zbiorniku: zmierzonych i modelowanych (zrzut III)



Wykres 9.4. Porównanie wartości temperatur wody w zbiorniku: zmierzonych i modelowanych (zrzut VII)

Na przedstawionych wyżej wykresach można zauważyć, iż dobra zgodność wyników modelowanych i obserwowanych, w strefie wody gorącej występuje w okresie do 2 godzin od rozpoczęcia procesu stygnięcia. Rozbieżności wynoszą maksymalnie 2 °C. Potem następuje coraz większe odchylenie od wyników pomiarowych. Dla pozostałych trzech cykli pomiarowych otrzymano podobne jakościowo wyniki. Porównanie wyników pomiarowych i obliczeniowych po 9 godzinach od zakończenia zrzutu, obrazuje tabela 9.2.

Tabela 9.2. Porównanie wyników pomiarowych i obliczeniowych stygnięcia wody w zbiorniku pomiarowym

Zrzut nr	Δt po 9 godzinach	maks. różnica po 9godz. pomiędzy temp. zmierzoną i policzoną w strefie wody gorącej	błąd obliczeń modelowych
I	41,8 °C	-3,4 °C	-8,13 %
II	42,8 °C	-5,8 °C	-13,55 %
III	42,1 °C	-10,4 °C	-24,70 %
IV	27,6 °C	-5,9 °C	-21,38 %
V	31,5 °C	-6,5 °C	-20,63 %
VI	39,8 °C	-6,9 °C	-17,34 %
VII	29,6 °C	-5,2 °C	-17,57 %

We wszystkich przypadkach wyniki obliczeń po 9 godzinach były niższe od wartości pomierzonych (błąd niedomiaru). Największe rozbieżności wystąpiły dla zrzutu III, gdzie po 9 godzinach, obliczona temperatura wody była niższa od wartości zmierzonej o 10,4°C. Przy ostygnięciu zbiornika o 42,1°C daje to błąd -24,7%. Najmniejszą różnicą wystąpiła w przypadku zrzutu I, w którym zbiornik wystygł o 41,8°C, a rozbieżność wyniosła -3,4°C (błąd -8,13%).

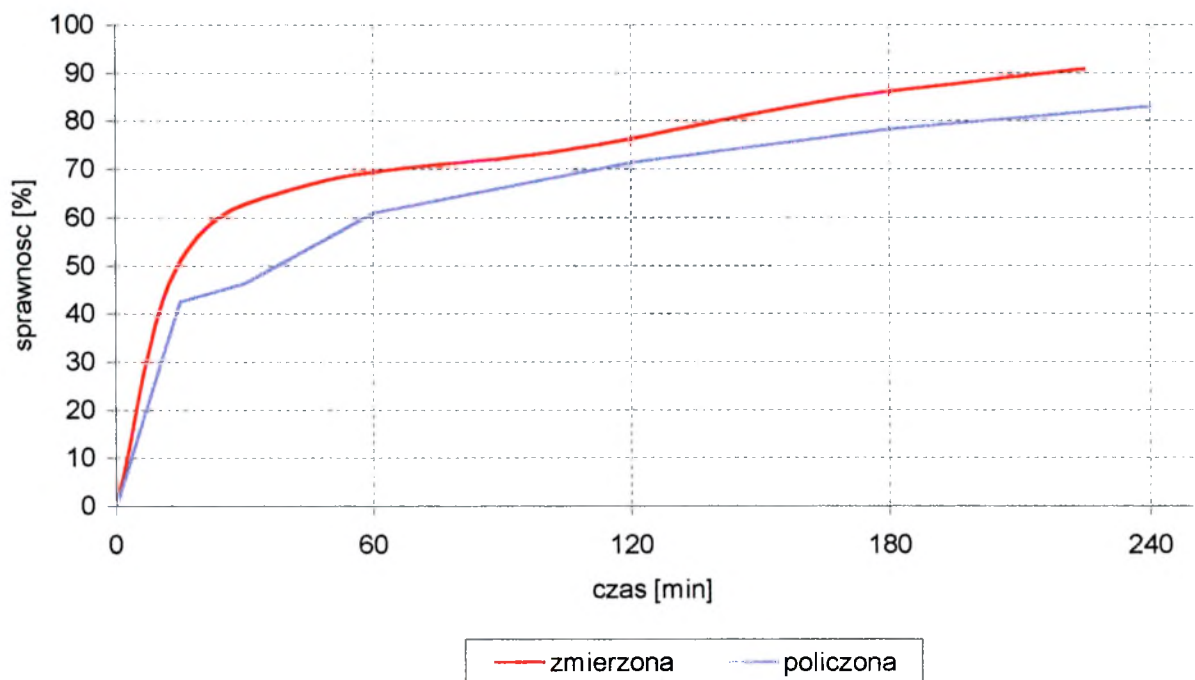
Zaobserwowane różnice pomiędzy pomiarami i obliczeniami zmian pola temperatury wody w zbiorniku, nie wpłyną znacząco na wyliczenia sprawności separacji, gdyż zdecydowana większość zanieczyszczeń opada na dno w ciągu pierwszych dwu godzin (patrz podrozdział 7.2.2.). W niewielkim stopniu zaważą też na dokładności wyliczeń, ponieważ model zakłada korygowanie gęstości i lepkości wody wraz ze zmianą temperatury – co 10°C.

9.2. Porównanie zmierzonych i modelowanych sprawności separacji

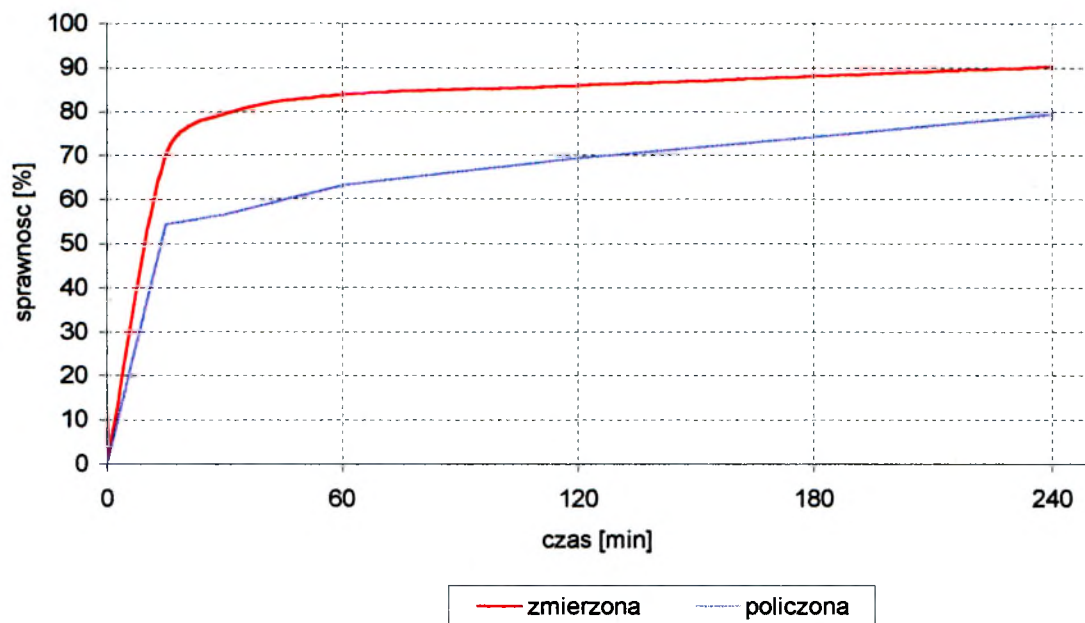
Porównanie zmierzonych i obliczonych sprawności odseparowania zanieczyszczeń od wody, zostało wykonane dla czterech przypadków, dla których przeprowadzono analizę frakcyjną zanieczyszczeń (zrzuty I, III i VI i VII). Dane wejściowe do modelu:

- dotyczące wymiany ciepła - zamieszczone są w tabeli 9.1.;
- gęstość zanieczyszczeń dla zrzutów - przyjęto wartości obliczone na podstawie analizy chemicznej zanieczyszczeń (tabela 8.9.);
- rozkład frakcyjny ziaren – na podstawie wyników analizy frakcyjnej (załączniki od 1 do 4).

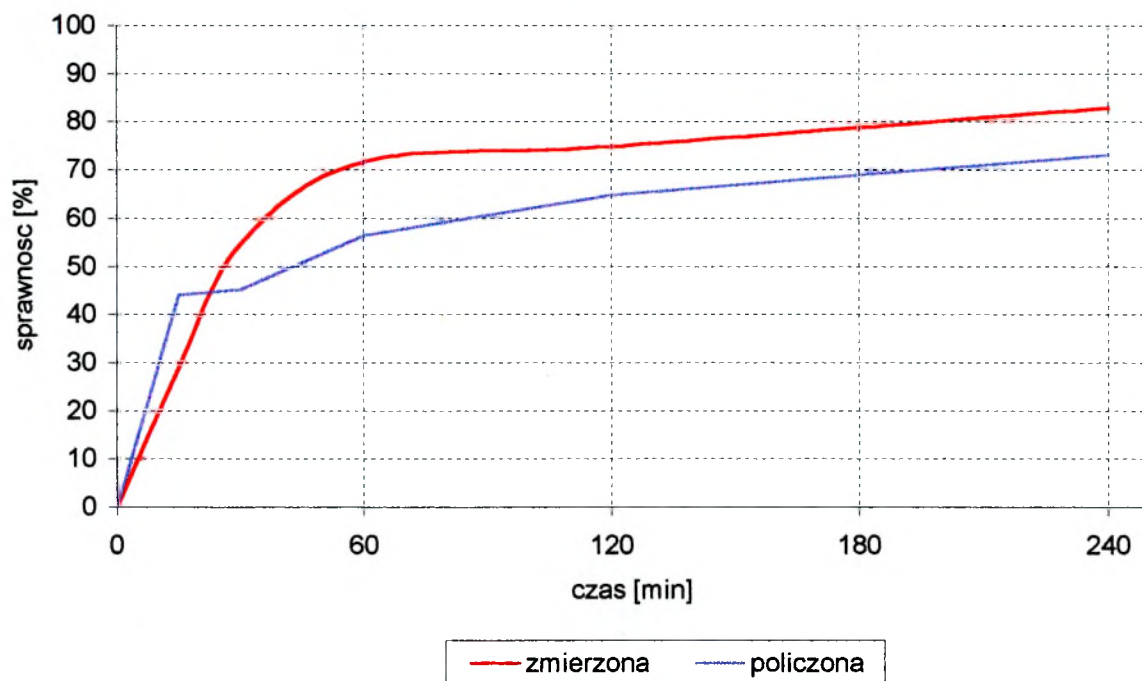
Wartości sprawności osadzania cząstek zanieczyszczeń, otrzymane w wyniku obliczeń numerycznych, porównano z wynikami pomiarów (wykresy od 9.5. do 9.8.).



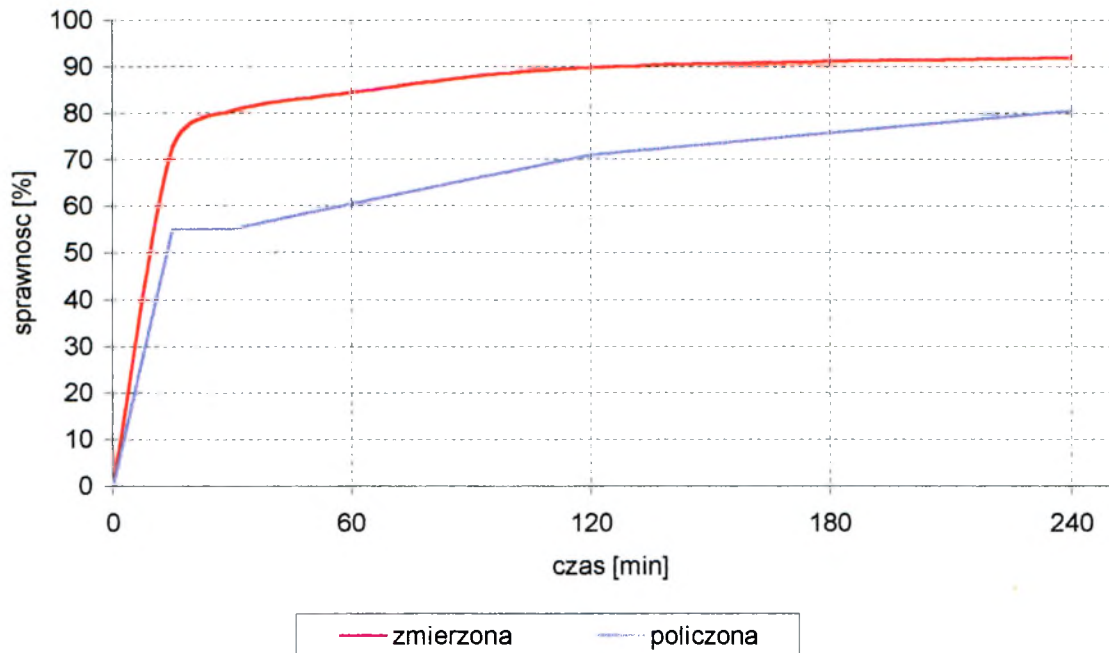
Wykres 9.5. Porównanie zmierzonych i policzonych sprawności osadnika (zrzut I)



Wykres 9.6. Porównanie zmierzonych i policzonych sprawności osadnika (zrzut III)



Wykres 9.7. Porównanie zmierzonych i policzonych sprawności osadnika (zrzut VI)



Wykres 9.8. Porównanie zmierzonych i policzonych sprawności osadnika (zrzut VII)

Analiza powyższych wykresów pozwala stwierdzić, iż wartości obliczeniowe sprawności osadnika różnią się od wielkości zmierzonych, a największe różnice występują w pierwszej godzinie procesu sedymentacji. Następnie odchylenie wartości modelowanych od wyników pomiarów zmniejsza się - po czterech godzinach różnica wynosi około 10%, przy czym w każdym przypadku wielkości obliczone są mniejsze od zmierzonych. Szczegółowe porównanie zamieszczono w tabeli 9.3.

Tabela 9.3. Zestawienie wartości zmierzonych i policzonych sprawności osadnika

Zrzut nr	Sprawność				Błąd obliczeń	
	po 60 minutach		po 240 minutach		po 240 minutach	
	zmierzona	policzona	zmierzona	policzona	bezwzględny (policz.-zmierz.)	względny $\left(\frac{\text{policz.}-\text{zmierz.}}{\text{zmierz.}}\right)$
I	69,8 % ^{*)}	60,9 % ^{*)}	90,8 % ^{**)}	83,0 % ^{**)}	- 7,8 % ^{**)}	- 8,59 % ^{**)}
III	83,7 %	63,1 %	90,2 %	79,3 %	- 10,9 %	- 12,08 %
VI	71,7 %	58,1 %	82,9 %	73,8 %	- 9,1 %	- 10,98 %
VII	84,5 %	62,6 %	92,1 %	83,4 %	- 8,7 %	- 9,45 %

^{*)} po 45 minutach

^{**)} po 225 minutach

We wszystkich przypadkach, niezależnie od rozkładu frakcyjnego zawiesiny oraz warunków zewnętrznych, obliczone skuteczności osadnika po 4 godzinach, były o około 10% niższe (7,8% - 10,9%), aniżeli wartości zmierzone. Natomiast wartości błędów względnych, zależnych od rzeczywistej skuteczności zbiornika, wahały się od -8,59% (zrzut I) do -12,08% (zrzut III).

Porównanie wyników pomiarów i obliczeń pozwala stwierdzić, że zaproponowany model w zadowalającym stopniu przybliża warunki rzeczywiste, przy czym każdorazowo po 4 godzinach, sprawność obliczona jest mniejsza o około 10% od sprawności zmierzonej.

Podstawowymi przyczynami występujących niezgodności obliczeń procesów sedymentacji w stosunku do badań fizykalnych, są przyjęte założenia upraszczające:

- całkowity brak mieszania wody gorącej i zimnej w trakcie zrzutu zanieczyszczeń,
- przyjęcie braku konwekcyjnej wymiany ciepła w ograniczonej przestrzeni wodnej zbiornika,
- niedokładności w wyznaczaniu rzeczywistej masy właściwej zawiesiny,
- przyjęcie dla wszystkich ziaren jednakowego współczynnika sferyczności $\phi = 0,85$,
- przyjęcie jako stanu rzeczywistego, składu frakcyjnego zawiesiny otrzymanego w wyniku analizy frakcyjnej.

Niedokładności metod wyznaczania rzeczywistego składu frakcyjnego zawiesiny, spowodowane są trudnościami w odtworzeniu stanu agregatywacji cząstek po uwolnieniu ich z materiału filtracyjnego za pomocą wibracji. Przyczyną tego jest rozbijanie części ziaren zawiesiny w skutek mieszania próbki (mieszadło mechaniczne i ultradźwięki), co wynika z metodyki wykonywania analizy frakcyjnej. Większy niż w rzeczywistości udział frakcji drobnej powoduje zaniżenie wyników modelowania sprawności osadnika.

10. Podsumowanie i wnioski

W ramach niniejszej pracy, wykonano badania procesów sedymentacji zawiesiny składającej się z zanieczyszczeń mechanicznych, występujących w wodzie systemów energetycznych, zachodzących w ograniczonej przestrzeni. Są to zjawiska nieizotermiczne, przebiegające w warunkach hydraulicznych występujących w stacjach z filtrami tkaninowo-włókninowymi, czyszczonymi metodami wibracyjnymi.

Poznanie tych procesów, dało możliwość stworzenia modelu numerycznego sedymentacji zanieczyszczeń w osadniku, w warunkach stratyfikacji pola temperatury. Pozwoli to na optymalne projektowanie i eksploatację rozpatrywanych stacji filtracyjnych, w sposób umożliwiający osiągnięcie największej ich skuteczności oraz minimalizację kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Ocenę skuteczności usuwania zanieczyszczeń w osadniku, przeprowadzono doświadczalnie, na stanowisku badawczym zlokalizowanym obok pracującej stacji. Warunki, jakie panowały podczas wykonywania pomiarów, były takie, jak podczas eksploatacji urządzenia.

W zakresie analizy teoretycznej przedstawiono:

- metody wyznaczania prędkości sedymentacji cząstek ciała stałego w cieczy,
- metody modelowania procesów wymiany ciepła, w zakresie obejmującym zjawiska zachodzące w osadniku,
- model numeryczny sedymentacji jednorodnej zawiesiny polidispersyjnej w warunkach silnej stratyfikacji pola temperatury, w części termicznej bazujący na metodzie bilansów elementarnych, natomiast do opisu opadania zanieczyszczeń zastosowano podstawowe wzór na wyznaczenie prędkości opadania ziaren w ruchu jednostajnym, zmodyfikowany dla ziaren o nieregularnych kształtach.

W zakresie badań eksperymentalnych przeprowadzono zrzutów zanieczyszczeń zatrzymanych na filtrze, do zbiornika pomiarowego. Dla każdego zrzutu wykonano cykl pomiarów, w skład którego wchodziło:

- pomiar zmian rozkładu temperatury wody w zbiorniku;
- określenie rozkładu stężeń zanieczyszczeń i wyznaczenie sprawności osadnika.

Ponadto dla części zrzutów wykonano badania chemiczne zanieczyszczeń oraz analizę frakcyjną zawiesiny. Dane te wykorzystano następnie do weryfikacji opracowanego modelu numerycznego.

W oparciu o wyniki badań oraz wykonane obliczenia, sformułowano wnioski dotyczące opadania zawiesin w zbiorniku sedymentacyjnym oraz dokładności wyników modelowych:

1. na podstawie eksperymentów wykazano wysoką skuteczność osadnika, w zakresie odseparowywania od wody zanieczyszczeń mechanicznych występujących w sieciach ciepłowniczych, co pozwala stwierdzić, iż rozwiązanie może być stosowane w praktyce;
2. wykazano zadowalającą dla celów technicznych zgodność pomiędzy wynikami pomiarów i wartościami obliczonymi za pomocą modelu numerycznego, co pozwala wykorzystywać model do celów projektowych:
 - w zakresie wymiany ciepła model, w ciągu pierwszych 2-3 godzin od momentu rozpoczęcia sedymentacji, wykazał zadowalającą zgodność z wynikami pomiarów; po tym okresie następuje rozbieżność pomiędzy pomiarami i obliczeniami, wynikająca z zastosowania uproszczonej metody obliczeń, nie uwzględniającej niektórych zjawisk (np. ruchów konwekcyjnych wody w górnej części zbiornika). Jest to przyczyną, w przypadku obliczeń, wolniejszego niż w rzeczywistości stygnięcia osadnika. Jednakże te różnice nie wpływają zasadniczo na przebieg sedymentacji;
 - porównanie wyników pomiarów i obliczeń sprawności osadnika pozwala stwierdzić, że zaproponowany model w zadowalającym stopniu przybliża warunki rzeczywiste: po 4 godzinach, sprawność obliczona jest mniejsza o około 10% od sprawności zmierzonej, przy czym z upływem kolejnych godzin rozbieżności maleją.

Autor pracy uważa, że dla pełnego opisu zjawisk zachodzących w rozpatrywanym procesie sedymentacji, w trakcie dalszych badań należy poznać przebieg zrzutu zanieczyszczeń z filtra do zbiornika, uwzględniając częściowe mieszanie wody gorącej i wody zimnej. Ponadto należy opracować taką metodykę poboru prób i wykonywania analizy frakcyjnej zawiesiny, która umożliwi odtworzenie rzeczywistego stanu agregatywacji cząstek po uwolnieniu ich za pomocą wibracji z materiału filtracyjnego.

SPIS LITERATURY

- [1] Adamski W.: *Modelowanie zmian jakości wód*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1996.
- [2] Bacciarelli J., Kuciński P.: *Badania eksploatacyjne odmulaczy*. OBRC SPEC, Warszawa 1979.
- [3] -Bacciarelli J., Sikora S.: *Metody oczyszczania wody sieciowej na przykładzie warszawskiego systemu ciepłowniczego. Materiały na seminarium podczas targów THERM '98*. WT FRC „Unia Ciepłownictwa”, Warszawa 1998.
- [4] Bandrowski J., Hehlmann J., Merta H., Ziolo J.: *Podział zawiesin ze względu na możliwość zagęszczania w osadnikach z wypełnieniem oraz analiza czynników wpływających na proces sedymentacji cienkowarstwowej*. Inż. i Ap. Chem. 3/1997 s. 3-7
- [5] Bandrowski J., Merta H., Ziolo J.: *Obliczanie powierzchni sedymentacji ciągłej na podstawie teoretycznej prędkości opadania*. Inż. i Ap. Chemiczna 4/1992, s. 25-29
- [6] Bandrowski J., Merta H., Ziolo J.: *Sedymencja zawiesin. Zasady i projektowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995.
- [7] Becker M.: *Heat Transfer. A Modern Approach*. Plenum Press, New York 1986.
- [8] Bernhardt C.: *Particle size analysis. Classification and sedimentation methods*. Chapman & Hall, London 1994.
- [9] Bobczyńska D.: *Filtr samoczyszczący do wody*. Polski Instalator 11-12/94, s. 52-53.
- [10] Bobrowicz M.: *Opracowanie końcowe...* BISTYP, Warszawa 1976.
- [11] Bochańska A.: *Badania konstrukcyjno-eksploatacyjne magnetoodmulaczy typu OISm*. OBR Ciepłownictwa przy SPEC, Warszawa 1995
- [12] Brodowicz J.: *Teoria wymienników ciepła i masy*. PWN, Warszawa 1982.
- [13] Charkowska A.: *Probablistyczna ocena numerycznej skuteczności filtracji aerozolu w materiałach mikrowłóknistych o słabo zdeterminowanej strukturze. Rozprawa doktorska*. Politechnika Warszawska, Warszawa 1997.
- [14] Chomicz D.: *Ciepłownictwo. Woda w ciepłownictwie i ogrzewnictwie*. Fundacja Rozwoju Ciepłownictwa „Unia Ciepłownictwa”, Warszawa 1995.
- [15] Ciborowski J.: *Podstawy Inżynierii Chemicznej*. WNT, Warszawa 1965.

- [16] CZAKI THERMO-PRODUCT: *Katalog firmowy 1996/1997*. Raszyn-Rybie, ul. 19 Kwietnia 58.
- [17] Dedelis W.: *Magnetoodmulacz OISm*. Polski Instalator 9/94, s. 25.
- [18] Diplas P., Papanicolaou A. N.: *Batch analysis of slurries in zone settling regime*. Journal of Env. Eng. 7/1997 s. 659-667
- [19] Doheim M. A., Abu-Ali M. H., Mabrouk S. A.: *Investigation and modelling of sedimentation of mixed particles*. Powder Technology 91 (1997) s. 43-47
- [20] Domański R., Jaworski M., Rebow M.: *Wymiana ciepła. Komputerowe wspomaganie obliczeń. Tablice właściwości termofizycznych*. OWPW, Warszawa 1996.
- [21] Domański R., Jaworski M., Rebow M.: *Wymiana ciepła. Termodynamika. Komputerowe bazy danych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.
- [22] Gargas J.: *Nowa generacja odmulaczy*. Polski Instalator 11-12/94, s. 4-5.
- [23] Gawroński R.: *Procesy oczyszczania cieczy*. Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1996.
- [24] Gdula S.J. (red.): *Przewodzenie ciepła*. PWN, Warszawa 1984
- [25] HECO International: *Filtry magnetyczno-workowe typu TPM*. Materiały reklamowe.
- [26] HECO International: *TP-Filtr workowy*. Materiały reklamowe.
- [27] Hollands K. G. T., Lightstone M. F.: *A review of low-flow, stratified-tank solar water heating systems*. Solar Energy 2/1989 s. 97-105
- [28] Kleinbach E. M., Beckman W. A., Klein S. A.: *Performance study of one-dimensional model for stratified thermal storage tanks*. Solar Energy 2/1993 s. 155-166
- [29] KLINGER Armaturen: *Filtry do gorącej wody typu AES i AES-F*. Materiały reklamowe.
- [30] Koch R., Noworyta A.: *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa 1996.
- [31] Kowal A., Świdorska-Bróz M.: *Oczyszczanie wody*. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1996
- [32] Kwapisz J.: *Oczyszczanie sieci ciepłej z zanieczyszczeń...* OBD SPEC, Warszawa 1971.
- [33] Kwapisz J.: *Odmulacze dla węzłów cieplnych*. COBRTI INSTAL, Warszawa 1981.

- [34] Lewis R., Morgan K., Thomas R., Seetharamu K.: *The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis*. John Willey & Sons, Chichester 1996.
- [35] Machej K.: *Ocena metod określania prędkości sedymentacji skrapowanej*. Inż. Chemiczna 4/1974 s. 641-652
- [36] Mańkowski S., Szadkowski W.: *Badania eksploatacyjne stacji oczyszczania wody sieciowej w przepompowni „Marymont”*. Raport. IOiW Politechnika Warszawska, Warszawa 1993.
- [37] Mańkowski S., Szadkowski W.: *Co płynie w wodzie sieciowej*. Polski Instalator 1/95, s. 30-36.
- [38] Mańkowski S., Szadkowski W.: *Zastosowanie wielostopniowej stacji do odmulania wody sieciowej*. Polski Instalator 9/94, s. 40-46.
- [39] Mavros P., Belessiotis V., Haralambopoulos D.: *Stratified energy storage vessels: characterization of performance and modeling of mixing behavior*. Solar Energy 4/1994 s. 327-336
- [40] Nelson J. E. B., Balakrishnan A. R., Srinivasa Murthy S.: *Transient Analysis of Energy Storage in a Thermally Stratified Water Tank*. Int. Journal of Energy Research 22/98 s. 867-883.
- [41] Nowosielski J.: *Opadanie cząstek w złożu fluidalnym ciecz-ciało stałe*. Inż. Chem. i Proc. 2/1996 s. 295-315
- [42] Orzechowski Z., Prywer J.: *Mechanika płynów w inżynierii środowiska. Przepływy dwufazowe*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1991.
- [43] P.W. PROMEX: *Filtry wody ciepłowniczej co i cwu, typ KKF*. Materiały reklamowe.
- [44] Pieńkowski K.: *Wymiana ciepła w płynach termicznie stratyfikowanych. Stratyfikacja stateczna*. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1982.
- [45] Recknagel, Sprenger, Hönnmann, Schranck: *Poradnik ogrzewanie i klimatyzacja*. EWFE, Gdańsk 1994.
- [46] Serwiński M.: *Zasady inżynierii chemicznej i procesowej*. WNT, Warszawa 1982.
- [47] Smith T. N.: *Differential settling of a binary mixture*. Powder Technology 92 (1997) s. 171-178
- [48] Socknick R.: *System filtrowania i odpowietrzania z płukaniem wstecznym instalacji c.o.* Polski Instalator 5/97, s. 46-47
- [49] Szadkowski W., Zawada B.: *Automatyzacja procesów filtracji wody sieciowej przy użyciu filtrów włókninowych czyszczonych metodami wibracyjnymi*. Uczelniane

Centrum Badawcze Energetyki i Inżynierii Środowiska, Zeszyt 2, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1998.

- [50] Szadkowski W.: *Badania skuteczności samooczyszczania się filtrów włókninowych w procesie filtracji wody sieciowej w obiegach energetycznych*. Polski Instalator 7-8/96, s. 75-78.
- [51] Szadkowski W.: *Odmulacze hydrocyklonowe w systemach ciepłowniczych. Rozprawa doktorska*. Politechnika Warszawska, Warszawa 1987.
- [52] Szadkowski W.: *Opracowanie nowoczesnych technologii oczyszczania wody sieciowej w systemach ciepłowniczych za pomocą samoczyszczących się filtrów włókninowych metodami wibracyjnymi*. Energia i utylizacja odpadów w ochronie środowiska - proprietyetowy program naukowo-badawczy. Zeszyt 1, PW Warszawa 1996
- [53] Szargut J. (red.): *Modelowanie numeryczne pól temperatury*. WN-T, Warszawa 1992.
- [54] Toczyłowska B., Wnuk M.: *Ocena skuteczności filtrów siatkowych*. Polski Instalator 6/97, s.48.
- [55] Toczyłowska B.: *Zastosowanie licznika cząstek do oceny jakości wody*. II Konferencja Naukowo - Techniczna „Uzdatnianie wód podziemnych - badania, projektowanie i eksploatacja”, Warszawa 24-25.06.1997.
- [56] van Berkel J.: *Mixing in thermally stratified energy stores*. Solar Energy 3-4/1996 s. 203-211
- [57] White F.: *Heat and Mass Transfer*. Addison-Wesley Publishing Company, New York 1988.
- [58] Wiśniewski S, Wiśniewski T.: *Wymiana ciepła*. WN-T, Warszawa 1994.
- [59] Wnuk M.: *Armatura instalacji wody pitnej*. Polski Instalator 3/97, s. 30.
- [60] Wójcik J.: *Prędkość sedymentacji w krystalizatorze fluidalnym*. Inż i Ap. Chem. 2-3/1990 s. 27-29
- [61] Wójcik J.: *Sedymentacja w krystalizatorze fluidalnym*. Inż. Chem. i Proc. 3/1995, s. 441-455
- [62] Żukowski M.: *Reduktor ciśnienia wody z filtrem*. Polski Instalator 6/96, s. 62.
- [63] *Racjonalizacja produkcji, przesyłu i użytkowania ciepła. Polsko- Duński Program Współpracy* – materiały na seminarium. KAPE, Warszawa Kopenhaga 1999
- [64] *Poradnik chemika analityka* (Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1994)

Załączniki

Załączniki zawierają karty wyników pomiarów składu frakcyjnego zanieczyszczeń zrzucanych z filtra do zbiornika sedymentacyjnego.

Wyniki analizy frakcyjnej posłużyły jako podstawowe dane wejściowe do obliczeń, weryfikujących poprawność wykonania modelu numerycznego.

Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej

1449	03-24-1997	09:47	FA.FRITSCH	UserID LAB/22	SerNo. SN3165
------	------------	-------	------------	---------------	---------------

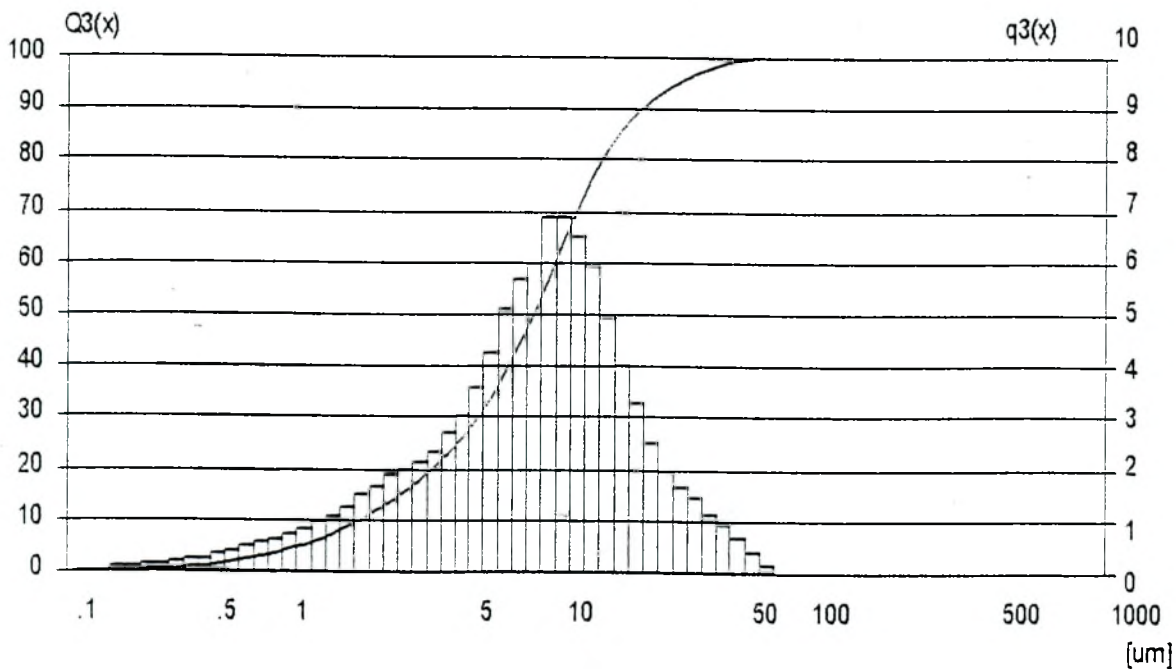
Politechnika – zawiesina 13.12.1996

Zakres pomiarowy	0.10 [μm] - 324.48 [μm]	Pompa	333 [rpm]
Rozdzielczość	62 Channels (9 mm / 123 mm)	Mieszad.	190 [rpm]
Absorpcja	12.00 [%]	Ultradz.	197
Długość pomiaru	20 [Scans]		

Modell Independant
Wybrany model Fraunhofer.

Intarpolation Values...				CIA22WIN\FRITSCH\SR_ZIARN.FPS							
4.51	%<	1.00	μm	9.63	%<	2.00	μm	13.70	%<	3.00	μm
20.16	%<	4.00	μm	29.54	%<	5.00	μm	33.83	%<	5.00	μm
38.93	%<	7.00	μm	44.63	%<	8.00	μm	50.64	%<	9.00	μm
57.50	%<	10.00	μm	76.78	%<	20.00	μm	91.56	%<	30.00	μm
96.62	%<	40.00	μm	99.42	%<	50.00	μm	99.85	%<	60.00	μm
100.00	%<	70.00	μm	100.00	%<	80.00	μm	100.00	%<	90.00	μm
*****	%<	100.00	μm	-----	%<	250.00	μm	-----	%<	400.00	μm
-----	%<	500.00	μm	-----	%<	750.00	μm	-----	%<	1000.00	μm
-----	%<	1250.00	μm	-----	%<	2000.00	μm	-----	%<	5000.00	μm
*****	%<	10000.00	μm								

Intarpolation Values...				CIA22WIN\FRITSCH\PROC_ZIA.FPV							
1.00	%<	0.42	μm	5.00	%<	1.17	μm	10.00	%<	2.41	μm
15.00	%<	3.13	μm	20.00	%<	3.91	μm	30.00	%<	5.22	μm
40.00	%<	7.35	μm	50.00	%<	8.39	μm	60.00	%<	11.25	μm
70.00	%<	15.67	μm	80.00	%<	21.00	μm	90.00	%<	28.61	μm
99.00	%<	48.79	μm								



Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej

4630	02-20-1998	14:57	FA.FRITSCH	UserID LAB/22	SerNo. SN3165
------	------------	-------	------------	---------------	---------------

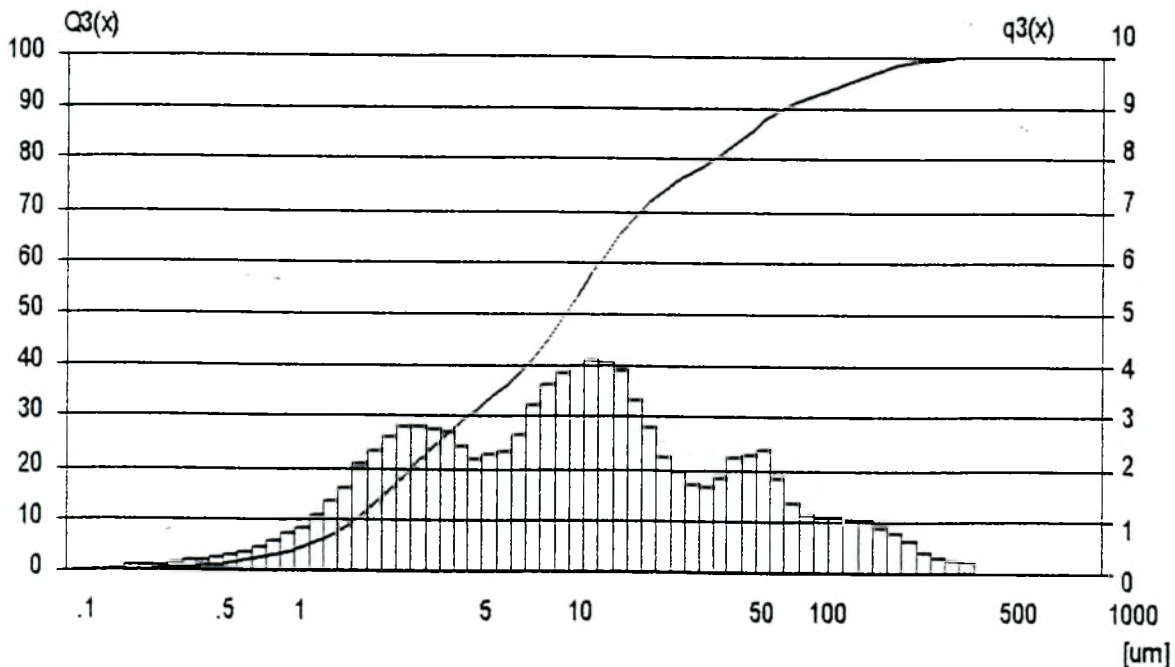
Politechnika – zawiesina 11.04.1997b

Zakres pomiarowy 0.10 [µm] - 509.15 [µm]
 Rozdzielczość 62 Channels (9 mm / 193 mm)
 Absorpcja 15.00 [%]
 Długość pomiaru 20 [Scans]

Modell Independant
 Wybrany model Fraunhofer.

Interpolation Values...		C:\A22\WIN\FRITSCH\ZIARN.FPS									
3.65	%<	1.00	µm	6.94	%<	2.00	µm	15.63	%<	3.00	µm
24.00	%<	4.00	µm	31.41	%<	5.00	µm	33.70	%<	6.00	µm
36.05	%<	7.00	µm	38.71	%<	8.00	µm	41.92	%<	9.00	µm
45.56	%<	10.00	µm	57.56	%<	20.00	µm	71.64	%<	30.00	µm
77.56	%<	40.00	µm	83.31	%<	50.00	µm	85.61	%<	60.00	µm
85.96	%<	70.00	µm	89.80	%<	80.00	µm	91.13	%<	90.00	µm
92.29	%<	100.00	µm	97.46	%<	250.00	µm	99.81	%<	400.00	µm
100.00	%<	500.00	µm	*****	%<	750.00	µm	*****	%<	1000.00	µm
*****	%<	1250.00	µm	*****	%<	2000.00	µm	*****	%<	5000.00	µm
*****	%<	10000.00	µm								

Interpolation Values...		C:\A22\WIN\FRITSCH\ZIARN.FPV									
1.00	%<	0.48	µm	5.00	%<	1.49	µm	10.00	%<	2.38	µm
15.00	%<	2.90	µm	20.00	%<	3.55	µm	30.00	%<	4.87	µm
40.00	%<	8.52	µm	50.00	%<	13.17	µm	60.00	%<	21.07	µm
70.00	%<	28.98	µm	80.00	%<	45.25	µm	90.00	%<	83.66	µm
99.00	%<	322.12	µm								



Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej

5045	04-08-1999	09:06	FA.FRITSCH	UserID LAB/22	SerNo. SN3165
------	------------	-------	------------	---------------	---------------

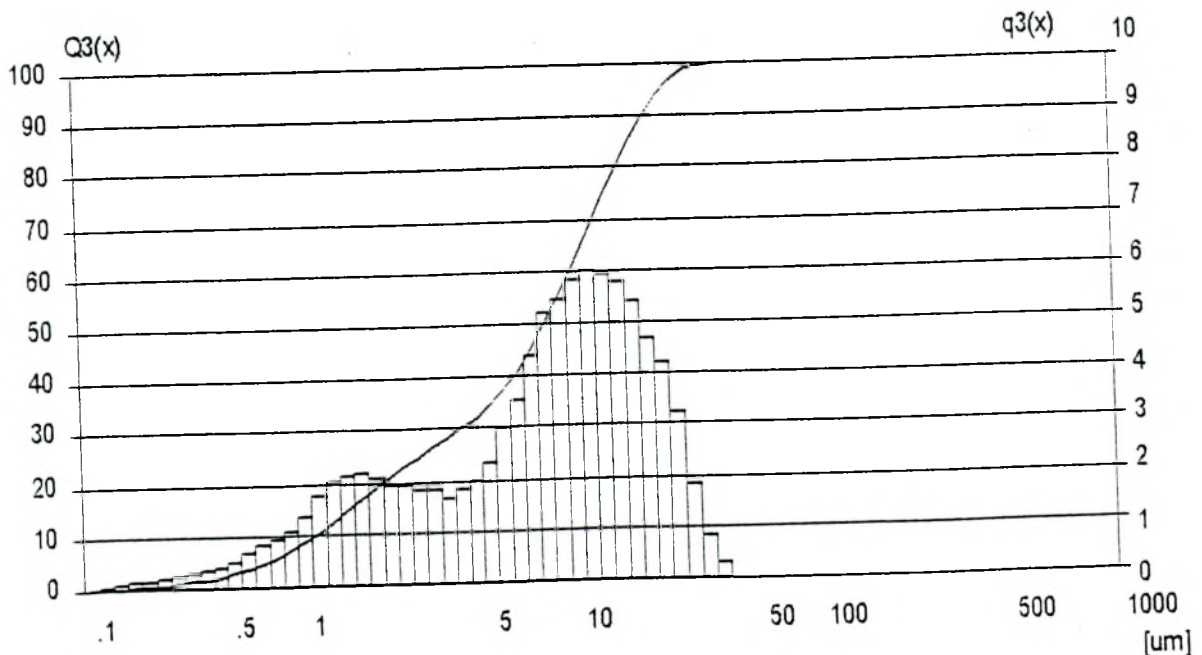
Politechnika 22.03.99 A mieszadło + ultradźwięki

Measuring Range	0.10 [μm] - 490.68 [μm]	Pump	83 [rpm]
Resolution	62 Channels (9 mm / 186 mm)	Sirrer	200[rpm]
Absorption	15.00 [%]	Ultrasonic	450
Measurement Duration	20 [Scans]		

Modell Independant
Fraunhofer Calculation selected.

Intarpolation Values...		C:\A22\WIN\FRITSCH\ZIARN.FPS					
3.78 %<	1.00 μm	14.70 %<	2.00 μm	22.92 %<	3.00 μm		
23.14 %<	4.00 μm	34.26 %<	5.00 μm	37.27 %<	6.00 μm		
40.82 %<	7.00 μm	45.21 %<	8.00 μm	50.40 %<	9.00 μm		
55.86 %<	10.00 μm	73.66 %<	20.00 μm	93.75 %<	30.00 μm		
99.67 %<	40.00 μm	100.00 %<	50.00 μm	100.00 %<	60.00 μm		
100.00 %<	70.00 μm	100.00 %<	80.00 μm	100.00 %<	90.00 μm		
100.00 %<	100.00 μm	100.00 %<	250.00 μm	100.00 %<	400.00 μm		
***** %<	500.00 μm	***** %<	750.00 μm	***** %<	1000.00 μm		
***** %<	1250.00 μm	***** %<	2000.00 μm	***** %<	5000.00 μm		
***** %<	10000.00 μm						

Intarpolation Values...		C:\A22\WIN\FRITSCH\ZIARN.FPV					
1.00 %<	0.33 μm	5.00 %<	0.73 μm	10.00 %<	1.21 μm		
15.00 %<	2.09 μm	20.00 %<	2.74 μm	30.00 %<	4.42 μm		
40.00 %<	6.90 μm	50.00 %<	8.95 μm	60.00 %<	11.99 μm		
70.00 %<	18.11 μm	80.00 %<	22.55 μm	90.00 %<	28.07 μm		
99.00 %<	38.76 μm						



Zakład Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej

5041	04-01-1999	11:43	FA.FRITSCH	UserID LAB/22	SerNo. SN3165
------	------------	-------	------------	---------------	---------------

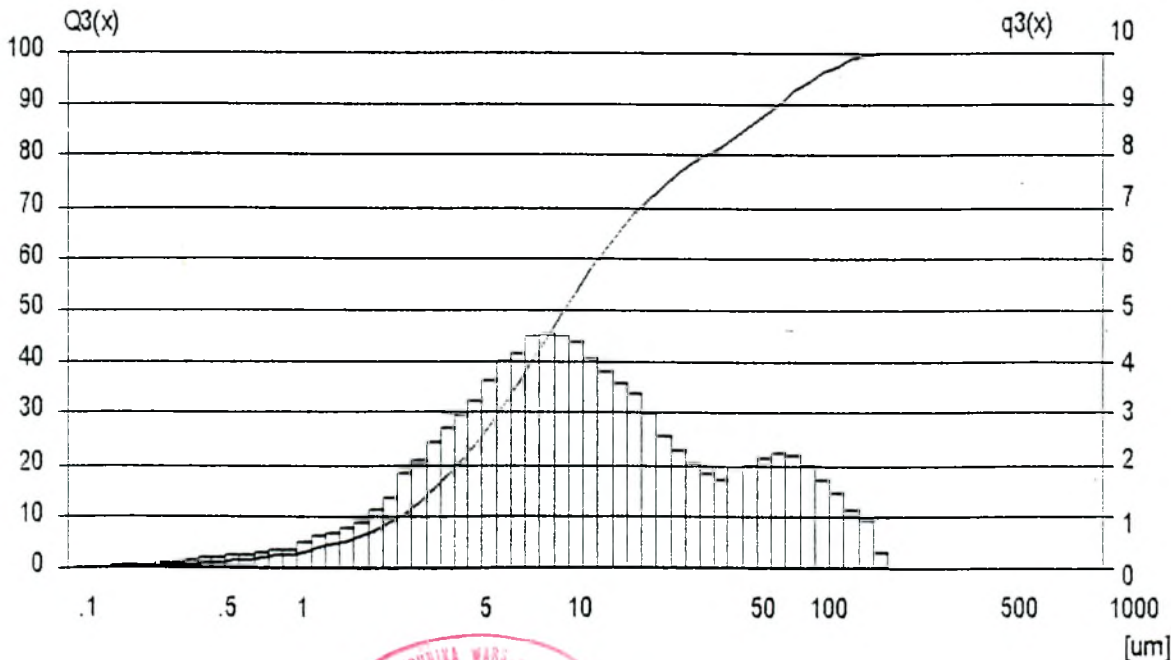
Politechnika – zawiesina 29.03.1999

Zakres pomiarowy 0.10 [µm] - 200.49 [µm]
 Rozdzielczość 62 Channels (9 mm / 76 mm)
 Absorpcja 15.00 [%]
 Długość pomiaru 9 [Scans]

Modell Independant
 Wybrano model Fraunhofer.

Interpolation Values...		C:\A22\WIN\FRITSCH\ZIARN.FPS									
2.34	%<	1.00	µm	4.67	%<	2.00	µm	3.33	%<	3.00	µm
15.23	%<	4.00	µm	24.12	%<	5.00	µm	27.74	%<	6.00	µm
31.73	%<	7.00	µm	35.92	%<	8.00	µm	40.38	%<	9.00	µm
44.93	%<	10.00	µm	57.33	%<	20.00	µm	71.61	%<	30.00	µm
78.45	%<	40.00	µm	83.91	%<	50.00	µm	85.91	%<	60.00	µm
88.04	%<	70.00	µm	90.27	%<	80.00	µm	92.45	%<	90.00	µm
94.42	%<	100.00	µm	100.00	%<	250.00	µm	100.00	%<	400.00	µm
100.00	%<	500.00	µm	-----	%<	750.00	µm	*****	%<	1000.00	µm
*****	%<	1250.00	µm	*****	%<	2000.00	µm	-----	%<	5000.00	µm
*****	%<	10000.00	µm								

Interpolation Values...		C:\A22\WIN\FRITSCH\ZIARN.FPV									
1.00	%<	0.48	µm	5.00	%<	2.17	µm	10.00	%<	3.29	µm
15.00	%<	3.94	µm	20.00	%<	4.63	µm	30.00	%<	6.60	µm
40.00	%<	8.91	µm	50.00	%<	14.03	µm	60.00	%<	21.77	µm
70.00	%<	29.21	µm	80.00	%<	43.54	µm	90.00	%<	79.113	µm
99.00	%<	207.38	µm								



BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Warszawskiej

C.110086



(400)000000001278

Magazyn
podstawowy