

2202966/1

INSTYTUT INŻYNIERII OCHRONY ŚRODOWISKA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raporty serii PREPRINTY nr 71/80

BADANIA MODELOWE WPŁYWU
WYBRANYCH PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH
INFILTRACYJNYCH UJĘĆ PROMIENISTYCH
WODY NA ICH WYDAJNOŚĆ

Praca doktorska

Andrzej Kotowski

Słowa kluczowe: wodociągi,
ujęcia wody,
infiltracja.

Promotor: prof.dr hab.inż. Edward Wł. Mielcarzewicz

80101801006

Wrocław, 1980

mgr inż. Andrzej Kotowski

Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska

Politechniki Wrocławskiej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27

50-370 Wrocław

Niniejszy raport stanowi pracę doktorską,
która została przedłożona Radzie Naukowo-Dydaktycznej
Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki
Wrocławskiej w celu uzyskania stopnia naukowego
doktora nauk technicznych.

Promotor: prof.dr hab.inż. Edward Wł. Mielcarzewicz

- Politechnika Wrocławska

Recenzenci: prof.dr hab.inż. Artur Wieczysty

- Politechnika Krakowska

doc.dr hab.inż. Zbigniew Siwoń

- Politechnika Wrocławska

P r o m o t o r o w i

Panu Profesorowi Edwardowi Mielcarzewiczowi
składam serdeczne podziękowanie za opiekę,
codzienną życzliwość i cenne rady przy
wykonywaniu pracy.

SPIS TREŚCI

	str.
1. WSTĘP	9
2. PRZEGLĄD PISMIENNICTWA	10
2.1. Analiza dotychczasowych metod określenia wydaj- ności infiltracyjnych ujęć promienistych	11
2.1.1. Metoda odwzorowań wiernokątnych	12
2.1.1.1. Zbieracz pojedynczy	12
2.1.1.2. Zespół zbieraczy	13
2.1.2. Metoda źródeł dodatnich i ujemnych	15
2.1.2.1. Zbieracz pojedynczy	15
2.1.2.2. Zespół zbieraczy	16
2.1.3. Metoda analogii elektrohydrodynamicznej	18
2.1.4. Analiza przydatności przedstawionych metod obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych	20
2.2. Dotychczasowe próby uwzględnienia strat energetycznych w zbieraczach	22
2.2.1. Metody przybliżone	22
2.2.2. Metody udoskonalone	24
2.2.3. Analiza metod uwzględniających straty energetyczne w zbieraczach	30
2.3. Wnioski z analizy dotychczas stosowanych metod obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych	31
3. CEL I ZAKRES PRACY	32
4. WYBÓR TYPU I WIELKOŚCI MODELU	33
4.1. Wybrane elementy teorii podobieństwa mechanicznego	33

	str.
4.2. Dobór skali modelu	35
4.3. Wybrane elementy analizy wymiarowej	38
5. PROGRAM BADAN I OPIS STANOWISKA DOŚWIADCZALNEGO	42
5.1. Program badań	42
5.2. Stanowisko doświadczalne	43
5.2.1. Zbiornik główny	49
5.2.2. Studnia zbiorcza z układem zbieraczy	49
5.2.3. Urządzenia zasilająco-spustowe	51
5.2.4. Urządzenia i przyrządy pomiarowe	51
5.2.5. Urządzenia do obsługi stanowiska	52
5.3. Przygotowanie stanowiska do badań	53
6. METODYKA BADAN	54
6.1. Metodyka określania cech fizycznych, chemicznych i bakteriologicznych złoża piaskowego	54
6.1.1. Uziarnienie i wskaźnik nierównomierności uziarnienia	54
6.1.2. Porowatość objętościowa i wskaźnik porowatości	55
6.1.3. Skład chemiczny i bakteriologiczny złoża	55
6.2. Metodyka obliczania wartości współczynnika filtracji złoża piaskowego	56
6.2.1. Obliczanie współczynnika k_f na podstawie formuł empirycznych	56
6.2.2. Metodyka laboratoryjnego wyznaczania wartości współczynnika filtracji	57
6.2.3. Metodyka wyznaczania współczynnika filtracji na podstawie "pompowań próbnych" w modelu	60
6.3. Metodyka wyznaczania współczynnika oporów liniowych tarcia zbieraczy perforowanych	62
6.4. Metodyka pomiarów na modelu infiltracyjnego ujęcia promienistego	65

	str.
6.4.1. Pomiar temperatury wody	70
6.4.2. Pomiar wydajności ujęcia	70
6.4.3. Pomiar wysokości ciśnień piezometrycznych i poziomów wody	71
6.4.4. Pomiar wysokości warstwy wodonośnej, zagłębienia i długości zbieraczy	72
7. WZORCOWANIE MODELU	73
7.1. Badanie cech chemicznych i biologicznych złoża filtracyjnego podczas doświadczeń	73
7.2. Wyniki pomiarów cech fizycznych i hydrogeolo- gicznych złoża piaskowego	76
7.2.1. Określenie wartości współczynnika filtracji na podstawie formuł empirycznych	76
7.2.2. Określenie wartości współczynnika filtracji na podstawie badań laboratoryjnych	80
7.2.3. Określenie wartości współczynnika filtracji na podstawie "pompowań próbnych" w modelu	80
7.2.4. Dyskusja wyników badań parametrów hydraulicz- nych złoża filtracyjnego	80
7.3. Wyniki pomiarów współczynnika oporów liniowych tarcia perforowanych zbieraczy	85
7.3.1. Analiza wyników badań w rurach pełnościennych	85
7.3.2. Analiza wyników badań w rurach perforowanych	89
8. ANALIZA BŁĘDÓW POMIARÓW I OBLICZEŃ	97
8.1. Analiza dokładności wyznaczenia współczynnika filtracji złoża modelowego na podstawie pompowań wg schematu Babuškina	97

8.2. Analiza dokładności wyznaczenia wielkości współczynnika liniowych oporów tarcia zbieraczy ze wzoru Darcy-Weisbach'a	100
9. WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH UJĘCIA PROMIENISTEGO NA JEGO WYDAJNOŚĆ	103
9.1. Omówienie wyników pomiarów wydajności przy zmianach parametrów konstrukcyjnych ujęcia	103
9.2. Omówienie wyników pomiarów ciśnień piezometrycznych	115
10. INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAŃ	128
10.1. Analiza wyników pomiarów na modelu	128
10.1.1. Nierównomierność dopływu wody do zbieraczy	128
10.1.2. Wzajemne oddziaływanie zbieraczy	135
10.2. Odniesienie wyników badań modelowych do rzeczywistości	136
11. ODWZOROWANIE MATEMATYCZNE DZIAŁANIA INFILTRACYJNEGO UJĘCIA PROMIENISTEGO	143
12. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	153
Literatura	156
Spis rysunków	162
Spis tabel	165

OZNACZENIA

- A, B, B_0 - współczynniki empiryczne
- C - współczynnik przeliczeniowy temperatury
- D - średnica studni zbiorczej ujęcia promienistego, m
- D_{st} - średnica filtra studziennego, m
- Fr - liczba Frouda
- H - głębokość wody w źródle infiltracji, m
- H_w - miąższość /wysokość/ warstwy wodonośnej, m
- ΔH - wysokość strat hydraulicznych na przepływie wody przez złożę filtracyjne, m
- J - spadek hydrauliczny
- Q - objętościowe natężenie przepływu, m^3/s
- Q_{st} - wydajność studni pionowej, m^3/s
- Q_u - wydajność ujęcia promienistego, m^3/s
- Re - liczba Reynolds'a
- U - wskaźnik nierównomierności uziarnienia
- V - średnia prędkość przepływu w przekroju pełnościennego odcinka zbieracza, m/s
- V_f - prędkość filtracji, m/s
- a, b, b_0 - współczynniki empiryczne
- b_i - wykładnik potęgowy, współczynnik regresji
- d_f - zewnętrzna średnica filtra zbieracza, mm
- d_e - średnica miarodajna ziarn gruntu, mm
- d_o - średnica otworu wykonanego w ścianie rury, mm
- d_w - wewnętrzna średnica zbieracza, mm
- g - przyspieszenie ziemskie, m^2/s
- Δh_f - wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody przez filtr otaczający zbieracz, m
- Δh_p - wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody wewnątrz perforowanego odcinka zbieracza, m

- Δh_s - wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody wewnątrz perforowanego i pełnościennego odcinka zbieracza łącznie ze stratami na wypływie wody do studni zbiorczej ujęcia, m
- k_f - współczynnik filtracji złoża /warstwy wodonośnej/, m/s
- k_z - zastępcza chropowatość piaskowa według Nikuradse'go, mm
- Δk_z - zwiększenie zastępczej chropowatości hydraulicznej ścianki perforowanej rury, wywołane wzajemnym oddziaływaniem zaburzeń ruchu strumienia cieczy, powstałych przy każdym otworze, mm
- l_f - długość perforowanej części zbieracza, m
- l_o - długość pełnościennej /zafiltrowej/ części zbieracza, m
- n - liczba zbieraczy
- n_p - porowatość złoża filtracyjnego
- q - wydajność pojedynczego zbieracza pracującego w zespole n zbieraczy ujęcia promienistego, m³/s
- q_1 - wydajność pojedynczego zbieracza pracującego indywidualnie, m³/s
- r_o - wewnętrzny promień zbieracza, mm
- s - depresja obliczeniowa, m
- s_p - depresja rzeczywista w studni zbiorczej, m
- z - zagłębienie zbieracza pod dnem źródła infiltracji, m
- α - współczynnik wzajemnego oddziaływania zbieraczy
- α_o - współczynnik Boussinesq'a
- β - kąt zawarty między zbieraczami, rad
- γ - ciężar właściwy gruntu, N/m³
- γ_{os} - ciężar objętościowy szkieletu gruntowego, N/m³
- δ - grubość ścianki zbieracza, mm
- η - współczynnik lepkości dynamicznej, N.s/m²

- λ - współczynnik oporów liniowych w rurze pełnościennej w strefie ruchu burzliwego
- λ_0 - współczynnik oporów liniowych w rurze pełnościennej w strefie ruchu laminarnego
- λ_{ot} - zastępczy współczynnik oporów wywołany obecnością otworów wykonanych w ściance rury
- λ_p - współczynnik oporów liniowych w rurze perforowanej,
- λ_{pr} - współczynnik oporów liniowych w rurze pełnościennej w strefie ruchu przejściowego
- λ_t - współczynnik oporów liniowych wywołany podstawową chropowatością ścianki rury
- ν - współczynnik lepkości kinematycznej wody, m^2/s
- ξ_{kf} - skala współczynnika filtracji
- ξ_l - skala długości
- ξ_Q - skala przepływów
- ξ_v - skala prędkości
- δ - względny maksymalny błąd pomiaru
- ρ - gęstość cieczy, kg/m^3
- φ - potencjał prędkości
- φ_0 - przepuszczalność ścianki perforowanej rury, mierzona stosunkiem całkowitej powierzchni otworów do wewnętrznej powierzchni ścianki rury.

Indeksy:

- M - wielkość w skali modelowej
- N - wielkość w skali rzeczywistej /naturalnej/
- t - wielkość mierzona w temperaturze t pomiaru
- 283,15 - wielkość sprowadzona do temperatury 283,15 K.

1. WSTĘP

Początki budowy ujęć promienistych wody podziemnej sięgają XVIII wieku, chociaż faktycznie ich narodziny zapoczątkował Leo Ranney w 1934 roku. Znaczny rozwój wykonawstwa tego typu ujęć nastąpił dopiero w latach 50-tych. Na świecie pracuje obecnie ponad 1000 studni promienistych, w tym w Polsce - 18 [3,61,63].

Główną przeszkodą w budowie tych ujęć w Polsce jest brak wyspecjalizowanego przedsiębiorstwa wykonawczego - co rzutuje na efekty ekonomiczne oraz brak zaufania do dotychczasowych metod obliczania wydajności ujęć promienistych, których na ogół nie osiąga się w czasie eksploatacji [12,49,61].

Jakkolwiek w ciągu 46-ciu lat opracowano szereg metod budowy i wariantów rozwiązań konstrukcyjnych ujęć promienistych, to jednak nie ma do dziś uniwersalnego sposobu obliczania i projektowania tych ujęć, uwzględniającego wszystkie czynniki wpływające na wydajność i efekty techniczno-ekonomiczne omawianych ujęć.

Obserwowany od kilku lat wzrost zainteresowania w świecie wodami infiltracyjnymi, jako źródłem wody na pokrycie potrzeb ludności i przemysłu, otwiera nowe możliwości rozwoju ujęć promienistych, umieszczonych w bezpośrednim sąsiedztwie rzek lub zbiorników wody powierzchniowej. Ujęcia tak zlokalizowane odznaczają się wyjątkowo dużą wydajnością, a woda powierzchniowa przefiltrowana przez warstwę gruntu zmienia na korzyść swoją jakość [3,63].

Infiltracyjne ujęcia promieniste są w sprzyjających warunkach hydrogeologicznych znacznie ekonomiczniejsze od ujęć za pomocą grup studzien wierconych lub kopanych, równoważnych pod względem wydajności. Ponadto cechuje je bezawaryjność i długowieczność, pod warunkiem prawidłowej eksploatacji. Można je stosować przy

niwielkich nawet miąższościach warstwy wodonośnej /rzędu kilku metrów/[63] .

Te i inne zalety ujęć promienistych powodują, że na całym świecie wypierają one w coraz większym stopniu tradycyjne sposoby ujmowania wody podziemnej i infiltracyjnej.

2. PRZEGLĄD PIŚMIENNICTWA

Ujęcia promieniste doczekały się szeregu opracowań, które w sposób ogólny podzielić można na trzy zasadnicze grupy tematyczne:

- 1/ prace dotyczące podstaw projektowania i obliczania ich wydajności,
- 2/ prace omawiające wyniki obserwacji eksploatowanych ujęć,
- 3/ prace dotyczące sposobów ich budowy.

Większość opracowań dotyczy ujęć wody gruntowej, mniej liczne obejmują ujęcia infiltracyjne.

Infiltracyjne ujęcie promieniste składa się z żelbetowej studni zbiorczej i z promieniście wyprowadzonych z niej do warstwy wodonośnej zbieraczy. Zbieracze składają się z głowicy /pilota/, rur filtrowych i rury pełnościennej /zafiltrowej/. Umieszcza się je poniżej poziomu wód podziemnych, najlepiej pod dnem obszaru infiltracji.

Wydajność ujęcia tego typu zależy od wielu czynników charakteryzujących :

- a/ warunki hydrogeologiczne - miąższość, uziarnienie i wodopruszczalność warstwy wodonośnej,
- b/ warunki eksploatacyjne - depresja w studni zbiorczej, stopień inkrustacji ścian zbieraczy i kolmatacji filtra oraz dna źródła infiltracji,

c/ konstrukcję ujęcia - głównie liczba, długość i średnica zbieraczy, a także zagłębienie ich pod dnem obszaru infiltracji.

Reasumując, wydajność ujęcia można w ogólności określić za pomocą następującej zależności:

$$Q_u = f / H_w, k_f, s_p, n, l_f, r_o, z / \quad /2-1/$$

2.1. Analiza dotychczasowych metod określania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych

Jest rzeczą charakterystyczną, iż technika wykonawstwa ujęć promienistych znacznie wyprzedziła opracowanie naukowych podstaw ich projektowania. Wiąże się to między innymi z faktem, że dopływ wody do ujęcia promienistego można rozpatrywać jedynie w przestrzeni trójwymiarowej, co wymaga stosowania zaawansowanego aparatu analitycznego, bądź też eksperymentalnego. Utrudnia to w sposób zasadniczy rozwiązanie zadania.

Prace teoretyczne z tego zakresu wychodzą z równań fizyki matematycznej, opisujących ruch wody w gruncie i opartych na założeniu potencjalnego ruchu cieczy doskonałej pod działaniem sił grawitacji w jednorodnym i izotropowym ośrodku gruntowym. W tych warunkach ruch wody opisywany jest równaniami Laplace'a:

- w odniesieniu do przestrzeni dwu^{wym}miarowej:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad /2-2/$$

- w odniesieniu do przestrzeni trójwymiarowej:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad /2-3/$$

w których φ stanowi potencjał prędkości, będący funkcją współrzędnych x, y lub x, y, z . Równania Laplace'a winny spełniać warunki brzegowe, wynikające z fizycznych własności obszaru

filtracyjnego [63] .

Do analitycznego rozwiązania tak sformułowanego zadania znalazły praktyczne zastosowanie dwie metody:

- metoda odwzorowań konforemnych /wie rnokątnych/ ,
- metoda źródeł i upustów /źródeł dodatnich i ujemnych/ .

W badaniach doświadczalnych natomiast wykorzystuje się analogie między zjawiskami zachodzącymi w naturze i w modelu - dające się opisać w/w równaniami Laplace'a. Praktyczne zastosowanie znalazła tutaj metoda analogii elektrohydrodynamicznej /AEHD/ .

2.1.1. Metoda odwzorowań wie rnokątnych

Do analitycznego sformułowania podstaw obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych najwcześniej została zastosowana metoda odwzorowań wie rnokątnych. Metoda ta polega na doborze takiej funkcji zmiennej zespolonej, która umożliwia stosunkowo proste rozwiązanie zagadnienia granicznego, odwzorowanego wie rnokątnie obszaru ruchu wody [8] .

Analiza teoretycznych opracowań wykorzystujących tę metodę pozwala wyróżnić opracowania dotyczące pojedynczego zbieracza oraz zespołu jednocześnie czynnych zbieraczy ujęcia promienistego.

2.1.1.1. Zbieracz pojedynczy

Prekursorem metody odwzorowań wie rnokątnych w odniesieniu do poddennych ujęć infiltracyjnych był V.V. Viediernikov /1939 r./ . Wszelkie dalsze opracowania powstały w oparciu o jego prace. Wykorzystując omawianą metodę Viediernikov wyprowadził wzór na jednostkowy dopływ wody do pojedynczego zbieracza o nieskończonej długości ułożonego w półograniczonej warstwie wodonośnej /pod dnem obszaru infiltracji/ [14, 63] :

$$q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_f \cdot (H + z - h_z)}{\ln \frac{2 \cdot z}{r_0}} ,$$

/2-4/

gdzie: q_1 - jednostkowy dopływ wody do zbieracza pracującego indywidualnie, $m^3/s \cdot m$,

h_z - wysokość ciśnienia na powierzchni zbieracza w odniesieniu do ciśnienia atmosferycznego, $m H_2O$.

Całkowitą wydajność pojedynczego zbieracza o długości l_f oblicza się ze wzoru:

$$Q_1 = q_1 \cdot l_f \quad /2-5/$$

Na podstawie prac Viediernikova, V.J. Aravin i S.N. Numerov [4] wyprowadzili wzór na jednostkowy dopływ wody do zbieracza założonego w warstwie wodonośnej o skończonej miąższości w postaci:

$$q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_f \cdot (H + z - h_w)}{\Phi}, \quad /2-6/$$

gdzie: h_w - wysokość ciśnienia wewnątrz zbieracza w odniesieniu do ciśnienia atmosferycznego, $m H_2O$,

Φ - współczynnik będący funkcją h_w , z i r_o , którego wartość określić można ze wzoru:

$$\Phi = \ln \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{2z + r_o}{H_w} \right) \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi}{4} \cdot \frac{r_o}{H_w} \right) \right] \cdot /2-7/$$

Wydajność zbieracza o długości l_f oblicza się ze wzoru /2-5/.

2.1.1.2. Zespół zbieraczy

Wykorzystując prace Viediernikova, Aravina i Numerova, Ostrowski [35,63] opracował wzór na wydajność ujęcia promienistego w postaci:

$$Q_u = n \cdot \sum_{1}^m \frac{2 \pi k_f (H + z - h_w) \cdot l_x}{\ln \sinh \frac{2 \pi z}{a_1} - \ln \sinh \frac{\pi r_o}{a_1}} \cdot \frac{\ln \frac{2 \cdot z}{r_o}}{\Phi}, \quad /2-8/$$

gdzie: Q_u - wydajność ujęcia składającego się z zespołu $/n/$ jednocześnie czynnych zbieraczy, m^3/s ,

n - liczba zbieraczy,

a_1 - średnia wzajemna odległość naprzeciwległych odcinków zbieraczy, powstałych z podziału długości l_f na m jednakowych części o długości $l_x = l_f/m$, m ,

Φ - współczynnik określany ze wzoru /2-7/.

Wzór /2-8/ stanowi modyfikację wzoru Viediernikova odnoszącego się do nieskończonej liczby równoległych zbieraczy. Zastąpiono w nim układ promienisty szeregiem odcinków równoległych o zmiennym rozstawie a_1 . Zawiera on ponadto wzory /2-4/ i /2-7/ /wyprowadzone przy różnych założeniach odnośnie miąższości warstwy wodonośnej/ w postaci ilorazu $\ln \frac{2 \cdot z}{r_0} / \Phi$ ujmującego wpływ wzajemnego oddziaływania zbieraczy na zmniejszenie wydajności ujęcia.

Wykorzystując prace Abramova, a także Aravina i Numerova, J.E. Surov opracował wzór na wydajność zespołu jednocześnie czynnych zbieraczy ujęcia promienistego w nieco prostszej postaci [63] :

$$Q_u = \frac{2 \pi \cdot k_{fp} \cdot n \cdot l_f \cdot \alpha \cdot Z \cdot (H + z - h_w)}{\Phi}, \quad /2-9/$$

gdzie: k_{fp} - średnia ważona wartość współczynnika filtracji przy pionowym przepływie wody przez dwie warstwy: zakolmatowaną $/k_{f0}/$ o miąższości 0,5 m i wodonośną $/k_f/$,

α - współczynnik wzajemnego oddziaływania zbieraczy, dobierany w zależności od liczby zbieraczy
 $/0,6 \leq \alpha \leq 1,0/$,

Z - współczynnik zamulenia dna obszaru infiltracji.

Wartość Z należy przyjmować wg Abramova w wysokości [15]:

$Z = 0,8$ - wody powierzchniowe o nieznacznej mętności,

$Z = 0,6$ - wody o średniej mętności,

$Z = 0,3$ - wody o znacznej mętności,

Φ - wg wzoru /2-7/.

2.1.2. Metoda źródeł dodatnich i ujemnych

Drugą metodą pozwalającą obliczyć wydajność infiltracyjnych ujęć promienistych, zaczerpniętą z hydrodynamiki teoretycznej, jest metoda źródeł i upustów, zwana także metodą źródeł dodatnich i ujemnych.

Podstawowe znaczenie mają tutaj prace P.J. Połubarinovej - Kočiny [37, 38], w których po raz pierwszy zastosowano tę metodę do rozwiązania zadania w odniesieniu do warstwy wodonośnej o nieograniczonej miąższości.

Według metody źródeł dodatnich i ujemnych zbieracze odwzorowane są za pomocą nieskończonej liczby źródeł ujemnych, które zasilane są przez źródła dodatnie, stanowiące symetryczne /zwierciadlane/ odbicie źródeł ujemnych względem dna obszaru infiltracji, przyjętego w postaci płaszczyzny poziomej. Dla tak zdefiniowanego schematu określana jest funkcja potencjału prędkości φ , a następnie całkowana wzdłuż długości zbieraczy.

2.1.2.1. Zbieracz pojedynczy

W 1955 r. Połubarinova - Kočina wykorzystując omawianą metodę wyprowadziła wzór na jednostkowy dopływ wody do pojedynczego zbieracza o nieskończonej długości rur filtrowych, ułożonego pod dnem obszaru infiltracji w warstwie wodonośnej o nieograniczonej miąższości [38]. Wzór ten ma postać identyczną do wzoru /2-4/ Wiedernikova, uzyskanego na drodze odwzorowań wiernokątnych. W odniesieniu do zbieracza o skończonej długości rur filtrowych wzór Połubarinovej - Kočiny przyjmuje postać:

$$q_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_f / H + z - h_z /}{\ln \frac{2 \cdot z}{1,225 r_0} - \ln \frac{c + \sqrt{c^2 + 4z^2}}{2 \cdot c}}, \quad /2-10/$$

gdzie: $c = l_f / 2$.

Całkowitą wydajność zbieracza oblicza się ze wzoru /2-5/.

Z porównania wzorów /2-4/ i /2-10/ wynika, że wpływ długości zbieracza na wielkość dopływu do niego wody ujmuje wyrażenie: $\ln \left(c + \sqrt{c^2 + 4z^2} / 2 \cdot c \right)$. Wpływ ten jest tym większy, im mniejsza jest długość zbieraczy. Przy znacznych długościach rur filtrowych można go pominąć [14] .

Brak mnożnika "1,225" w mianowniku funkcji logarytmicznej równania /2-4/ wynika z przyjęcia położenia jednej z linii równego potencjału bezpośrednio na konturze zbieracza /zagadnienie dwuwymiarowe/.

Wykorzystując prace Połubarinovej - Kočiny oraz stosując zmodyfikowaną metodę źródeł dodatnich i ujemnych, polegającą na wielokrotnym odbiciu źródeł od dna rzeki lub zbiornika G.A. Razumov [41] wyprowadził wzór na jednostkową wydajność pojedynczego zbieracza o skończonej długości, umieszczonego w warstwie wodonośnej o ograniczonej miąższości:

$$q_1 = \frac{2\pi k_f / H + z - h_z}{\ln U_r} , \quad /2-11/$$

gdzie: U_r - współczynnik określany ze wzoru:

$$U_r = \frac{4 H_w z l_f / \sqrt{l_f^2 + 16 / H_w - z / 2} + l_f}{1,225 r_o / H_w - z / \cdot / \sqrt{l_f^2 + 16 z^2} + l_f / \cdot / \sqrt{l_f^2 + 16 H_w^2} + l_f /} \quad /2-12/$$

Wydajność zbieracza o długości l_f oblicza się ze wzoru /2-5/.

2.1.2.2. Zespół zbieraczy

Zastosowanie podanych uprzednio wzorów do obliczania wydajności ujęcia składającego się z kilku promieniście rozmieszczonych zbieraczy, prowadziłoby do zawyżenia wyników. Pomijają one wzajemne oddziaływanie zbieraczy. Z tego względu wzór na wydajność

jednego zbieracza ujęcia promienistego wyprowadzony przez Połubarinovą - Koćinę [38] różni się od wzoru /2-10/:

$$q/k/ = \frac{2\pi k_f l_f \cdot (H + z - h_z/}{\ln \frac{2 \cdot z}{1,225r_0} - \ln \frac{c + \sqrt{c^2 + 4z^2}}{2 \cdot c} + \sigma_k}, \quad /2-13/$$

gdzie: σ_k - wielkość wyrażająca wpływ pozostałych zbieraczy na wydajność zbieracza oznaczonego numerem k.

Wielkość σ_k obliczyć można ze wzoru:

$$\sigma_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{R_1 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i + \sqrt{\left(R_1 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i\right)^2 + \frac{(R_1+R_2)^2}{4} \sin^2 \beta_i + 4z^2}}{R_1 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i + \sqrt{\left(R_1 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i\right)^2 + \frac{(R_1+R_2)^2}{4} \sin^2 \beta_i}} \cdot \frac{R_2 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i + \sqrt{\left(R_2 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i\right)^2 + \frac{(R_1+R_2)^2}{4} \sin^2 \beta_i}}{R_2 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i + \sqrt{\left(R_2 - \frac{R_1+R_2}{2} \cos \beta_i\right)^2 + \frac{(R_1+R_2)^2}{4} \sin^2 \beta_i + 4z^2}}, \quad /2-14/$$

gdzie: $R_1 = 0,5 \cdot D_z + l_0$, m,

D_z - zewnętrzna średnica studni zbiorczej, m,

$R_2 = R_1 + l_f$, m,

β_i - kąt, który tworzy zbieracz k ze zbieraczem i, rad.

Po określeniu wartości σ_k , wydajność danego zbieracza $q/k/$ pracującego w zespole można określić ze wzoru /2-13/, a wydajność ujęcia ze wzoru:

$$Q_u = \sum_{k=1}^n q/k/. \quad /2-15/$$

Gdy zbieracze są rozmieszczone symetrycznie na obwodzie studni zbiorczej, dopływ do każdego z nich jest jednakowy, a wydajność ujęcia wynosi:

$$Q_u = n \cdot q \quad /2-16/$$

Przytoczone wzory Połubarinovej - Koćiny zostały wyprowadzone

przy założeniu nieograniczonej miąższości warstwy wodonośnej i skończonej /jednakowej/ długości zbieraczy.

Ograniczoną miąższość warstwy wodonośnej i skończoną długość rur filtrowych uwzględnia wzór wyprowadzony przez G.A. Razumowa [42] :

$$Q_u = \frac{2 \pi k_f \cdot n \cdot l_f \cdot s}{\ln U_r + \frac{n-1}{2} \ln U_\beta + \frac{1}{2} U_o} , \quad /2-17/$$

gdzie: $s = H + z - h_z$, m,

U_r = wg wzoru /2-12/,

$$U_\beta = 1 + \frac{16 H_w^2}{l_f^2 \cdot \sin^2 \beta} , \quad /2-18/$$

$U_o = f / r_o, l_f, H_w, z/$, [42, 50] ,

β - kąt zawarty między sąsiednimi zbieraczami, w przypadku niesymetrycznego rozmieszczenia zbieraczy:

$$\beta = \bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{n} \quad /2-19/$$

Z porównania wzorów /2-11/ i /2-17/ wynika, że wpływ wzajemnego oddziaływania zbieraczy na zmniejszenie się wydajności ujęcia promienistego ujmują współczynniki U_β i U_o występujące we wzorze /2-17/.

2.1.3. Metoda analogii elektrohydrodynamicznej

Różnorodność założeń i uproszczeń przy formułowaniu teoretycznie opracowanych metod obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych doprowadziła do dużej liczby wzorów obliczeniowych, które różnią się w sposób istotny swoją strukturą. Zwłaszcza analityczne rozwiązanie problemu wzajemnego oddziaływania zbieraczy wymagało eksperymentalnej weryfikacji szeregu założeń. Szczególne

zastosowanie znalazło tutaj modelowanie metodą analogii elektrohydrodynamicznej. Metoda AEHD wykorzystuje podobieństwo przepływu prądu elektrycznego w stacjonarnym polu elektrycznym i przepływu wody podziemnej w porowatej warstwie wodonośnej. Potencjał elektryczny U zastępuje jednoznacznie potencjał prędkości φ w równaniach /2-2/ i /2-3/ Laplace'a, opisujących ustalony dopływ wody do zbieraczy [63].

Wykorzystując metodę AEHD G.A. Razumov [41,42] porównał wyniki obliczeń wydajności q_1 i Q_u ze wzorów teoretycznych /2-11 i 2-17/ z wynikami badań doświadczalnych na modelu elektrycznym. Badania te umożliwiły dokonanie oceny współczynnika α wzajemnego oddziaływania zbieraczy, zdefiniowanego następująco:

$$\alpha = \frac{Q_u}{n \cdot q_1} \quad /2-20/$$

Na podstawie badań modelowych Razumov [43] zweryfikował wzór /2-17/ do postaci:

$$Q_u = \frac{2 \pi k_f \cdot l_f \cdot n \cdot s}{\ln U_1 + \frac{n-1}{2} \ln U_\beta}, \quad /2-21/$$

gdzie:

$$U_1 = \frac{3 \cdot H_w \cdot z \cdot l_f}{r_o \cdot /H_w - z/ \cdot /l_f + \sqrt{l_f^2 + 16 H_w^2}/}, \quad /2-22/$$

U_β - określa się ze wzoru /2-18/.

Wzór /2-21/ można stosować przy spełnieniu ograniczeń, wynikających z zakresu przeprowadzonych badań na modelu, a mianowicie:

$$\begin{aligned} l_f / H_w &\geq 3, \\ 0,8 \geq z / H_w &\geq 0,2, \\ H_w - z &\geq 2r_o, \\ z &\geq 20r_o, \\ \beta &\geq 0,393 \text{ rad.} \end{aligned} \quad /2-23/$$

Opracowania Razumova stanowią niewątpliwie krok naprzód w

rozwiązywaniu interesującego nas zagadnienia, jednakże pozostawiają one na uboczu problem rozkładu jednostkowego dopływu wody wzdłuż zbieraczy. Ten stan rzeczy skłonił B. Kordasa i M. Maciejewskiego [21,25] do podjęcia badań analitycznych i eksperymentalnych w tym zakresie. Wykorzystując metodę źródeł dodatnich i ujemnych oraz metodę analogii elektrohydrodynamicznej, autorzy ci potwierdzili doświadczalnie hipotezę o równomierności dopływu wody na długości zbieraczy, przyjmowaną w metodach analitycznych. Owocem tych badań jest formuła Maciejewskiego [25] :

$$Q_u = 5,4 \cdot k_f \cdot s \cdot l_f \cdot r_o^{0,28} n^{0,56} z^{-0,40} H_w^{0,12}, \quad /2-24/$$

Wzór /2-24/ ma zastosowanie przy następujących ograniczeniach:

$$\begin{aligned} 4 &\leq n \leq 16, \\ 100 &\leq l_f/r_o \leq 200, \\ 15 &\leq z/r_o \leq 310, \\ 20 &\leq H_w/r_o \leq 415. \end{aligned} \quad /2-25/$$

2.1.4. Analiza przydatności przedstawionych metod obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych

Zastosowane do określenia wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych metody: odwzorowań wieńkowych, źródeł dodatnich i ujemnych oraz analogii elektrohydrodynamicznej okazały pewną swą przydatność do rozwiązywania zadań tego typu.

Podstawową wadą wzorów obliczeniowych powstałych w oparciu o te metody jest nadmierne uproszczenie modelu pracy infiltracyjnego ujęcia promienistego, a mianowicie:

- założenie nieograniczonej ^{zbieraczy} długości i miąższości warstwy wodonośnej, wynikające z trudności natury matematycznej zastosowanych metod poznawczych /wzór /2-4/ Wiedernikova i Połubarinovej - Koćiny/,

- utożsamianie depresji obliczeniowej z depresją powstającą w studni zbiorczej ujęcia /wzory: /2-17/, /2-21/ i /2-24//,
- przyjęcie równomiernego napływu wody wzdłuż zbieraczy.

Ponadto praktyczne zastosowanie niektórych z omawianych wzorów napotyka na trudności, jak np.:

- uzależnianie wydajności od wysokości ciśnienia na zewnątrz zbieraczy $/H + z - h_z/$, które jest trudne do określenia w pracującym ujęciu /wzory: /2-4/, /2-10/, /2-11/ i /2-13//,
- uzależnianie wydajności od wysokości ciśnienia panującego wewnątrz zbieraczy $/H + z - h_w/$, przy założeniu jego niezmienności wzdłuż długości zbieraczy, co jest niezgodne z rzeczywistością /wzory: /2-6/, /2-8/ i /2-9//.

Na uwagę zasługują zwłaszcza wzory Surova, Razumova i Maciejewskiego:

- wzór /2-9/ otrzymany przy zastosowaniu metody odwzorowań wiernekątnych w oparciu o prace Viediernikova, Aravina i Numerova,
- wzór /2-21/ wyprowadzony przy pomocy metody źródeł dodatnich i ujemnych w oparciu o prace Połubarinovej - Kočiny, zweryfikowany następnie na modelu elektrycznym,
- wzór /2-24/ uzyskany przy zastosowaniu analogii elektrohydrodynamicznej.

Wzory te znalazły zastosowanie w praktyce, gdyż dotyczą skończonych wartości zarówno długości zbieraczy jak i miąższości warstwy wodonośnej. Były przedmiotem licznych badań ich przydatności [12,50,51,61], z których wynika, że różnice między wynikami obliczeń wydajności na ich podstawie a rezultatami pomiarów czynnych ujęć dochodzą do 100% i więcej.

Przeprowadzona w pracy [22] analiza fizykalna wpływu ważniejszych parametrów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i hydrogeolo-

gicznych na wydajność infiltracyjnych ujęć promienistych, określana ze wzorów Surova /2-9/, Razumowa /2-21/ i Maciejewskiego /2-24/ wykazała, że wydajność tych ujęć jest wprost proporcjonalna do wartości współczynnika filtracji k_f warstwy wodonośnej i depresji obliczeniowej s , w istotny sposób zależy od l_f , n i z oraz w niewielkim stopniu od r_0 i H_w . Przedstawiony w pracy [22] obraz zależności funkcyjnych ulega pewnej zmianie, jeśli wziąć pod uwagę występujące w trakcie przepływu wody przez zbieracze straty hydrauliczne i wiążący się z tym problem nierównomierności napływu wody.

2.2. Dotychczasowe próby uwzględnienia strat energetycznych w zbieraczach

Znaczne różnice między wynikami obliczeń a rezultatami z pomiarów eksploatacyjnych wynikają z pomijania strat energetycznych powstających w czasie przepływu wody wewnątrz perforowanych rur filtrowych i przyjmowania równomiernego napływu wody wzdłuż zbieraczy przy wyprowadzaniu wzorów [12, 22, 23, 28, 39, 51, 61, 64].

Uwzględnienie strat hydraulicznych w obliczeniach wydajności omawianych ujęć prowadzi do zwiększenia depresji pozornej w studni zbiorczej ujęcia, a tym samym wpływa na zmniejszenie się obliczonej wydajności. Wielkość tych strat determinuje rozkład napływu wody do zbieraczy [31, 53].

2.2.1. Metody przybliżone

Próby przybliżonego określenia wpływu strat hydraulicznych wewnątrz zbieraczy na wydajność ujęcia podejmowano w pracach [14, 15, 41, 48, 61]. Autorzy tych prac określali wysokość strat w zbieraczach w funkcji współczynnika oporów λ rur pełnościennych. Z tego względu wyniki przez nich uzyskiwane są rozbieżne [39], np.: obliczenia wg wzoru podanego w pracy [64] prowadzą do 2,

3-krotnego zaniżenia wysokości strat zmierzonych w warunkach polowych przez Stefańczyka [47] lub obliczonych z dokładnych wzorów Siwonina [53,54,55,56] - uzyskanych na podstawie badań laboratoryjnych.

Pierwszą analityczną próbą uwzględnienia zmian wysokości ciśnienia na długości zbieraczy spowodowanych stratami hydraulicznymi w rurach filtrowych były prace Z. Glinickiego i M. Romana [14,15]. Jako wyjściowy przyjęto do rozważań wzór Viediernikova, odnoszący się do zespołu równoległych względem siebie zbieraczy, przystosowując go do układu promienistego w sposób analogiczny do Ostrowskiego /p. 2.1.1.2/. Zmodyfikowany wzór Viediernikova przedstawiono w postaci:

$$Q_u = n \sum_{i=1}^m \frac{2\pi \cdot k_f \cdot l_x \cdot (H + z - h_{wi})}{\ln \sinh \frac{2\pi \cdot z}{a_i} - \ln \sinh \frac{\pi \cdot r_0}{a_i}}, \quad /2-26/$$

gdzie: h_{wi} - zmienna na długości wysokość ciśnienia wewnątrz zbieracza w stosunku do ciśnienia atmosferycznego, m H_2O .

Zastosowanie wzoru /2-26/ wymaga znajomości rozkładu wysokości ciśnienia wzdłuż zbieraczy. Wzór /2-26/, podobnie jak wzór /2-8/, odnosi się w zasadzie do ujęć o dużej liczbie długich zbieraczy, założonych w nieograniczonej warstwie wodonośnej.

Podobną próbę uwzględnienia strat hydraulicznych we wzorze na wydajność ujęć promienistych podjął Z. Stefańczyk w pracach [48,49]. Autor na podstawie rozważań teoretycznych i wyników pomiarów terenowych wysokości strat hydraulicznych w zbieraczach czynnego ujęcia [47] sformułował następujący wzór:

$$Q_u = \frac{2 \cdot U_w \cdot k_f \cdot l_f \cdot n \cdot s_p}{1 + \sqrt{1 + 3/U_w \cdot k_f \cdot l_f / 2 \cdot \left(\frac{0,89 \alpha_o}{g \cdot F_o^2} + \delta_o \cdot C_o \cdot l_f / s_p \right)}},$$

/2-27/

gdzie: $U_w = f/r_o$, l_f , H_w , z , n - ze wzorów J. Wernera lub N.N. Vierigina [49],

α_o , δ_o - współczynniki empiryczne,

F_o - powierzchnia przekroju poprzecznego zbieracza, m^2 ,

C_o - współczynnik oporności właściwej rur filtrowych, s^2/m^6 .

Wzór /2-27/ ma charakter przybliżony. Dotyczy wyłącznie ujęć, w których wysokość strat hydraulicznych powstających wewnątrz zbieraczy równa jest połowie wartości depresji pozornej s_p w studni zbiorczej.

2.2.2. Metody udoskonalone

Z. Glinicki i M. Roman zaproponowali [14,15] wykreślny sposób korygowania depresji obliczonej ze wzoru /2-10/ Połubarinowej - K oćiny, o wielkość strat hydraulicznych w zbieraczach, obliczonych z przybliżonego wzoru Pietrova [14], uwzględniającego zmianę masy płynącej w zbieraczu wody. Idea tej metody znajduje do dziś zastosowanie. Polega na wykreśleniu podstawowej charakterystyki wydajności ujęcia: $Q_u = f / s$ - na podstawie wzorów /linia prosta/ i dodaniu do jej rzędnych wartości strat energetycznych Δh_g , powstających wewnątrz zbieraczy, w czasie przepływu wody do studni zbiorczej. Otrzymana w ten sposób nowa charakterystyka: $Q_u = f / s_p$ - znacznie lepiej odwzorowuje zależność między wydajnością a depresją mierzoną wewnątrz studni zbiorczej. Stosowanie podanej metody zaleca Mielcarzewicz [27,28], Razumov [3,41], Siwoń [39,55] i Wieczysty [63,64].

Obliczanie depresji pozornej z uwzględnieniem Δh_s należy wg pracy [64] wykonywać wówczas, gdy wydajność pojedynczego zbieracza jest przy maksymalnej depresji większa od $0,030 \text{ m}^3/\text{s}$, bądź gdy jego średnica jest równa lub mniejsza od 100 mm. W tych warunkach stosowany był zazwyczaj [64] wzór podany przez Razumowa:

$$\Delta h_s = \sqrt{1 + \frac{\lambda_p}{e} \cdot \frac{1_r}{d_w} / \frac{V_{ob}^2}{2g}} + \sqrt{1 + \lambda \cdot \frac{1_o}{d_w} / \frac{V^2}{2g}}, \quad /2-28/$$

gdzie: λ_p - współczynnik oporów liniowych w perforowanym odcinku zbieracza, przyjmowany w wysokości $3 \div 4/\lambda$,

e - współczynnik zależny od rozkładu jednostkowych dopływów wody wzdłuż perforowanego odcinka zbieracza;

$e = 1 \div 3$ - w przypadku koncentracji dopływu u czoła zbieracza,

$e = 3$ - jeżeli dopływ jest rozłożony równomiernie,

$e > 3$ - jeżeli koncentracja dopływu występuje w pobliżu studni zbiorczej.

V - średnia prędkość przepływu wody w przekroju pełnościennego odcinka zbieracza, m/s,

V_{ob} - obliczeniowa prędkość przepływu wody wzdłuż perforowanej części zbieracza, przyjmowana w wysokości połowy prędkości V , m/s.

Pierwszy człon wzoru /2-28/ określa wysokość strat ciśnienia w czasie przepływu wody wewnątrz perforowanego odcinka zbieracza, zaś drugi - wzdłuż odcinka pełnościennego. Przy obliczaniu wydajności ujęć promienistych najczęściej przyjmuje się $e = 3$, tj. zakłada się, że dopływ wody do zbieracza jest rozłożony na jego długości równomiernie [43, 61].

Wzór /2-28/ Razumova ma charakter przybliżony, nie uwzględnia

m.in. kształtu, rozmieszczenia i wielkości otworów perforacji, rodzaju materiału rur filtrowych, a także zmiany wartości współczynnika tarcia λ_p wraz ze zmianą średniej prędkości przepływu wody wzdłuż zbieraczy. Wymienione parametry uwzględnione są w dużej mierze we wzorach Siwonina [53,55], dzięki temu obliczone na ich podstawie wielkości wykazują znaczną zgodność z wynikami pomiarów terenowych [47]:

$$\Delta h_s = \frac{1 + \eta_p / \alpha_o}{2g} / V^2 - v_p^2 / + \frac{1 \lambda_{ot} + \lambda_{tk} \cdot B' / \cdot l_f}{2g d_w} \cdot$$

$$\cdot \left[\frac{v_p^2}{2} + \frac{2 v_p / V - v_p /}{m' + 1} + \frac{1 / V - v_p /^2}{2 \cdot m' + 1} \right] + 1 + \lambda \frac{l_o}{d_w} / \frac{v^2}{2g} ,$$

/2-29/

gdzie: η_p - współczynnik korekcyjny, uwzględniający łączny wpływ nieciągłości bocznego dopływu oraz wpływ kąta zawartego między dopływającymi strugami cieczy a osią głównego strumienia. W warunkach gdy przepuszczalność ścianek rury filtrowej jest większa od 0,03, można przyjmować w obliczeniach: $1 + \eta_p / \cdot \alpha_o = 1,86$,

v_p - średnia prędkość przepływu w najdalszym od studni przekroju rury filtrowej, m/s,

λ_{ot} - zastępczy współczynnik oporów liniowych, wywołany obecnością otworów perforacji, obliczany ze wzoru:

$$\lambda_{ot} = 0,0106 \cdot \varphi_o^{0,413} , \quad /2-30/$$

λ_{tk} - współczynnik oporów liniowych wywołany podstawową chropowatością ścianki perforowanej rury odniesiony do prędkości V , obliczany ze wzoru:

$$\lambda_{tk} = 0,11 / \frac{k_z}{d_w} + 0,282 \varphi_o^{2,40} + \frac{68}{Re} /^{0,25} , \quad /2-31/$$

B' - współczynnik charakteryzujący wpływ zmian współczynnika oporów λ_t w rurze perforowanej na wielkość liniowych oporów tarcia. Dla $\varphi_0 \geq 0,10$ - $B' = 1,0$, wówczas:

$$\lambda_p = \lambda_{ot} + \lambda_{tk} , \quad /2-32/$$

m' - współczynnik charakteryzujący rozmieszczenie jednostkowych dopływów bocznych wzdłuż perforowanej rury, przy równomiernym ich rozmieszczeniu przyjmuje się: $m' = 1$.

Zakładając we wzorze /2-29/ $V_p = 0$ oraz $m' = 1$ otrzymamy:

$$\Delta h_s = /1,86 + \lambda_p \cdot \frac{l_f}{3 \cdot d_w} / \frac{V^2}{2g} + /1 + \lambda \frac{l_o}{d_w} / \frac{V^2}{2g} , \quad /2-33/$$

Przydatność wzoru /2-33/ wykazano m.in. w pracy [23] , Zadanie polegało na wyznaczeniu wydajności Q_u infiltracyjnego ujęcia promienistego dla zadanych wartości depresji s_p w studni zbiorczej oraz określonych parametrach konstrukcyjnych i hydrogeologicznych ujęcia.

Analiza fizykalna zjawiska /rys. 2-1/ dokonana w pracy [22] pozwoliła na sformułowanie następującego równania wyjściowego:

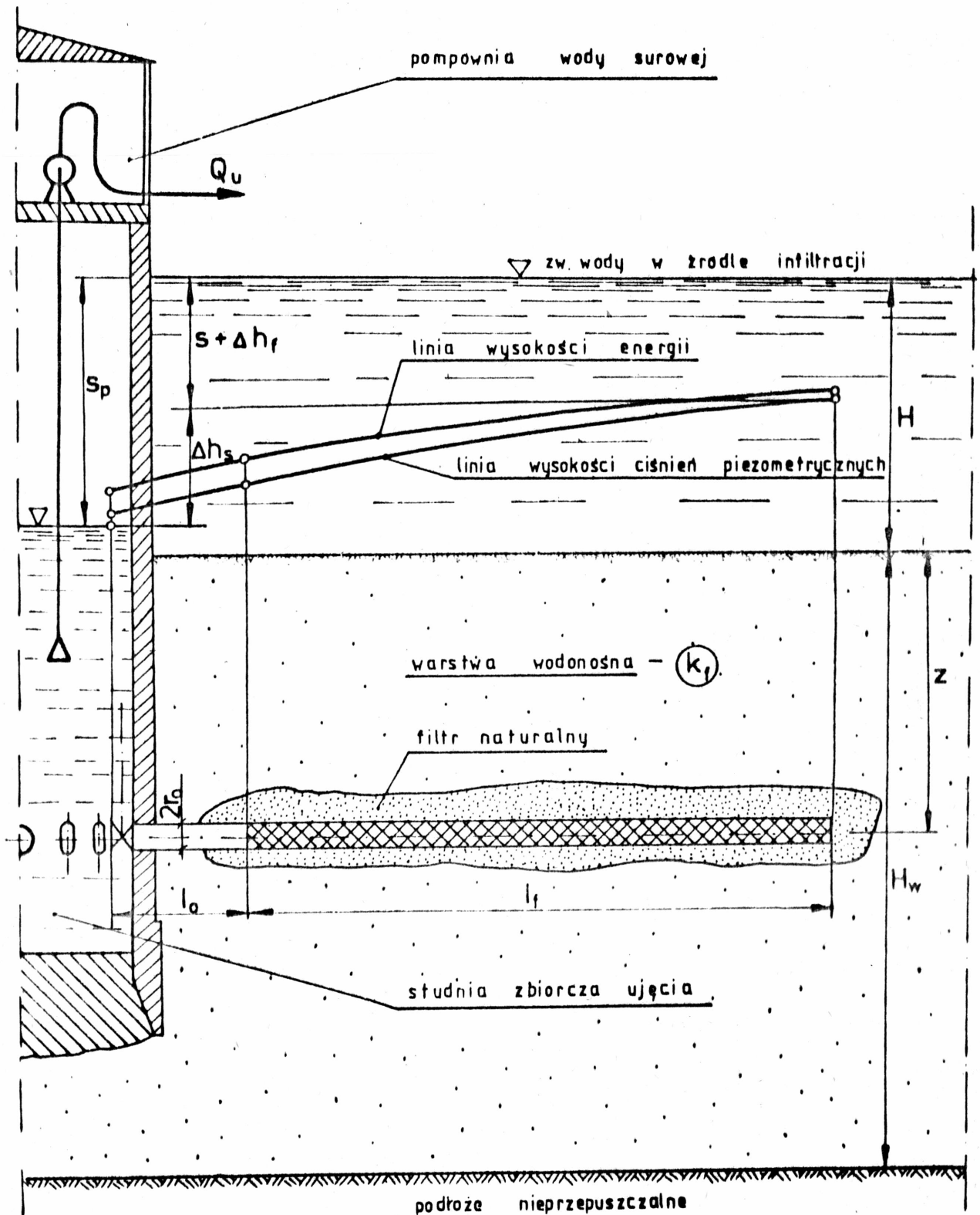
$$s + \Delta h_f + \Delta h_s - s_p = 0 , \quad /2-34/$$

gdzie: s - depresja obliczeniowa uzyskana drogą przekształceń wzorów: Surova /2-9/, Razumova /2-21/ i Maciejewskiego /2-24/, m,

Δh_f - wysokość strat hydraulicznych na przepływie wody przez naturalny filtr wytwarzający się wokół zbieracza, obliczona ze wzoru Abramova /WODGEO/:

$$\Delta h_f = 0,01 \cdot a_e \cdot \sqrt{\frac{s_p \cdot Q_u}{\pi \cdot d_f \cdot n \cdot l_f \cdot k_f}} , \text{ m} ,$$

/2-35/



Rys. 2-1 Schemat ujęcia promienistego w warunkach infiltracji

gdzie: a_e - współczynnik empiryczny, którego wartość dla filtrów perforowanych przyjmuje się w granicach $6 \div 10$ [28],

d_f - średnica filtra naturalnego [44]:

$$d_f \approx d_w + 2 \cdot \delta + 0,20, \text{ m}$$

Δh_s - wg wzoru /2-33/ podstawiając za V wyrażenie:

$$V = \frac{4 \cdot Q_u}{\pi \cdot d_w^2 \cdot n} \quad /2-36/$$

Celem sprawdzenia dokładności udoskonalonej metody obliczania podstawowej charakterystyki wydajności omawianych ujęć, porównano dla przykładu wyniki obliczeń z danymi eksploatacyjnymi Ujęcia Zasadniczego w Warszawie. Stwierdzono, że wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie formuł: Surova /2-9/ i Maciejewskiego /2-24/, skorygowane o wartości strat energetycznych uzyskane ze wzorów /2-33/ i /2-35/ są dla warunków ujęcia warszawskiego zgodne z wynikami pomiarów. Natomiast wyniki obliczeń wg ^{wzoru} Razumova /2-21/, mimo korekty, wykazały około 50% odchyłki.

Podobną próbę podjął W. Stefański w pracy [50]. W celu zmniejszenia różnic między wynikami obliczeń wydajności $/Q_u/$, a danymi eksploatacyjnymi Ujęcia Praskiego, Stefański zaproponował uwzględnianie poprawki Δs w obliczaniu depresji omawianych ujęć. Przy przyjęciu równomiernego dopływu wody do zbieraczy depresję obliczeniową s obliczyć można ze wzoru [51]:

$$s = s_p - \Delta s = s_p - \left[\lambda_p \cdot \frac{1}{4 \cdot d_w} + 1 + \lambda \cdot \frac{1}{d_w} \cdot \frac{v^2}{2g} \right], \quad /2-37/$$

gdzie: λ_p - określane ze wzorów /2-30/, /2-31/ i /2-32/ Siwonina.

Przeprowadzone badania laboratoryjne ujęcia promienistego oraz analiza wyników pomiarów eksploatacyjnych Ujęcia Praskiego wykazały,

że procentowe różnice R między wydajnością obliczoną ze wzorów: Surova /2-9/, Ostrowskiego /2-8/ i Połubarinowej - Kočiny /2-13/ bez uwzględnienia oporów hydraulicznych w zbieraczach, a pomierzoną zawarte są w granicach [51] :

- wg wzoru /2-9/ $2,5\% \leq R \leq 95\%$,
- wg wzoru /2-8/ $2,5\% \leq R \leq 100\%$,
- wg wzoru /2-13/ $30\% \leq R \leq 140\%$,
- natomiast z uwzględnieniem proponowanej poprawki Δs :
 - wg wzoru /2-9/ $-7\% \leq R \leq 45\%$,
 - wg wzoru /2-8/ $-10\% \leq R \leq 50\%$,
 - wg wzoru /2-13/ $-17\% \leq R \leq 80\%$.

2.2.3. Analiza metod uwzględniających straty energetyczne w zbieraczach

Przedstawione w p. 2.2. wyniki badań wpływu strat hydraulicznych powstających podczas ruchu wody w zbieraczach na wydajność infiltracyjnych ujęć promienistych, wskazują na konieczność uwzględnienia ich w obliczeniach. Najwłaściwsze są tutaj wzory Siwonina /2-29/ i /2-33/, poprawnie opisujące zjawisko strat energetycznych w rurach filtrowych. Wysokość strat uzależniona jest w nich od: chropowatości ścian zbieraczy, stopnia perforacji, nierównomierności napływu wody i wartości współczynnika oporów liniowych λ_p .

Należy jednak stwierdzić, że zasadnicze różnice między wynikami obliczeń i pomiarów wynikają nie tyle z nieuwzględnienia strat hydraulicznych w zbieraczach, ile z zastosowania nieodpowiedniego dla danych warunków wzoru, określającego zależność Q_u/s . Można to łatwo stwierdzić stosując dla konkretnych warunków różne wzory. W tym przypadku korygowanie uzyskanych wyników w omówiony poprzednio sposób, daje dobre rezultaty tylko w odniesieniu do

wyników obliczeń, przeprowadzonych na podstawie odpowiednio dobrane-
go wzoru [12,22,23,51,61].

2.3. Wnioski z analizy dotychczas stosowanych metod obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych

Przeprowadzona analiza dotychczasowego stanu wiedzy na temat
metod obliczania promienistych ujęć wody umożliwia sformułowanie
następujących wniosków:

- 1/ Wzory i formuły określające zależność wydajności ujęcia promie-
nistego od szeregu parametrów i czynników, a wyprowadzone przy
wykorzystaniu metody odwzorowań wiernokątnych, źródeł dodat-
nich i ujemnych oraz metody analogii elektrohydrodynamicznej,
jak np. wzory: Maciejewskiego /2-24/, Ostrowskiego /2-8/, Po-
łubarinowej - Kočiny /2-13/, Razumova /2-21/ i Surova /2-9/,
pomijają straty energetyczne powstające w zbieraczach i oparte
są na założeniu równomiernego napływu wody do filtrów na całej
ich długości. Z tego względu uzyskane w wyniku obliczeń wydaj-
ności ujęć zazwyczaj znacznie przekraczają wartości uzyskiwane
w czasie pompowań.
- 2/ Uwzględnianie strat energetycznych w zbieraczach przy oblicza-
niu wydajności ujęć na podstawie dotychczas stosowanych wzorów
zbliża uzyskane rezultaty do rzeczywistości, jednak nie stano-
wi jednoznacznego rozwiązania zadania. Nie uwzględniony zosta-
je w dalszym ciągu wpływ zmiany wysokości ciśnienia wzdłuż
zbieraczy na nierównomierność napływu wody do rur filtrowych,
jak również na wzajemne oddziaływanie zbieraczy.
- 3/ Rozpowszechnione obecnie metody obliczeń infiltracyjnych ujęć
promienistych dalekie są od doskonałości, co wynika z uprosz-
czeń modelowych jak i z trudności w analitycznym rozwiązywaniu

bardziej skomplikowanych zadań. Konieczne jest zatem kontynuowanie badań na modelach fizycznych w celu dokładniejszego opisu zjawisk towarzyszących czerpaniu wody z ujęcia promienistego i ustawienie formuł ujmujących je bardziej kompleksowo.

3. CEL I ZAKRES PRACY

Celem prezentowanej dysertacji jest zbadanie wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na wydajność ujęcia promienistego ze zbieraczami, umieszczonymi symetrycznie pod dnem obszaru infiltracji w jednorodnej i izotropowej warstwie gruntu, przy zachowaniu ciągłości strugi wody infiltrującej przez dno zbiornika w głąb warstwy wodonośnej.

Celem pracy jest również znalezienie zależności funkcyjnej między wydajnością ujęcia a tymi parametrami, która mogłaby być wykorzystana do hydraulicznego obliczania infiltracyjnych ujęć promienistych.

Badaniami objęto wpływ długości, liczby i zagłębienia zbieraczy przy przyjęciu określonej średnicy rur filtrowych, jak również wpływ miąższości warstwy wodonośnej na wydajność ujęcia.

Brak podstaw do określania wielkości współczynnika oporów liniowych λ_p , użytych do badań modelowych perforowanych rur mosiężnych, zwłaszcza w obszarze strefy przepływów laminarnych i strefy przejściowej, spowodował konieczność rozszerzenia zakresu pracy o to zagadnienie.

4. WYBÓR TYPU I WIELKOŚCI MODELU

Analiza stanu wiedzy w zakresie podstaw projektowania infiltracyjnych ujęć promienistych przeprowadzona w rozdziale 2, jak również sprecyzowany w rozdziale 3 cel pracy skłoniły autora do podjęcia badań na przestrzennym modelu gruntowym /hydraulicznym/.

Na podstawie prawideł wynikających z teorii podobieństwa mechanicznego i analizy wymiarowej określono:

- istotę podobieństwa zjawisk w naturze i w modelu,
- skalę modelu,
- metodykę przeliczania wyników uzyskanych z pomiarów w modelu na wielkości naturalne.

4.1. Wybrane elementy teorii podobieństwa mechanicznego

Teoria podobieństwa mechanicznego umożliwia jakościowy i ilościowy opis zjawiska rzeczywistego na podstawie badań modelowych. Do osiągnięcia warunków takiego podobieństwa potrzebne jest spełnienie podobieństwa geometrycznego, kinematycznego i dynamicznego [8,46,57,67].

Warunki podobieństwa geometrycznego:

- dwa układy są do siebie geometrycznie podobne, jeżeli długości odpowiadających sobie odcinków w naturze i w modelu pozostają w stałym stosunku liczbowym równym:

$$\xi_1 = \frac{l_N}{l_M}, \quad /4-1/$$

gdzie: ξ_1 - skala długości,

l_N - długość odcinka w naturze,

l_M - długość odcinka w modelu.

Z warunku /4-1/ wynika podobieństwo powierzchniowe:

$$\xi_F = \xi_1^2 = \frac{F_N}{F_M}, \quad /4-2/$$

gdzie: ξ_F - skala powierzchni,

F_N - powierzchnia w układzie rzeczywistym,

F_M - powierzchnia w układzie modelowym.

Warunki podobieństwa kinematycznego:

- w dwu kinematycznie podobnych układach pola przepływu są do siebie geometrycznie podobne. Podstawą podobieństwa jest skala czasu:

$$\xi_t = \frac{t_N}{t_M}, \quad /4-3/$$

gdzie: ξ_t - skala czasu,

t_N - czas przebiegu zjawiska w naturze,

t_M - czas przebiegu zjawiska w modelu.

Skala prędkości ξ_v :

$$\xi_v = \frac{v_N}{v_M} = \frac{\xi_1}{\xi_t} \quad /4-4/$$

Skala przyspieszeń ξ_g :

$$\xi_g = \frac{g_N}{g_M} = \frac{\xi_1^2}{\xi_t^2} \quad /4-5/$$

Warunki podobieństwa dynamicznego:

- aby zachodziło podobieństwo dynamiczne między naturą a modelem, liczby Newtona w obu układach muszą być sobie równe. Definicja ta stanowi ogólne prawo podobieństwa dynamicznego zjawisk, które zapisać możemy następująco:

$$Ne_N = Ne_M, \quad /4-6/$$

gdzie: Ne - liczba Newtona,

N, M - indeksy wielkości: w naturze i w modelu.

Na dowolną cząstkę poruszającej się cieczy działają siły:

naporu, ciężkości, tarcia wewnętrznego, sprężystości i napięcia powierzchniowego. Z równania /4-6/ wynikają szczegółowe prawa podobieństwa poszczególnych sił:

- naporu, $Eu_N = Eu_M$ - kryterium Euler'a /4-7/
- ciężkości, $Fr_N = Fr_M$ - kryterium Froude'a /4-8/
- tarcia, $Re_N = Re_M$ - kryterium Reynolds'a /4-9/
- sprężystości, $Ca_N = Ca_M$ - kryterium Cauchy'ego /4-10/
- napięcia, $We_N = We_M$ - kryterium Weber'a /4-11/

Spełnienie wszystkich kryteriów podobieństwa nie jest możliwe, ponieważ nie są znane dwie ciecz o takich własnościach fizycznych, które pozwoliłyby na równoczesne spełnienie równań /4-7/ ÷ /4-11/. Wynika stąd, że prowadzenie badań modelowych z zachowaniem pełnego podobieństwa dynamicznego nie jest osiągalne [31, 57, 61]. W praktyce nie każda z wymienionych sił ma jednakowy wpływ na przebieg badanego zjawiska i najczęściej tylko jedna lub najwyższej dwie odgrywają decydującą rolę, a pozostałe nie mają większego znaczenia i można je pominąć. W tym przypadku zadowalamy się tzw. podobieństwem niepełnym, które polega na tym, że spełnione zostaje jedno lub dwa kryteria podobieństwa związane z siłami uznanymi za dominujące w danym zjawisku.

W badaniach modelowych infiltracyjnego ujęcia promienistego za decydujące uznano siły ciężkości i tarcia wewnętrznego. Podobieństwo dynamiczne zjawisk polegało więc na spełnieniu kryterium Froude'a /4-8/ i kryterium Reynolds'a /4-9/.

4.2. Dobór skal modelu

W przypadku badań modelowych ujęć promienistych należy rozróżnić:

- 1/ dopływ wody do zbieraczy przez warstwę gruntu, przy zachowaniu prawa Darcy,

2/ przepływ wody wewnątrz zbieraczy, przy zachowaniu ważności wzorów Darcy - Weisbach'a i Siwonina.

Ad.1/ Laminarny przepływ wody w gruncie opisuje równanie Darcy w postaci:

$$V_f = k_f \cdot J, \quad /4-12/$$

Prawo Darcy /4-12/ jest spełnione dla wartości liczby Reynolds'a $Re < 5$, określonej ze wzoru [63]:

$$Re = \frac{V_f \cdot d_e}{\nu \cdot n_p^{0,33}}, \quad /4-13/$$

Ad.2/ W czasie ruchu wody wzdłuż perforowanego odcinka zbieracza zasilanego bocznym dopływem, następuje dyskretna zmiana masy głównego strumienia cieczy i w konsekwencji zmiana średniej prędkości przepływu. Różnicę ciśnień piezometrycznych /mierzoną wysokością słupa wody/ wzdłuż odcinka zbieracza o długości l_f , a także na długości l_o , określić można ze wzoru /2-29/ [55].

Hydromechaniczne podobieństwo przepływu w naturze i w modelu jest zachowane wówczas, gdy liczba Froude'a jest jednoznaczna funkcją liczby Reynolds'a [57]:

$$Fr = C \cdot J \cdot Re, \quad /4-14/$$

gdzie: C - współczynnik proporcjonalności.

Z analizy równania /4-14/ wynika, że w badaniach modelowych nie można posługiwać się takim samym płynem jaki występuje w rzeczywistości, a ponadto, że konieczne jest zachowanie podobieństwa geometrycznego wewnętrznych powierzchni rur filtrowych. Modelowanie przepływu wody w zbieraczach jest dotychczas praktycznie nierozwiązane. Zadowalamy się tutaj częściowym podobieństwem, tj. spełnieniem kryterium Froude'a [31].

W obu przypadkach ruchu wody w modelu, tj. przepływu w gruncie i wewnątrz zbieraczy, zachowane jest prawo ciągłości ruchu. Znaczy to, że masa wody dopływająca do zbieraczy w jednostce czasu równa jest masie wody odprowadzonej w tym samym czasie przez zbieracze. Spełnienie warunku ciągłości, a także kryterium Reynolds'a odnośnie do przepływu w gruncie oraz Froude'a do przepływu w zbieraczach, umożliwia odniesienie wielkości zmierzonych w modelu do warunków naturalnych za pomocą odpowiednich skal podobieństwa. Ponieważ geometryczne wymiary modelu określone zostały za pomocą jednej skali - ξ_1 /4-1/, to spadki hydrauliczne są modelowane w skali 1:1. Korzystając z prawa Darcy /4-12/ możemy napisać:

$$\xi_V = \xi_{kf} \cdot \xi_J = \xi_{kf}, \quad /4-15/$$

gdzie: $\xi_{kf} = \frac{k_{fN}}{k_{fM}}$ - skala współczynnika filtracji,

$$\xi_J = \frac{J_N}{J_M} = 1 - \text{skala spadków hydraulicznych.}$$

Stosując prawo ciągłości przepływu objętościowego / $Q = VF$ / oraz wykorzystując zależność /4-2/ otrzymamy:

$$\xi_Q = \xi_V \cdot \xi_F, \quad /4-16/$$

gdzie: $\xi_Q = \frac{Q_N}{Q_M}$ - skala przepływów.

Wprowadzając do równania /4-16/ zależności opisane wzorami /4-2/ i /4-15/ otrzymamy:

$$\xi_Q = \xi_{kf} \cdot \xi_1^2, \quad /4-17/$$

- jest to podstawowy wzór na przeliczanie wydajności ujęcia pomierzone w modelu na wydajności w naturze. Istotną trudność stanowi w nim ustalenie skali współczynnika filtracji ξ_{kf} . Wychodząc z prawa ciągłości ruchu, przy zachowaniu kryterium Froude'a dla przepływu wewnątrz zbieraczy w postaci:

$$\frac{\xi_V^2}{\xi_g \cdot \xi_1} = 1, \quad /4-18/$$

oraz przyjmując $\xi_g = 1$ otrzymamy skalę prędkości:

$$\xi_V = \xi_1^{0,5} = \xi_{kf} \quad /4-19/$$

Skala prędkości określona za pomocą /4-19/ jest słuszna przy przyjęciu skali współczynnika tarcia zbieraczy $\xi_\lambda = 1$. Oznacza to równość:

$$\lambda_N = \lambda_M \quad /4-20/$$

Spełnienie tego warunku w badaniach modelowych /pomniejszony obiekt rzeczywisty $\xi_1 > 1/$ nie jest możliwe, gdyż wartości $\lambda = f / Re /$ są różne w modelu i w rzeczywistości. Nie spełnienie warunku /4-20/ prowadzi do doświadczalnego określenia ξ_V , a ściślej nie znanego wykładnika potęgowego x przy ξ_1 we wzorze /4-19/, który w tej sytuacji przyjmuje postać:

$$\xi_V = \xi_1^x = \xi_{kf} \quad /4-21/$$

Wprowadzając zależność /4-21/ do wzoru /4-17/ otrzymamy ostatecznie:

$$\xi_Q = \xi_1^{x+2} \quad /4-22/$$

4.3. Wybrane elementy analizy wymiarowej

Zadaniem analizy wymiarowej jest poprawne pod względem wymiarowym ustawienie postaci wzorów fizykalnych [57,67]. Każdemu równaniu fizykalnemu opisującemu pewne zjawiska, można przyporządkować równanie wymiarowe w podstawowym układzie wielkości.

W zjawiskach kinematycznych, do których należy zaliczyć modelowanie dopływu wody do infiltracyjnych ujęć promienistych, układ podstawowy tworzą: długość L i czas T . Symbole i wymiary występujących tutaj wielkości podano w tabeli 4-1.

T a b e l a 4-1

Wymiary niektórych wielkości układu LT

Lp.	Wielkość, w	Symbol	Wymiar, [W]
1	Czas	t	T
2	Długość, promień, średnica	l, r, d	L
3	Powierzchnia	F	L ²
4	Prędkość liniowa	V	L T ⁻¹
5	Lepkość kinematyczna	ν	L ² T ⁻¹
6	Objętościowe natężenie przepływu	Q	L ³ T ⁻¹

Iloczyny bezwymiarowe π_i wielkości w_i tworzą układ równań postaci:

$$\begin{aligned}
 \pi_1 &= w_1^{x_1} \cdot w_2^{y_1} \cdot w_3 \\
 \pi_2 &= w_1^{x_2} \cdot w_2^{y_2} \cdot w_4 \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 \pi_{k-2} &= w_1^{x_{k-2}} \cdot w_2^{y_{k-2}} \cdot w_k
 \end{aligned}
 \quad /4-23/$$

gdzie: k - liczba uwzględnionych wielkości w.

Rozwiązanie powyższego układu równań prowadzi do znalezienia liczbowych wartości wykładników x_i, y_i i określenia bezwymiarowych iloczynów π_i , co z kolei umożliwia wyprowadzenie poszukiwanej zależności jakościowego opisu zjawiska, postaci:

$$\pi_1 = F / \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{k-2} / , \quad /4-24/$$

Podobieństwo iloczynów π_i w naturze i w modelu stanowi zarazem kryterium podobieństwa badanych zjawisk.

Analiza fizykalna wpływu parametrów konstrukcyjnych, hydrogeo-

logicznych i eksploatacyjnych na wydajność infiltracyjnych ujęć promienistych, umożliwia sformułowanie następującej funkcji ^{wydajności} tych ujęć [22] /2-1/:

$$Q_u = f / n, l_f, z, r_o, H_w, k_f, s_p / .$$

W równaniu /2-1/ występuje osiem wielkości w, tworzących 6 iloczynów bezwymiarowych π :

$$\pi_1 = k_f^{x_1} \cdot r_o^{y_1} \cdot Q_u ,$$

$$\pi_2 = k_f^{x_2} \cdot r_o^{y_2} \cdot n ,$$

$$\pi_3 = k_f^{x_3} \cdot r_o^{y_3} \cdot l_f , \quad /4-25/$$

$$\pi_4 = k_f^{x_4} \cdot r_o^{y_4} \cdot z ,$$

$$\pi_5 = k_f^{x_5} \cdot r_o^{y_5} \cdot H_w ,$$

$$\pi_6 = k_f^{x_6} \cdot r_o^{y_6} \cdot s_p .$$

Rozwiązując układ równań /4-25/ otrzymano:

$$\pi_1 = \frac{Q_u}{k_f \cdot r_o^2} ; \quad \pi_2 = n ; \quad \pi_3 = \frac{l_f}{r_o} ; \quad \pi_4 = \frac{z}{r_o} ; \quad \pi_5 = \frac{H_w}{r_o} ; \quad \pi_6 = \frac{s_p}{r_o}$$

/4-26/

- stąd jakościowy opis charakterystyk hydraulicznych ujęcia przedstawiać można w postaci:

$$\frac{Q_u}{k_f \cdot r_o^2} = F \left(n, \frac{l_f}{r_o}, \frac{z}{r_o}, \frac{H_w}{r_o}, \frac{s_p}{r_o} \right) , \quad /4-27/$$

lub

$$Q_u = B_o \cdot k_f \cdot r_o^2 \cdot n^{b_1} \cdot \left(\frac{l_f}{r_o} \right)^{b_2} \cdot \left(\frac{z}{r_o} \right)^{b_3} \cdot \left(\frac{H_w}{r_o} \right)^{b_4} \cdot \left(\frac{s_p}{r_o} \right)^{b_5} , \quad /4-28/$$

Wartości wykładników potęgowych $b_1 \div b_5$ i współczynnika B_o można wyznaczyć na podstawie analizy fizycznej lub doświadczalnie.

Postać równania /4-27/ nadaje się do przeprowadzenia analizy wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na wydajność modelowego ujęcia promienistego. Natomiast postać wzoru /4-28/ umożliwia jakościowy i ilościowy opis zjawiska określonego równaniem wyjściowym /2-1/.

Podobieństwo iloczynów: π_2 , π_3 , π_4 , π_5 , i π_6 określonych równaniami /4-26/, w naturze i w modelu jest zachowane, ponieważ dla tych wielkości przyjęta została jednakowa skala geometryczna ξ_1 . Z porównania bezwymiarowych iloczynów π_1 wyznaczyć można skalę przepływów /wydajności/:

$$\xi_{Q_u} = \frac{Q_{uN}}{Q_{uM}} = \frac{B_{oN} \cdot k_{fN} \cdot r_{oN}^2}{B_{oM} \cdot k_{fM} \cdot r_{oM}^2}, \quad /4-29/$$

gdzie: $B_{oN} = B_{oM}$.

Korzystając z definicji skal współczynnika filtracji i powierzchni, równanie /4-29/ przyjmuje postać analogiczną do wzoru /4-17/, a mianowicie:

$$\xi_{Q_u} = \xi_{k_f} \cdot \xi_1^2. \quad /4-30/$$

W badaniach modelowych infiltracyjnego ujęcia promienistego pomiary wydajności Q_u są prowadzone na pomniejszonym obiekcie rzeczywistym, toteż względne błędy pomiarowe wielkości fizycznych mierzonych w modelu wzrastają najczęściej wprost proporcjonalnie do wartości skali podobieństwa /4-30/ [57]. Mając to na uwadze, pomiary prowadzono w skali półtechnicznej, przyjmując $\xi_1 = 25$.

5. PROGRAM BADAŃ I OPIS STANOWISKA DOŚWIADCZALNEGO

5.1. Program badań

Cel i zakres badań został sprecyzowany w rozdziale 3. Osiągnięcie celu wymagało przeprowadzenia badań wg następującego programu:

1/ Prace przygotowawcze i pomocnicze, obejmujące:

- projekt i budowę stanowiska doświadczalnego,
- wzorcowanie modelu,
- przygotowanie stanowiska do badań,
- zmianę parametrów geometrycznych modelu.

2/ Pomiary, obejmujące:

- wydajność ujęcia przy różnych wartościach parametrów geometrycznych $/l_f, n, z, s_p, H_w/$,
- wysokość ciśnienia piezometrycznego w wybranych punktach modelu,
- temperaturę wody,
- badanie składu fizyczno-chemicznego i bakteriologicznego wody oraz gruntu.

3/ Analiza błędów wzorcowania modelu.

4/ Opracowanie wyników pomiarów w postaci funkcji obrazujących zależność wydajności od wybranych parametrów konstrukcyjnych ujęcia $/l_f, n, z/$.

5/ Próba uogólnienia wyników badań w postaci uniwersalnej formuły do obliczania wydajności ujęcia promienistego o zbieraczach, umieszczonych pod dnem obszaru infiltracji w jednorodnej i izotropowej warstwie gruntu, przy zachowaniu ciągłości strugi wody, zasilającej zbieracze ujęcia.

5.2. Stanowisko doświadczalne

Stanowisko doświadczalne wykonano przy następujących założeniach:

- skala geometryczna modelu 1:25,
- parametry geometryczne ujęcia mogą być zmieniane dyskretnie w zakresie wartości zestawionych w tabeli 5-1 [3,61,65] .

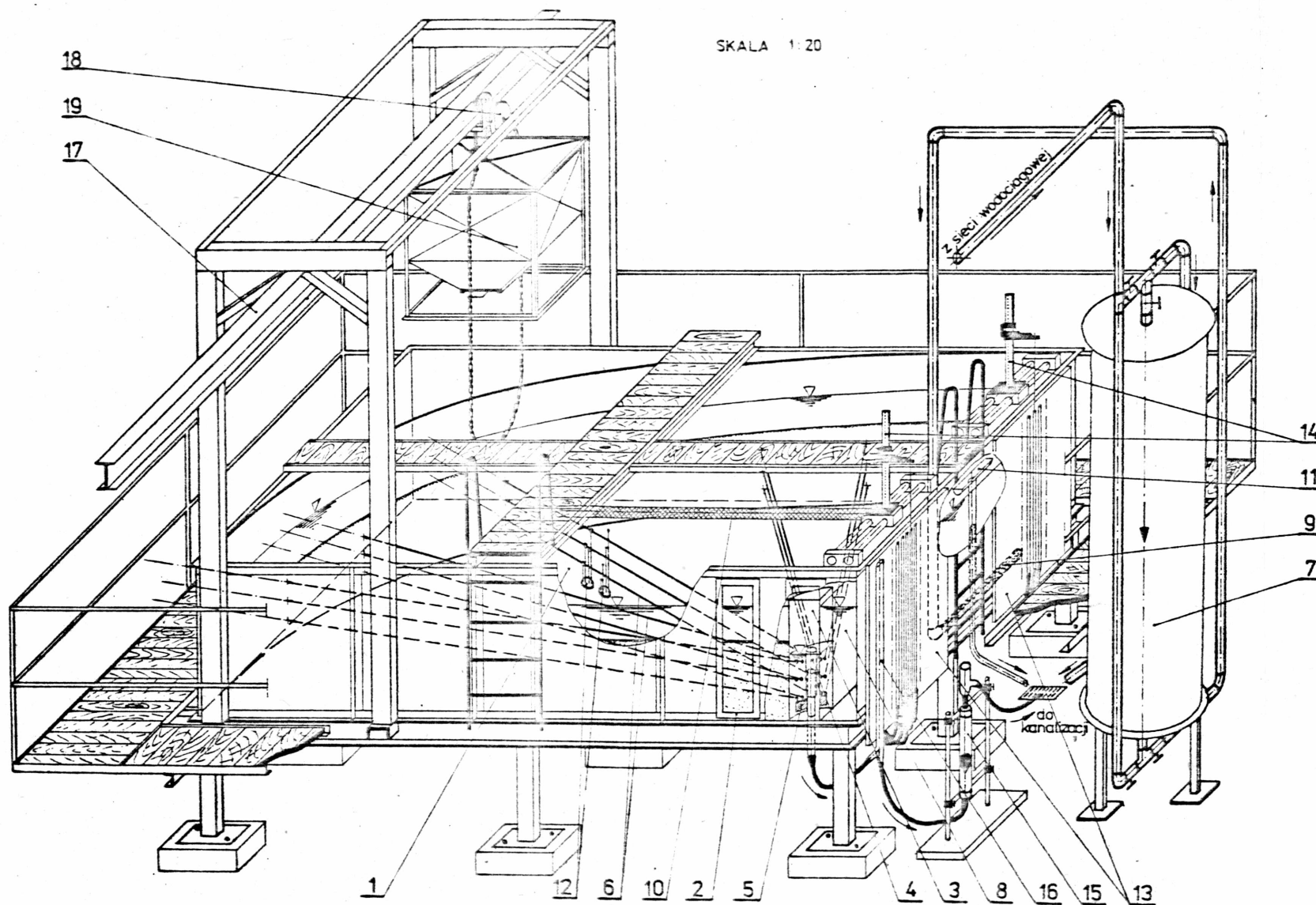
T a b e l a 5-1

Zakres zmian parametrów modelowego ujęcia wody

Lp.	Parametr zmienny - opis	Oznaczenie	Zakres zmian:	
			w skali modelowej	w skali rzeczywistej
1	Długość czynna zbieracza	l_f	500 ÷ 3600 mm	12,5 ÷ 90,0 m
2	Liczba zbieraczy	n	1 ÷ 3 szt	4 ÷ 12 szt
3	Głębokość ułożenia zbieraczy	z	120 ÷ 480 mm	3,0 ÷ 12,0 m
4	Depresja w studni zbiorczej	s_p	80 ÷ 240 mm	2,0 ÷ 6,0 m
5	Miażdżość warstwy wodonośnej	H_w	360 ÷ 600 mm	9,0 ÷ 15,0 m

- średnica zbieraczy 0,25 m [31,50,61] /w modelu 0,01 m/,
- stopień perforacji rur filtrowych 20%,
- długość pełnościennego odcinka zbieraczy 3,0 m /0,12 m/,
- warstwę wodonośną stanowi jednorodne złożo z piasku średnioziarnistego, pochodzącego z pradoliny Odry,
- głębokość wody w źródle infiltracji 4,0 m /0,16 m/,
- do badań wykorzystano wodę wodociągową, poddaną dodatkowej filtracji na filtrze pospiesznym, w celu redukcji zawartości żelaza i uniknięcia kolmatacji złoża w czasie pomiarów.

Wykonane na podstawie wymienionych założeń stanowisko doświadczalne przedstawiono schematycznie na rysunkach 5-1 i 5-2.

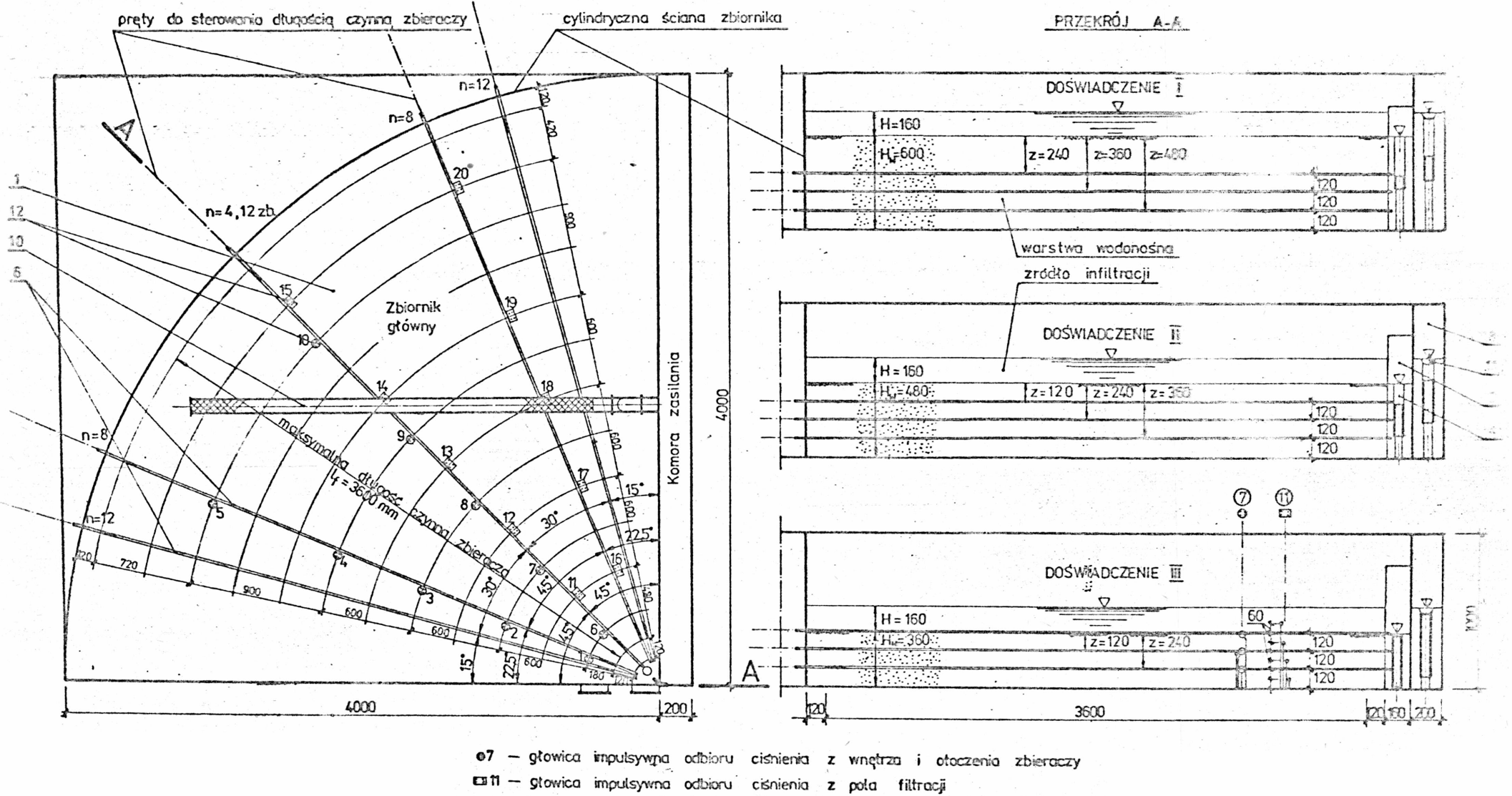


OPIS OZNACZEŃ

- 1 Zbiornik główny
- 2 Wziernik kontrolny
- 3 Studnia zbiorcza
- 4 Przelew
- 5 Filtr studzienny
- 6 Zbieracz
- 7 Filtr
- 8 Komora zasilania
- 9 Rura zasilająca
- 10 Rura rozprowadzająca
- 11 Przelew korytkowy
- 12 Głowice impulsywne
- 13 Tablice piezometrów
- 14 Wodowskozy szpilkowe
- 15 Przepływomierz płytkowy
- 16 Rura odpowietrzająca
- 17 Podciąg belkowy
- 18 Wciągarka łańcuchowa
- 19 Zbiornik na piasek

Rys. 5-1 Schemat stanowiska doświadczalnego

SKALA 1:20



Rys. 5-2 Schemat rozmieszczenia zbieraczy w modelu

Stanowisko doświadczalne do modelowych badań infiltracyjnego ujęcia promienistego składa się z pięciu zasadniczych elementów:

- 1 - otwartego zbiornika głównego w kształcie ćwiartki walca, wypełnionego gruntem, przedstawiającego obszar filtracji modelowego ujęcia wody,
- 2 - układu poziomych, symetrycznie ułożonych zbieraczy /rur filtracyjnych/, ujmujących wodę z obszaru filtracji i odprowadzających ją do studni zbiorczej ujęcia,
- 3 - urządzeń zasilająco-spustowych, zadaniem których jest utrzymanie ciągłości pracy modelowego ujęcia, tj. utrzymanie ustalonego reżimu filtracji,
- 4 - urządzeń i przyrządów pomiarowych,
- 5 - urządzeń do obsługi stanowiska.

5.2.1. Zbiornik główny

Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest zbiornik otwarty /1/ w kształcie ćwiartki walca o promieniu 4,0 m i wysokości 1,0 m, przedstawiający obszar filtracji o promieniu 100 m i wysokości 25 m w skali naturalnej /rys. 5-1/. Dno zbiornika jak i ściany boczne - ograniczające obszar filtracji modelowego ujęcia wody, usztywnia ramowa konstrukcja nośna wykonana z kształtowników. Czołowa ściana boczna zaopatrzona jest w dwa wzierniki /2/, służące do kontroli wizualnej działania modelu. Wokół stanowiska badawczego, na wysokości płyty dennej, znajduje się pomost roboczy, a na zbiorniku - pomost manewrowy.

Zbiornik wypełniony był częściowo złożem z piasku średnioziarnistego, odwzorowującego warstwę wodonośną.

5.2.2. Studnia zbiorcza z układem zbieraczy

Studnia zbiorcza ujęcia /3/, w kształcie ćwiartki walca o

promieniu 0,16 m i wysokości 0,80 m zaopatrzona jest w teleskopowy przelew /4/, umożliwiający zmianę depresji wody w studni /rys. 5-1/. Kontrola wysokości położenia przelewu odbywa się poprzez pomiar wysokości piezometrycznej na tablicy piezometrów. Czołowa ściana studni wykonana jest z metapleksu. W dolnej części studnia zbiorcza zaopatrzona jest w filtr siatkowy /5/, umożliwiający pomiar współczynnika filtracji złoża metodą pompowań próbnych.

Ujmujące wodę zbieracze /6/ wykonano z rur mosiężnych o wewnętrznej średnicy $d_w = 9,9 \pm 0,1$ mm. Zbieracze umieszczono w zbiorniku głównym symetrycznie, na trzech poziomach /rys. 5-2 i 5-4/. Każdy ze zbieraczy ma długość 3,84 m, z czego 0,24 m przypada na odcinki pełnościenne /odcinek przedfiltrowy o długości 0,12 m i zafiltrowy - $l_o = 0,12$ m/, a pozostałe 3,60 m stanowi odcinek perforowany /maksymalna długość l_f zbieracza/. Łączna długość rur filtrowych zainstalowanych w modelu wynosi 54 mb. Perforację zbieraczy wykonano okrągłymi otworami o średnicy 4,0 mm, rozmieszczonymi w szachownicę. Stopień perforacji wynosi $\varphi_o = 0,199$. Schemat sposobu rozmieszczenia otworów w ścianie rur filtrowych przedstawiono na rysunku 6-4 w p. 6.3 pracy.

W celu zabezpieczenia zbieraczy przed zapiaszczeniem, podczas zasypywania złoża jak i w czasie pracy ujęcia, rury filtrowe owinięto podwójną warstwą siatki o splocie kwadratowym $\square 1/1$ mm i pojedynczą warstwą bandaża elastycznego. Warstwy te stanowią modelowy filtr naturalny /o zewnętrznej średnicy $d_f \approx 20$ mm/, ułatwiający dopływ wody do zbieraczy.

Zmianę długości czynnej zbieraczy uzyskiwano za pomocą prętów $\varnothing 9,0$ mm, wprowadzanych do wnętrza zbieraczy. Pręty wyposażone są w uszczelki gumowe, utrudniające przepływ wody między ich powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną powierzchnią zbieraczy.

Zmianę liczby czynnych zbieraczy jak również poziomu wody w studni zbiorczej /depresja/ regulowano w studni modelowego ujęcia.

5.2.3. Urządzenia zasilające - spustowe

W skład urządzeń zasilających wchodzi: filtr pospieszny ciśnieniowy /7/, komora zasilania /8/ z przelewem korytkowym, zawory sterujące i przewody doprowadzające wodę /rys. 5-1/. Filtr pospieszny miał na celu zmniejszenie zawartości związków żelaza w wodzie wodociągowej użytej do badań. Osiągnięto redukcję tych związków w wysokości ok. 50%.

Woda doprowadzana jest do komory zasilania /8/ poprzez perforowany odcinek przewodu /9/, ułatwiający wydzielanie się gazów rozpuszczonych w wodzie. Przepływ wody z komory zasilającej do zbiornika głównego /do modelu/ odbywa się przez osadzoną przegubowo perforowaną rurę $\varnothing$ 60 mm /10/ /rys. 5-2/.

Utrzymanie stałej wysokości położenia zwierciadła wody w źródle infiltracji /ustalony dopływ wody do ujęcia/ osiągnięto przez zainstalowanie przelewu korytkowego /11/ w komorze zasilania. Przelew ten osadzony jest na rurze teleskopowej, co umożliwia regulację poziomu wody w zbiorniku /w modelu/.

5.2.4. Urządzenia i przyrządy pomiarowe

Do odbioru wysokości ciśnienia statycznego w polu filtracji, jak również ciśnienia dynamicznego w zbieraczach służą głowice impulsowe /12/ zamocowane w dnie zbiornika, w płaszczyźnie pionowej zbieraczy. Układ głowic impulsowych pokazano na rysunkach 5-2 i 5-4.

Punktowe ciśnienia statyczne odbierane są za pośrednictwem rurek miedzianych średnicy 5/9 mm, zaopatrzonych w filtr siatkowy.

Ciśnienia dynamiczne z wnętrza zbieraczy przekazują obwodowe komory, służące do wyrównania ciśnień piezometrycznych. Ogółem na modelu zainstalowano 80 punktów odbioru wysokości ciśnienia.

Do pomiaru ciśnień piezometrycznych w polu filtracji lub wewnątrz zbieraczy, a także wysokości poziomu wody w studni zbiorczej, komorze zasilania i w zbiorniku głównym, zastosowano 83 piezometry zblokowane w dwóch tablicach /13/ /rys. 5-5/. Piezometry stanowią rury szklane o średnicy 16,0 mm /tablica nr 1/ i 20,0 mm /tablica nr 2/. Tak duża średnica pozwala na pominięcie wpływu podciągania kapilarnego na poziom wody w piezometrach. Odczyty piezometrów dokonywano za pomocą dwóch wodowskazów szpilkowych /14/. Wodowskaz stanowi adaptowany głębokościomierz suwmiarkowy umieszczony na wózku, poruszającym się wzdłuż tablicy po wy poziomowanych belkach.

Pomiary wydajności modelowego ujęcia wody dokonywano przy pomocy przepływomierzy pływakowych /15/ /rotametrów/ o zakresie pomiarowym $10 \div 100 \text{ dm}^3/\text{h}$ i $100 \div 1000 \text{ dm}^3/\text{h}$. Rotametry wodne połączone są za pomocą węży gumowych z rurą odpowietrzającą /16/, do której przyłączony jest przelew ze studni zbiorczej ujęcia.

Pomiary temperatury wody dokonywano za pomocą termometrów laboratoryjnych dziesiętnych, umieszczonych w zbiorniku głównym i zasilającym, a także w studni zbiorczej ujęcia oraz na wypływie wody z rotametu.

5.2.5. Urządzenia do obsługi stanowiska

Zadaniem tych urządzeń było ułatwienie prac związanych z zasypywaniem i wymianą złoża gruntowego modelu. Do urządzeń tych zalicza się konstrukcję podciągu belkowego /17/, wciągarkę łańcuchową /18/ i pojemnik na piasek /19/. Urządzenia te przedstawiono na rysunku 5-1. Zbiornik na piasek o pojemności ca $0,2 \text{ m}^3$, ma

konstrukcję przystosowaną do załadunku i wyładunku jak również do transportu na trasie magazyn piasku - zbiornik.

5.3. Przygotowanie stanowiska do badań

Po zakończeniu budowy zbiornik poddano próbie szczelności, a następnie wypełniono go złożem filtracyjnym. W tym celu wypełniono zbiornik /1/ wodą do wysokości krawędzi przelewowej studni zbiorczej / $h = 0,80$ m/. Na pomoście manewrowym ułożono sito, o prześwicie oczek $3/3$ mm, na które sypano piasek ze zbiornika piasku /19/, a następnie przemywano strumieniem wody. Po równomiernym rozproszaniu kilkucentymetrowej warstwy piasku w zbiorniku, złożę ubijano. Opisany sposób wypełniania modelu piaskiem miał na celu m.in. usunięcie powietrza znajdującego się między ziarnami piasku oraz jego przepłukanie. Popłuczyny odprowadzane były poprzez studnię zbiorczą do kanalizacji.

Po napełnieniu zbiornika głównego piaskiem do odpowiedniej wysokości H_w usuwano powietrze z piezometrów przy użyciu ręcznej pompki próżniowej. Następnie regulując wysokość położenia przelewu korytkowego w komorze zasilania i przelewu w studni zbiorczej ustalono głębokość wody nad złożem H i depresję w studni s_p . Po takim przygotowaniu stanowiska otwierano wyloty zbieraczy w studni zbiorczej i uruchamiano dopływ, pozostawiając uruchomione stanowisko na okres kilku dni. Miało to na celu stabilizację złoża, wyrównanie temperatury i ustalenie się warunków przepływu w modelu.

6. METODYKA BADAN

Zgodnie z programem badania obejmowały:

- pomiary związane z identyfikacją i wzorcowaniem elementów modelu, tj. określenie fizycznych, chemicznych i bakteriologicznych cech złoża filtracyjnego i współczynników oporów tarcia zbieraczy,
- pomiary związane z realizacją zasadniczego celu pracy, tj. pomiary temperatury wody, wydajności ujęcia, wysokości ciśnienia piezometrycznego i wysokości poziomu wody,
- opracowanie wyników pomiarów w sposób dogodny do ich interpretacji, tj. zestawienia tabelaryczne i wykresne.

6.1. Metodyka określania cech fizycznych, chemicznych i bakteriologicznych złoża piaskowego

6.1.1. Uziarnienie i wskaźnik nierównomierności uziarnienia

W celu określenia średnicy miarodajnej d_e złoża modelowego, dokonano analizy sitowej pobranych próbek gruntu /zgodnie z normą PN-55/B-04484/, na podstawie której sporządzono wykresy uziarnienia złoża. Wykresy te posłużyły do graficznego określania charakterystycznych średnic czynnych gruntu i obliczenia wskaźnika nierównomierności uziarnienia U , określanego ze wzoru:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} , \quad /6-1/$$

gdzie: d_{60} i d_{10} - odczytane z wykresów średnice zastępcze ziarn piasku, które wraz z mniejszymi stanowią odpowiednio: 60 lub 10% ciężaru całej próbki.

Do badań użyto: wagę laboratoryjną o dokładności $9.807 \cdot 10^{-5}$ N /0.01 G/, wstrząsarkę mechaniczną z kompletem sit o oczkach kwadratowych $\Phi 1,02, 0,75, 0,50, 0,385, 0,30, 0,20, 0,10$ i $0,06$ mm

oraz suszarkę elektryczną.

6.1.2. Porowatość objętościowa i wskaźnik porowatości

Porowatość n_p i wskaźnik porowatości ε złoża określono na podstawie pomiarów: ciężaru właściwego γ i ciężaru objętościowego γ_{os} szkieletu gruntowego /zgodnie z normą PN-55/B-04488/.

Do obliczeń wykorzystano wzory:

$$n_p = \frac{\gamma - \gamma_{os}}{\gamma}, \quad /6-2/$$

$$\varepsilon = \frac{\gamma - \gamma_{os}}{\gamma_{os}}, \quad /6-3/$$

gdzie: $\gamma = G_s / [W_c - (G_n - G_s)]$, N/m^3 ,

$\gamma_{os} = G_s / W_c$, N/m^3

W_c - objętość próbki gruntu, m^3

G_s - ciężar próbki suchej, N

G_n - ciężar próbki nasyconej wodą, N.

6.1.3. Skład chemiczny i bakteriologiczny złoża

W celu określenia składu chemicznego złoża modelowego i jego zmian na skutek długotrwałego okresu filtracji, dokonano analizy chemicznej piasku ze względu na zawartość:

- Fe /ogólne/ - metodą kalorymetryczną /rodankową/,
- Mn - metodą kalorymetryczną /po utlenieniu do MnO_4^{-2} /,
- Ca^{+2} , Mg^{+2} - metodą miareczkową /wersenianem dwusodowym/,
- SO_4^{-2} - metodą wagową,
- Cl^- - metodą Mohra.

Analiza bakteriologiczna złoża piasku polegała na ustaleniu liczby komórek bakterii heterotroficznych w jednostce objętości roztworu fizjologicznego /posiew na agarze/, przy czym wyróżniono: bakterie psychrofilne i bakterie mezofilne oraz ich formy

prze trwalne. Ponadto badania te miały na celu ustalenie obecności bakterii z grupy coli, a dokładniej jej przedstawiciela - pałeczki okrężnicy /Escherichii coli/.

Badaniami chemicznymi i bakteriologicznymi objęto piasek przed rozpoczęciem pomiarów, jak i w trakcie cyklu doświadczeń na modelu.

6.2. Metodyka obliczania wartości współczynnika filtracji złoża piaskowego

6.2.1. Obliczanie współczynnika k_f na podstawie formuł empirycznych

Do obliczeń współczynnika k_f złoża modelowego wykorzystano /zgodnie z normą BN-64/8950-03/ wzory: Krüger'a, Hazen'a i Seelheim'a oraz dodatkowo uogólniony wzór Hazen'a, a także wzory: Slichter'a, Terzaghie'ego, Zauerbrey'a i Kozeny'ego [28,63].

Wzory sprowadzono do jednakowych jednostek wymiarowych (m/s).

1/ Formuła Krüger'a:

$$k_{f283} = 1350 \frac{n_p}{\theta^2} \cdot 10^{-2} \quad , \quad /6-4/$$

gdzie: k_{f283} - współczynnik filtracji przy temperaturze 283,15 K,

θ - współczynnik określany na podstawie analizy sítowej gruntu, $\theta = f / n_p, d_1 /$.

2/ Formuła Hazen'a:

$$k_{f283} = 1,16 \cdot d_{10}^2 \cdot 10^{-2} \quad , \quad /6-5/$$

zastosowanie: $0,1 < d_{10} < 3,0$ mm, $U < 5$.

3/ Formuła Seelheim'a:

$$k_{f283} = 0,357 \cdot d_{50}^2 \cdot 10^{-2} \quad , \quad /6-6/$$

4/ Formuła Hazen'a - uogólniona:

$$k_{f283} = [400 + 40 / n_p - 26 /] \cdot d_{10}^2 \cdot 86400^{-1}, \quad /6-7/$$

- zastosowanie: $0,1 < d_{10} < 3,0$ mm, $U < 5$.

5/ Formuła Slichter'a:

$$k_f = 8,83 \frac{m_s}{\eta} d_{10}^2 \cdot 86400^{-1} \quad /6-8/$$

- zastosowanie: $0,1 < d_{10} < 0,5$ mm,

gdzie: m_s - współczynnik odczytywany z tablic, $m_s = f / n_p$,

η - współczynnik lepkości dynamicznej.

6/ Formuła Terzaghie'go:

$$k_f = \frac{C_t}{\sqrt[3]{\eta}} \left(\frac{n_p - 0,13}{\sqrt[3]{1 - n_p}} \right)^2 \cdot d_{10}^2 \cdot 10^{-6}, \quad /6-9/$$

gdzie: C_t - współczynnik empiryczny zależny od kształtu ziaren,

$\sqrt[3]{\eta}$ - kinematyczny współczynnik lepkości.

7/ Formuła Zaubrey'a:

$$k_{f283} = \frac{\beta_z \cdot n_p^3}{/1 - n_p/^{1/2}} \cdot d_{17}^2 \cdot 86400^{-1}, \quad /6-10/$$

gdzie: β_z - współczynnik empiryczny zależny od wielkości i jednorodności uziarnienia.

8/ Formuła Kozany'ego:

$$k_{f283} = 5400 \frac{n_p^3}{/1 - n_p/^{1/2}} \cdot d_{10}^2 \cdot 86400^{-1}, \quad /6-11/$$

6.2.2. Metodyka laboratoryjnego wyznaczania wartości współczynnika filtracji

Laboratoryjne wyznaczanie wartości współczynnika filtracji k_f wykonano metodą objętościową przy użyciu perametrów^(me). Istota badań

polegała na przepuszczaniu wody przez próbkę gruntu, pobraną z modelowego obszaru filtracji, z jednoczesnym pomiarem objętości W przesącza w czasie T i straty hydraulicznej ΔH . Znając geometryczne wymiary próbki: pole przekroju poprzecznego F , wysokość h oraz temperaturę t wody, współczynnik k_{ft} obliczano ze wzoru [63]:

$$k_{ft} = \frac{W \cdot h}{T \cdot F \cdot \Delta H}, \quad /6-12/$$

Wyniki obliczeń k_{ft} ze wzoru /6-12/ sprowadzano do temperatury 283,15 K, korzystając z zależności:

$$k_{f283} = k_{ft} \cdot C, \quad /6-13/$$

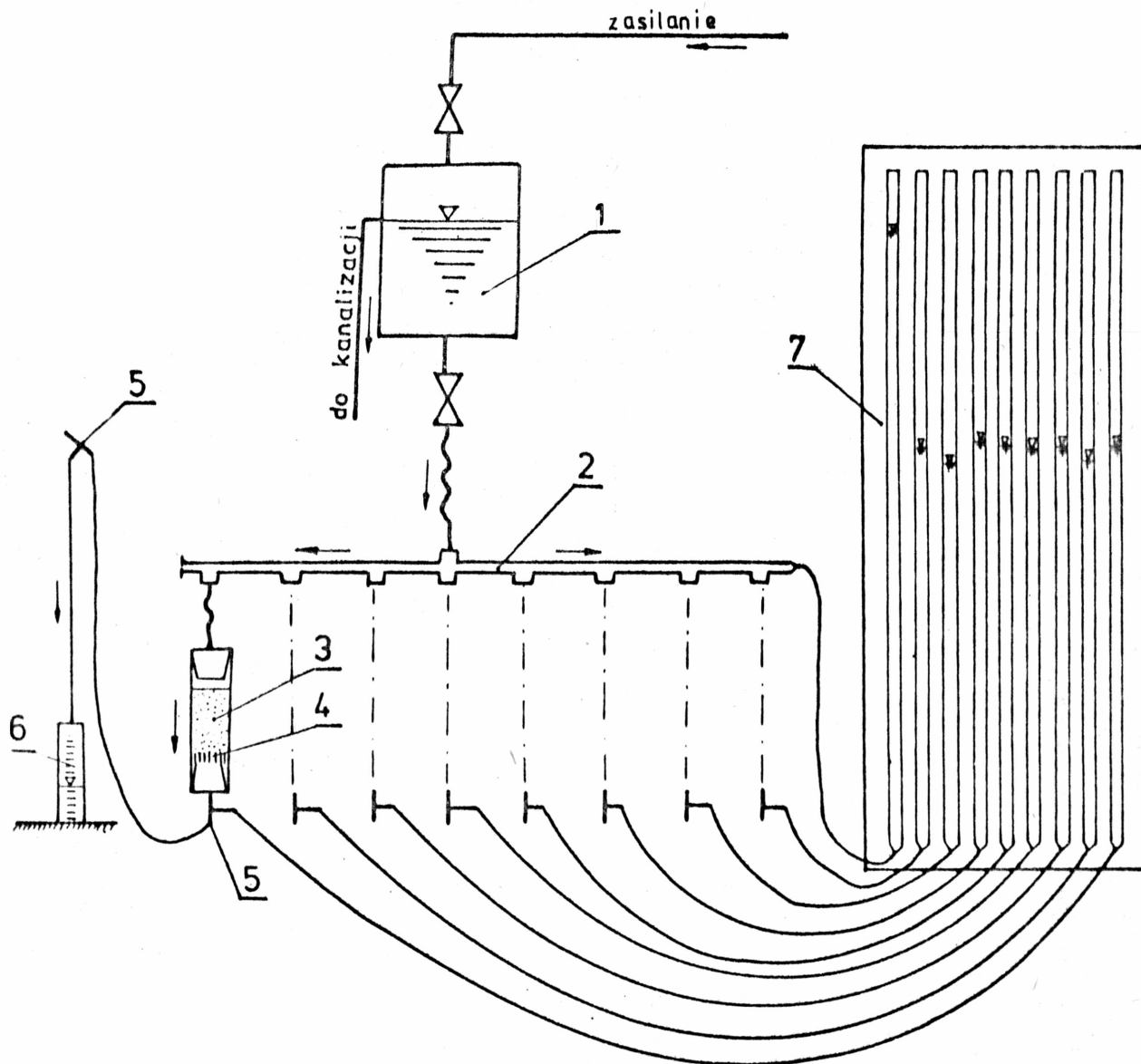
gdzie: $C = \nu_t / \nu_{283}$.

Do pomiarów użyto: termometru laboratoryjnego o dokładności $0,1^\circ$, sekundomierza o dokładności $0,1$ s, przymiaru o podziałce milimetrowej, naczyń mierniczych o dokładności $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

Pomiary prowadzono zgodnie z normą PN-55/B-04492, posługując się aparatem ZWK II. Zastosowano także permeametr przedstawiony na rysunku 6-1, umożliwiający jednoczesny pomiar kilku próbek gruntu. Korzystano również z permeametru Kamieńskiego, a współczynnik k_{ft} obliczono ze wzoru [63]:

$$k_{ft} = \frac{h}{T} \left[-\ln/1 - \frac{h_1}{h_0}/ \right], \quad /6-14/$$

gdzie: h_1 - opad zwierciadła wody w permeametrze z wysokości h_0 do $h_0 - h_1$ w czasie T .



OPIS OZNACZEŃ

- 1 Zbiornik wyrównawczy
- 2 Rozdzielacz
- 3 Cylinder szklany z próbka gruntu
- 4 Złoże podtrzymujące
- 5 Trójnik
- 6 Naczynie miernicze
- 7 Tablica piezometrów

Rys. 6-1 Schemat stanowiska do badań współczynnika filtracji gruntu

6.2.3. Metodyka wyznaczania współczynnika filtracji na podstawie "pompowań próbnych" w modelu

W celu sprawdzenia uzyskanych wartości współczynnika filtracji złoża metodami rachunkowymi i laboratoryjnymi przeprowadzono, po zakończeniu pełnego cyklu doświadczeń na modelu, dodatkowe badanie współczynnika k_f metodą "pompowań próbnych". Studnia zbiorcza ujęcia promienistego posiada filtr siatkowy umożliwiający realizację tych badań. W tym celu zamknięto odpływ ze zbieraczy i zablokowano w nich przepływ prętami sterującymi długością filtrów. Po ustaleniu się stanu wody w zbiorniku uruchomiono filtr studzienny i przystąpiono do symulacji pompowań próbnych, obniżając poziom przelewu w stosunku do poziomu wody nad złożem. Pomiary wydajności prowadzono zmieniając depresję wody w studni. Wydajność studni mierzono za pomocą rotametu wodnego o zakresie natężeń przepływów $10 \div 100 \text{ dm}^3/\text{h}$. Temperaturę wody w studni mierzono termometrem laboratoryjnym, a poziom wody w zbiorniku i w studni - wodowskazem szpilkowym /tablica piezometrów nr 1/.

Na podstawie wyników "pompowań próbnych" wartości współczynnika k_{ft} obliczono adaptując modele Babuškina [26] i Giryńskiego [63] /rys. 6-2/.

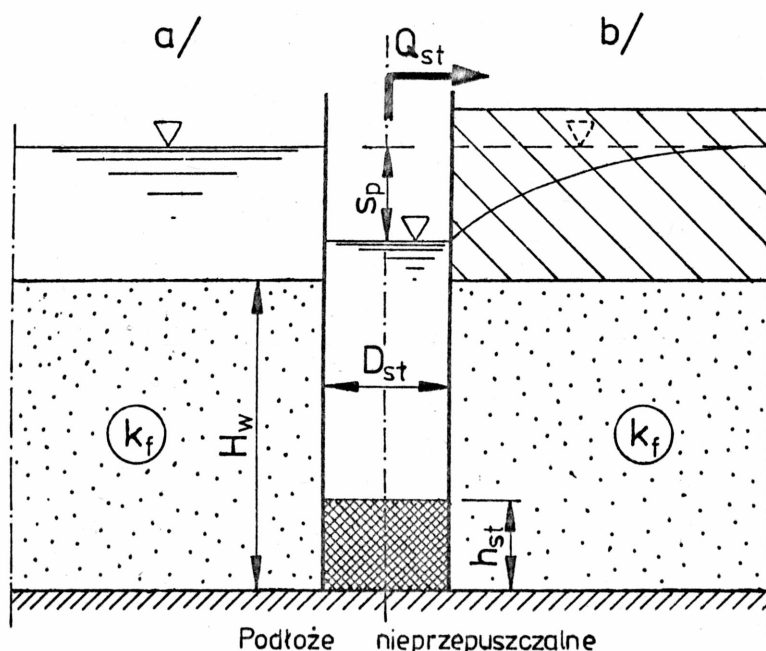
Metoda Babuškina:

$$k_{ft} = \frac{Q_{st}}{2\pi h_{st} \cdot s_p} \cdot B_a, \quad /6-15/$$

gdzie: $Q_{st} = 4 \cdot q_{st}$,

q_{st} - wydajność studni mierzona w modelu /czwarta część obszaru filtracji/,

B_a - współczynnik obliczany ze wzoru /6-16/.



Zastosowanie:
 $h_{st} < 0,3 H_w$

Rys. 6-2 Modele do obliczania współczynnika k_f
 na podstawie pompowań próbnych:
 a/ wg metody Babuškina ,
 b/ wg metody Giryńskiego

$$B_a = \log \frac{3 \cdot h_{st}}{2 \cdot D_{st}} - \frac{1}{2} \ln \frac{H_w + 0,25 h_{st}}{3 / H_w + 0,75 h_{st}} , \quad /6-16/$$

Metoda Giryńskiego:

Studnia dogłębiona z krótkim filtrem zlokalizowana w zbiorniku wód podziemnych o napiętym zwierciadle wody, stanowi pewną analogię do studni infiltracyjnej [27]. Współczynnik filtracji oblicza się tutaj ze wzoru:

$$k_{ft} = \frac{Q_{st}}{2 \pi \cdot h_{st} \cdot s_p} \cdot G_1 , \quad /6-17/$$

gdzie: $G_1 = \ln \frac{3,2 \cdot h_{st}}{D_{st}} , \quad /6-18/$

Wyniki obliczeń współczynnika filtracji ze wzorów: Babuškina /6-15/ i Giryńskiego /6-17/ sprowadzono do temperatury 283,15 K przy pomocy zależności /6-13/.

6.3. Metodyka wyznaczania współczynnika oporów liniowych tarcia zbieraczy perforowanych

W celu opracowania podstaw obliczania współczynnika oporów tarcia λ_p rur perforowanych małych średnic, z jakich wykonano zbieracze modelowego ujęcia promienistego, przeprowadzono badania laboratoryjne takich rur na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 6-3.

Do badań użyto rur mosiężnych o wewnętrznej średnicy $d_w = 9,90 \pm 0,10$ mm i grubości ścianki $\delta = 2,0 \pm 0,1$ mm. Perforację wykonano okrągłymi otworami o średnicy $d_o = 2,0, 2,8$ i $4,0$ mm, rozmieszczonymi w szachownicę. Schematy perforacji rur w pięciu seriach pomiarowych przedstawiono na rysunku 6-4.

Serie o numerach: 1, 2 i 3 miały zachowaną jednakową geometrię rozmieszczenia otworów perforacji /geometryczne podobieństwo trójkątów uzyskanych przez połączenie środków otworów liniami prostymi/, natomiast w seriach 4 i 5 sposób rozmieszczenia otworów perforacji został zmieniony /przy zachowaniu jednak podobnego stopnia perforacji jak w seriach 2 i 3/. Seria nr 1 badań dotyczy zbieraczy modelowego ujęcia promienistego.

Wartości bezwymiarowych wielkości charakteryzujących geometryczne podobieństwo powierzchni badanych rur wynosiły:

$$0,050 \leq \varphi_o \leq 0,199,$$

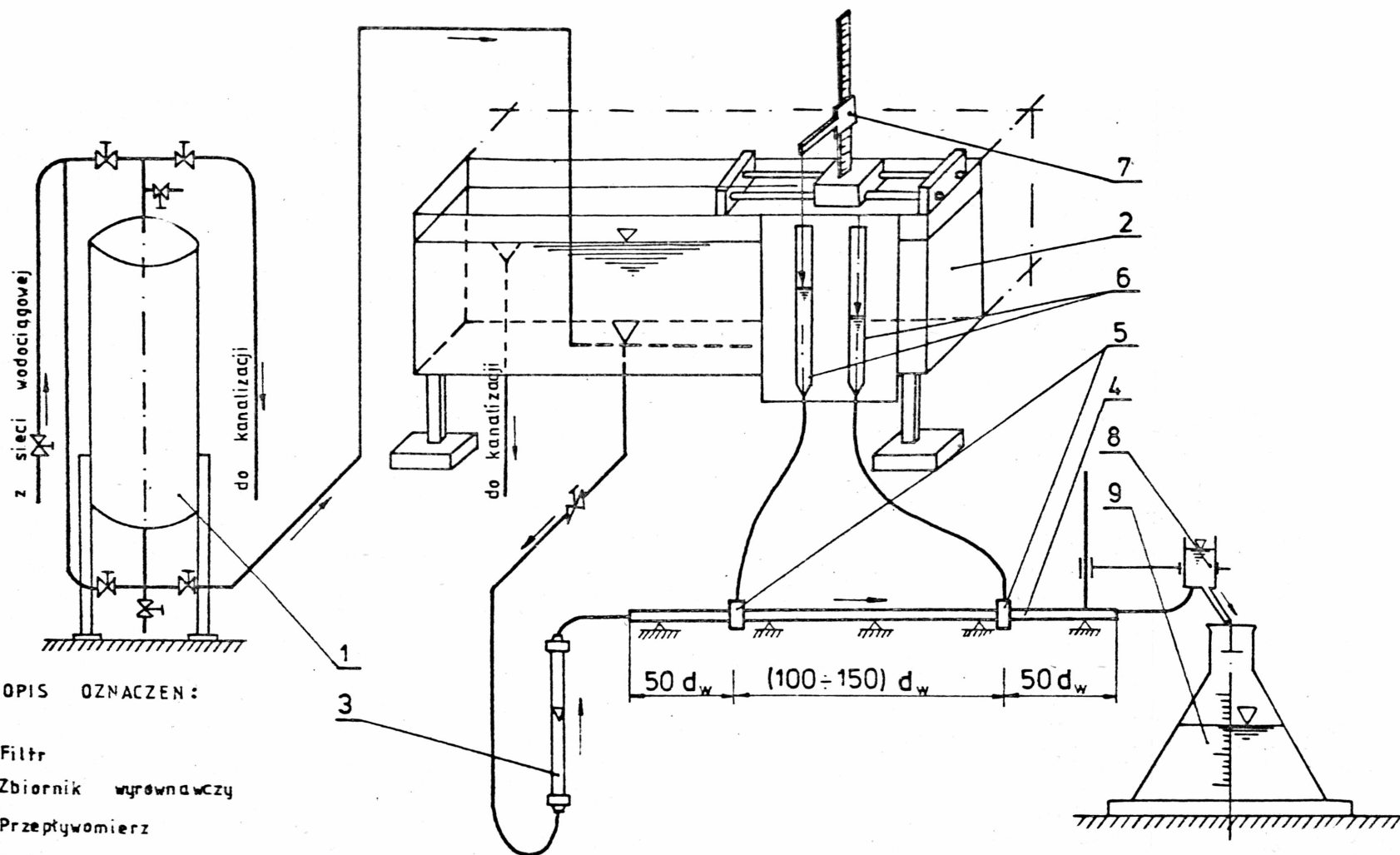
$$0,202 \leq d_o/d_w \leq 0,404,$$

/6-19/

$$\delta/d_w = 0,202$$

a zakres liczb Reynolds'a osiągniętych w odcinku pomiarowym wynosił:

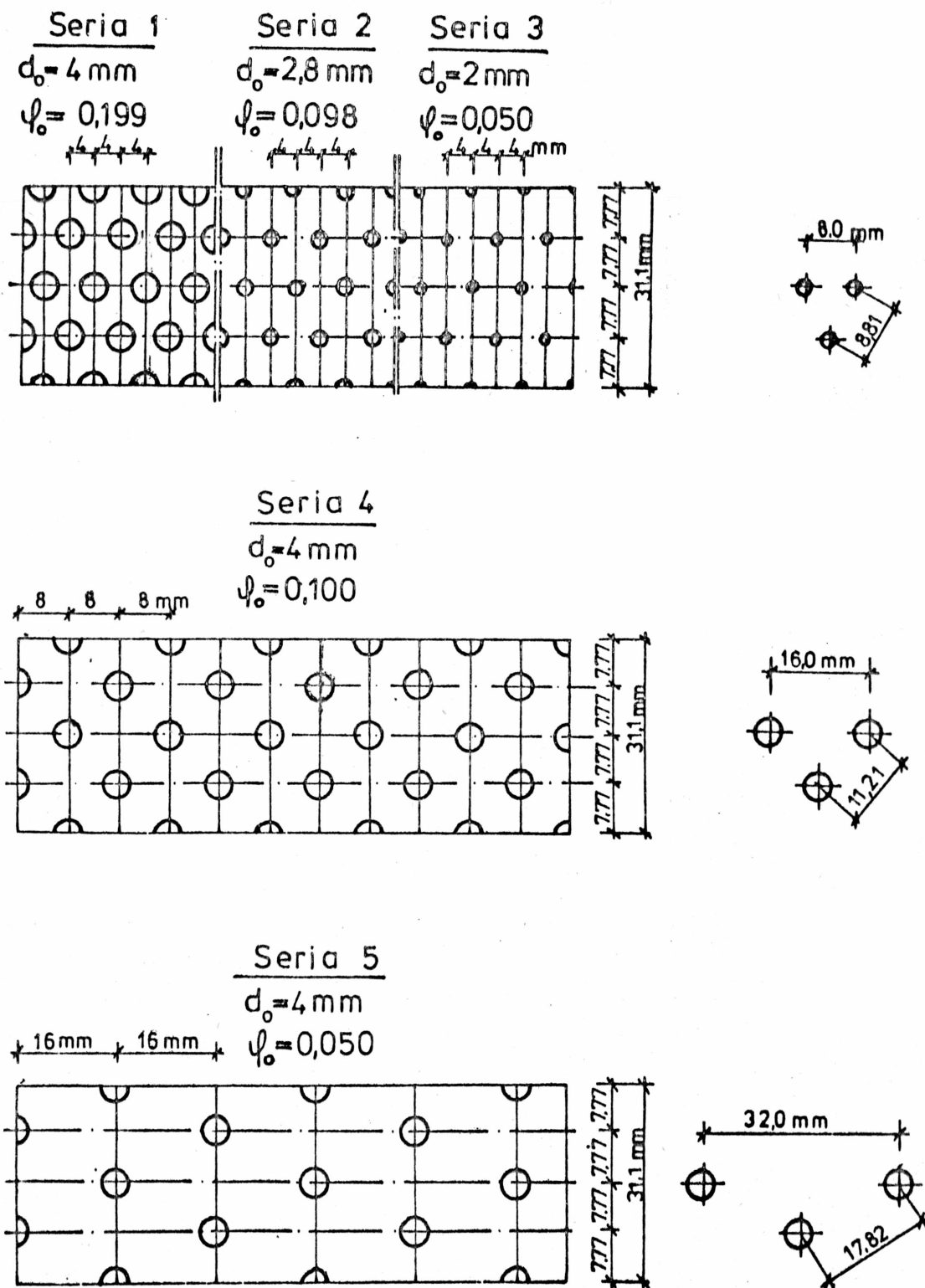
$$330 \leq Re \leq 22100.$$



OPIS OZNACZEN:

- 1 Filtr
- 2 Zbiornik wyrównawczy
- 3 Przepływomierz
- 4 Badany przewód
- 5 Komory obwodowe odbioru ciśnienia
- 6 Piezometry
- 7 Wodowskaz szpilkowy
- 8 Przelew
- 9 Naczynie miarowe

Rys. 6-3 Schemat stanowiska do badań współczynnika liniowych oporów tarcia zbieraczy



Rys. 6.4. Schematy sposobu perforacji badanych rur

Przed wykonaniem perforacji wyznaczono na podstawie pomiarów wartości współczynnika oporów liniowych λ w rurach pełnościennych. Pomiary w rurach perforowanych wykonano po nałożeniu na nie przewodu gumowego i tym samym uniemożliwieniu przepływu wody przez otwory perforacji.

Ilościową ocenę wielkości λ oparto na wzorze Darcy:

$$\Delta h = \lambda \cdot \frac{l}{d_w} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad /6-20/$$

stąd:

$$\lambda = \frac{2g \cdot d_w}{l} \cdot \frac{\Delta h}{v^2}, \quad /6-21/$$

Wyznaczenie wartości λ wymaga zatem pomiaru:

- długości l odcinka pomiarowego /przymiar metrowy/,
- wewnętrznej średnicy d_w badanych rur /suwmiarka/,
- wysokości strat ciśnienia na długości: Δh /wodowskaz szpilkowy/,
- natężenia przepływu: $Q = W/T$ /naczynie podstawione/,

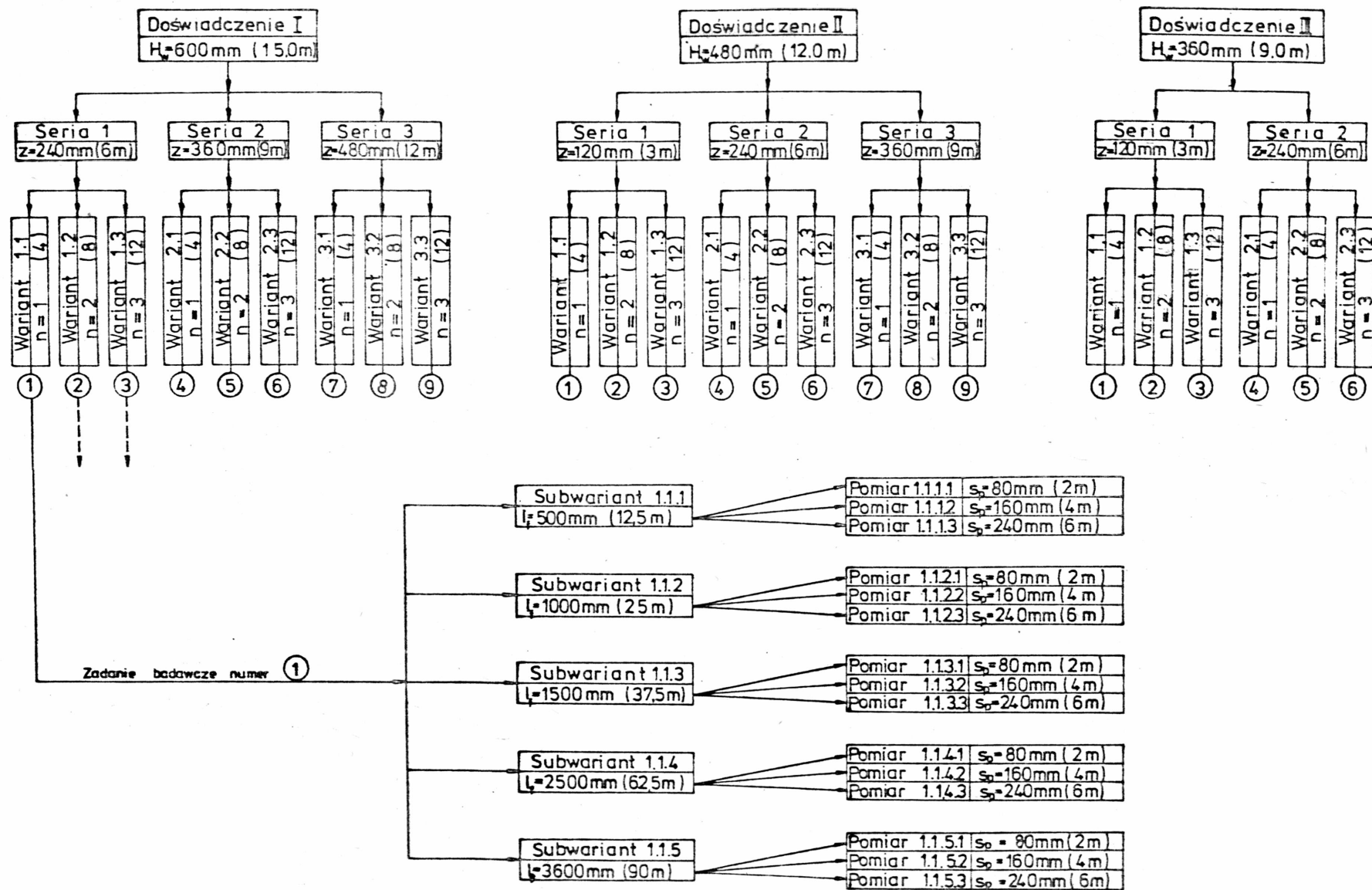
stąd:

$$V = \frac{4Q}{\pi d_w^2}, \quad /6-22/$$

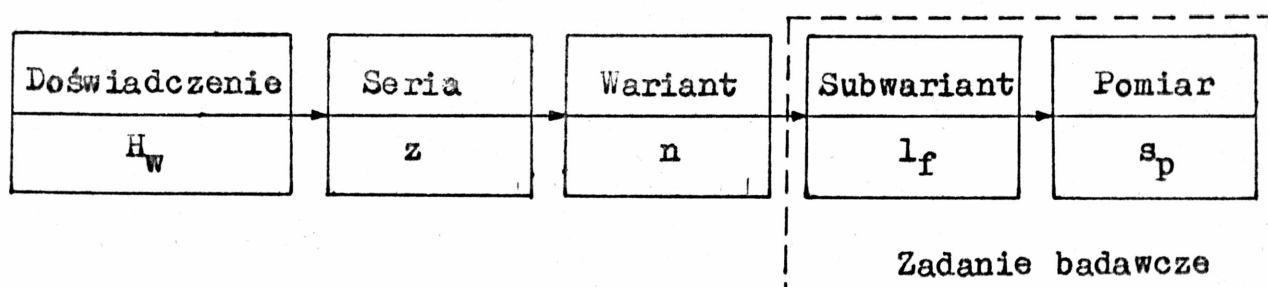
- czasu T napełniania się naczynia o objętości W /sekundomierz/,
- temperatury wody t /termometr laboratoryjny/.

6.4. Metodyka pomiarów na modelu infiltracyjnego ujęcia promienistego

Stosownie do programu badań przedstawionego w p. 5.1, a także biorąc pod uwagę wyniki analizy wymiarowej, dokonanej w p. 4.3, pomiary wykonywane na modelu realizowano wg programu przedstawionego na schemacie blokowym /rys. 6-5/. Zmiany parametrów modelowego ujęcia promienistego dokonano wg klucza:



Rys. 6-5 Program pomiarów



Całość pomiarów podzielono na trzy doświadczenia, w każdym z nich zastosowano inną miąższość H_w złoża filtracyjnego. Doświadczenie I $/H_w = 600 \text{ mm}/$ i doświadczenie II $/H_w = 480 \text{ mm}/$ podzielono na 3 serie, natomiast doświadczenie III $/H_w = 360 \text{ mm}/$, ze względu na konstrukcję modelu, podzielono na 2 serie. W każdej serii przyjmowano inne zagłębienie z zbieraczy. Każdą serię podzielono na 3 warianty wg liczby n czynnych zbieraczy. Każdy wariant był podzielony na 5 subwariantów, wg długości czynnej l_f zbieraczy. W każdym subwariacie dokonywano pomiarów wydajności ujęcia przy zastosowaniu 3 różnych depresji s_p w studni zbiorczej - stanowiło to podstawowe zadanie badawcze.

Łączna liczba kombinacji pomiarów wydajności wynosiła 360, a każdy pomiar był powtarzany 3 razy w celu eliminacji błędów grubych.

Pomiary wykonywano po ustaleniu się warunków przepływu w modelu. Mierzono temperaturę wody, wydajność ujęcia, wysokość ciśnienia piezometrycznego w zbieraczach i na zewnątrz zbieraczy, długość l_f rur filtrowych oraz poziom wody nad złożem, w studni zbiorczej i w komorze zasilania. Na wstępie - przed umieszczeniem złoża piaskowego w zbiorniku pomierzono: długość perforowanych i pełnościennych odcinków zbieraczy, wysokość ułożenia zbieraczy ponad dnem zbiornika $/3 \text{ wysokości}/$ oraz rozstaw kątowy zbieraczy $/\text{rys. 5-2}/$.

Wyniki pomiarów zapisywano w notatnikach, których przykład podano w tabelach 6-1 i 6-2.

NOTATNIK POMIAROWY BADAŃ										Tablica 1 piezometrów nr 1	
BADANIA MODELOWE INFILTRACYJNEGO UJĘCIA PROMIENISTEGO POMIARY CIŚNIENIA PIEZOMETRYCZNEGO, WYDAJNOŚCI I TEMPERATURY										2.3.3	
Doswiadczenie II		Zadanie 6		Seria 2		Wariant 2.3		1:25		Subwariant 2.3.4	
$H_w = 480 \text{ mm}$		$H = 160 \text{ mm}$		$z = 240 \text{ mm}$		$n = 3$				2.3.5	
DATA: 8.05.79											
Numer pomiaru		2.3.3.1	2.3.3.2	2.3.3.3	2.3.4.1	2.3.4.2	2.3.4.3	2.3.5.1	2.3.5.2	2.3.5.3	
Długość zb. l , mm		1500			2500			3600			
Rzędna zw. w.	zbiornik	2	311,6	311,5	311,8	311,3	311,4	311,0	311,4	311,2	311,4
	zasilanie	3	311,8	312,2	312,2	312,4	312,0	312,0	311,8	312,2	312,2
	studnia	4	231,6	151,5	71,6	231,0	151,6	71,0	231,2	150,8	71,8
Depresja s_p , mm			80,0	160,0	240,2	80,3	159,8	240,0	80,2	160,4	239,6
Wydajność ujęcia	Q_1	dm^3/h	320	494	648	366	564	715	380	575	735
	Q_2		318	494	648	366	562	715	378	573	735
	Q_3		319	494	648	366	560	715	379	571	735
	sr. Q_u		319	494	648	366	562	715	379	573	735
Temp. wody w studni, °C			15,7	15,6	15,6	15,6	15,6	15,5	15,6	15,6	15,5
I	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (otoczenie zbieracza)	5									
II	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (otoczenie zbieracza)	6									
III	$z = 120 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	7									
IV	$z = 120 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	8									
V	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	9									
VI	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	10	265,2	233,6	195,3	267,4	234,0	202,1	269,1	235,6	205,1
			277,1	258,2	239,6	281,1	264,7	251,6	284,0	268,0	256,8
VII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	11	280,8	261,9	247,1	285,5	272,9	264,9	288,5	278,1	279,5
			308,9	306,1	303,0	293,9	286,4	282,1	297,1	291,9	287,9
VIII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	12	311,8	311,2	310,6	310,2	309,0	307,3	302,8	298,7	295,9
IX	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	13									
X	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	14									
XI	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	15									
XII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	16									
XIII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	17									
XIV	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	18									
XV	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	19									
XVI	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	20									
XVII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	21									
XVIII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	22									
XIX	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	23									
XX	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	24									
XXI	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	25									
XXII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	26									
XXIII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	27									
XXIV	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	28									
XXV	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	29									
XXVI	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	30	241,3	187,2	131,6	244,1	192,3	142,0	245,0	193,4	144,2
			257,2	226,5	198,7	263,8	238,2	221,2	266,4	241,0	225,5
XXVII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	31	265,7	242,4	222,6	277,8	262,3	252,0	281,9	267,4	258,0
			308,8	306,5	304,5	285,3	274,5	287,5	291,3	281,6	276,3
XXVIII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	32	311,8	311,2	310,4	311,4	309,2	308,0	297,8	291,7	288,2
XXIX	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	33									
XXX	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	34									
XXXI	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	35									
XXXII	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	36									
XXXIII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	37									
XXXIV	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	38									
XXXV	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	39									
XXXVI	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	40									
XXXVII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	41									
XXXVIII	$z = 240 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	42									
XXXIX	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 2$ (zbieracz)	43									
XL	$z = 360 \text{ mm}$ $n = 1, 3$ (zbieracz)	44									

Tabela 6-2.

NOTATNIK POMIAROWY BADAŃ									
BADANIA MODELOWE INFILTRACYJNEGO UJĘCIA PROMIENISTEGO									
POMIARY TEMP I ROZKŁADU CIŚNIENIA PIEZOMETRYCZNEGO W GRUNCIE									
Doswiadcz II $H_w = 480 \text{ mm}$	Zadanie 6 $H = 160 \text{ mm}$	Seria 2 $z = 240 \text{ mm}$	Wariant 2,3 $n = 3$		1:25		DATA: 8.05.79		
Numer pomiaru	2.3.3.1	2.3.3.2	2.3.3.3	2.3.4.1	2.3.4.2	2.3.4.3	2.3.5.1	2.3.5.2	2.3.5.3
Długość zb. l_f , mm	1500			2500			3600		
Depresja s_p , mm	80,0	160,0	240,2	80,3	159,8	240,0	80,2	160,4	239,6
Rzędna zw.w.w zbiorniku	311,6	311,5	311,8	311,3	311,4	311,0	311,4	311,2	311,4
Temp wody na zasilaniu, °C	15,8	15,8	15,7	15,7	15,7	15,6	15,6	15,5	15,4
Temp wody na wypływie, °C	15,7	15,6	15,6	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
IX $z = 60 \text{ mm}$ $n = 1,3$	1	303,8	304,0	301,6	303,5	303,4	301,5	308,5	304,0
	2	307,8	304,5	302,3	309,4	306,9	304,9	309,5	306,8
	3	310,1	308,0	306,6	309,7	307,3	305,3	310,9	307,1
	4	311,8	310,8	310,5	310,9	309,0	308,8	311,1	309,2
	5	311,6	311,4	310,8	311,5	311,4	310,8	311,3	309,4
X $z = 60 \text{ mm}$ $n = 2$	6					305,8			
	7					308,1			
	8					309,0			
	9					310,7			
	10					311,2			
XI $z = 180 \text{ mm}$ $n = 1,3$	11	284,9	266,8	249,3	287,6	271,3	258,0	288,7	272,4
	12	290,6	278,4	267,9	294,9	284,7	277,8	296,4	286,6
	13	304,5	293,8	296,0	299,6	292,8	288,0	301,4	295,1
	14	310,7	309,8	308,9	303,4	299,2	296,1	304,9	301,1
	15	311,5	311,3	310,7	312,0	311,0	309,8	306,9	303,4
XII $z = 180 \text{ mm}$ $n = 2$	16					273,3			
	17					292,2			
	18					301,4			
	19					307,3			
	20					311,0			
XIII $z = 300 \text{ mm}$ $n = 1,3$	21	270,4	242,7	216,3	274,0	249,1	229,5	275,4	251,6
	22	282,1	263,2	248,4	286,0	269,0	262,4	288,0	275,0
	23	300,9	275,1	289,8	293,4	284,7	278,4	296,2	288,3
	24	310,3	308,9	307,9	298,7	292,5	298,3	301,8	295,5
	25	311,1	311,3	310,7	311,9	310,5	309,3	304,5	301,1
XIV $z = 300 \text{ mm}$ $n = 2$	26					256,6			
	27					283,8			
	28					297,3			
	29					304,4			
	30					310,8			
XV $z = 420 \text{ mm}$ $n = 1,3$	31	276,6	252,3	230,3	279,7	258,7	241,5	281,0	260,7
	32	288,4	275,6	264,4	286,7	278,5	271,1	292,1	285,4
	33	302,0	296,6	291,6	298,3	291,5	286,0	300,0	294,3
	34	309,8	308,5	307,2	303,7	299,5	296,1	304,7	301,4
	35	311,3	311,4	310,4	311,5	310,4	309,0	307,6	304,9
XVI $z = 420 \text{ mm}$ $n = 2$	36					258,1			
	37					283,0			
	38					295,7			
	39					304,1			
	40					310,5			

6.4.1. Pomiar temperatury wody

Temperaturę wody mierzono za pomocą termometrów laboratoryjnych o dokładności 0,1 K w studni zbiorczej ujęcia i w źródle infiltracji - nad warstwą wodonośną. Dodatkowo mierzono temperaturę wody w komorze zasilania oraz na wypływie wody z rotametrów. Podczas realizacji zadania badawczego, w przypadku stwierdzenia różnic temperatury wody w zbiorniku i na wypływie większych niż 0,5 K przerywano pomiary do czasu ustalenia się warunków termicznych w modelu.

Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń wstępnych za miarodajną uznano temperaturę wody w studni zbiorczej ujęcia - jako najbliższą wartości średniej z wszystkich pomiarów.

6.4.2. Pomiar wydajności ujęcia

Pomiar wydajności Q_M modelowego ujęcia wody polegał na odczycie natężenia przepływu na przepływomierzu pływakowym, o ruchu obrotowym pływaka /rotametrze/. Ponieważ skale natężenia przepływu użytych do badań rotametrów wodnych wycechowane były w temperaturze 288,15 K, przeliczanie wskazań przepływomierza dla temperatury wody t /mierzonej na wypływie/ dokonywano na podstawie zależności:

$$Q_{Mt} = Q_{288} \cdot C_r, \quad /6-23/$$

$$C_r = \sqrt{\frac{\beta_{288}}{\beta_t} \cdot \frac{\beta_p - \beta_t}{\beta_p - \beta_{288}}}, \quad /6-24/$$

gdzie: Q_{Mt} - objętościowe natężenie przepływu w temperaturze t
pomiarów - wydajność modelowego ujęcia wody, dm^3/h ,

Q_{288} - natężenie przepływu odczytywane na skali rotametrów,
 dm^3/h ,

C_r - współczynnik przeliczeniowy,

ρ_t - gęstość wody w temperaturze t , kg/m^3

ρ_{288} - gęstość wody w temperaturze 288,15 K, kg/m^3 ,

ρ_p - gęstość materiału pływaka, kg/m^3 .

Użyte do badań rotametry wzorcowane były metodą naczyń podstawionego, po wagowym wytarowaniu cylindrów pomiarowych.

Ze względu na to, że obszar filtracji modelowego ujęcia wody stanowi czwartą część walca, w celu określenia całkowitej wydajności ujęcia Q_{uMt} korzystano z zależności:

$$Q_{uMt} = 4 \cdot Q_{Mt} \quad , \quad /6-25/$$

Wydajność pojedynczego zbieracza q_{Mt} , pracującego w zespole n symetrycznie rozmieszczonych zbieraczy, określano ze wzoru:

$$q_{Mt} = \frac{Q_{uMt}}{n} \quad , \quad /6-26/$$

przyjmując tym samym, że wydajność każdego z nich jest identyczna.

Wyniki pomiarów i obliczeń wydajności Q_{uMt} modelowego ujęcia wody, uzyskane przy różnych temperaturach wody /mierzonych w studni zbiorczej/ sprowadzano do temperatury 283,15 K, przy założeniu liniowej zależności wydajności ujęcia od wartości współczynnika filtracji warstwy wodonośnej, zgodnie z relacją:

$$Q_{uM283} = Q_{uMt} \cdot V_t / V_{283} \quad /6-27/$$

6.4.3. Pomiar wysokości ciśnień piezometrycznych i poziomów wody

Przy realizacji zadania badawczego dokonywano pomiarów: rozkładu ciśnień piezometrycznych wzdłuż zbieraczy - zarówno w ich wnętrzu jak i w bezpośrednim otoczeniu, a także rozkładu ciśnień w polu filtracji. W tym celu dokonywano pomiarów poziomu wody w piezomet-

rach przy użyciu wodowskazów szpilkowych. Piezometry, zblokowane w dwóch tablicach /nr 1 i nr 2/ zamontowano w ściśle określonej kolejności, łącząc je w sekcje odnoszące się do określonego przekroju warstwy wodonośnej, bądź też poziomu umieszczenia zbieraczy. Układ ten pozwalał na eliminację błędów grubych, gdyż obraz położenia zwierciadła wody w piezometrach danej sekcji był uporządkowany.

W celu ułatwienia rejestracji momentu zetknięcia się szpilki wodowskazu ze zwierciadłem wody, zastosowano elektryczną sondę akustyczną. Pomiar testujące przy użyciu tego urządzenia, wykazały małą jego przydatność, m.in. ze względu na dużą bezwładność, a więc i małą dokładność, w porównaniu z odczytem wizualnym.

Na tablicy nr 1 zlokalizowano również piezometry rejestrujące położenie zwierciadła wody w komorze zasilania, w zbiorniku i w studni zbiorczej. Depresję s_p określano z różnicy wysokości zwierciadła wody w źródle infiltracji i w studni zbiorczej ujęcia.

6.4.4. Pomiar wysokości warstwy wodonośnej, zagłębienia i długości zbieraczy

Wysokość warstwy wodonośnej mierzono przymiarem o podziałce milimetrowej przez sondowanie, po wyrównaniu powierzchni dna źródła infiltracji /stropu warstwy wodonośnej/ metodą hydrauliczną.

Zagłębienie zbieraczy określano z różnicy wysokości warstwy wodonośnej i zmierzonych uprzednio /przed zasypaniem złoża/ wysokości umieszczenia zbieraczy nad dnem zbiornika /spągami warstwy wodonośnej .

Długość l_f zbieraczy określano na podstawie pomiaru różnicy między całkowitą ich długością czynną / $l_{fmax} = 3,60$ m/ a długością prętów sterujących, wprowadzanych do wnętrza zbieraczy.

7. WZORCOWANIE MODELU

7.1. Badanie cech chemicznych i biologicznych złoża filtracyjnego podczas doświadczeń

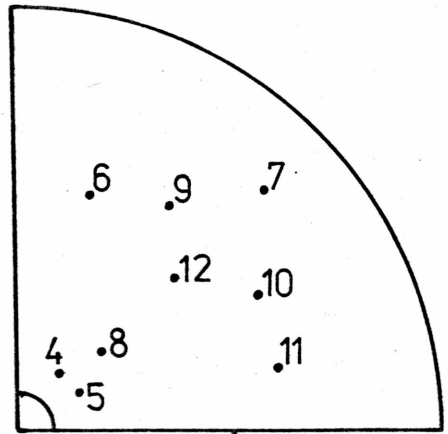
Złoże filtracyjne modelowego ujęcia wody może podlegać procesowi kolmatacji chemicznej i biologicznej, spowodowanej długotrwałą filtracją. Tym samym w czasie badań może ono zmieniać swoje właściwości hydrauliczne, głównie wodoprzepuszczalność. W celu określenia zaistniałych w modelu zmian chemicznych i bakteriologicznych oraz stopnia ich wpływu na przepuszczalność złoża, dokonano odpowiednich analiz próbek gruntu. Badaniami objęto próbki piasku pobrane ze złoża przed rozpoczęciem badań, jak i w trakcie doświadczeń. Wyniki badań przedstawiono w tabelach 7-1 i 7-2.

Analizując wyniki zmian zawartości żelaza, manganu, wapnia i magnezu /tab. 7-1/ stwierdzono, że nie następuje kumulacja tych związków w gruncie, a przeciwnie - są one wypłukiwane. Szczególnie wyraźnie proces ten zaznacza się w bezpośrednim otoczeniu zbieracza /próbka nr 12/. Świadczy to o braku zjawiska kolmatacji chemicznej złoża i poprawnej pracy filtra, zainstalowanego na dopływie wody do modelu.

Analiza bakteriologiczna próbek gruntu wykazać miała przede wszystkim istnienie, bądź też brak tzw. błony biologicznej w przypowierzchniowej warstwie piasku. Z punktu widzenia hydrauliki filtracji jest to proces niekorzystny - zmienny w czasie, a przez to zniekształcający wyniki pomiarów wydajności modelowego ujęcia wody infiltracyjnej. Zestawienie wyników badań bakteriologicznych próbek gruntu, zamieszczone w tabeli 7-2, wskazuje na brak wykształcenia się błony biologicznej, o czym świadczy liczba bakterii w przypowierzchniowej warstwie gruntu. Liczba bakterii nieznacznie zmniejsza się wraz z wydłużeniem się okresu pracy złoża,

T a b e l a 7-1.

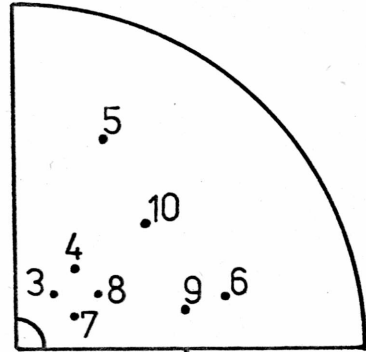
Zestawienie wyników badań składu chemicznego piasku

Nr próbki	Fe	Mn	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	Mięszczość warstwy wodonośnej	Głębokość poboru próbki	Okres pracy złoża	Plan poboru próbek, uwagi
	mg/100 g suchej masy piasku						m	m	~dni	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	200,0	13,0	156,0	144,0	Wielkość śladowe	4,0	-	-	-	} złożo naturalne /przed podjęciem badań na modelu/
2	210,0	14,9	93,0	227,0		4,0	-	-	-	
3	210,0	10,9	286,0	103,0		5,0	-	-	-	
4	200,0	9,3	206,0	118,8		44,0	0,60	0,05÷0,08	50	
5	170,0	9,2	380,0	210,0		58,0	0,60	0,0 ÷ 0,02	50	
6	175,0	7,8	235,0	162,4		69,0	0,60	0,05÷0,08	50	
7	180,0	8,0	263,8	169,4		158,0	0,60	0,0÷0,02	50	
8	170,0	9,0	186,0	128,0		7,0	0,48	0,0÷0,02	140	
9	158,0	6,9	221,0	ślady		34,0	0,48	0,20÷0,25	140	
10	150,0	7,3	163,6	119,4		11,0	0,48	0,06÷0,09	140	
11	150,0	7,3	149,8	102,6		20,0	0,48	0,20÷0,25	140	
12	130,0	1,9	142,6	115,4		9,0	0,48	0,12	140	

- bezpośrednie otoczenie zbieracza

T a b e l a 7-2

Zestawienie wyników badań bakteriologicznych piasku

Nr próbki	Liczba bakterii		Liczba przetrwalników		Miąższość warstwy wodonośnej	Głębokość poboru próbki	Okres pracy złoża	Plan poboru próbek, uwagi
	psychrofilne	mezofilne	psychrofilne	mezofilne				
	liczba bakterii w 1 g piasku				m	m	~dni	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	100 000	42 800	nie stwier.	2	-	-	-	} złoże naturalne /przed rozpoczęciem badań modelowych  zasilanie - bezpośrednie otoczenie zbieracza
2	50 000	62 300	1	2	-	-	-	
3	50 000	51 200	2	6	0,60	0,0±0,02	50	
4	22 000	2 480	4	2	0,60	0,05±0,08	50	
5	30 000	5 000	6	1	0,60	0,05±0,08	50	
6	410 000	3 500	6	9	0,60	0,0±0,02	50	
7	12 100	4 000	214	7	0,48	0,0±0,02	140	
8	11 300	4 100	100	2	0,48	0,20±0,25	140	
9	80 000	40 000	15	300	0,48	0,0±0,02	140	
10	5 700	3 200	1	50	0,48	0,12	140	

Nie stwierdzono bakterii typu coli.

rośnie natomiast liczba form przetrwalnych, tworzących się wskutek niesprzyjających biologicznie warunków środowiskowych w modelu. W bezpośrednim otoczeniu zbieracza /próbka nr 10/ stwierdzono najmniejszą liczbę bakterii, co dowodzi braku kolmatacji biologicznej filtrów.

Reasumując należy stwierdzić, że w czasie trwania doświadczeń na modelowym ujęciu wody skład chemiczny jak i bakteriologiczny gruntu był w miarę stabilny i nie wpływał w istotny sposób na zmiany własności filtracyjnych ośrodka gruntowego modelu.

7.2. Wyniki pomiarów cech fizycznych i hydrogeologicznych złoża piaskowego

7.2.1. Określenie wartości współczynnika filtracji na podstawie formuł empirycznych

W celu obliczenia wartości współczynnika filtracji na podstawie wzorów empirycznych /p. 6.2.1/ określono porowatość i uziarnienie pobranych z modelu próbek gruntu. Wyniki zestawiono w tabelach 7-3 i 7-4, a na rysunku 7-1 zamieszczono przykład wyników analizy sitowej gruntu. Do obliczania cech fizycznych gruntu wykorzystano wzory /6-1/, /6-2/ i /6-3/.

Zestawione w tabelach 7-3 i 7-4 wyniki wykorzystano do obliczenia ^(ze) wzorów /6-4/ ÷ /6-11/, wartości współczynnika filtracji gruntu. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 7-5.

T a b e l a 7-3

Cechy fizyczne złoża modelowego

Nr próbki gruntu	Objętość próbki W_c	Okres poboru próbki	Wielkości pomierzone		Wielkości obliczone	
			γ	γ_{os}	Porowość n_p	Wskaźnik porowości ε
	$m^3 \cdot 10^{-6}$	-	N/m^3	N/m^3	%	-
1	2	3	4	5	6	7
1	250	przed rozpoczęciem badań	25830,72	16180,97	37,36	0,596
2	250	"	25183,48	16073,10	36,18	0,567
3	250	"	26458,34	15317,99	42,10	0,727
4	250	po zakończeniu badań	25595,36	15818,13	38,20	0,618
5	250	"	24467,59	16386,91	33,03	0,493
6	250	"	26605,44	16416,33	38,30	0,620
średnio:			25690,15	16032,24	37,53	0,603

T a b e l a 7-4

Zestawienie wyników analiz sitowych gruntu

Nr próbki gruntu	Średnica miarodajna d_e :				Wskaźnik równomier- ności uziarnienia $U= d_{60}/d_{10}$
	d_{10}	d_{17}	d_{50}	d_{60}	
	$m \cdot 10^{-3}$				
1	2	3	4	5	6
1	0,205	0,250	0,370	0,410	2,000
2	0,230	0,270	0,375	0,430	1,869
3	0,230	0,275	0,380	0,420	1,826
4	0,205	0,240	0,360	0,390	1,902
5	0,205	0,250	0,360	0,400	1,951
6	0,215	0,250	0,360	0,400	1,860
średnio:	0,215	0,256	0,367	0,408	1,900

ANALIZA SITOWA

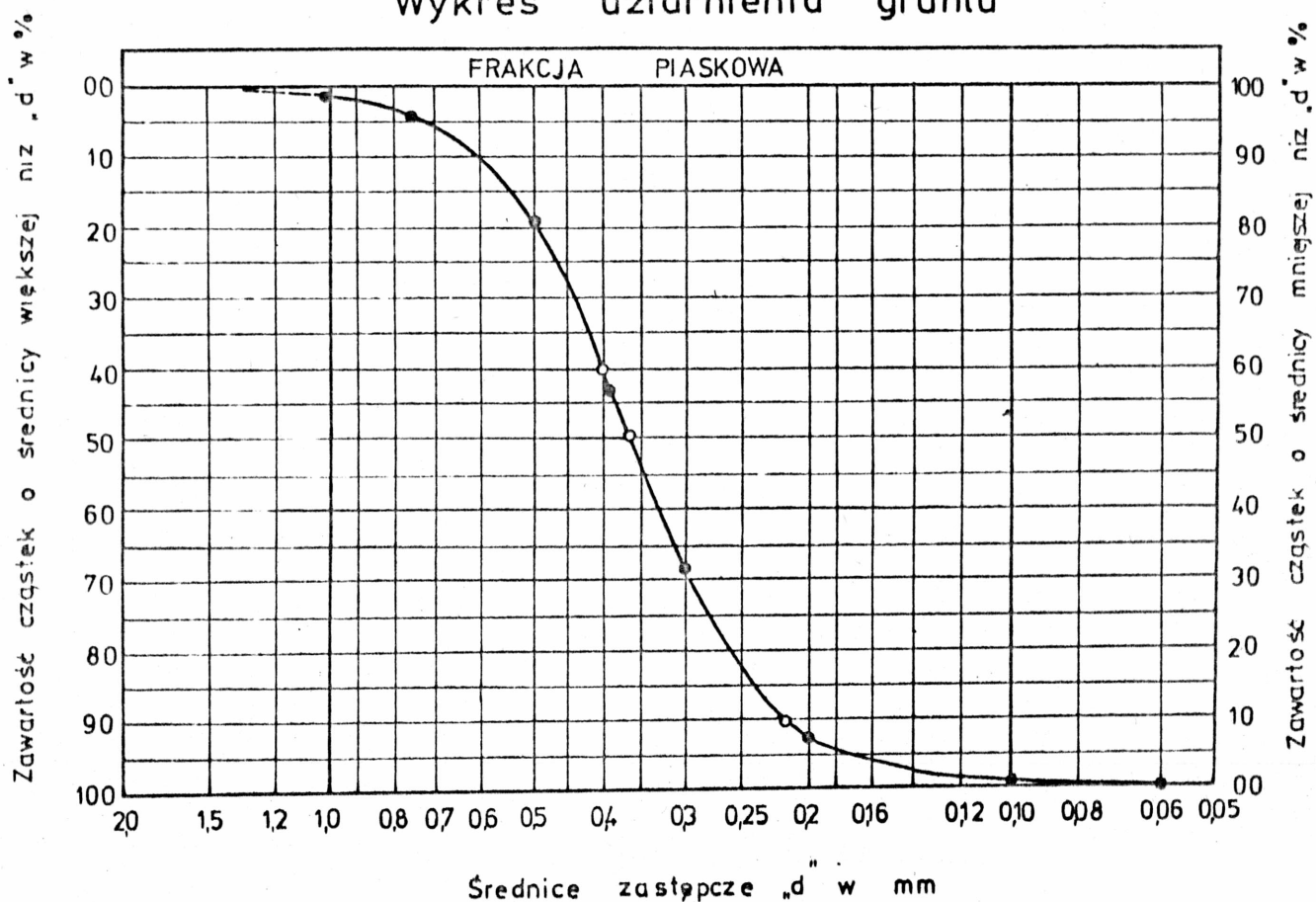
Nazwa gruntu: piasek średnioziarnisty

Wzięto do analizy: 200,0g

Numer i data analizy: 6 / 18.10.79

Lp	Wymiar sita d, mm	Pozostaje na sicie g	Korekta pomiaru g	%	Σ %
1	1,02	3,100	3,100	1,550	1,550
2	0,75	5,750	5,750	2,875	4,425
3	0,50	30,410 + 0,07	30,480	15,240	19,665
4	0,385	45,420 + 0,15	45,570	22,785	42,450
5	0,30	51,310 + 0,20	51,510	25,755	68,205
6	0,20	46,430 + 0,15	46,580	23,290	91,495
7	0,10	16,200	16,200	8,100	99,595
8	0,06	0,650	0,650	0,325	99,920
9	<0,06	0,160	0,160	0,080	100,000
10	—	—	—	—	—
Σ		199,430 + 0,57	200,00	100,00	—

Wykres uziarnienia gruntu



Wyniki: $d_{10} = 0,215$ mm $d_{50} = 0,360$ mm $d_{60} = 0,400$ mm $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 1,860$

Rys. 7-1 Wykres uziarnienia złoża modelu

T a b e l a 7-5

Wartości współczynnika filtracji złoża modelowego
obliczone na podstawie formuł empirycznych

Lp.	Autor wzoru: /numer/	Wartość współczynnika filtracji k_f		U w a g i
		$m/s \cdot 10^{-4}$	m/d	
1	2	3	4	5
1	Krüger /6-4/	3,3217	28,70	BN-64/8950-03 $k_f = k_{f283}$ $n_p = 0,375$
2	Hazen /6-5/	5,3766	46,45	BN-64/8950-03 $k_f = k_{f283}$ $d_{10} = 0,215 \text{ mm}$
3	Seelheim /6-6/	4,8238	41,68	BN-64/8950-03 $k_f = k_{f283}$ $d_{50} = 0,367 \text{ mm}$
4	Hazen /uogólniony/ /6-7/	4,6010	39,75	$k_f = k_{f283}$ $d_{10} = 0,215 \text{ mm}$
5	Slichter /6-8/	1,4378	12,42	$n_p = 0,375$ $m_s^2 = 0,03981$ $\eta_{283} = 0,001308 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ $d_{10} = 0,215 \text{ mm}$
6	Terzaghie /6-9/	3,0495	26,35	$c = 10,48$ $\sqrt{\eta_{283}} = 1,3081 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ $d_{10} = 0,0215 \text{ cm}$
7	Zaue rbrey /6-10/	3,0104	26,01	$k_f = k_{f283}$ $n_p = 0,375$ $\beta_z = 3010$ $d_{17} = 0,256 \text{ mm}$
8	Kozeny /6-11/	3,9002	33,70	$k_f = k_{f283}$ $n_p = 0,375$ $d_{10} = 0,215 \text{ mm}$

7.2.2. Określenie wartości współczynnika filtracji na podstawie badań laboratoryjnych

Wyniki pomiarów laboratoryjnych współczynnika k_f próbek gruntu pobranych z obszaru filtracji uzyskane przy zastosowaniu aparatu ZWK, permeametru wielocylindrowego i rurki Kamieńskiego /p. 6.2.2/, zestawiono w tabelach 7-6, 7-7 i 7-8.

7.2.3. Określenie wartości współczynnika filtracji na podstawie "pompowań próbnych" w modelu

Wartości współczynnika filtracji określone na podstawie wyników próbnych pompowań w modelu, przy wykorzystaniu do obliczeń wzorów /6-15/ i /6-16/, odnoszących się do schematu obliczeniowego Babuśkina oraz wzorów /6-17/ i /6-18/ dotyczących schematu Giryńskiego /p. 6.2.3/, zestawiono w tabeli 7-9.

7.2.4. Dyskusja wyników badań parametrów hydraulicznych złoża filtracyjnego

Jak wynika z zamieszczonego wykresu uziarnienia gruntu /rys. 7-1/, złożo gruntowe modelowego ujęcia promienistego stanowi piasek średnioziarnisty, o średnicy miarodajnej $d_{10} = 2,15 \cdot 10^{-4}$ m. Piasek ten charakteryzuje się ustabilizowanym składem granulometrycznym, na co wskazują wyniki analiz sitowych zamieszczone w tabeli 7-4, równomiernym uziarnieniem $U = 1,9$ oraz znaczną porowatością $n_p = 37,5\%$ /tab. 7-3/.

Dokładne wyznaczenie wartości współczynnika filtracji warstwy wodonośnej napotyka na podstawową trudność, wynikającą z braku metody wzorcowej, dającej wyniki na tyle ścisłe, aby można było porównywać z nimi wyniki uzyskane za pomocą innych metod. Jak dotąd za metodę taką uznaje się powszechnie próbne pompowania, przeprowadzone przy zachowaniu warunków odpowiednich do stosowania poszczególnych wzorów obliczeniowych. Zastosowane do obliczeń wzory

Tabela 7-6

Wyniki pomiarów współczynnika filtracji za pomocą aparatu ZWK II

Nr pró- by	W i e l k o ś c i m i e r z o n e								W i e l k o ś c i o b l i c z o n e				
	Wyso- kość próbki h	Różni- ca po- ziomów ΔH	Czas prze- pływu T	Objętość przesączu				Tempe- ratura wody t	Spadek hydrau- liczny $J = \frac{\Delta H}{h}$	Współczyn- nik tempe- ratury $C = \sqrt{t} / \sqrt{t_{283}}$	Wartość współczynnika filtracji		
				nr pomiaru			$\bar{W}$				k_{ft}	k_{f283}	
				1	2	3							
				$m \cdot 10^{-3}$		s							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	52,0	38,0	180	2,41	2,37	2,35	2,376	288,45	0,731	0,8659	3,5924	3,1107	26,88
2	50,0	37,0	120	1,75	1,70	1,69	1,713	287,15	0,740	0,8957	3,8378	3,4375	29,70
3	51,5	34,0	120	1,42	1,41	1,38	1,403	287,05	0,660	0,8933	3,5242	3,1482	27,20
4	54,0	35,0	180	2,10	2,05	2,01	2,053	287,55	0,648	0,8865	3,5017	3,1042	26,82
5	53,0	31,0	120	1,30	1,26	1,25	1,270	287,15	0,585	0,8957	3,5991	3,2238	27,85
6	51,0	32,5	120	1,34	1,31	1,27	1,307	287,15	0,637	0,8957	3,4016	3,0468	26,32

Średnica cylindra $d = 0,080 \text{ m}$ Przekrój cylindra $F = 5,0265 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ $\bar{k}_{f283} = 3,1785 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} / 27,46 \text{ m/d/}$

Wyniki pomiarów współczynnika filtracji przy użyciu permeametry wielocylindrowego

Tabela 7-7

Nr cylindra	Wielkości mierzone								Wielkości obliczone							
	Wysokość próbki h	Strata ciśnienia ΔH	Czas przepływu t	Objętość przesączu W			Temperatura wody t	Spadek hydrauliczny $J = \frac{\Delta H}{h}$	Natężenie przepływu $Q = \frac{W}{t}$	Prędkość filtracji $V_f = \frac{Q}{F}$	Współczynnik temperatury $C = \frac{V_t}{V_{283}}$	Współczynnik filtracji k_f				
				nr pomiaru								$k_{ft} = \frac{V_f}{J}$	$k_{f283} = k_{ft} \cdot C$			
				1	2	3										
				1	2	3										
$m \cdot 10^{-3}$		s	$m^3 \cdot 10^{-4}$			K	-	$m^3/s \cdot 10^{-6}$	$m/s \cdot 10^{-4}$	-	$m/s \cdot 10^{-4}$		m/d			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
A. Pomiary przed rozpoczęciem badań modelowych																
1	80	75	265	1,40	1,40	1,41	1,403	290,15	0,9375	0,5294	4,2132	0,8287	4,4941	3,7243	32,18	
2	100	145	265	2,20	2,22	2,22	2,213	290,15	1,4500	0,8351	6,6457	0,8287	4,5832	3,7981	32,82	
3	80	150	260	2,64	2,76	2,70	2,700	290,15	1,8750	1,0384	8,2640	0,8287	4,4075	3,6525	31,56	
4	99	240	260	3,72	3,69	3,70	3,703	290,15	2,4242	1,4242	11,3340	0,8287	4,6753	3,8744	33,48	
5	87	270	260	4,15	4,12	4,13	4,133	290,15	3,1034	1,5896	12,6501	0,8287	4,0762	3,3780	29,19	
6	86	305	265	5,00	5,00	5,00	5,000	290,15	3,5465	1,8868	15,0151	0,8287	4,2338	3,5085	30,31	
B. Pomiary po zakończeniu badań modelowych																
1	90	81	265	1,40	1,48	1,45	1,443	291,35	0,9000	0,5445	4,3333	0,8044	4,8148	3,8730	33,46	
2	78	145	265	2,88	2,92	2,90	2,900	291,35	1,8589	1,0943	8,7087	0,8044	4,6849	3,7685	32,56	
3	88	155	260	2,80	2,92	2,94	2,887	291,35	1,7613	1,1104	8,8364	0,8044	5,0170	4,0357	34,87	
4	79	240	260	3,82	3,92	3,93	3,890	291,35	3,0379	1,4961	11,9063	0,8044	3,9192	3,1526	27,24	
5	83	270	260	4,30	4,34	4,32	4,320	291,35	3,2530	1,6615	13,2225	0,8044	4,0647	3,2696	28,25	
6	82	305	265	4,90	4,88	4,89	4,890	291,35	3,7195	1,8453	14,6847	0,8044	3,9480	3,1758	27,44	

Srednica cylindra $d = 0,040 m$

Przekrój cylindra $F = 1,2566 \cdot 10^{-3} m^2$

$$A \quad \bar{k}_{f283} = 3,6560 \cdot 10^{-4} m/s \quad /31,59 m/d/$$

$$B \quad \bar{k}_{f283} = 3,5460 \cdot 10^{-4} m/s \quad /30,64 m/d/$$

$$A + B \quad \bar{k}_{f283} = 3,6010 \cdot 10^{-4} m/s \quad /31,11 m/d/$$

T a b e l a 7-8

Wyniki pomiarów współczynnika filtracji za pomocą rurki Kamieńskiego

Nr pró- by	W i e l k o ś c i m i e r z o n e									W i e l k o ś c i o b l i c z o n e					
	Wyso- kość prób- ki h	Wyso- kość hydrau- liczna h ₀	Opad zwier- ciadła wody h ₁	Czas opadu zwierciadła wody T					Tempe- ratura wody t	Współczyn- nik K K=-ln/1- $\frac{h_1}{h_0}$	Współ- czyn- nik temp. C= $\frac{V_t}{V_{283}}$	Współczynnik fil- tracji k _f			
				nr pomiaru								$\overline{T}$	k _{ft}	k _{f283} =k _{ft} ·C	
				1	2	3	4	5							
m · 10 ⁻³			s					°K	-	-	m/s·10 ⁻⁴		m/d		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	100	150	40	85,0	87,3	84,0	84,5	83,8	84,92	288,35	0,3101	0,8681	3,6523	3,1705	27,39
2	108	150	40	103,2	103,0	104,6	102,0	102,2	103,00	288,35	0,3101	0,8681	3,2521	2,8231	24,39
3	102	150	40	96,4	98,0	98,5	97,0	98,0	97,58	288,25	0,3101	0,8703	3,2415	2,8211	24,37
4	99	150	40	82,3	84,5	83,8	84,0	83,0	83,52	288,25	0,3101	0,8703	3,6757	3,1999	27,64
5	100	150	40	86,0	84,8	83,2	81,0	83,0	83,60	288,25	0,3101	0,8703	3,7093	3,2282	27,89
6	101	150	40	89,0	91,2	90,6	92,0	91,2	90,80	288,25	0,3101	0,8703	3,4493	3,0019	25,94

Średnica rurki $d = 0,040 \text{ m}$ $\bar{k}_{f283} = 3,0408 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} / 26,27 \text{ m/d/}$

T a b e l a 7-9

Wyniki pomiarów i obliczeń współczynnika filtracji - pompowania próbne na modelu

Nr po- miaru	Wielkości pomiarzone				Wielkości obliczone							
	Depresja wody w studni s_p $m \cdot 10^{-3}$	Wydażność studni w modelu q_{st} dm^3/h	Wydażność studni $Q_{st}=4 \cdot q_{st}$ dm^3/h	Tempe- ratura wody w studni t $^{\circ}K$	Wydażność oblicze- niowa Q $m^3/s \cdot 10^{-5}$	Współczynnik temperatury $C = \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{283}}$ -	Schemat Babuškina		Schemat Girynskiego			
							Wartość współczynnika filtracji k_f					
							$k_{ft} = \frac{2 \cdot Ba}{2 \pi h_{st} \cdot s_p}$; $k_{f283} = k_{ft} \cdot C$		$k_{ft} = \frac{Q \cdot G_1}{2 \pi h_{st} \cdot s_p}$; $k_{f283} = k_{ft} \cdot C$			
	$m/s \cdot 10^{-4}$		m/d		$m/s \cdot 10^{-4}$		m/d					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	18,4	9,0	36,0	288,65	1,0000	0,8614	4,3916	3,7829	32,68	4,5091	3,8841	33,56
2	36,3	17,4	69,6	288,55	1,9333	0,8636	4,3035	3,7165	32,11	4,4187	3,8160	32,97
3	56,3	27,5	110,0	288,55	3,0555	0,8636	4,3853	3,7871	32,72	4,5028	3,8886	33,60
4	77,4	38,0	152,0	288,55	4,2222	0,8636	4,4078	3,8066	32,89	4,5259	3,9085	33,77
5	103,8	49,5	198,0	288,45	5,5005	0,8658	4,2818	3,7072	32,03	4,3965	3,8065	32,89
6	119,4	56,5	226,0	288,35	6,2778	0,8681	4,2484	3,6880	31,86	4,3622	3,7868	32,72
7	130,6	61,4	245,6	288,35	6,8222	0,8681	4,2209	3,6642	31,66	4,3340	3,7623	32,51
8	148,0	69,7	278,8	288,35	7,7444	0,8681	4,2282	3,6705	31,71	4,3414	3,7688	32,56
9	168,0	82,1	328,4	288,35	9,1224	0,8681	4,3876	3,8089	32,91	4,5051	3,9109	33,79
10	197,7	93,6	374,4	288,35	10,4000	0,8681	4,2506	3,6900	31,88	4,3645	3,7888	32,73

Wysokość filtra studni $h_{st} = 0,10 \text{ m}$

Srednica filtra w studni $D_{st} = 0,19 \text{ m}$

Mięższość warstwy wodonośnej $H_w = 0,36 \text{ m}$

Współczynnik: $Ba = 0,5077$

Współczynnik: $Gi = 0,5213$

$\bar{k}_{f283} = 3,7322 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ /32,25 m/d/; $\bar{k}_f = 3,8321 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ /33,11 m/d/

Babuškina /6-15/ i /6-16/ i Giryńskiego /6-17/ i /6-18/ dają wyniki porównywalne /tab. 7-9/.

Wartość współczynnika filtracji obliczoną ze wzoru Babuškina uznano za najbardziej prawdopodobną i wykorzystano ją do oceny przydatności innych metod wyznaczania k_f .

W tabeli 7-10 zestawiono wyniki obliczeń wartości k_f przy wykorzystaniu omówionych poprzednio metod.

W praktyce hydrogeologicznej za dokładną metodę uważa się taką, która różni się w ocenie współczynnika filtracji w granicach $\pm 10\%$ wartości uzyskanej z pompowań próbnych [63] .

Z tabeli 7-10 wynika, że metody laboratoryjne zaniżają ocenę wartości k_f w stosunku do rezultatów pompowań. Spowodowane jest to zapewne różnym stopniem zagęszczenia złoża w badanej próbce i w modelu. Najmniejsze różnice daje zastosowanie permeametry wielocylindrowego /-3,5%/ . Rozbieżności wyników obliczeń współczynnika k_f na podstawie formuł empirycznych są znaczne i zawierają się w granicach od -61,5 do +44,1%, co w zdecydowany sposób podkreśla ich przybliżony charakter. Właściwym dla tego typu uziarnienia gruntu i sposobu zagęszczenia wydaje się być wzór Kozeny, wykazujący stosunkowo najmniejsze różnice w porównaniu do wyników pompowań próbnych /+4,5%/.

7.3. Wyniki pomiarów współczynnika oporów liniowych tarcia perforowanych zbieraczy

7.3.1. Analiza wyników badań w rurach pełnościennych

Zbieracze modelowego ujęcia promienistego wody infiltracyjnej składają się z odcinka rury pełnościennej /zafiltrowej/ o długości l_0 oraz odcinka perforowanego o długości czynnej l_f , którą w trakcie badań zmieniano.

T a b e l a 7-10

Wartości współczynnika k_f złoża filtracyjnego
wyznaczone różnymi metodami

Lp.	Metoda wyznaczania współ- czynnika filtracji k_f	Wartość współczyn- nika filtracji k_{f283}		Różnica
		m/s $\cdot 10^{-4}$	m/d	
1	2	3	4	5
A. Pompowanie próbne:				
1	- schemat Babuškina	3,7322	32,25	0,0
2	- schemat Giryńskiego	3,8321	33,11	+2,7
B. Badania laboratoryjne:				
3	- aparat ZWK	3,1785	27,46	-14,8
4	- permeametr wielocy- lindrowy	3,6010	31,11	- 3,5
5	- rurka Kamieńskiego	3,0408	26,27	-18,5
C. Formuły empiryczne:				
6	- Krüger	3,3217	28,70	-11,0
7	- Hazen	5,3766	46,45	+44,1 ^ж
8	- Seelheim	4,8238	41,68	+29,2
9	- Hazen /uogólniona/	4,6010	39,75	+23,3
10	- Slichter	1,4378	12,42	-61,5 ^ж
11	- Terzaghi	3,0495	26,35	-18,3
12	- Zauerbrey	3,0104	26,01	-19,3
13	- Kozeny	3,9002	33,70	+ 4,5

/Pomijając formuły o znacznej różnicy wyników /ж/ i nie uwzględniając wagi wyników poszczególnych metod obliczeniowych, wartość współczynnika filtracji otrzymana na drodze pompowań próbnych wg schematu Babuškina leży w najbliższej średniej arytmetycznej pozostałych wyników/.

Pomiary współczynnika oporów liniowych w rurach pełnościennych /przed wykonaniem perforacji/ obejmowały przepływy: laminarny, w strefie przejściowej i burzliwy. Ich charakterystyczne wyniki przedstawiono na rysunku 7-2.

W zakresie przepływu laminarnego $/Re \leq Re_{kr1} = 2260/$ uzyskano praktyczną zgodność ze wzorem Hagen'a - Poiseville'a, a równanie najlepiej aproksymujące wyniki pomiarów ma postać:

$$\lambda_0 = \frac{64,045}{Re^{0,995}}, \quad /7-1/$$

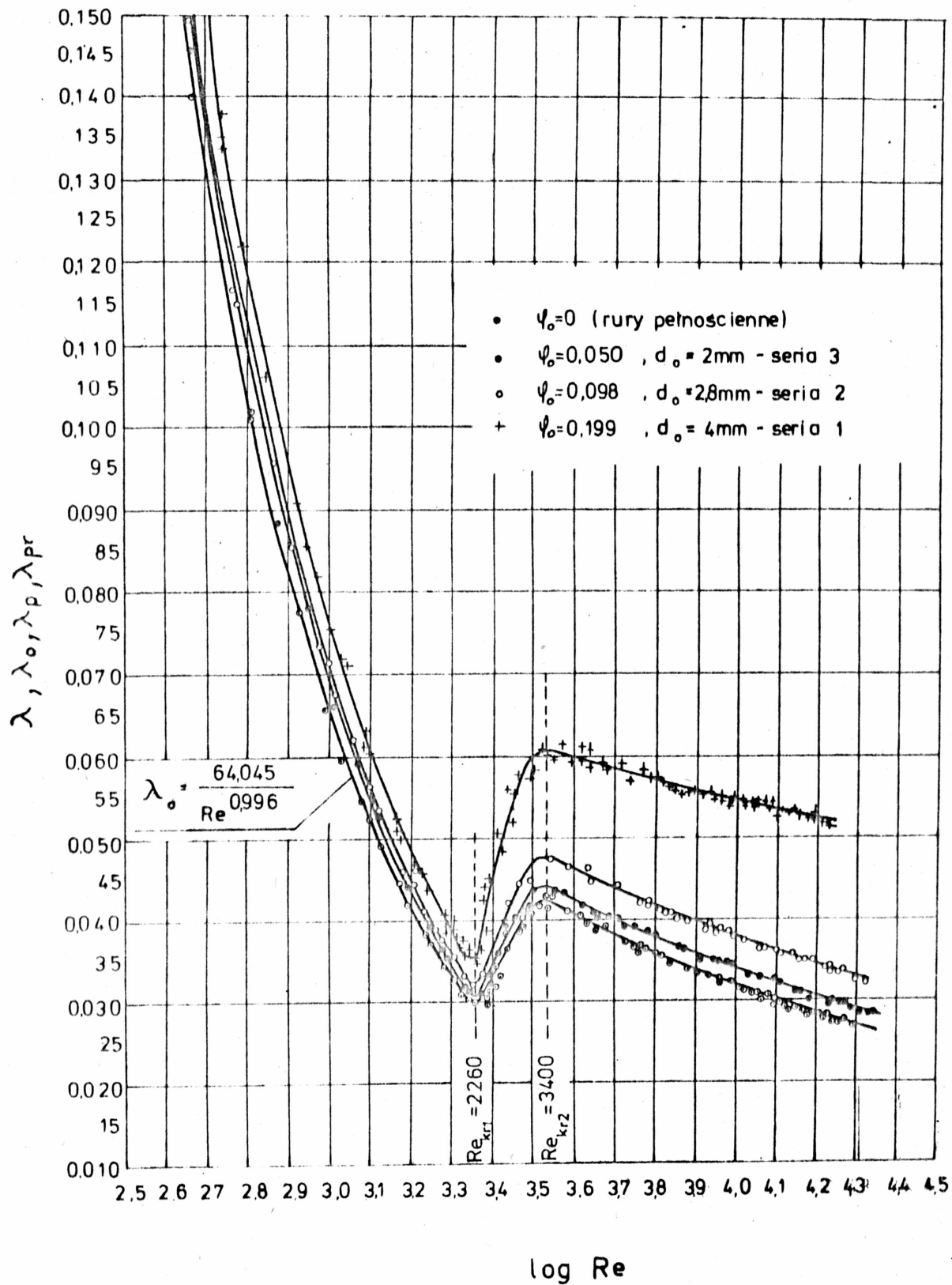
Współczynniki liczbowe występujące we wzorze /7-1/ wyznaczono na EMC przy zastosowaniu regresji liniowej metodą najmniejszych kwadratów [52,59] .

Zjawisko przepływu przejściowego jest złożone i nie zostało dotychczas w pełni wyjaśnione. Wskutek turbulencji wzrastającej od ścianki w kierunku do osi rury, rozkład miejscowych prędkości w poprzecznym przekroju strumienia cieczy różni się przy przepływach przejściowych od rozkładu parabolicznego, charakterystycznego dla ruchu laminarnego [8,55] .

Ustalone doświadczalnie krytyczne liczby Reynolds'a ograniczające zakres przepływu przejściowego, zarówno pierwsza Re_{kr1} jak i druga Re_{kr2} są zależne od średnicy rury i liczby Prandtl'a [40] , zatem przeprowadzone w pracy badania rur o jednej tylko średnicy $d_w = 9,9$ mm nie mogą być uogólnione. Do opisania współczynnika oporów liniowych λ_{pr} w obszarze ruchu przejściowego, tj. w zakresie liczb Reynolds'a od $Re_{kr1} = 2260$ do $Re_{kr2} = 3400$, zastosowano wzór aproksymacyjny:

$$\lambda_{pr} = /356,1 - 197,3 \log Re + 27,7 \log^2 Re/^{-2} \quad /7-2/$$

Współczynniki równania /7-2/ znaleziono stosując regresję krzywoliniową.



Rys. 7-2 Zależność współczynnika λ_0 , λ_{pr} , λ i λ_p od liczby Re wg przeprowadzonych badań

Wzór /7-2/ może służyć wyłącznie do porównania wartości współczynnika oporów liniowych w rurach pełnościennych i perforowanych.

W zakresie liczb Reynolds'a: $Re_{kr2} \leq Re \leq 22100$ przepływ cieczy odpowiadał warunkom strefy przejściowej ruchu burzliwego. Dobrą zgodność z wynikami pomiarów /rys. 7-2/ otrzymano stosując do obliczeń aproksymacyjny wzór Siwonia [56]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log \left(\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,269 \cdot \frac{k_z}{d_w} \right) , \quad /7-3/$$

dla $k_z/d_w = 0,00035$.

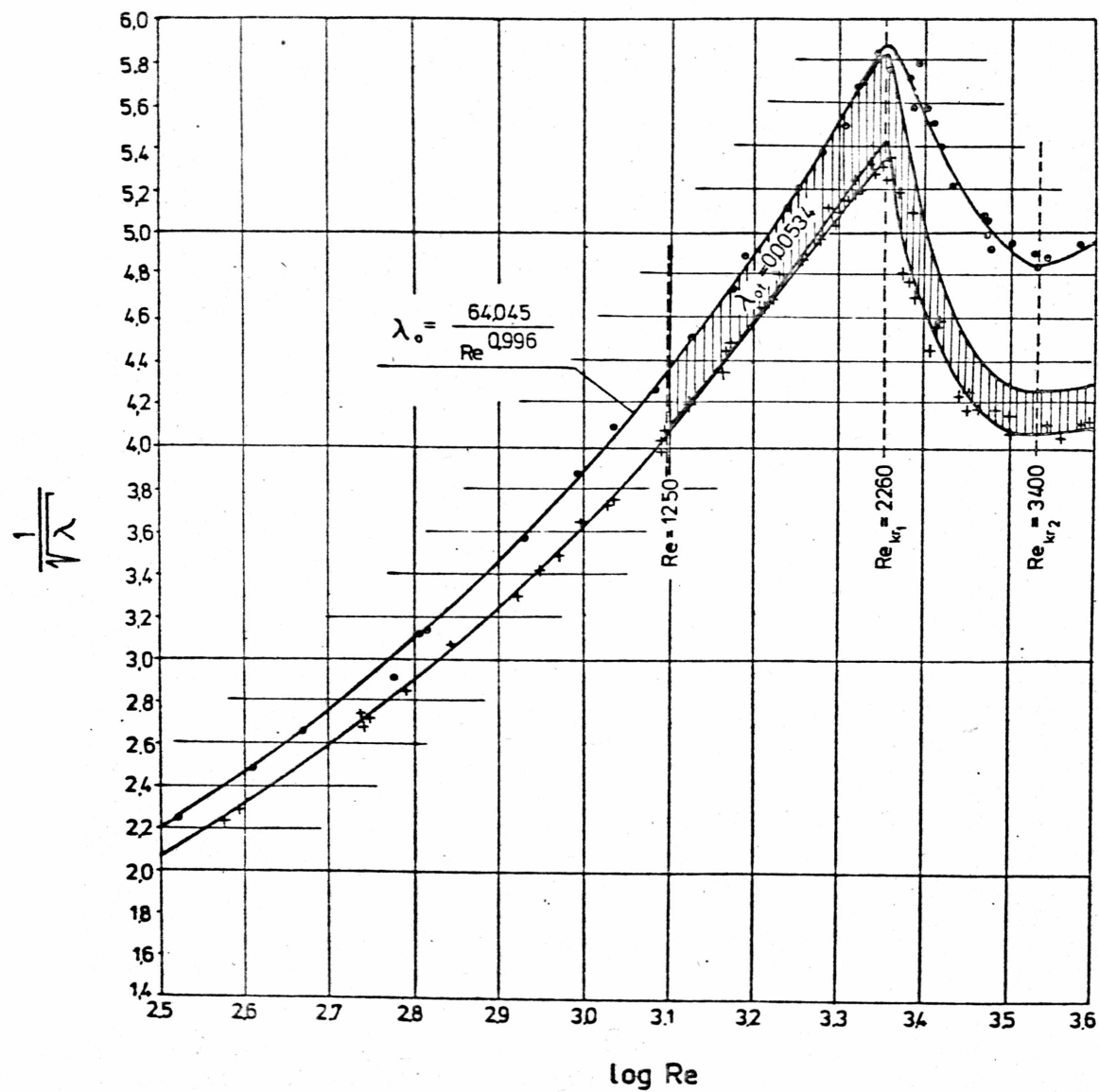
Uniwersalna postać wzoru /7-3/ nadaje się do obliczania współczynnika oporów λ w rurach pełnościennych w całym zakresie przepływu burzliwego i pozwala uzyskać wyniki zgodne z obliczonymi ze wzoru Colebrooka-White'a [55] .

7.3.2. Analiza wyników badań w rurach perforowanych

W pracach [53,54] wykazano, że w obszarze przepływu burzliwego otwory wykonane w ścianie rury wywołują przerwanie ciągłości występowania podwarstwy laminarnej i powodują powstanie przy każdym z nich zaburzeń ruchu strumienia cieczy, które w warunkach odpowiednio dużej przepuszczalności φ_0 ścianki rury mogą się przenosić w kierunku ruchu cieczy. Współczynnik oporów liniowych λ_p , zależny od liczby Re i bezwymiarowych wielkości charakteryzujących geometryczne podobieństwo wnętrza rur, stanowi wówczas sumę zastępczego współczynnika oporów λ_{ot} , spowodowanego obecnością otworów, wywołujących miejscowe straty hydrauliczne oraz współczynnika oporów liniowych λ_t , to jest:

$$\lambda_p = \lambda_{ot} + \lambda_t , \quad /7-4/$$

Wyniki badań zaprezentowane na rysunku 7-3 potwierdzają teoretyczną hipotezę podaną w pracy [55], że wzór /7-4/ jest słuszny nie tylko dla przepływu burzliwego, lecz również w obszarze ruchu



7.3 Zależność współczynnika λ_0 , λ_p i λ_{pr} od liczby Re w zakresie przepływu laminarnego i przejściowego, dla $\varphi_0 = 0,199$.

przejściowego i częściowo - ruchu laminarnego. W zakresie liczb Re większych od ok. 1250 współczynnik λ_{ot} jest - przy określonym sposobie rozmieszczenia otworów na powierzchni ścianki rury - zależny wyłącznie od przepuszczalności φ_0 , charakteryzującej jej geometryczne podobieństwo i może być wyznaczony ze wzoru:

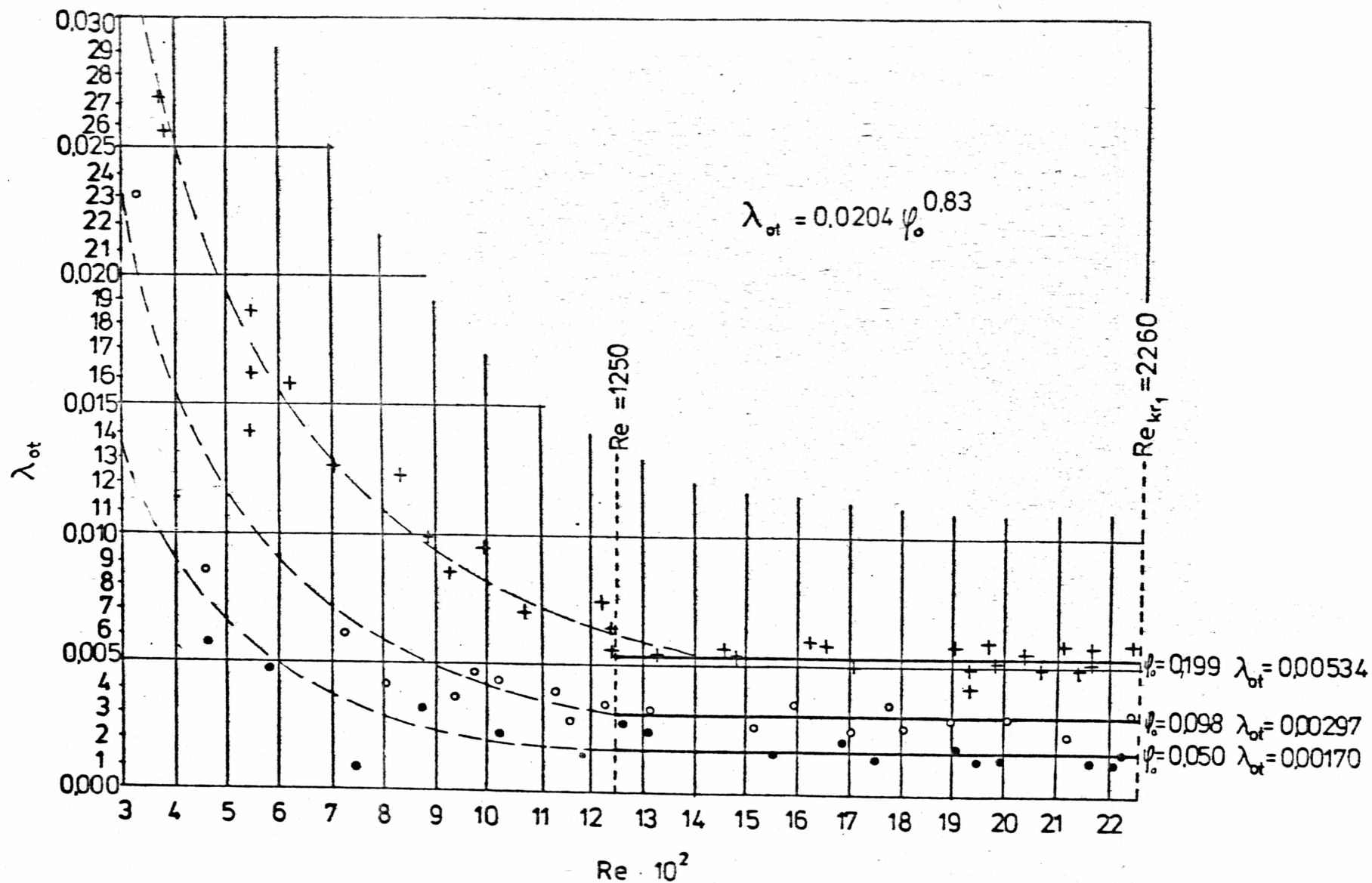
$$\lambda_{ot} = a \cdot \varphi_0^b, \quad /7-5/$$

przy czym wartości współczynników a i b są stałe dla określonego sposobu rozmieszczenia otworów, wykonanych w ściance rury i praktycznie niezależne od rodzaju ruchu cieczy w rurze, tj. są jednakowe dla przepływu laminarnego i burzliwego.

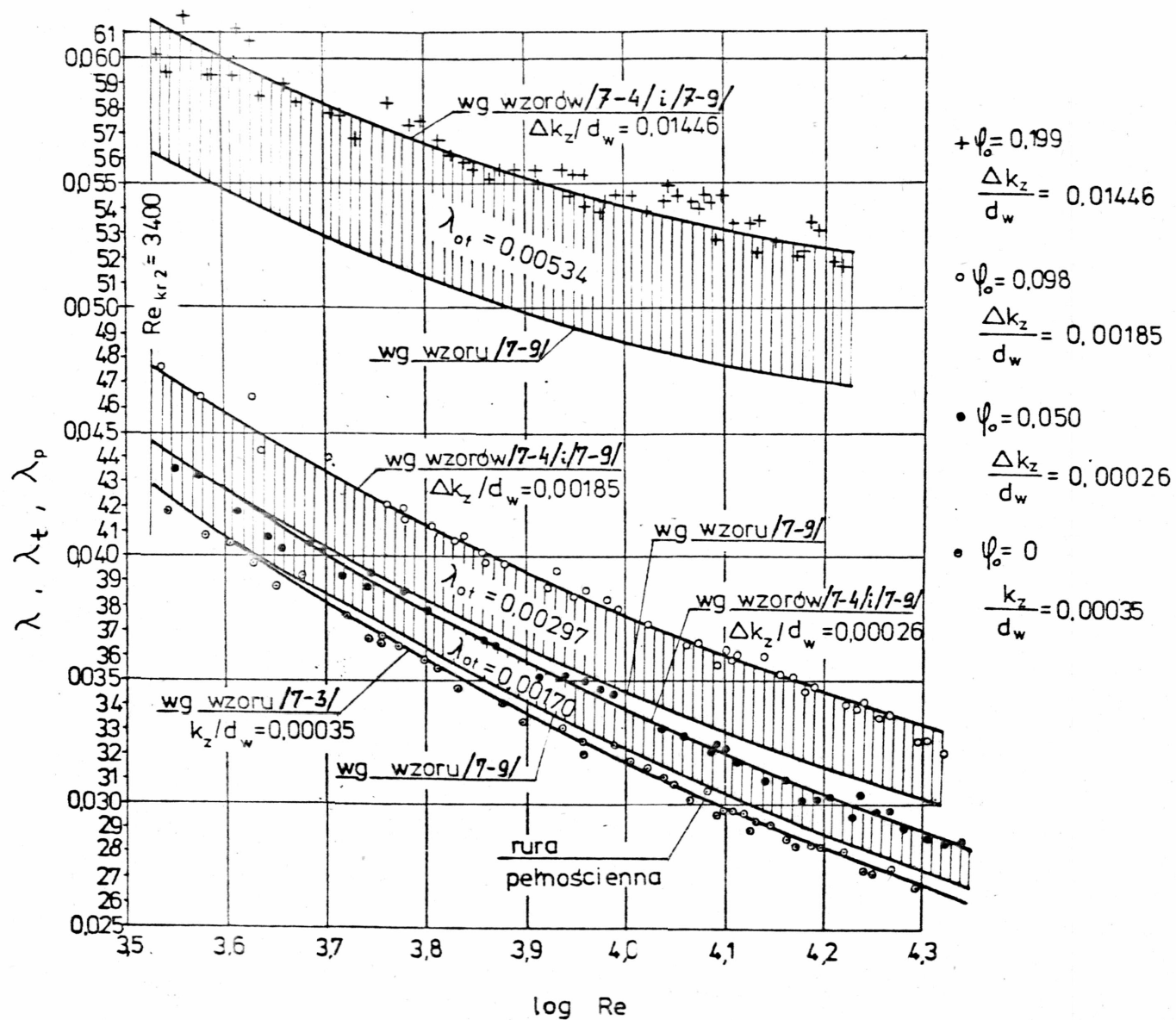
Z wykresów zamieszczonych na rysunku 7-4 wynika, że wartość liczby Reynolds'a odpowiadająca granicy przepływu przejściowego i burzliwego dla miejscowych oporów hydraulicznych, spowodowanych obecnością otworów perforacji i charakteryzowanych współczynnikiem λ_{ot} , wynosi około 1250. Poniżej tej granicy współczynnik λ_{ot} jest zależny nie tylko od przepuszczalności φ_0 ścianki rury, lecz również od liczby Reynolds'a, tj. jego wartości zwiększają się wraz ze zmniejszeniem się liczby Re . Wniosek ten jest praktycznie zgodny z wynikami badań John'a i Rowley'a, cytowanymi w pracach [2, 55]. Wykazali oni, że dla miejscowych oporów hydraulicznych spowodowanych wbudowaniem trójkąta w prosty odcinek przewodu - co stanowi analogię do otworów wykonanych w ściance rury - wartość krytycznej liczby Reynolds'a wynosi około 1000.

Współczynnik oporów liniowych λ_t we wzorze /7-4/ jest w obszarze przepływu laminarnego równy współczynnikowi oporów λ_0 /niezależnie od przepuszczalności ścianki rury oraz sposobu rozmieszczenia otworów/ i może być wyznaczony ze wzoru /7-1/.

Wyniki badań w zakresie przepływu burzliwego /rys. 7-5/ są w zasadzie zgodne z rozważaniami zaprezentowanymi w cytowanych już



Rys. 7-4 Zależność $\lambda_{ot} / Re, \varphi_o /$ dla przepływu laminarnego
seria 1, 2 i 3 pomiarów



Rys. 7-5 Zależności λ/Re , λ_t/Re i λ_p/Re w zakresie przepływu burzliwego dla 1, 2 i 3 serii pomiarów

pracach Siwonia. Stwierdzono, że wskutek wzajemnego oddziaływania zaburzeń ruchu strumienia cieczy powstałych przy każdym otworze, występuje zwiększenie Δk_z - zastępczej chropowatości ścianki rury perforowanej w porównaniu z naturalną chropowatością k_z ścianki takiej samej rury pełnościennej. Wielkość $\Delta k_z/d_w$ - przy określonym sposobie rozmieszczania otworów perforacji, zależy wyłącznie od przepuszczalności φ_0 i może być obliczona ze wzoru:

$$\frac{\Delta k_z}{d_w} = A \cdot \varphi_0^B, \quad /7-6/$$

gdzie: - współczynniki A i B są stałe,

Po uwzględnieniu zależności /7-1/, /7-3/, /7-4/, /7-5/ i /7-6/ wzory umożliwiające obliczanie wartości współczynnika oporów liniowych λ_p w rurach perforowanych, przyjmują postać uogólnioną:

- w obszarze przepływu laminarnego; $1250 < Re < 2260$:

$$\lambda_p = \lambda_{ot} + \frac{64}{Re}, \quad /7-7/$$

lub

$$\lambda_p = a \cdot \varphi_0^b + \frac{64 \cdot \nu}{v \cdot d_w}, \quad /7-8/$$

- w obszarze ruchu burzliwego:

/7-4/

$$\lambda_p = \lambda_{ot} + \lambda_t$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_t}} = -2 \cdot \log \left[\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,269 \frac{k_z + \Delta k_z}{d_w} \right], \quad /7-9/$$

lub

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_t}} = -2 \cdot \log \left[\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,269 \left(A \cdot \varphi_0^B + \frac{k_z}{d_w} \right) \right], \quad /7-10/$$

Wartości współczynników a, b i A, B we wzorach /7-8/ i /7-10/ są zależne od sposobu rozmieszczenia otworów perforacji na powierzchni ścianki rury. Dla sposobu przyjętego w zbieraczach modelowego

ujęcia promienistego /seria 1, 2 i 3 pomiarów - rys. 6-4/ wynoszą:

$$a = 0,0204, \quad b = 0,830, \quad A = 1,560, \quad B = 2,90.$$

Wpływ sposobu rozmieszczenia otworów perforacji na wartość współczynnika λ_p w obszarze ruchu burzliwego uwidoczniło na rysunku 7-6, na którym naniesiono wykresy 1 i 2, charakteryzujące wyniki badań w 2 i 3 serii pomiarów, a także - dla tych samych przepuszczalności φ_0 ścianki rury, równych 0,05 i 0,10 - punkty obrazujące wyniki pomiarów serii 4 i 5 oraz wykresy 4 i 5 wg badań Siwonia [53, 54] dla przypadku, gdy linie łączące środki otworów perforacji tworzą trójkąty równoboczne i $\varphi_0 \leq 0,126$. Wpływ ten jest w zakresie ruchu burzliwego większy niż w obszarze przepływów przejściowych i laminarnych, kiedy jest praktycznie pomijalny.

Szczegółowa postać wzorów na λ_p badanych rur filtrowych modelowego ujęcia promienistego jest następująca:

- dla strefy przepływów laminarnych; $300 < Re < 2260$:

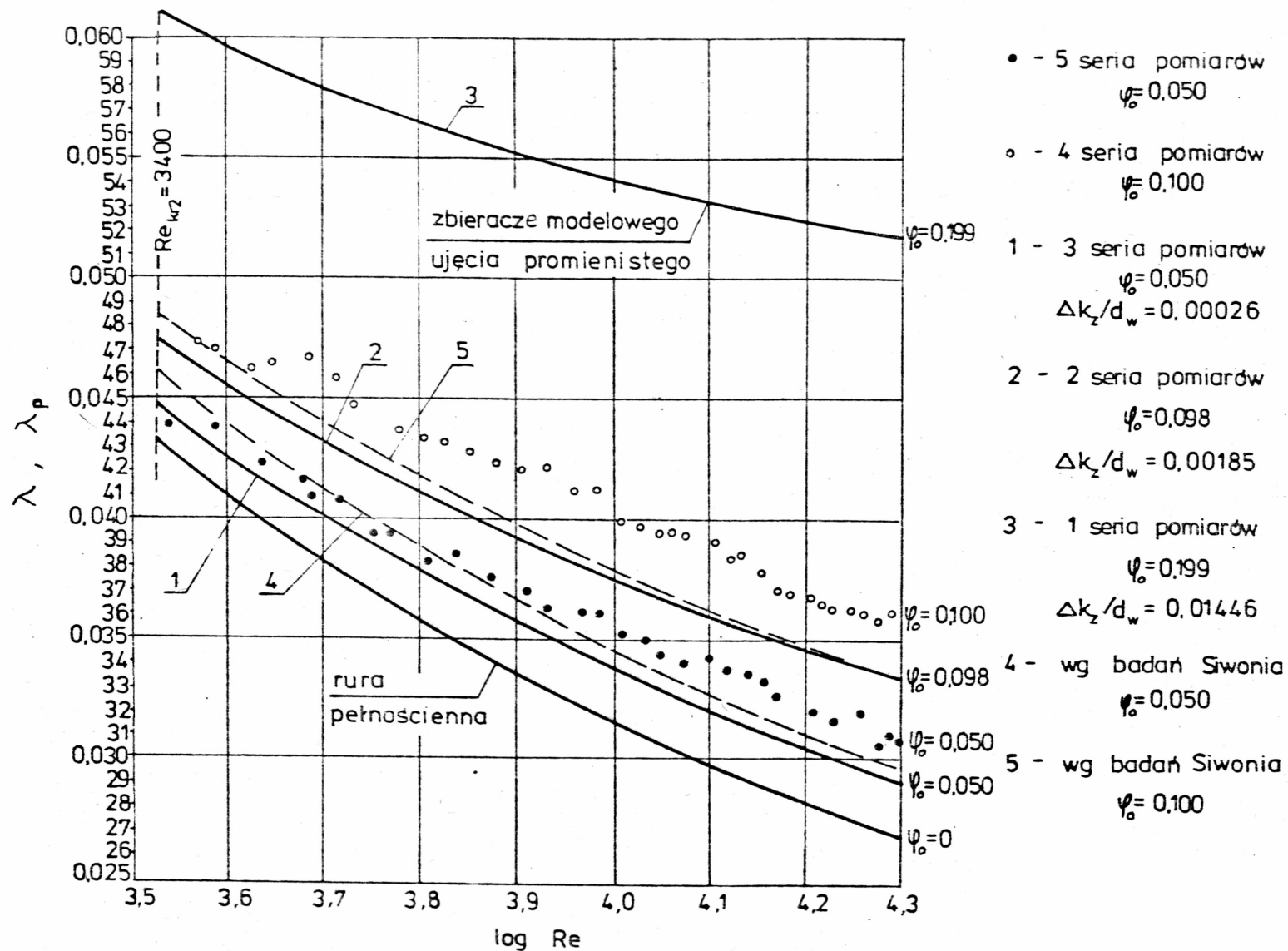
$$\lambda_p = \frac{70,312}{Re^{0,989}}, \quad /7-11/$$

- dla strefy ruchu przejściowego; $2260 < Re < 3400$:

$$\lambda_p = 157,706 \log^2 Re - 404,325 \log Re + 712,326 / Re^2, \quad /7-12/$$

- dla strefy ruchu burzliwego; $3400 < Re < 22100$:

$$\lambda_p = \left[-2 \cdot \log \left(\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,00398 \right) \right]^{-2} + 0,00534. \quad /7-13/$$



Rys. 7-6 Zależność $\lambda_p / Re, \varphi_0 /$ dla różnych sposobów rozmieszczenia otworów perforacji

8. ANALIZA BŁĘDÓW POMIARÓW I OBLICZEN

Wyniki pomiarów mogą być obarczone błędami przypadkowymi, systematycznymi oraz nadmiernymi /pomyłkami/, wynikającymi z niedoskonałości metod i przyrządów pomiarowych, wpływu zewnętrznych czynników zakłócających, itp. [16,17,52] .

Błędy przypadkowe eliminowano w znacznym stopniu przez kilkukrotne odczytywanie mierzonej wielkości i wprowadzanie do obliczeń wartości średniej.

Błędy nadmierne wykrywano w znacznej mierze przez dokładną analizę wyników pomiarów. Po wstępnym obliczeniu parametrów hydraulicznych, a w szczególności współczynnika filtracji złoża modelowego eliminowano błędy nadmierne metodą Dixona, stosowaną dla małej liczby pomiarów i odrzucano niepewny wynik /pomiar/, ryzykując popełnienie błędu z prawdopodobieństwem mniejszym niż 0,01 - w metodzie "pompowań próbnych", oraz 0,05 - w badaniach laboratoryjnych.

Błędy systematyczne eliminowano przez staranne wzorcowanie aparatury i przyrządów pomiarowych przed realizacją każdego zadania badawczego.

Wartości maksymalnych błędów, z jakimi określone są wartości parametrów k_f i λ_p , zależą od błędów pomiaru wielkości, a także od przyjętej metody pomiaru.

8.1. Analiza dokładności wyznaczenia wartości współczynnika filtracji złoża modelowego na podstawie pompowań próbnych wg modelu Babuškina

Wartości współczynnika filtracji obliczono ze wzorów /6-15/ i /6-16/:

$$k_f = \frac{Q_{st}}{2 \pi \cdot h_{st} \cdot s_p} \left[\log \frac{1,5 \cdot h_{st}}{D_{st}} - 1,15 \log \frac{H_w + 0,25 \cdot h_{st}}{3 / H_w + 0,75 \cdot h_{st}} \right]$$

Parametrami mierzonymi bezpośrednio na modelu są: $Q_{st} = 4 \cdot q_{st}$ /modelowy obszar filtracji stanowi czwartą część walca/ oraz s_p . Pozostałe parametry, takie jak: h_{st} , D_{st} , H_w , można przyjąć za stałe /błędy przypadkowe niższego rzędu/.

Błędy systematyczne określenia Q_{st} w temperaturze t pomiarów, wynikające ze skali przepływów rotametru wodnego, cechowanego w temperaturze 288,15 K, usuwano stosując poprawkę określoną wzorami /6-23/ i /6-24/:

$$q_{st} = q_{288} \cdot \sqrt{\frac{\beta_{288}}{\beta_t} \cdot \frac{\beta_p - \beta_t}{\beta_p - \beta_{288}}}$$

Maksymalny błąd względny δ_{k_f} można obliczyć ze wzoru:

$$\delta_{k_f} = \frac{\Delta k_f}{k_f} = \pm \frac{1}{k_f} \left(\left| \frac{\partial k_f}{\partial q_{st}} \cdot \Delta q_{st} \right| + \left| \frac{\partial k_f}{\partial s_p} \cdot \Delta s_p \right| \right) \quad /8-1/$$

Oszacowano, że wyniki pomiarów mogą być obciążone następującymi błędami bezwzględnymi:

- wydajność studni, mierzona rotametrem o zakresie natężeń przepływów $10 \div 100 \text{ dm}^3/\text{h}$ $\Delta q_{st} = 0,5 \text{ dm}^3/\text{h}$,
- depresja wody w studni, mierzona wodowskazem szpilkowym; dokładność oszacowania poziomu zetknięcia się sondy z powierzchnią wody w piezometrze wraz z dokładnością odczytu wodowskazu $\Delta s_p = 0,3 \text{ mm}$.

Wartości maksymalnych błędów względnych δ_{k_f} obliczono dla skrajnych depresji wody w studni na podstawie tabeli 7-9.

Wynoszą one:

- dla depresji najmniejszej - 8,70%
- dla depresji największej - 0,69%.

Maksymalnego błędu względnego statystycznego nie obliczono ze względu na małą liczbę mierzonych wielkości, występujących we wzorze /8-1/.

Uwzględniając wpływ błędów oszacowania pozostałych parametrów występujących we wzorach /6-15/ i /6-16/ na wartość błędów maksymalnych, korzystano ze wzoru:

$$\sigma_{k_f} = \frac{\Delta k_f}{k_f} \pm \frac{1}{k_f} \left(\left| \frac{\partial k_f}{\partial q_{st}} \cdot \Delta q_{st} \right| + \left| \frac{\partial k_f}{\partial s_p} \cdot \Delta s_p \right| + \left| \frac{\partial k_f}{\partial h_{st}} \cdot \Delta h_{st} \right| + \left| \frac{\partial k_f}{\partial D_{st}} \cdot \Delta D_{st} \right| + \left| \frac{\partial k_f}{\partial H_w} \cdot \Delta H_w \right| \right), \quad /8-2/$$

W rozpatrywanym przypadku występuje pięć zmiennych niezależnych, wpływających na wartość k_f , a zatem istnieje małe prawdopodobieństwo takiego zdarzenia, w którym błędy przypadkowe wszystkich zmiennych przyjmują jednocześnie wartości graniczne, a ponadto jednaki układ znaków. Dlatego obliczono tutaj również względny maksymalny błąd statystyczny $\sigma_{k_f}^{\pi} = F_{k_f}/k_f$, na poziomie ufności $p = 0,95$ ze wzoru:

$$\sigma_{k_f}^{\pi} = \frac{F_{k_f}}{k_f} = \pm \frac{1}{k_f} \sqrt{\left(\frac{\partial k_f}{\partial q_{st}} \cdot \Delta q_{st} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_f}{\partial s_p} \cdot \Delta s_p \right)^2 + \left(\frac{\partial k_f}{\partial h_{st}} \cdot \Delta h_{st} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_f}{\partial D_{st}} \cdot \Delta D_{st} \right)^2 + \left(\frac{\partial k_f}{\partial H_w} \cdot \Delta H_w \right)^2} \quad /8-3/$$

Przyjęto, że wyniki pomiarów parametrów h_{st} , D_{st} i H_w mogą być obciążone następującymi błędami bezwzględnymi:

- parametry konstrukcyjne studni h_{st} i D_{st} mierzone przymiarem z podziałką milimetrową - $\Delta h_{st}, \Delta D_{st} = 1,0 \text{ mm}$,
- miąższość warstwy wodonośnej H_w mierzona sondą z podziałem milimetrowym - $\Delta H_w = 5,0 \text{ mm}$.

Zestawienie wartości błędów maksymalnych podano w tabeli 8-1.

T a b e l a 8-1

Maksymalne błędy względne wyznaczenia współczynnika filtracji

Depresja wody w studni	Wartość błędów maksymalnych w %		
	względny od wielkości błędów: q_{st}, s_p	względny od wielkości błędów: $q_{st}, s_p, h_{st}, D_{st}, H_w$	względny statystyczny od wielkości błędów: $q_{st}, s_p, h_{st}, D_{st}, H_w$
- najmniejsza	8,70	11,06	6,69
- największa	0,69	1,91	1,19

8.2. Analiza dokładności wyznaczenia wielkości współczynnika liniowych oporów tarcia zbieraczy ze wzoru Darcy-Weisbacha

Wartość współczynnika oporów liniowych obliczono ze wzoru /6-21/:

$$\lambda_p = \frac{2g \cdot d_w}{1} \cdot \frac{\Delta h}{v^2},$$

gdzie: V - prędkość przepływu wody określona ze wzorów /6-22/:

$$Q = F \cdot V, \quad Q = \frac{W}{T},$$

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi d_w^2}, \quad V = \frac{4 \cdot W}{\pi d_w^2 T},$$

- stąd ostatecznie wzór /6-21/ przyjmuje postać:

$$\lambda_p = \frac{\pi^2 \cdot g \cdot d_w^5 \cdot T^2 \cdot \Delta h}{8 \cdot 1 \cdot W^2}, \quad /8-4/$$

Maksymalny błąd względny $\delta_{\lambda p}$ wyraża się zależnością /8-5/, natomiast maksymalny względny błąd statystyczny $\delta_{\lambda p}^{\pi}$ na poziomie ufności $p = 0,95$ - wzorem /8-6/:

$$\delta_{\lambda p} = \frac{\Delta \lambda_p}{\lambda_p} = \pm \frac{1}{\lambda_p} \left(\left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial d_w} \cdot \Delta d_w \right| + \left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial (\Delta h)} \cdot \Delta / \Delta h / \right| + \left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial T} \cdot \Delta T \right| + \right. \\ \left. + \left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial l} \cdot \Delta l \right| + \left| \frac{\partial \lambda_p}{\partial W} \cdot \Delta W \right| \right), \quad /8-5/$$

$$\delta_{\lambda p}^{\Sigma} = \frac{\Sigma \lambda_p}{\lambda_p} = \pm \frac{1}{\lambda_p} \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda_p}{\partial d_w} \cdot \Delta d_w \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_p}{\partial (\Delta h)} \cdot \Delta / \Delta h / \right)^2 +} \\ + \left(\frac{\partial \lambda_p}{\partial T} \cdot \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_p}{\partial l} \cdot \Delta l \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda_p}{\partial W} \cdot \Delta W \right)^2} \\ /8-6/$$

Oszacowano, że wyniki pomiarów mogą być obarczone następującymi błędami bezwzględными:

- | | |
|---|--|
| - pomiar średnicy - suwmiarką | $\Delta d_w = 0,1 \text{ mm}$ |
| - pomiar straty ciśnienia - wodowskazem szpilkowym | $\Delta / \Delta h / = 0,3 \text{ mm}$ |
| - pomiar czasu - sekundomierzem | $\Delta T = 0,2 \text{ s}$ |
| - pomiar długości - przymiar z podziałką milimetrową | $\Delta l = 1,0 \text{ mm}$ |
| - pomiar objętości wody - naczynia miernicze o pojemności 1,2 i 5 dm ³ | $\Delta W_1 = 0,005 \text{ dm}^3$ |
| | $\Delta W_2 = 0,01 \text{ dm}^3$ |
| /błąd określenia momentu wypełnienia się naczynia - ustalony doświadczalnie/ | $\Delta W_3 = 0,02 \text{ dm}^3$ |

Wyniki obliczeń błędów maksymalnych zestawiono w tabeli 8-2.

T a b e l a 8-2

Maksymalne błędy względne wyznaczenia współczynnika liniowych oporów zbieraczy modelowego ujęcia wody

Rodzaj ruchu cieczy	Błąd maksymalny	Wartość błędu w %	
		- przy Re_{min}	- przy Re_{max}
A. Ruch laminarny $300 < Re < 2260$	a/ względny $\bar{\epsilon}_{\lambda p}$	17,34	8,66
	b/ względny statystyczny $\bar{\epsilon}_{\lambda p}^{\pi}$	12,17	5,45
B. Ruch przejściowy $2260 < Re < 3400$	a/ względny $\bar{\epsilon}_{\lambda p}$	8,71	8,08
	b/ względny statystyczny $\bar{\epsilon}_{\lambda p}^{\pi}$	5,47	5,39
C. Ruch burzliwy $3400 < Re < 22100$	a/ względny $\bar{\epsilon}_{\lambda p}$	8,11	7,53
	b/ względny statystyczny $\bar{\epsilon}_{\lambda p}^{\pi}$	5,41	5,34

Należy oczekiwać, że wartości średnich błędów wielkości mierzonych i obliczonych będą o około 2/3 niższe od wartości błędów maksymalnych, na poziomie ufności $p = 0,99$ i przy założeniu rozkładu normalnego błędów [16].

9. WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH WPŁYWU WYBRANYCH PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH UJĘCIA PROMIENISTEGO NA JEGO WYDAJNOŚĆ

9.1. Omówienie wyników pomiarów wydajności przy zmianach parametrów konstrukcyjnych ujęcia

Zgodnie z zamieszczonym w p. 6.4 programem przeprowadzono wszystkie przewidziane w tym programie pomiary, a wyniki zestawiono w tabelach 9-1 i 9-2.

W tabeli 9-1 zestawiono wyniki pomiarów wydajności q_M pojedynczego zbieracza pracującego w zespole n zbieraczy, w temperaturze t . W tabeli 9-2 przedstawiono wyniki pomiarów wydajności ujęcia Q_{uM} sprowadzone do temperatury 283,15 K.

Na podstawie przeprowadzonej w p. 4.3 analizy wymiarowej ocenę wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych ujęcia na jego wydajność dokonano w oparciu o zredukowane wyniki pomiarów. Wyniki obliczeń zredukowanej wydajności ujęcia $Q_u/k_f r_0^2$ przedstawiono w tabeli 9-3, a niektóre z nich - dla $s_p/r_0 = 32,32$, naniesiono na wykresy przedstawione na rysunkach 9-1 do 9-8.

Na rysunkach 9-1, 9-2 i 9-3 przedstawiono zależność zredukowanej wydajności ujęcia promienistego od liczby zbieraczy, dla $H_w/r_0 = 72,73, 96,97$ i $121,21$.

Na rysunkach 9-4, 9-5 i 9-6 zobrazowano zależność $Q_u/k_f r_0^2$ od l_f/r_0 , dla $H_w/r_0 = 72,73, 96,97$ i $121,21$.

Na rysunkach 9-7 i 9-8 przedstawiono zależność $Q_u/k_f r_0^2$ od z/r_0 , dla $H_w/r_0 = 72,73$ i $121,21$, a także dla $H_w/r_0 = 96,97$.

T a b e l a 9-1

Zestawienie wyników pomiarów wydajności q_{Mt} pojedynczego zbieracza
ujęcia promienistego (dm^3/h)

długość zbieracza l_z , mm	depresja w studni zb. s_p , mm	$H_W = 360$ mm						$H_W = 480$ mm									$H_W = 600$ mm								
		$z = 120$ mm			$z = 240$ mm			$z = 120$ mm			$z = 240$ mm			$z = 360$ mm			$z = 240$ mm			$z = 360$ mm			$z = 480$ mm		
		n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3
		Nr. zadania badawczego w dośw. III						Numer zadania badawczego w doświadczeniu II									Numer zadania badawczego w doświadczeniu I								
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	80	69,00	57,50	51,33	61,00	53,00	49,33	68,00	60,00	55,00	58,00	52,50	47,67	49,00	44,00	38,33	65,50	60,00	51,00	56,00	50,00	44,00	52,00	47,00	39,33
1000		110,00	99,00	86,67	98,00	91,50	83,33	101,00	97,50	90,00	90,00	84,00	78,33	78,00	71,00	60,00	97,50	90,50	85,67	85,00	80,00	66,67	85,00	76,00	61,67
1500		130,00	121,00	113,33	121,00	117,50	110,00	126,00	122,00	114,33	111,00	107,00	106,33	101,00	92,00	81,67	115,00	112,50	110,00	110,00	101,00	90,00	110,00	99,00	86,67
2500		148,00	140,00	133,33	146,00	140,00	131,00	142,00	138,00	129,33	127,00	123,50	112,00	122,00	113,50	106,67	136,00	130,00	126,67	132,00	125,00	116,67	134,00	125,00	113,33
3600		156,00	146,00	138,33	150,00	145,00	136,67	148,00	142,00	134,67	133,00	130,00	126,33	128,00	120,00	112,00	142,00	137,50	133,33	140,00	135,00	130,00	140,00	130,00	125,00
500	160	117,00	107,50	96,67	110,00	103,00	95,00	114,00	108,00	102,33	108,00	100,00	93,33	96,00	86,00	76,00	118,00	110,00	98,00	104,00	94,00	83,33	97,00	92,00	75,00
1000		168,00	160,00	145,00	164,00	155,00	140,00	159,00	155,00	148,00	158,00	144,00	133,33	147,00	136,50	118,67	163,00	155,00	138,00	155,00	150,00	130,00	155,00	140,00	116,67
1500		204,00	192,50	175,00	192,00	187,50	171,67	192,00	186,00	172,67	176,00	169,50	164,67	172,00	163,00	150,67	188,00	180,00	170,00	185,00	180,00	158,33	182,00	175,00	146,67
2500		220,00	212,50	194,67	213,00	205,00	193,33	208,00	200,00	187,33	195,00	187,50	187,33	195,00	186,00	170,00	220,00	210,00	201,67	210,00	200,00	181,67	202,00	195,00	173,33
3600		228,00	217,50	201,00	220,00	210,00	196,67	215,00	210,00	195,33	202,00	195,50	191,00	206,00	191,50	177,00	228,00	218,50	210,00	218,00	205,00	190,67	208,00	200,00	181,67
500	240	166,00	155,00	144,00	155,00	150,00	135,00	163,00	155,00	141,67	159,00	140,00	129,67	136,00	120,50	110,00	165,00	160,00	138,33	147,00	139,00	120,00	141,00	130,00	110,00
1000		228,00	220,00	200,00	219,00	210,00	190,00	213,00	207,00	192,00	208,00	190,00	181,67	192,00	182,50	161,67	212,00	210,00	185,00	207,50	195,00	174,00	200,00	187,50	158,33
1500		254,00	242,50	228,33	253,00	240,00	223,33	247,00	235,00	221,67	232,00	221,50	216,00	222,00	210,00	193,33	250,00	237,00	218,00	238,00	220,00	206,67	230,00	220,00	191,67
2500		268,00	258,00	248,33	273,00	257,50	243,33	260,00	250,00	241,67	252,00	242,50	238,33	241,00	232,00	216,67	275,00	266,00	255,00	257,00	245,00	230,00	252,00	245,00	220,00
3600		275,00	266,00	251,67	280,00	265,00	248,00	268,00	258,50	248,33	261,00	248,50	245,00	248,00	238,00	221,67	285,00	272,50	235,00	265,00	255,00	237,00	262,00	255,00	228,00
temp. wody, K		292,35	292,35	292,45	293,25	293,05	292,55	292,85	288,15	287,85	287,65	287,65	288,75	288,55	288,55	288,35	289,05	289,55	290,05	290,65	290,85	290,95	291,95	291,35	290,95

T a b e l a 9-2

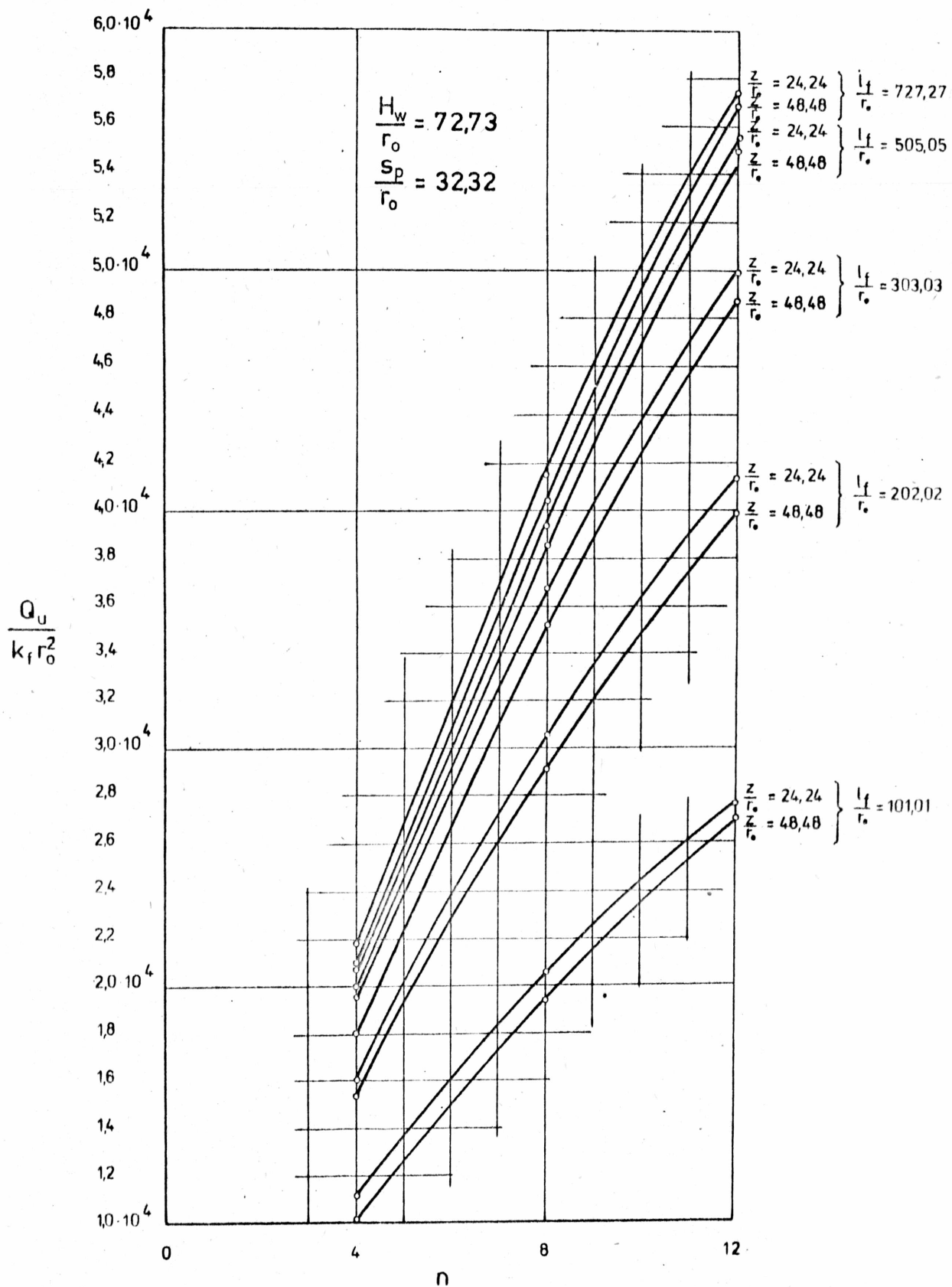
Zestawienie wyników pomiarów wydajności Q_{um283} ujęcia promienistego ($m^3/s \cdot 10^{-4}$)

długość zbieracza l_f, mm	depresja w studni zb. s_p, mm	$H_W = 360 mm$						$H_W = 480 mm$									$H_W = 600 mm$								
		$z = 120 mm$			$z = 240 mm$			$z = 120 mm$			$z = 240 mm$			$z = 360 mm$			$z = 240 mm$			$z = 360 mm$			$z = 480 mm$		
		$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$	$n = 4$	$n = 8$	$n = 12$
		Nr. zadania badawczego w dośw. III						Numer zadania badawczego w doświadczeniu II									Numer zadania badawczego w doświadczeniu I								
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	80	0,6017	1,0029	1,3393	0,5203	0,9087	1,2843	0,6644	1,1635	1,6123	0,5698	1,0313	1,3653	0,4702	0,8444	1,1090	0,6203	1,1222	1,4123	0,5090	0,9042	1,1907	0,4578	0,8393	1,0643
1000		0,9592	1,7264	2,2617	0,8360	1,5689	2,1693	0,9870	1,8907	2,6383	0,8841	1,6502	2,2433	0,7484	1,3624	1,7363	0,9234	1,6927	2,3727	0,7727	1,4469	1,8040	0,7483	1,3575	1,6687
1500		1,1335	2,1102	2,9577	1,0322	2,0147	2,8637	1,2313	2,3658	3,3517	1,0903	2,1022	3,0453	0,9691	1,7655	2,3633	1,0892	2,1042	3,0467	0,9999	1,8267	2,4353	0,9684	1,7684	2,3453
2500		1,2905	2,4415	3,4793	1,2455	2,4004	3,4103	1,3877	2,6760	3,7913	1,2475	2,4262	3,4940	1,1707	2,1782	3,0867	1,2880	2,4315	3,5083	1,1999	2,2609	3,1570	1,1798	2,2327	3,0667
3600		1,3603	2,5462	3,6097	1,2797	2,4862	3,5580	1,4462	2,7535	3,9480	1,3064	2,5540	3,6180	1,2282	2,3029	3,2410	1,3449	2,5718	3,6927	1,2725	2,4418	3,5177	1,2327	2,3220	3,3823
500	160	1,0202	1,8747	2,5227	0,9384	1,7660	2,4733	1,1140	2,0942	3,0000	1,0610	1,9647	2,6730	0,9211	1,6504	2,1990	1,1175	2,0575	2,7143	0,9453	1,7002	2,2550	0,8540	1,6433	2,0293
1000		1,4650	2,7904	3,7840	1,3991	2,6578	3,6447	1,5538	3,0055	4,3390	1,5521	2,8291	3,8187	1,4105	2,6195	3,4340	1,5438	2,8991	3,8220	1,4089	2,7129	3,5177	1,3647	2,5007	3,1570
1500		1,7789	3,3571	4,5667	1,6380	3,2149	4,4690	1,8762	3,6067	5,0620	1,7289	3,3300	4,7160	1,6504	3,1282	4,3600	1,7805	3,3669	4,7083	1,6817	3,2555	4,2843	1,6024	3,1258	3,9609
2500		1,9183	3,7060	5,0803	1,8171	3,2149	4,4690	2,0327	3,8782	5,4920	1,9155	3,6838	5,3650	1,8711	3,5695	4,9193	2,0837	3,9280	5,5857	1,9089	3,6173	4,9160	1,7784	3,4831	4,6903
3600		1,9881	3,7931	5,2453	1,8769	3,6009	5,1200	2,1010	4,0722	5,7263	1,9843	3,8409	5,4703	1,9767	3,6751	5,1217	2,1594	4,0869	5,8163	1,9815	3,7078	5,1593	1,8313	3,5724	4,9180
500	240	1,4475	2,7031	3,7580	1,3222	2,5720	3,5143	1,5929	3,0055	4,1533	1,5619	2,7504	3,7137	1,3050	2,3124	3,1830	1,5628	2,9927	3,8313	1,3362	2,5140	3,2473	1,2414	2,3222	2,9767
1000		1,9881	3,8367	5,2193	1,8683	3,6009	4,9463	2,1303	4,0140	5,6287	2,0432	3,7329	5,1697	1,8423	3,5024	4,6780	2,0079	3,9280	5,1240	1,8862	3,5268	4,7083	1,7609	3,3491	4,2843
1500		2,2148	4,2291	5,9587	2,1583	4,1151	5,8140	2,4138	4,5569	6,4987	2,2790	4,3518	6,1860	2,1302	4,0300	5,5943	2,3678	4,4329	6,0380	2,1634	3,9791	5,5923	2,0250	3,9295	5,1867
2500		2,3370	4,4995	6,4807	2,3290	4,4153	6,3347	2,5408	4,8478	7,0850	2,4754	4,7642	6,8257	2,3125	4,4522	6,2700	2,6045	4,9753	7,0627	2,3361	4,4311	6,2237	2,2187	4,3762	5,9535
3600		2,3980	4,6391	6,5677	2,3887	4,5440	6,4553	2,6190	5,0127	7,2803	2,5639	4,8822	7,0167	2,3797	4,5675	6,4144	2,6992	5,0969	7,3397	2,4089	4,6120	6,4133	2,3068	4,5549	6,1697

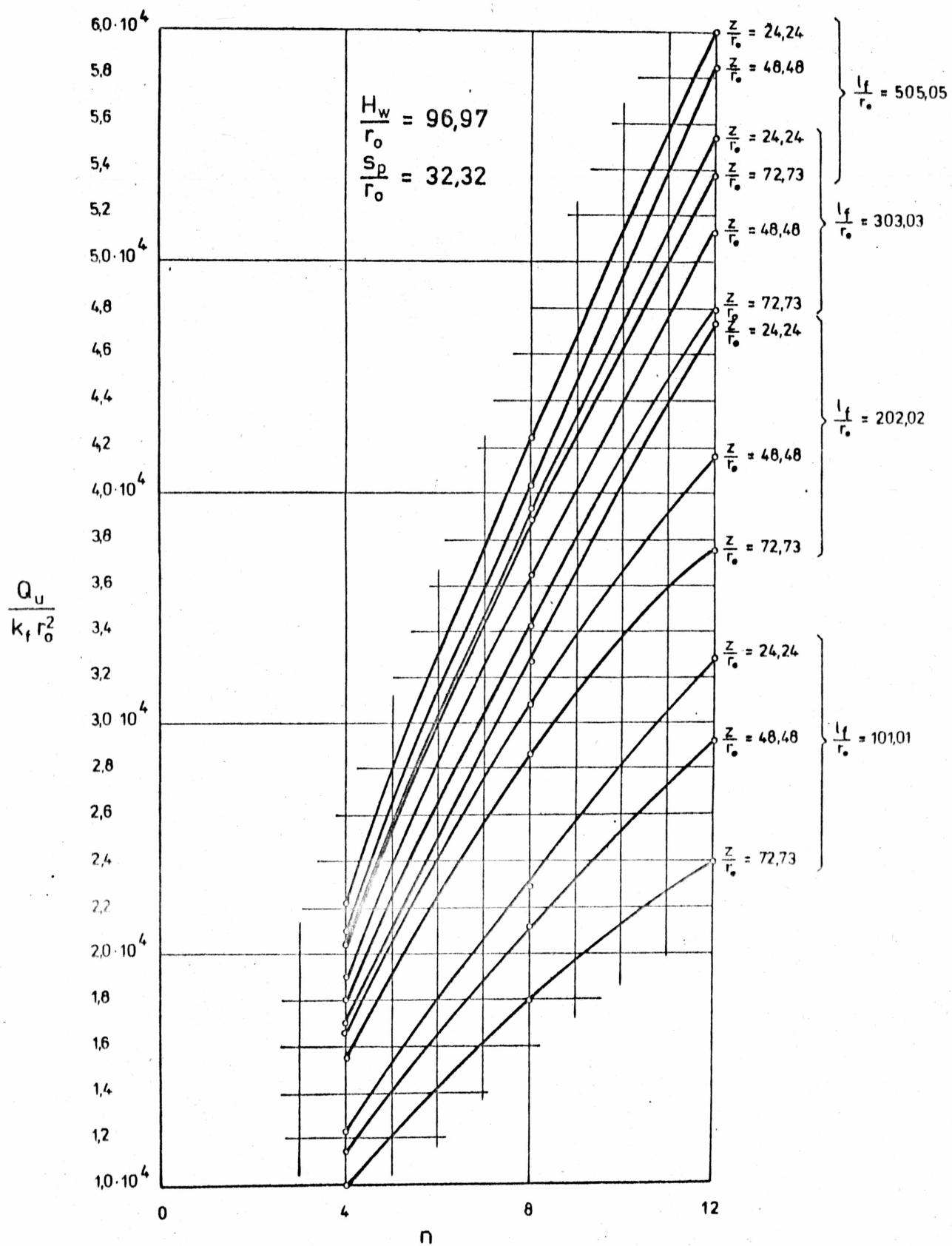
T a b e l a 9-3

Zestawienie wyników obliczeń sprawowanej wydajności ujęcia ($Q_u/k_f r_o^2/.100$)

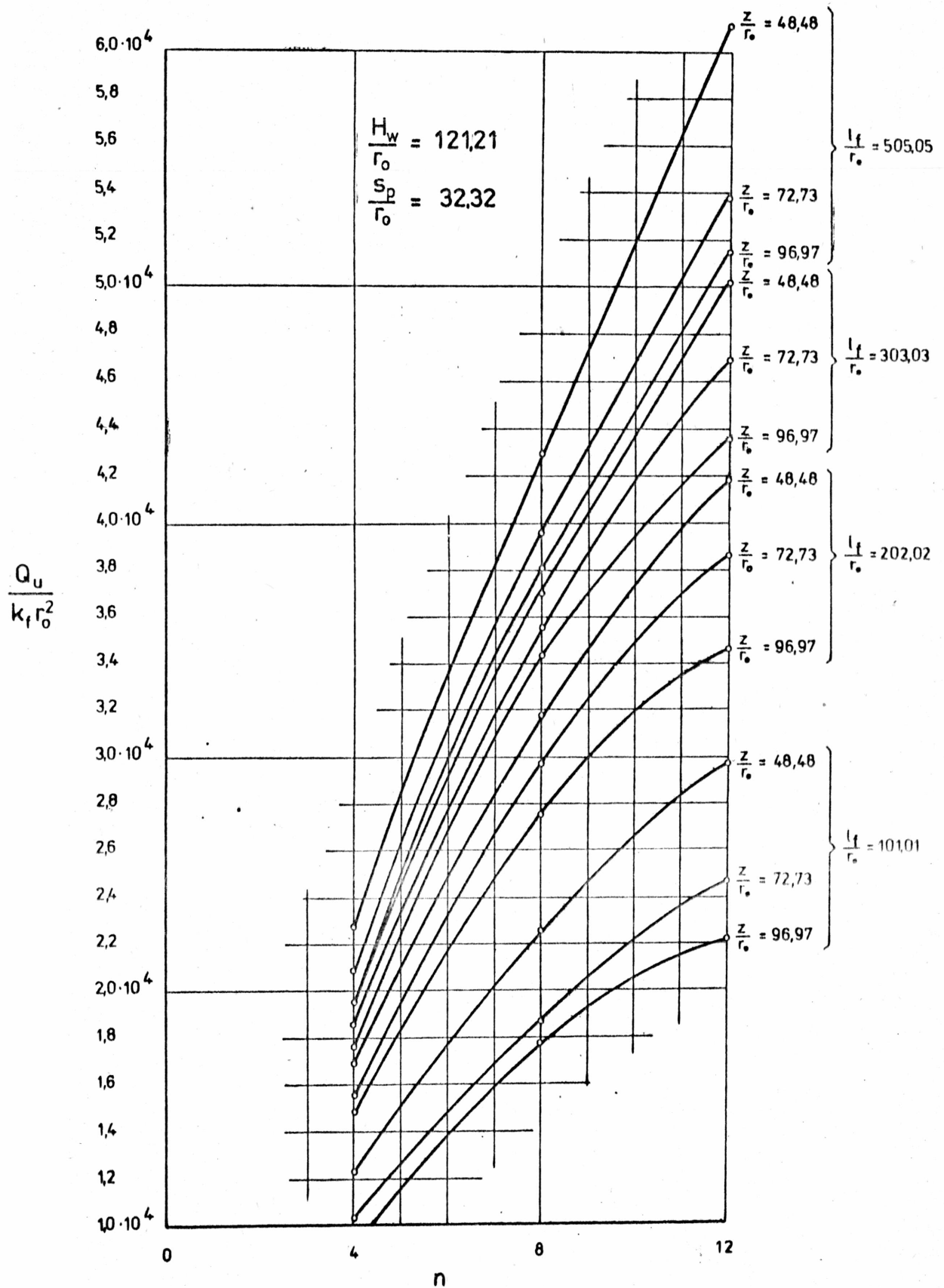
$\frac{l_f}{r_o}$	$\frac{s_p}{r_o}$	$\frac{H_w}{r_o} = 72,73$						$\frac{H_w}{r_o} = 96,97$									$\frac{H_w}{r_o} = 121,21$								
		$\frac{Z}{r_o} = 24,24$			$\frac{Z}{r_o} = 48,48$			$\frac{Z}{r_o} = 24,24$			$\frac{Z}{r_o} = 48,48$			$\frac{Z}{r_o} = 72,73$			$\frac{Z}{r_o} = 48,48$			$\frac{Z}{r_o} = 72,73$			$\frac{Z}{r_o} = 96,97$		
		n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12
		Nr zadania badawczego w dośw. III						Numer zadania badawczego w doświadczeniu II									Numer zadania badawczego w doświadczeniu I								
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
101,01	16,16	6580	109,66	146,46	56,89	99,36	140,44	72,64	127,23	176,36	62,30	112,78	149,29	51,42	92,34	121,26	67,83	122,71	154,43	55,65	98,87	130,20	50,05	91,78	116,38
202,02		104,88	188,78	247,22	91,41	171,56	237,24	107,93	206,80	288,51	96,68	180,38	245,29	81,82	148,98	189,83	100,97	185,11	259,46	84,48	158,21	197,18	81,82	148,43	182,48
303,03		123,94	230,77	323,33	112,86	220,27	313,18	134,65	258,76	366,54	119,21	229,90	332,95	105,97	192,98	258,41	119,09	230,07	333,12	109,33	199,80	266,29	105,88	193,33	256,49
505,05		141,12	266,99	380,36	136,19	262,44	372,84	151,74	292,53	414,48	136,41	265,24	382,11	128,01	238,12	337,50	140,84	265,94	383,69	131,20	247,22	345,20	129,01	244,07	335,40
727,27		148,75	278,36	394,71	139,93	271,89	389,11	158,14	301,11	431,63	142,85	279,23	395,58	134,30	251,77	354,47	147,07	281,16	403,81	139,14	266,99	384,74	134,79	253,87	369,87
101,01	32,32	111,55	205,05	275,91	102,61	193,15	270,49	121,80	229,02	328,05	116,00	214,85	292,36	100,72	180,38	240,39	122,19	225,00	296,73	103,36	185,98	246,52	93,37	179,68	221,85
202,02		160,19	305,13	413,78	152,98	290,61	398,56	169,90	328,57	474,49	169,73	309,33	417,63	154,24	286,41	375,46	168,82	317,03	417,98	154,07	296,73	384,74	149,22	273,46	345,20
303,03		194,55	367,07	499,34	179,16	351,49	488,66	205,23	394,36	553,58	189,13	364,09	515,61	180,38	342,05	476,77	194,73	368,12	514,91	183,88	356,04	468,54	175,13	341,87	434,08
505,05		209,77	405,21	555,50	198,75	384,39	550,43	222,20	424,10	600,47	209,42	402,76	586,64	204,53	390,34	538,00	227,80	429,53	610,79	208,73	395,58	537,48	194,38	380,89	512,81
727,27		217,30	414,83	573,52	205,23	393,66	559,87	229,72	445,27	626,19	216,95	420,08	598,19	216,07	401,88	560,05	236,19	446,85	635,98	216,60	405,38	564,07	200,33	390,69	537,48
101,01	48,48	158,28	295,51	410,98	144,58	281,16	394,21	174,17	328,57	454,20	170,79	300,76	406,08	142,69	252,82	348,00	170,88	327,17	419,03	146,11	274,86	355,17	135,75	253,87	325,43
202,02		217,30	419,55	570,72	204,35	393,66	540,80	232,87	438,98	615,51	223,42	408,18	565,30	201,38	382,99	511,58	219,57	429,53	560,22	206,28	385,61	514,91	192,63	366,19	468,54
303,03		242,14	462,42	651,55	236,02	450,00	635,31	264,01	498,29	710,69	249,14	475,89	676,40	232,87	440,73	611,66	258,94	484,64	660,30	236,54	435,13	611,49	221,50	429,70	567,22
505,05		255,44	491,99	708,59	254,74	482,89	692,57	277,84	530,13	774,73	270,66	521,03	746,38	252,82	486,92	685,67	284,83	544,13	772,28	255,44	484,77	680,60	242,67	478,52	651,03
727,27		262,26	507,21	718,22	261,21	487,09	705,97	286,41	548,15	796,07	280,28	533,81	767,21	260,16	499,51	701,42	295,16	557,43	802,55	263,49	504,24	701,24	252,29	498,11	674,65



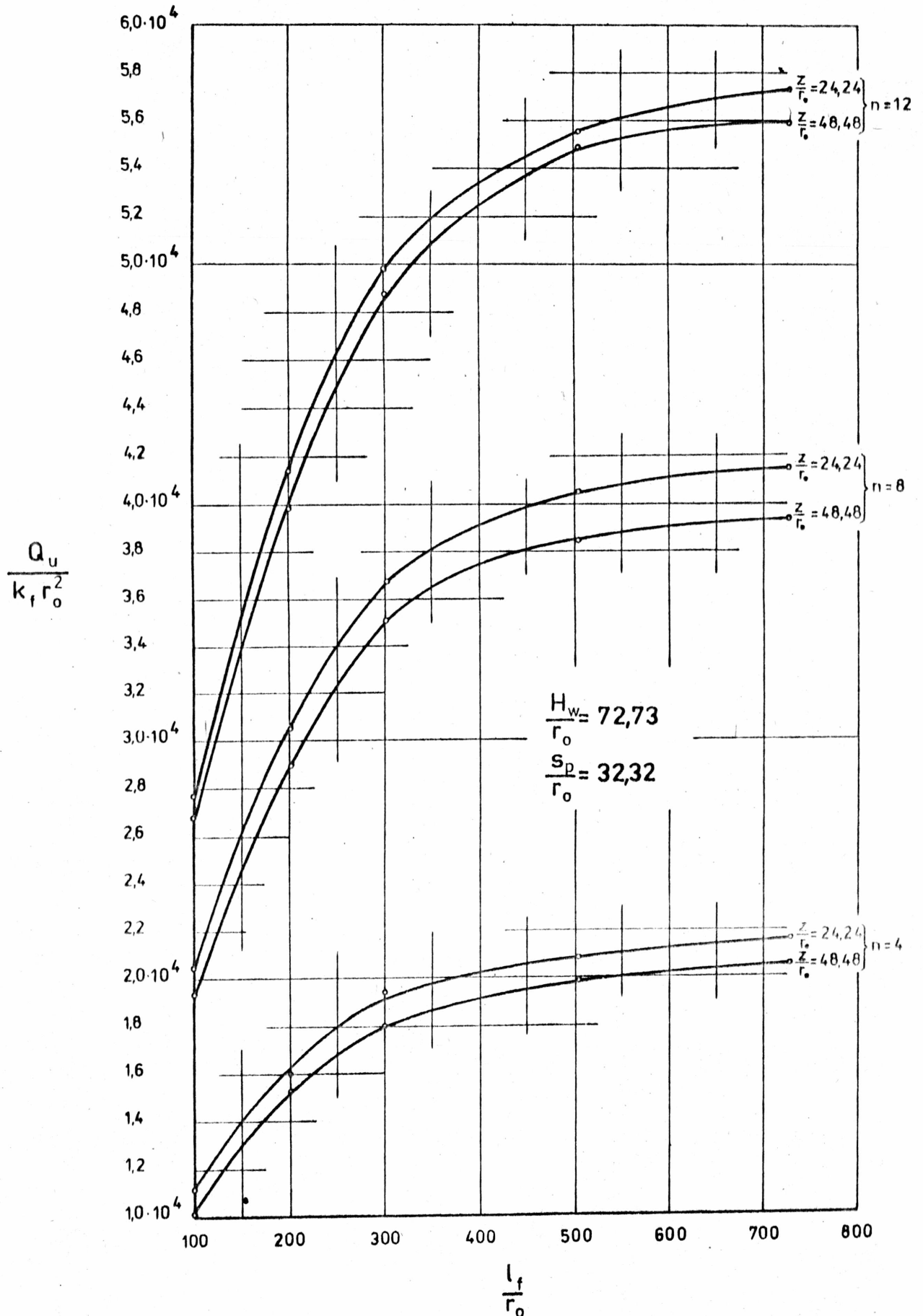
Rys. 9-1 Zależność $Q_u / k_f r_o^2 = F / n$ dla $H_w / r_o = 72,73$



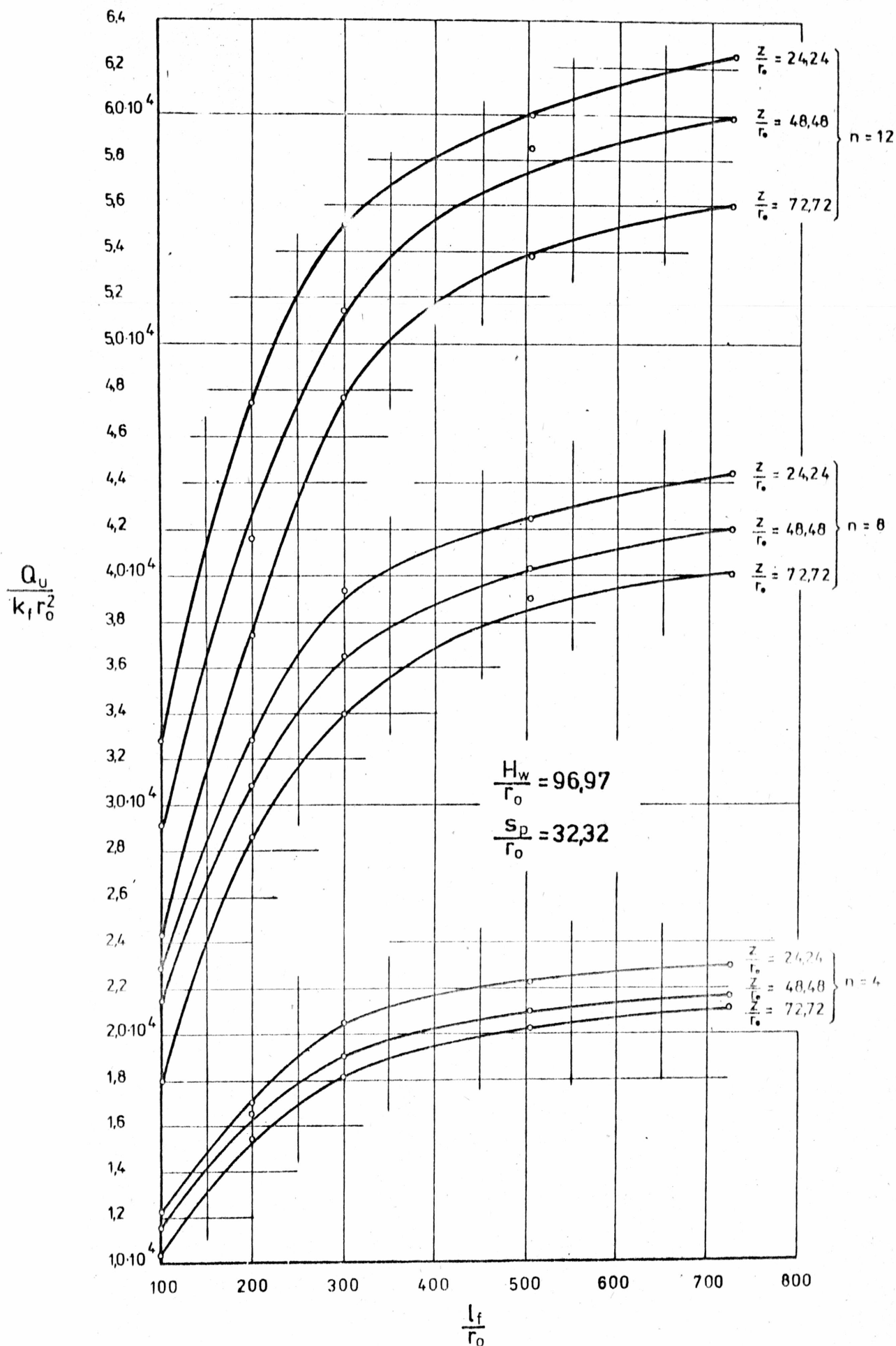
Rys. 9-2 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F/n$ dla $H_w/r_o = 96,97$



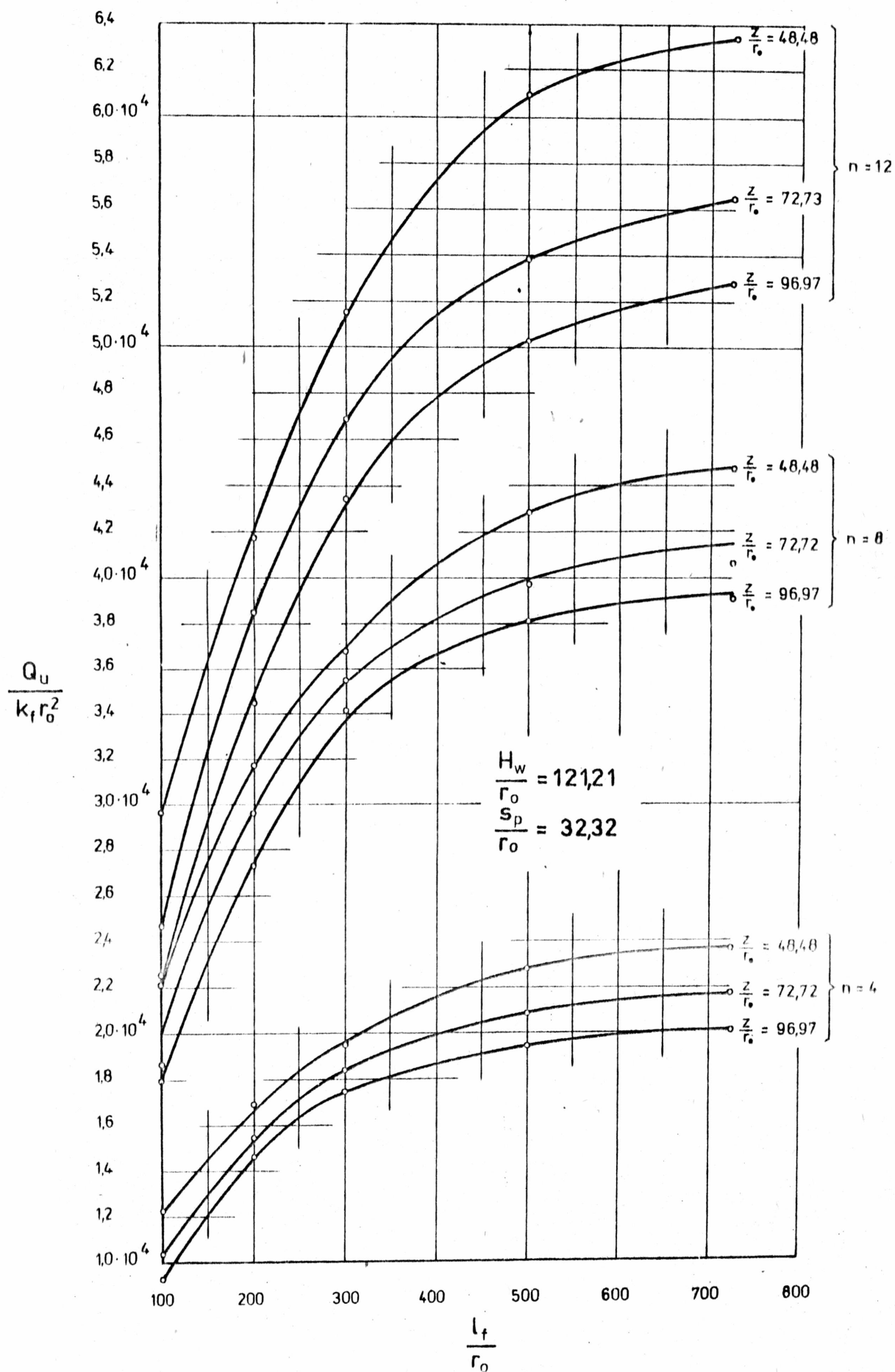
Rys. 9-3 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F/n$ dla $H_w/r_o = 121,21$



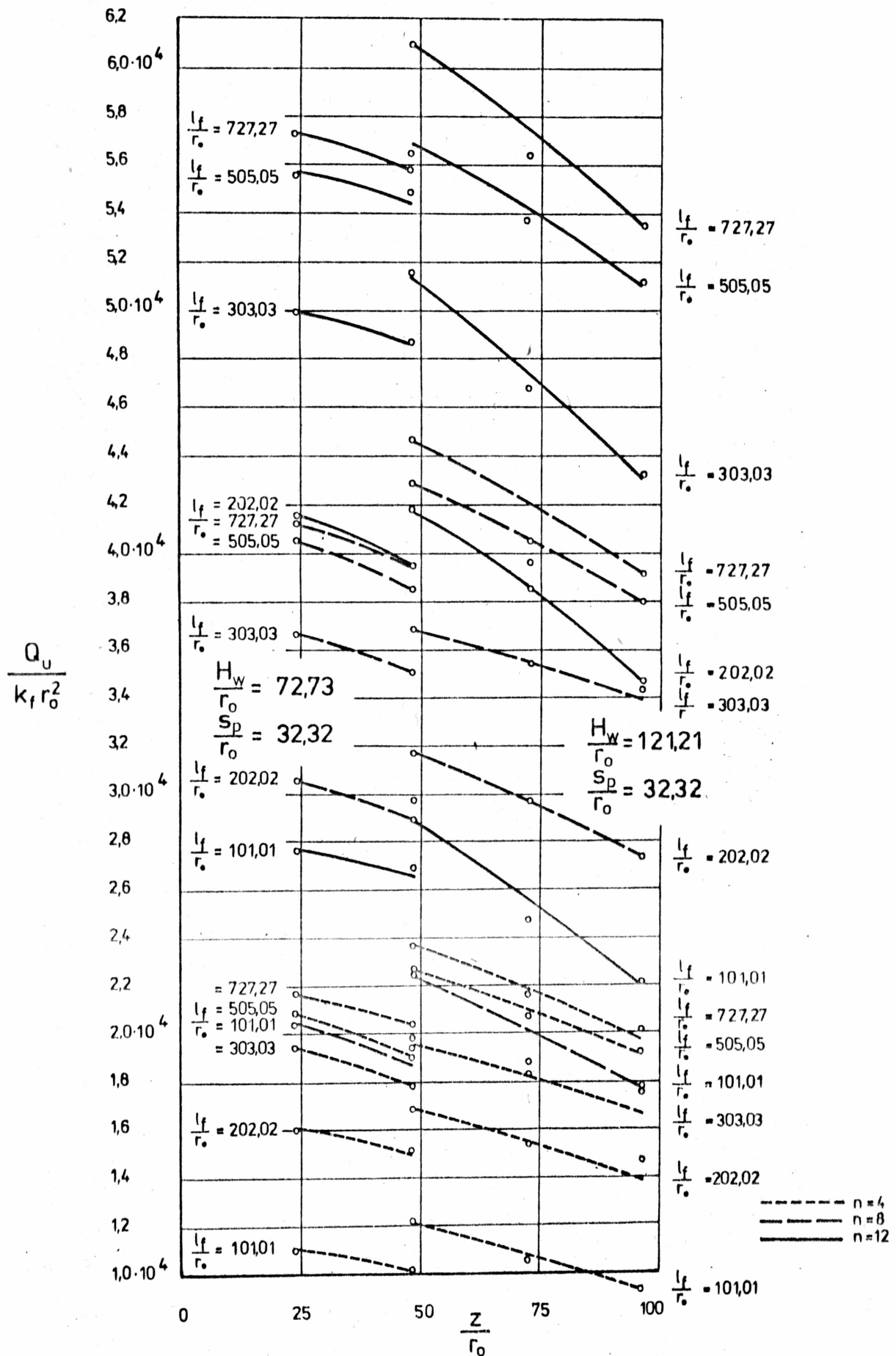
Rys. 9-4 Zależność $\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = F / \frac{l_f}{r_o}$ dla $\frac{H_w}{r_o} = 72,73$



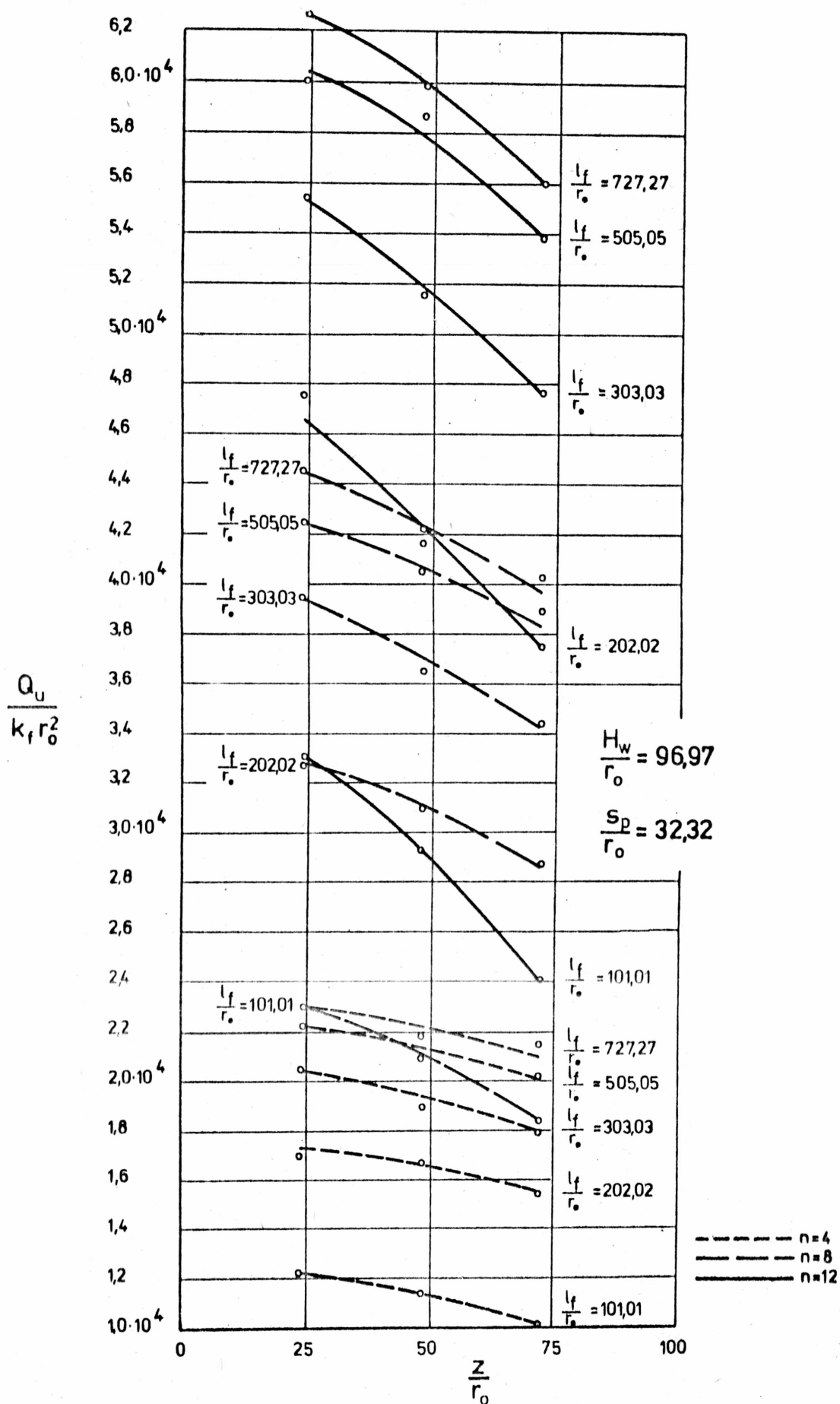
Rys. 9-5 Zależność $\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = F \ /l_f/r_o/$
dla $\frac{H_w}{r_o} = 96,97$



Rys. 9-6 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / l_f / r_o /$ dla $H_w/r_o = 121,21$



Rys. 9-7 Zależność $\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = F / z / r_o /$ dla $H_w / r_o = 72,73$ i 121,21



Rys. 9-8 Zależność $Q_u / k_f r_o^2 = F / z / r_o /$ dla $H_w / r_o = 96,97$

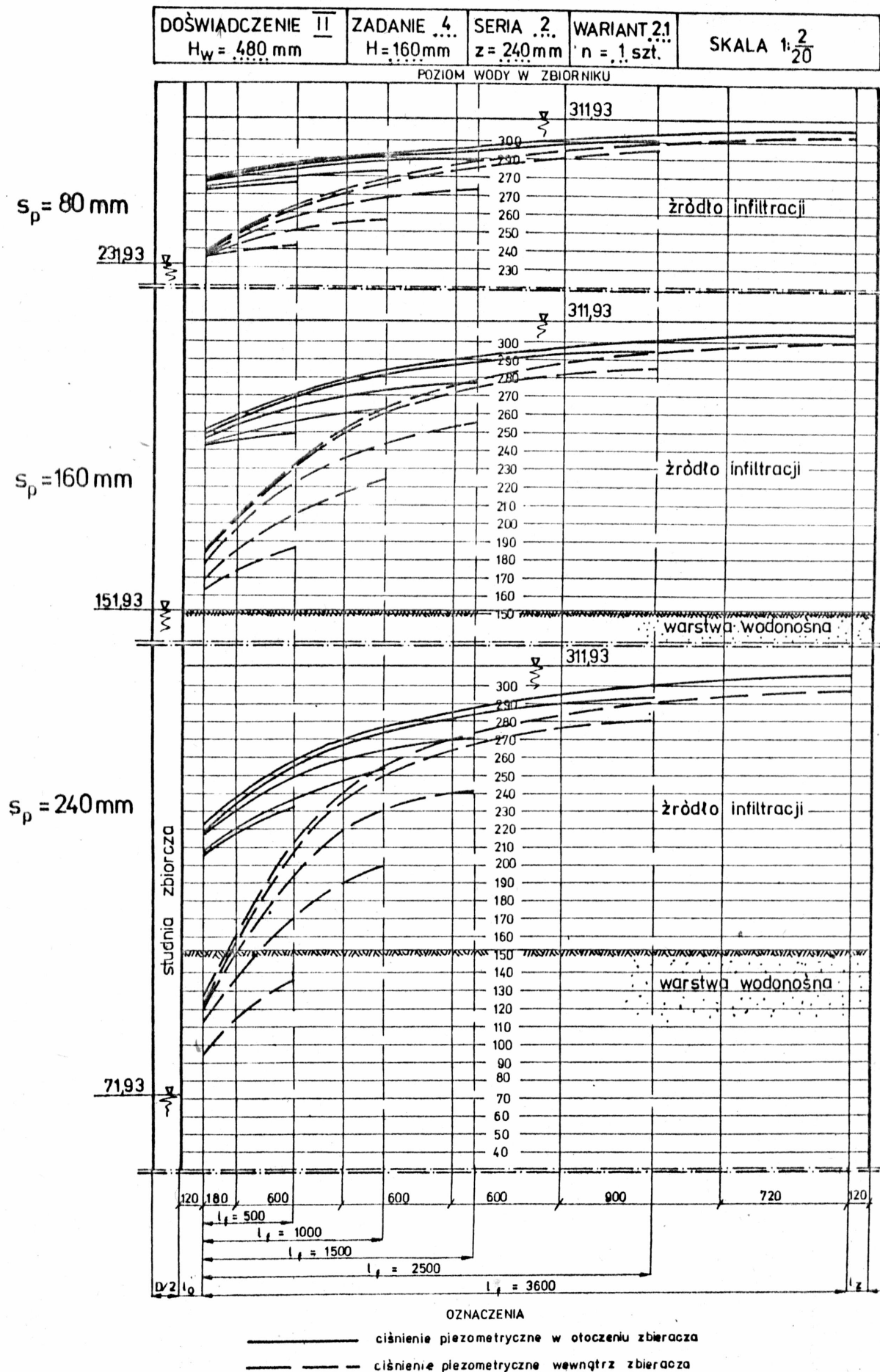
9.2.. Omówienie wyników pomiarów ciśnień piezometrycznych

W celu zbadania rozkładu napływu wody wzdłuż długości zbieraczy jak i kierunków tego dopływu w warstwie filtracyjnej, dokonywano przy każdej zmianie parametrów pracy ujęcia pomiarów ciśnień piezometrycznych we wnętrzu i w bezpośrednim otoczeniu rur filtrowych, a także pomiarów w złożu filtracyjnym. W dalszym ciągu przedstawiono dla przykładu jedynie wybrane wyniki tych pomiarów.

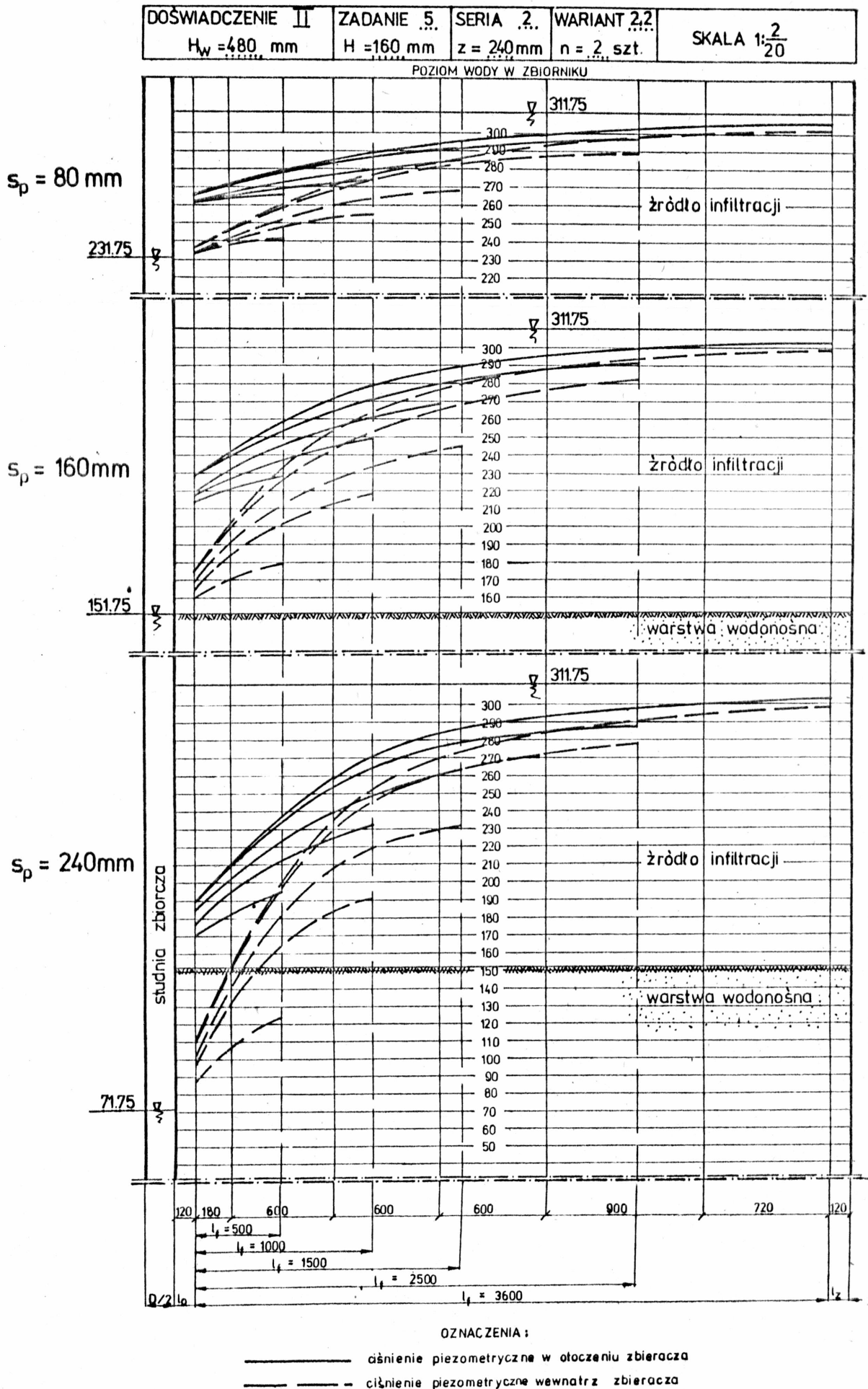
Analiza obszernego materiału badawczego pozwoliła stwierdzić, że zmiany ciśnień piezometrycznych dotyczącego II-go doświadczenia $/H_w = 0,48 \text{ m/}$ są reprezentatywne dla doświadczeń przeprowadzonych na modelu. Wybrane wyniki tych badań odnośnie do zmian ciśnienia piezometrycznego wzdłuż zbieraczy dla $n = 1, 2$ i 3 oraz $z = 0,24 \text{ m}$, przedstawiono na rysunkach 9-9 do 9-11, natomiast odpowiadające im charakterystyczne rozkłady ciśnień w złożu filtracyjnym - na rysunkach 9-12 do 9-20.

Na rysunkach 9-9, 9-10 i 9-11 przedstawiono różnice między ciśnieniem piezometrycznym w bezpośrednim otoczeniu zbieraczy i w ich wnętrzu, przy zmianach długości czynnej zbieraczy: $l_f = 0,5, 1,0, 1,5, 2,5$ i $3,6 \text{ m}$ i zmianach depresji: $s_p = 0,08, 0,16$ i $0,24 \text{ m}$.

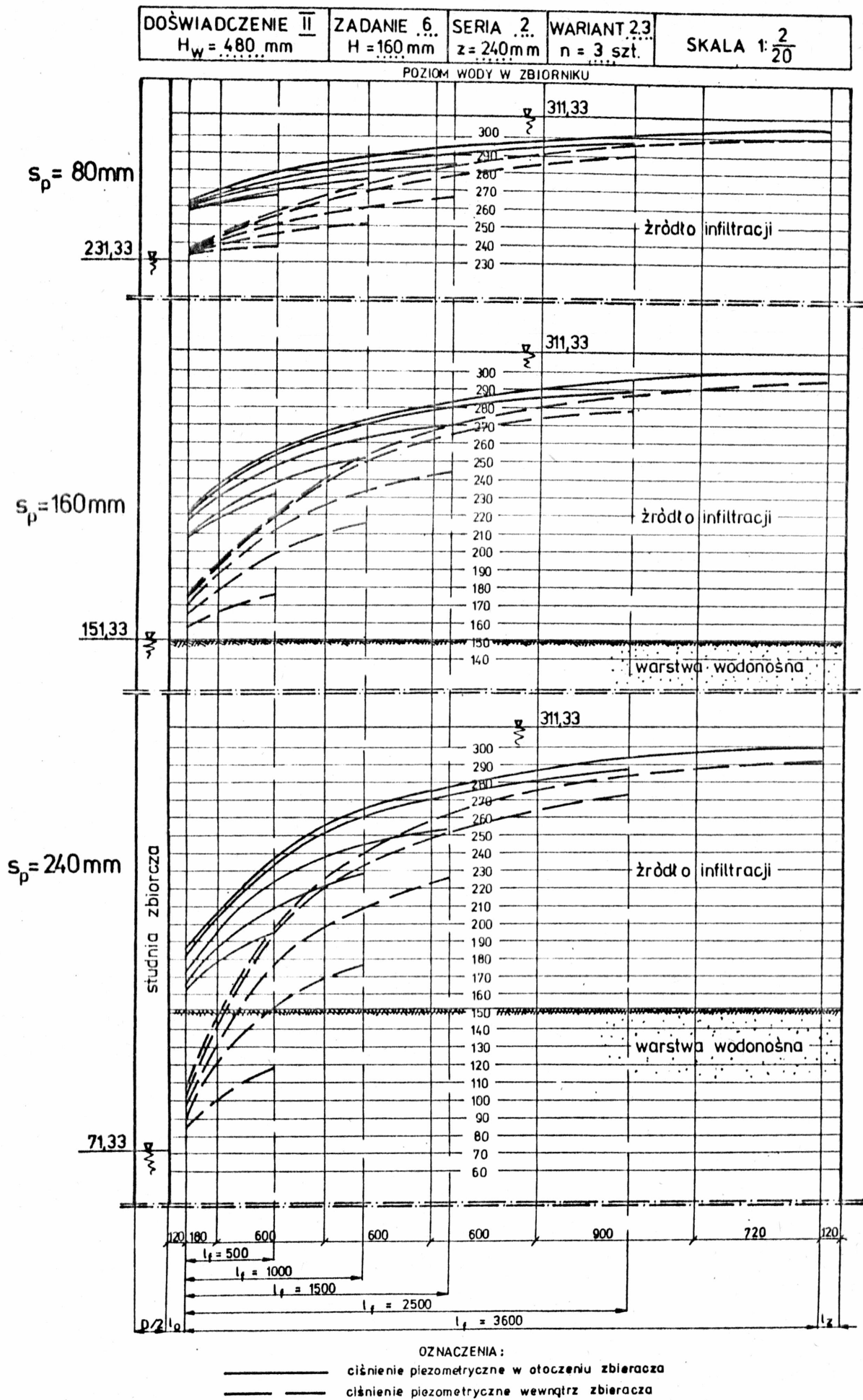
Na rysunkach 9-12, 9-13 i 9-14 przedstawiono układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1, z = 0,24 \text{ m}$ i $s_p = 0,16 \text{ m}$ oraz $l_f = 1,5, 2,5, \text{ i } 3,6 \text{ m}$; na rysunkach 9-15, 9-16 i 9-17 dla $n = 2, z = 0,24 \text{ m}, s_p = 0,16 \text{ m}$ i $l_f = 1,5, 2,5$ i $3,6 \text{ m}$; a na rysunkach 9-18, 9-19 i 9-20 dla $n = 3, z = 0,24, s_p = 0,16 \text{ m}$ i $l_f = 1,5, 2,5$ i $3,6 \text{ m}$.



Rys. 9-9 Zmiany ciśnień piezometrycznych wzdłuż długości zbieracza dla $n = 1$



Rys. 9-10 Zmiany ciśnień piezometrycznych wzdłuż długości zbieracza dla $n = 2$



Rys. 9-11 Zmiany ciśnień piezometrycznych wzdłuż długości zbieracza dla $n = 3$

SKALA 1: $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 4

Seria 2

Wariant 2.1

Subwariant 2.1.3

Pomiar 2.1.3.2

$H_w = 480 \text{ mm}$

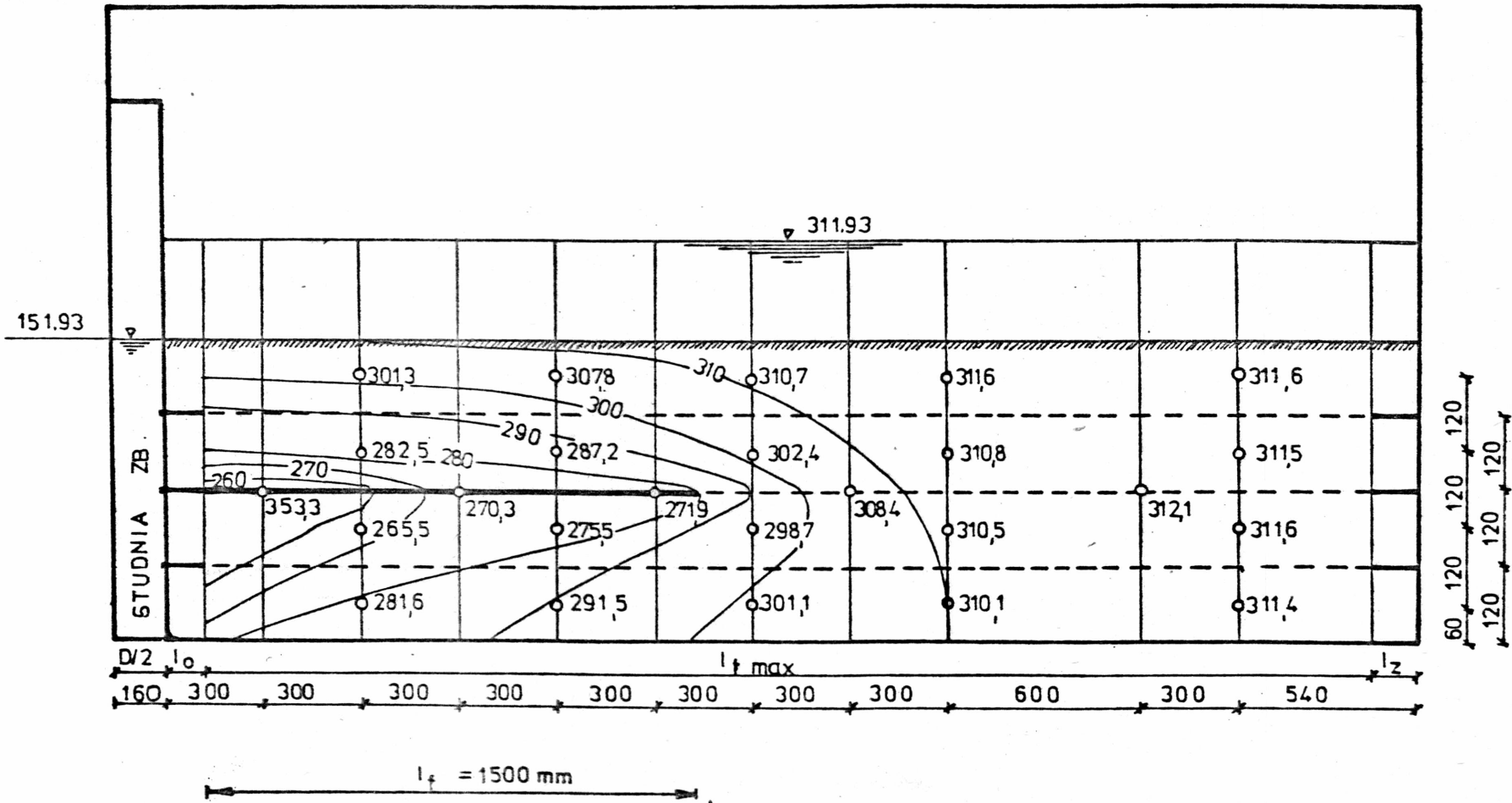
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 1 \text{ szt}$

$l_f = 1500 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-12 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1$, $l_f = 1500 \text{ mm}$

SKALA 1 $\frac{10}{20}$

Doswiadczenie I

Zadanie 4

Seria 2

Wariant 2.1

Subwariant 2.14

Pomiar 2142

$H_w = 480 \text{ mm}$

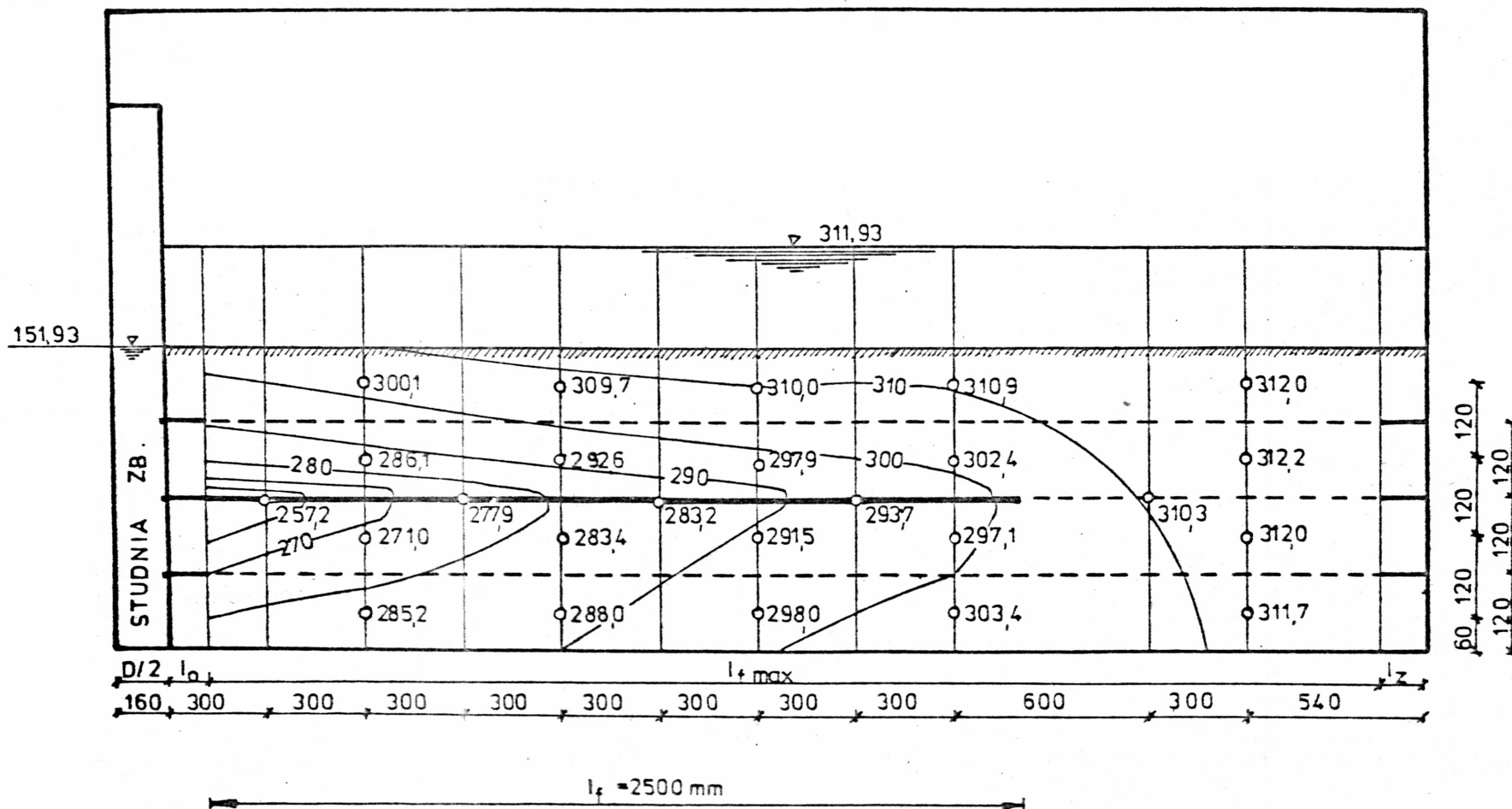
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 1 \text{ szt.}$

$l_f = 2500 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-13 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1$,
 $l_f = 2500 \text{ mm}$

SKALA 1: $\frac{10}{20}$

Doswiadczenie II

Zadanie 4

Seria 2

Wariant 2.1

Subwariant 2.1.5

Pomiar 2.1.5.2

$H_w = 480 \text{ mm}$

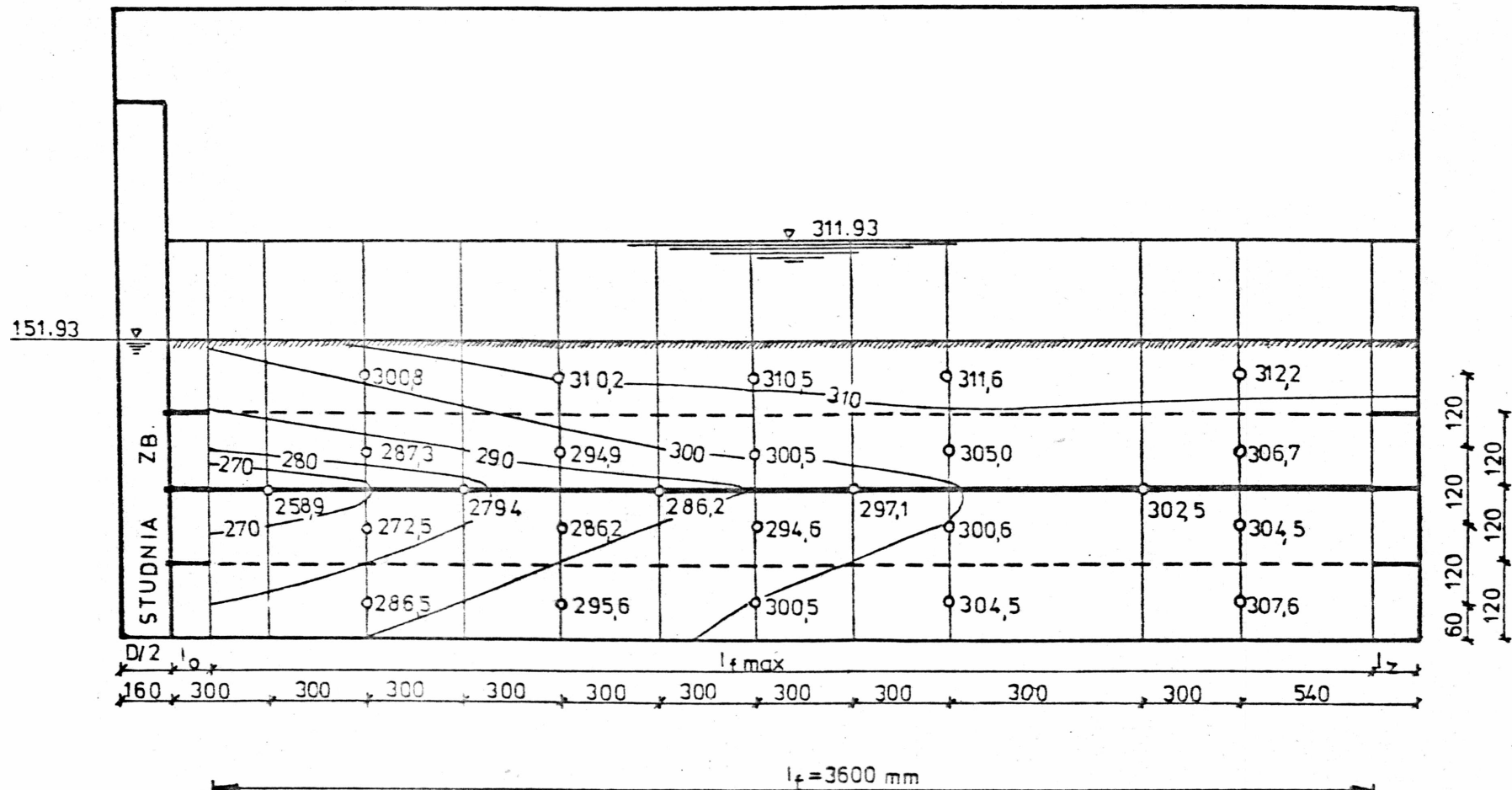
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 1 \text{ szt}$

$l_f = 3600 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-14 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1$,
 $l_f = 3600 \text{ mm}$

SKALA 1: $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 5

Seria 2

Wariant 2.2

Subwariant 2.2.3

Pomiar 2.2.3.2

$H_w = 480 \text{ mm}$

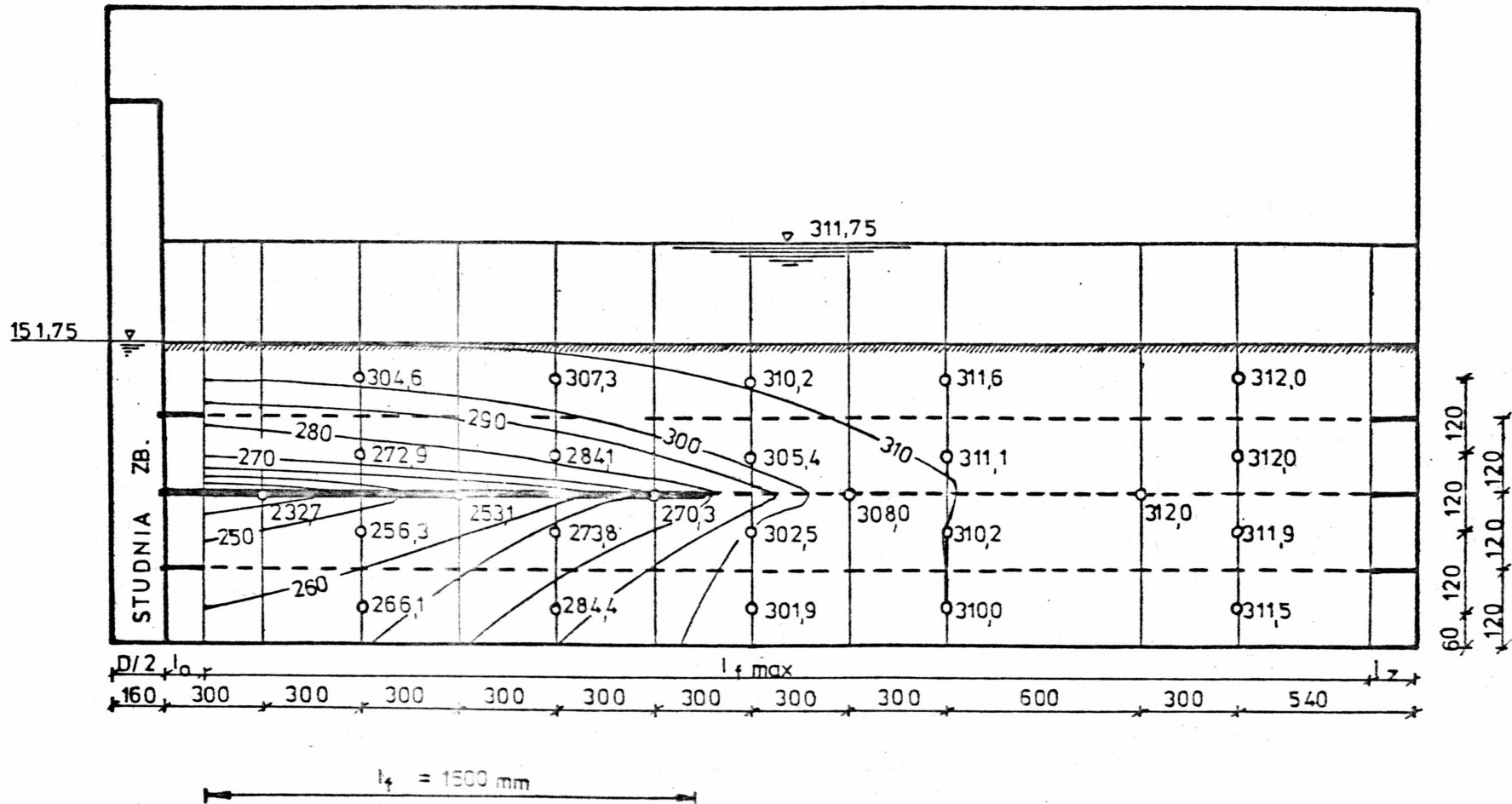
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 2 \text{ szt}$

$l_f = 1500 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-15 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 2$,
 $l_f = 1500 \text{ mm}$

SKALA 1: $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 5

Seria 2

Wariant 22

Subwariant 2.2.4

Pomiar 2.2.4.2

$H_w = 480 \text{ mm}$

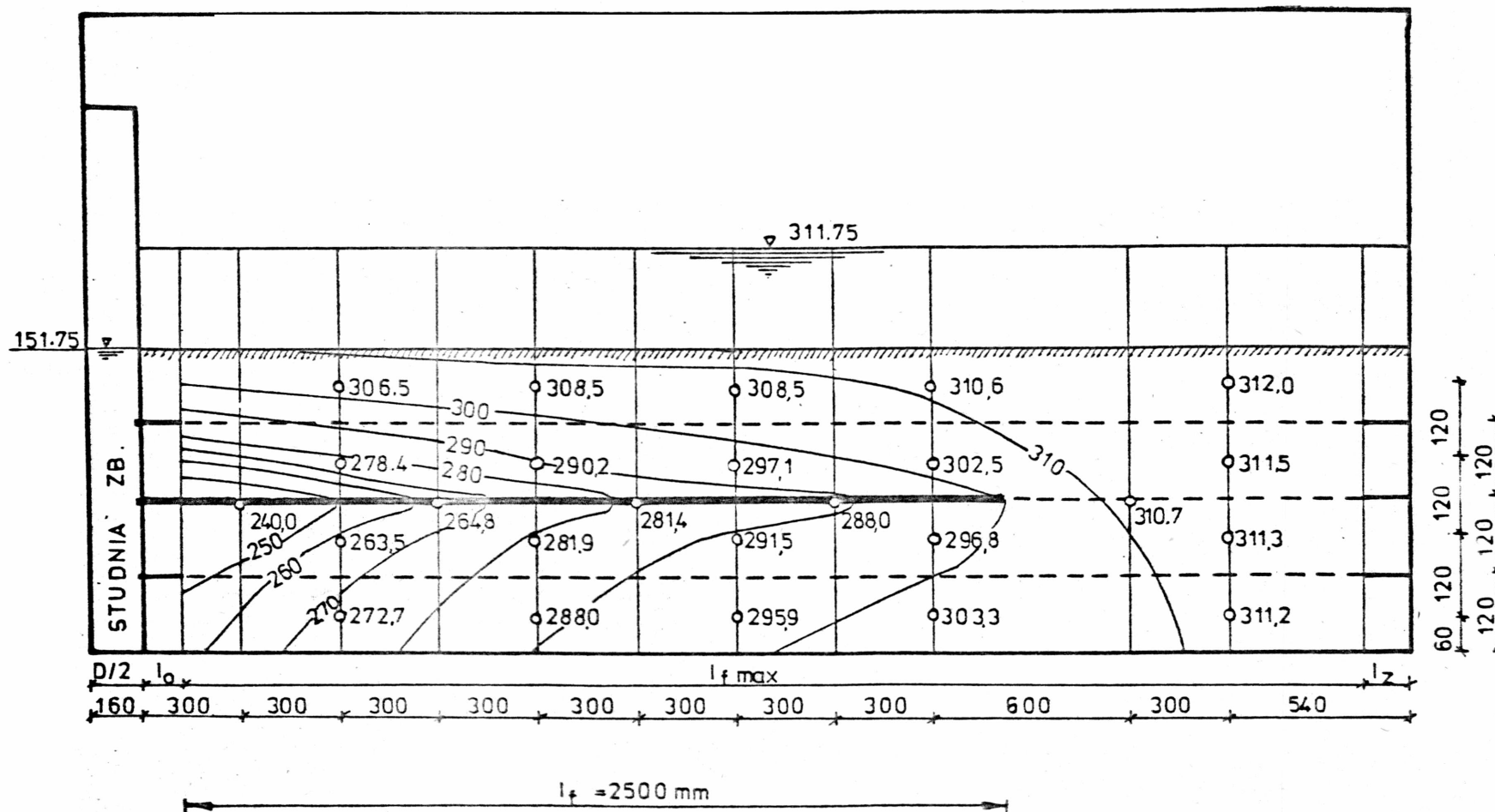
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 2 \text{ szt}$

$l_f = 2500 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-16 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 2$,
 $l_f = 2500 \text{ mm}$

SKALA 1: $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 5

Seria 2

Variant 2.2

Subvariant 2.2.5

Pomiar 2.2.5.2

$$H_w = 480 \text{ mm}$$

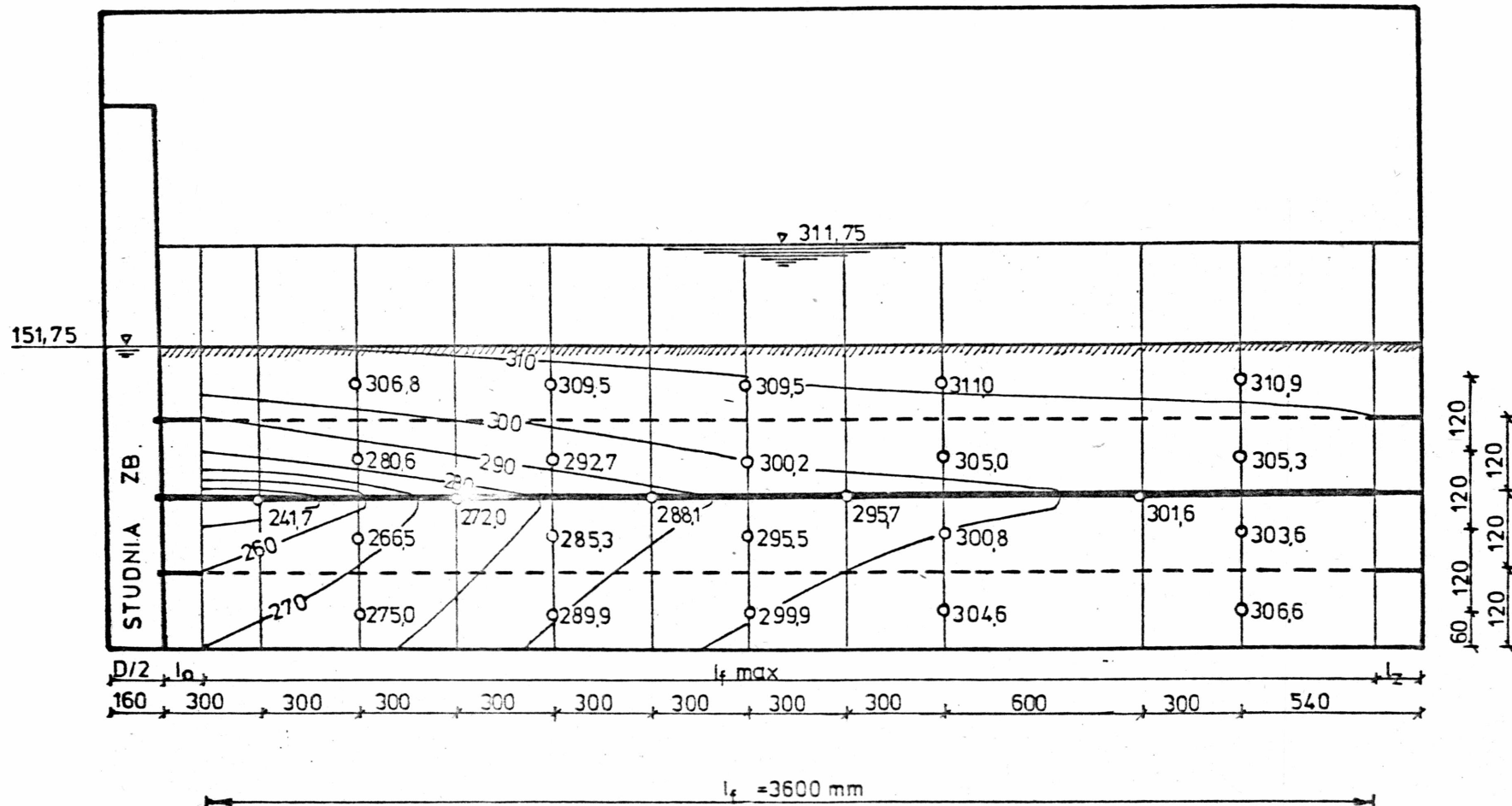
H = 160mm

$$z = 240 \text{ mm}$$

$n = 2$ szt.

$$l_f = 3600 \text{ mm}$$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-17 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 2$,
 $l_f = 3600$ mm

SKALA 1: $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 6

Seria 2

Wariant 2.3

Subwariant 2.3.3

Pomiar 2.3.3.2

$H_w = 480 \text{ mm}$

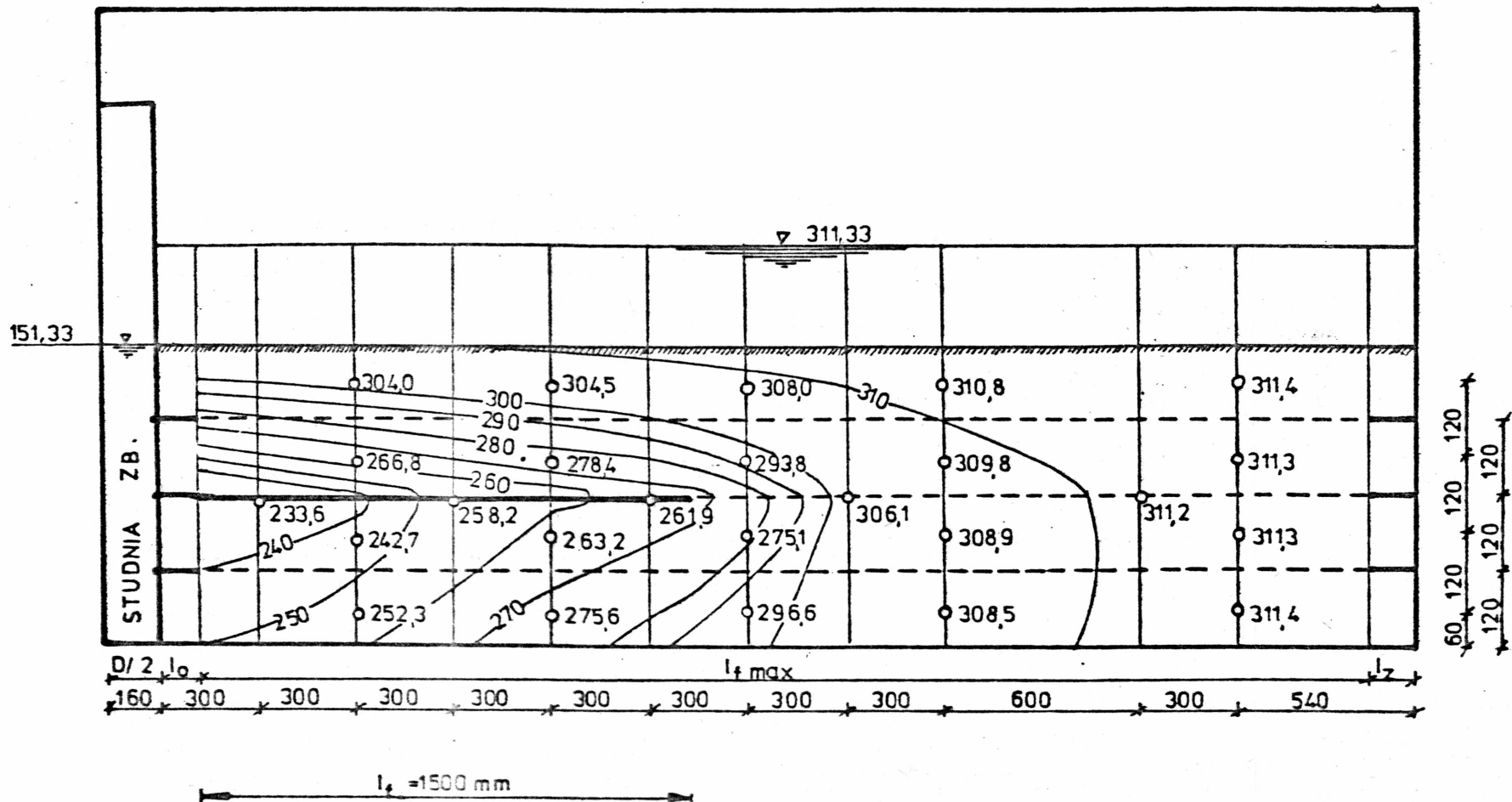
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 3 \text{ szt.}$

$l_f = 1500 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-18 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 3$,
 $l_f = 1500 \text{ mm}$

SKALA 1 $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 6

Seria 2

Wariant 2.3

Subwariant 2.3.4

Pomiar 2.3.4.2

$H_w = 480 \text{ mm}$

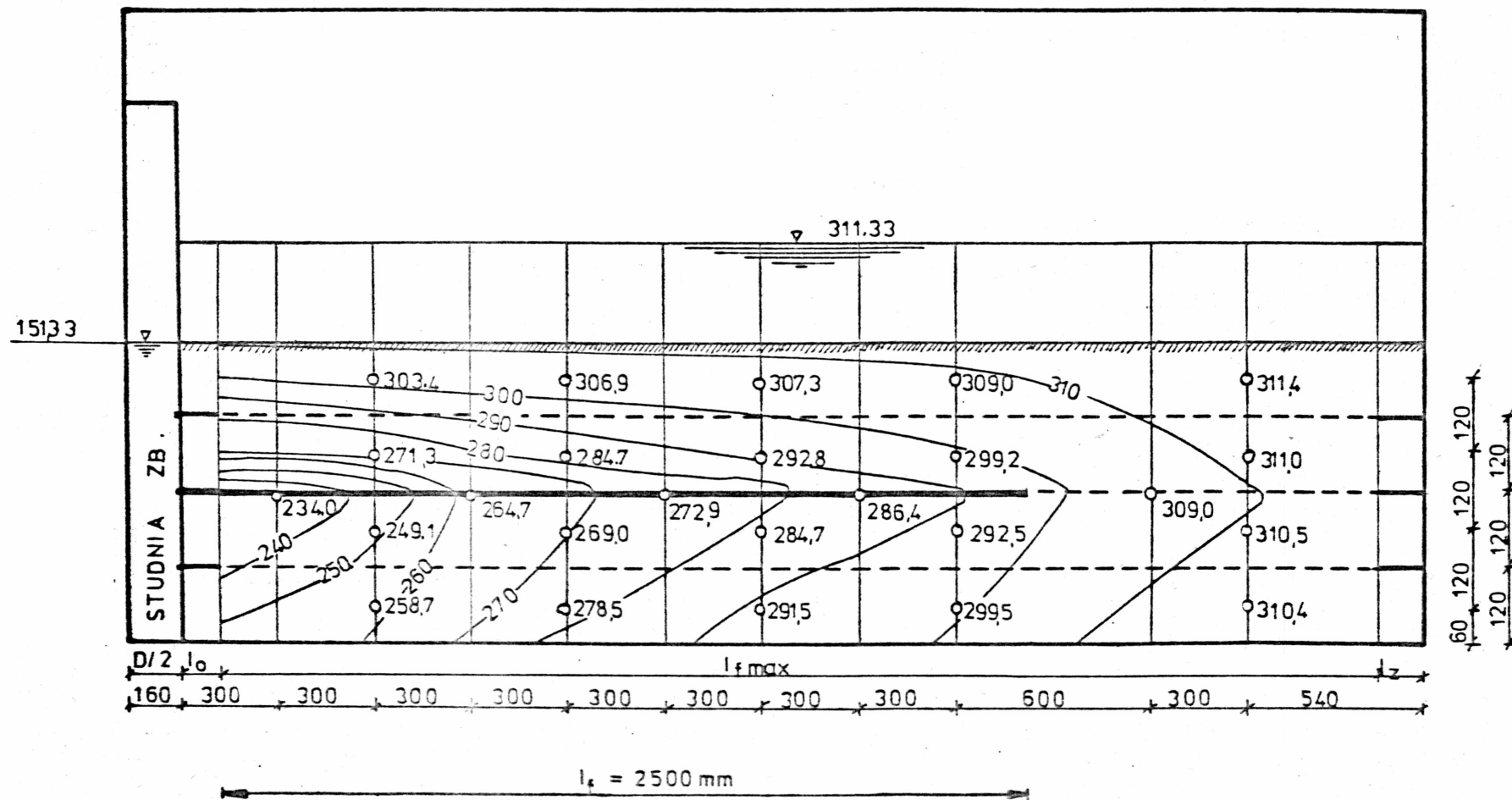
$H = 160 \text{ mm}$

$z = 240 \text{ mm}$

$n = 3 \text{ szt}$

$l_f = 2500 \text{ mm}$

$s_p = 160 \text{ mm}$



Rys. 9-19 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 3$,
 $l_f = 2500 \text{ mm}$

SKALA 1 $\frac{10}{20}$

Doświadczenie II

Zadanie 6

Seria 2

Wariant 2.3

Subwariant 2.3.5

Pomiar 2.3.5.2

$H_w = 480$ mm

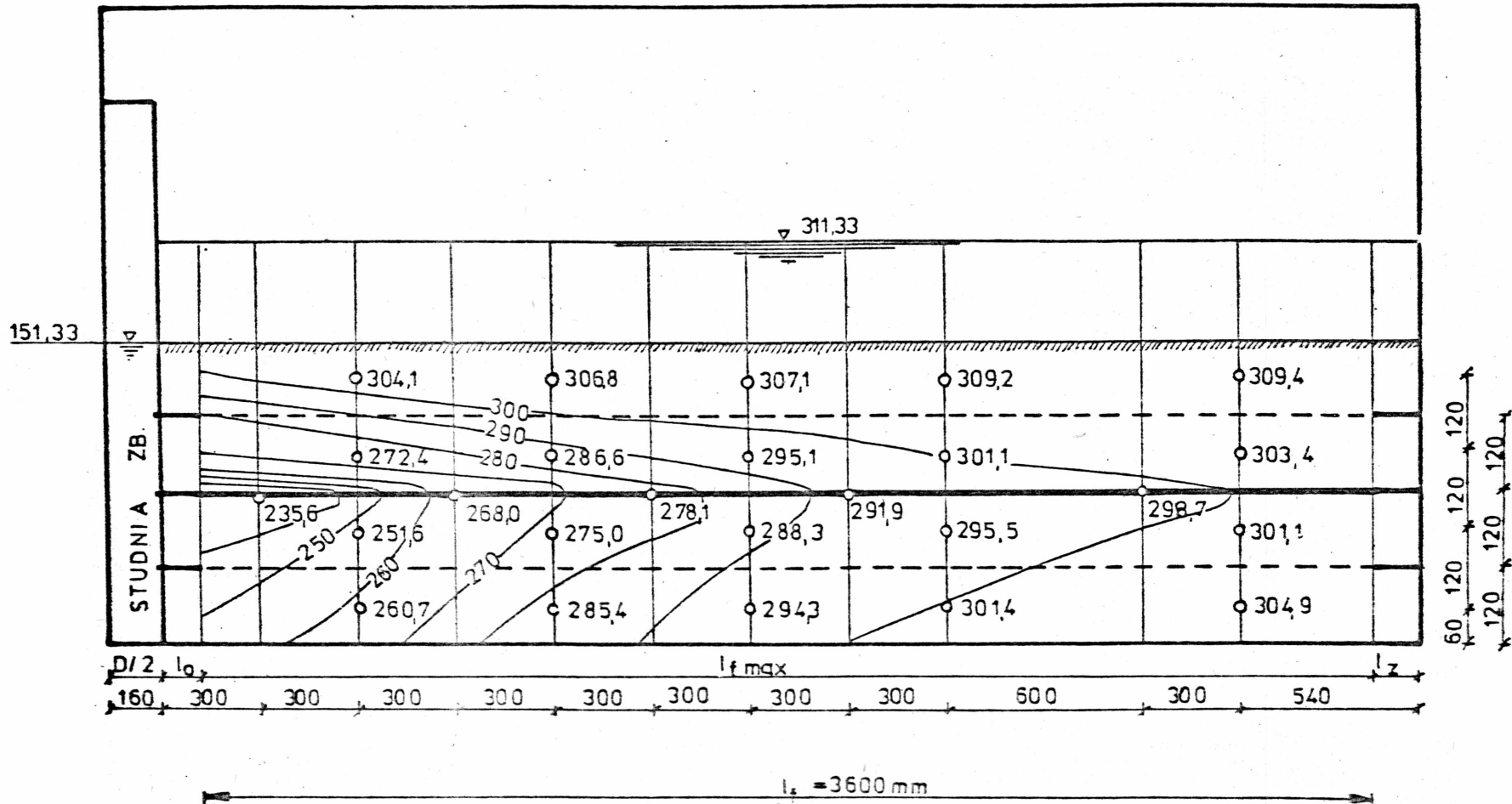
$H = 160$ mm

$z = 240$ mm

$n = 3$ szt

$l_f = 3600$ mm

$s_p = 160$ mm



Rys. 9-20 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 3$,
 $l_f = 3600$ mm

10. INTERPRETACJA WYNIKÓW BADAN

10.1. Analiza wyników pomiarów na modelu

10.1.1. Nierównomierność dopływu wody do zbieraczy

Siłą motoryczną napływu wody do ujęcia jest zadana w studni zbiorczej depresja s_p , tj. różnica między ciśnieniem piezometrycznym wody w źródle infiltracji i w studni. Depresja ta powoduje ukształtowanie się określonego stanu równowagi energetycznej w modelu. Stan ten jest zależny przede wszystkim od współczynnika filtracji warstwy wodonośnej oraz średnicy i długości zbieraczy, tzn. od parametrów charakteryzujących straty hydrauliczne w złożu filtracyjnym i zbieraczach. Zmianom parametrów konstrukcyjnych ujęcia, tj. długości, liczby i zagłębienia zbieraczy, towarzyszy inny stan równowagi energetycznej dopływu wody do ujęcia..

Analiza różnic między ciśnieniem piezometrycznym w bezpośrednim otoczeniu zbieraczy i w ich wnętrzu /rys. 9-9 do 9-11/, jak również układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym /rys. 9-12 do 9-20/ wskazuje na znaczną nierównomierność napływu wody do rur filtrowych wzdłuż ich długości. Nierównomierność ta zwiększa się wraz ze wzrostem długości czynnej l_f zbieraczy i depresji s_p w studni zbiorczej ujęcia, natomiast zmniejsza się wraz ze wzrostem liczby n czynnych zbieraczy. Wpływ miąższości H_w warstwy wodonośnej oraz zagłębienia z zbieraczy na nierównomierność jest stosunkowo nieznaczny. Istotne znaczenie ma tutaj stosunek strat ciśnienia w gruncie do strat energetycznych powstających wewnątrz zbieraczy, podczas przepływu wody do studni zbiorczej ujęcia [27, 31, 36]. Przy określonej średnicy zbieraczy współczynnik filtracji gruntu ma więc decydujący wpływ na nierównomierność obciążenia hydraulicznego zbieraczy. Im jest on większy, tym nierównomierność będzie więk-

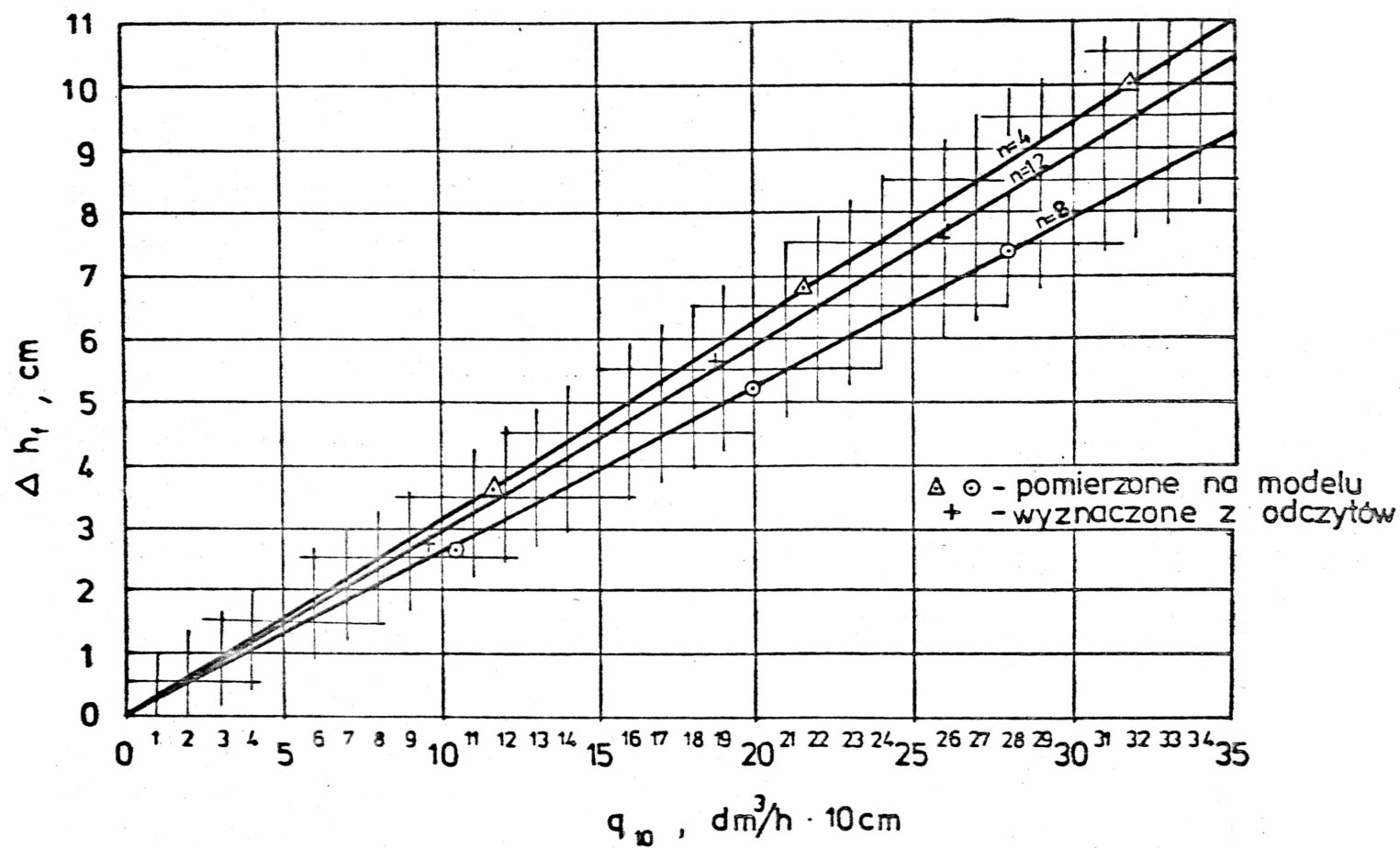
sza. W rozpatrywanym przypadku /badania modelowe/ przeważają straty wewnątrz zbieraczy, także dopływ wody do ujęcia jest największy przy studni zbiorczej.

Wobec tego, że określenie natężenia dopływu wody wzdłuż długości zbieraczy przez bezpośredni pomiar jest niemożliwe w warunkach modelowych, zastosowano metodę pośredniego wyznaczania wartości tego dopływu dla dowolnego odcinka zbieracza. W tym celu dokonano pomiarów różnicy ciśnień Δh_f zewnątrz i wewnątrz odcinka zbieracza o długości $l_f = 0,5$ m i pomiarów wydajności q tego odcinka. Pomiarów wykonano dla zbieraczy pracujących w zespole $n = 4, 8$ i 12 . Natężenie dopływu wody odpowiadające stratom Δh_f obliczano ze wzoru:

$$q_{10} = \frac{q}{l_f} \quad , \quad /10-1/$$

gdzie: q_{10} - dopływ jednostkowy wody przypadający na 10 cm długości zbieracza, $\text{dm}^3/\text{h dm}$,
 q - wydajność zbieracza, dm^3/h ,
 l_f - długość zbieracza, dm.

Uzyskane wyniki naniesiono na wykresy przedstawione na rysunku 10-1. Z przedstawionych wykresów wynika, że istnieje liniowa zależność między natężeniem q_{10} dopływu wody a wielkością powstających strat Δh_f . Opracowane wykresy /rys. 10-1/ wykorzystano następnie do określenia natężenia dopływu wody do zbieraczy wzdłuż ich długości, na podstawie pomierzonej różnicy ciśnień zewnątrz i wewnątrz rur filtrowych /rys. 9-9 + 9-11/. W tym celu dzielono zbieracze na odcinki jednostkowe o długości $l_{fi} = 0,10$ m. Dla każdego z tych odcinków określano Δh_{fi} na podstawie wykresów zamieszczonych na rysunkach 9-9, 9-10 i 9-11, a następnie q_{10i} , korzystając z wykresów na rysunku 10-1. Wyniki pomiarów Δh_{fi} oraz obliczeń q_{10i} dla zbieraczy pracujących w zespołach $n = 4, 8$ i 12 zestawiono w tabelach 10-1, 10-2 i 10-3.



Rys. 10-1 Zależność jednostkowego natężenia dopływu wody q_{10} od różnicy ciśnień Δh_f .

T a b e l a 10-1

Wyniki badań nierównomierności napływu wody do zbieraczy przy $n = 4$

S _p	l _f	pomier- ze: q	sumo- we: q*	różnica: R=q*-q		H _w =480 mm H=160 mm n=4 z=240 mm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
						Ilość odcinków jednostkowych o długości l _{fi} =0,10 m																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
mm	mm	dm ³ /h	dm ³ /h	dm ³ /h	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														

x) Δh_{fi} , cm.xx) q_{10i} , dm^3/h .

T a b e l a 10-2

Wyniki badań nierównomierności napływu wody do zbieraczy przy $n = 8$

[illegible]
$$\begin{array}{l} x) \Delta h_{fi} \text{ , cm.} \\ xx) q_{10i} \text{ , dm}^3/\text{h.} \end{array}$$

T a b e l a 10-3

Wyniki badań nierównomierności napływu wody do zbieraczy przy $n = 12$

S _p	l _f	po- mie- ro- ne:	sumo- we:	różnica:		H = 480 mm H = 160 mm n = 12 z = 240 mm																																									
		q	q*	R=q-q	ilość odcinków jednostkowych o długości l _o = 0,10 m																																										
mm	mm	dm ³ /h	dm ³ /h	dm ³ /h	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
80	500	47,67	46,0	-1,67	-35	27 9,2	27 9,2	27 9,2	27 9,2	27 9,2	x) xx)																																				
	1000	78,33	76,4	-1,93	-25	24 8,2	23 7,8	23 7,8	23 7,8	23 7,8	22 7,4	22 7,4	22 7,4	22 7,4	22 7,4																																
	1500	106,33	105,4	-0,93	-09	24 8,2	24 8,2	23 7,8	22 7,4	22 7,4	21 7,1	20 6,8	20 6,8	20 6,8	20 6,8	20 6,8	19 6,4	19 6,4	19 6,4	18 6,1																											
	2500	122,00	124,0	+2,00	+1,6	24 8,2	24 8,2	23 7,8	22 7,4	21 7,1	20 6,8	18 6,1	17 5,8	16 5,5	15 5,2	15 5,2	14 4,8	14 4,8	13 4,5	13 4,5	12 4,2	12 4,2	11 3,8	10 3,5	10 3,5	09 3,1	09 3,1	09 3,1	08 2,8	08 2,8	08 2,8																
	3600	126,33	125,5	-0,83	-0,7	24 8,2	24 8,2	23 7,8	22 7,4	21 7,1	20 6,8	18 6,1	17 5,8	16 5,5	15 5,2	14 4,8	12 4,2	11 3,8	10 3,5	09 3,1	09 3,1	08 2,8	07 2,4	06 2,1	06 2,1	06 2,1	05 1,8	05 1,8	05 1,8	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5	04 1,5						
160	500	93,33	94,0	-2,33	-25	54 18,2	54 18,2	54 18,2	54 18,2	54 18,2																																					
	1000	133,33	132,2	-1,13	-0,8	44 14,8	44 14,8	43 14,5	40 13,5	39 13,1	38 12,8	37 12,5	36 12,1	36 12,1	36 12,1																																
	1500	164,67	165,1	+0,43	+0,3	45 15,1	43 14,5	40 13,5	37 12,5	34 11,8	33 11,1	32 10,6	31 10,4	29 10,1	28 9,8	27 9,5	27 9,2	27 9,2	26 8,8	26 8,8																											
	2500	187,33	183,8	-3,53	-1,9	45 15,1	43 14,5	40 13,5	38 12,8	34 11,8	31 10,4	28 9,5	25 9,8	23 8,8	22 8,7	20 8,1	18 7,6	17 7,1	16 6,8	15 6,5	14 6,2	12 5,8	12 5,5	12 5,2	12 4,8	12 4,8	12 4,8	12 4,8	12 4,8	12 4,8																	
	3600	190,00	190,6	+0,60	-0,3	44 14,8	44 14,8	40 13,5	36 12,8	34 11,5	31 10,4	28 9,5	26 8,8	22 8,7	20 8,1	18 7,6	17 7,1	15 6,8	14 6,5	13 6,2	12 5,8	12 5,5	10 5,2	10 4,8	09 4,5	09 4,2	09 4,2	08 3,8	08 3,5	07 3,1	07 2,8	06 2,4	06 2,1	06 2,1	06 2,1	06 2,1	06 2,1	06 2,1	05 1,8	05 1,8	05 1,8	05 1,8					
240	500	129,67	127,5	-2,17	-1,7	76 25,5	76 25,5	76 25,5	76 25,5	76 25,5																																					
	1000	181,67	183,5	+1,83	+1,0	70 23,4	64 21,5	58 19,6	54 18,2	53 17,8	52 17,4	50 16,8	50 16,3	48 16,0	48 16,0																																
	1500	216,00	217,8	+1,80	+0,8	70 23,4	65 21,8	57 19,1	54 18,2	49 16,4	46 15,	43 14,5	42 14,2	40 13,5	38 12,8	36 12,1	34 11,5	32 10,8	30 10,1	29 9,8	28 9,5																										
	2500	238,33	240,6	+2,27	+1,0	70 23,4	63 21,2	53 17,8	47 15,8	40 13,5	36 12,1	33 11,1	30 10,1	27 9,5	25 9,2	23 8,8	21 8,2	20 7,8	19 7,4	17 7,1	16 6,8	15 6,5	14 6,2	13 5,8	12 5,5	11 5,2	11 5,2	10 4,8	10 4,8	9 4,5	9 4,5	8 4,2	8 4,2	7 3,8	7 3,8	6 3,5	6 3,5	5 3,1	5 3,1	4 2,8	4 2,8	3 2,4	3 2,4				
	3600	245,00	242,0	-3,00	-1,2	69 23,0	61 20,5	52 17,4	46 15,3	40 13,0	36 12,1	33 11,1	30 10,1	27 9,5	25 9,2	23 8,8	21 8,2	20 7,8	19 7,4	17 7,1	16 6,8	15 6,5	14 6,2	13 5,8	12 5,5	11 5,2	11 5,2	10 4,8	10 4,8	9 4,5	9 4,5	8 4,2	8 4,2	7 3,8	7 3,8	6 3,5	6 3,5	5 3,1	5 3,1	4 2,8	4 2,8	3 2,4	3 2,4				

x) Δh_{fi} , cm.
xx) q_{10i} , dm³/h.

W tabelach tych numery kolumn 1÷36 odpowiadają numerom /liczbie/ odcinków jednostkowych, licząc od końca rury filtrowej. W kolumnach zestawiono wartości Δh_{fi} oraz odpowiadające im wartości q_{10i} . Dokładność omówionej metody określania nierównomierności dopływu wody do poszczególnych zbieraczy sprawdzano, określając różnice R między wydajnością zbieracza q^{Σ} - obliczoną przez zsumowanie jednostkowych dopływów wody a wydajnością q pomierzoną w modelu /tab. 9-1/. Różnice R wynoszą od -4,0% do +3,5%.

Nierównomierność rozumiana jako stosunek jednostkowego dopływu wody do zbieracza na jego końcu /przy studni zbiorczej/ - $q_{10,1}$ do jednostkowego napływu wody na początku zbieracza - $q_{10,k}$, gdzie k oznacza liczbę odcinków jednostkowych danego zbieracza, zależy przede wszystkim od długości rur filtrowych. Przy krótkich zbieraczach o długości nie przekraczającej ca 1,0 m /25 m w skali naturalnej/ nierównomierność jest niewielka, a dopływ do zbieraczy może być traktowany w przybliżeniu jako równomierny. Dla większych długości rur filtrowych dopływ wody jest wyraźnie nierównomierny. Nierównomierność ta wzrasta wraz ze wzrostem depresji w studni zbiorczej ujęcia. Natomiast wzrost liczby zbieraczy na ujęciu powoduje stosunkowo nieznaczne zmniejszenie nierównomierności dopływu, a zagłębienie zbieraczy nie ma praktycznie wpływu na omawiane zjawisko. W skrajnych przypadkach / $l_f = 3,6$ m, $s_p = 0,24$ m, $n = 4$ / jednostkowy napływ wody na końcu zbieracza był około 12 razy większy od napływu jednostkowego na początku zbieracza /tab. 10-1/.

Rozważania te znalazły potwierdzenie w analizie układu linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym modelowego ujęcia wody - przykładowo przedstawionych na rysunkach 9-12 do 9-20. Największe spadki hydrauliczne /zagęszczenie linii stałego potencjału/ obserwuje się w pobliżu studni zbiorczej.

Nierównomierność napływu wody do zbieraczy modelowego ujęcia promienistego powoduje, że zasięg oddziaływania ujęcia kończy się praktycznie w odległości ca $0,5 l_f$, licząc od początku /głowicy/ zbieracza /rys. 9-12 ÷ 9-20/. Rezultaty badań osiągnięte dla $l_f = 3,6 \text{ m}$ /90 m w skali naturalnej/ należy traktować jako przybliżone - oddziaływanie zbieraczy wykracza poza ograniczenie obszaru filtracji cylindryczną ścianą zbiornika - w związku z czym zostały one pominięte przy matematycznym opisie pracy modelowego ujęcia wody /p. 11/.

Omówione tutaj zjawisko nierównomierności dopływu wody do ujęcia, wynikające z określonego stanu równowagi energetycznej w modelu ma istotny wpływ na zależności funkcyjne $Q_u / k_f r_0^2 = F(n, l_f / r_0, z / r_0)$ przedstawione na rysunkach 9-1 do 9-8. W szczególności analiza zamieszczonych wykresów /rys. 9-4 do 9-6/ pozwala stwierdzić, że niezależnie od liczby /rys. 9-1 do 9-3/ i zagłębienia zbieraczy /rys. 9-7 i 9-8/ wydłużenie ich ponad $l_f \approx 2,0 \text{ m}$ /50m w skali naturalnej/ nie przynosi istotnego wzrostu wydajności ujęcia.

10.1.2. Wzajemne oddziaływanie zbieraczy

Z zamieszczonych na rysunkach 9-1 ÷ 9-3 wykresów wynika, że zwiększenie liczby zbieraczy wpływa w zdecydowany sposób na wzrost wydajności ujęcia /niezależnie od ich długości - rys. 9-4 ÷ 9-6 i zagłębienia - rys. 9-7 i 9-8/. Świadczy to o małym stopniu wzajemnego oddziaływania zbieraczy. Można zatem przyjąć, że w warunkach takich jak w modelu wzajemne oddziaływanie zbieraczy występuje dopiero przy $n > 4$. Toteż współczynnik wzajemnego oddziaływania zbieraczy α zdefiniowano następująco:

$$\alpha = \frac{q/n/}{q/4/}, \quad /10-2/$$

gdzie: $q/n/ = Q_{um}/n$ - wydajność pojedynczego zbieracza pracującego w zespole n zbieraczy $/n \geq 4/$,

$q/4/ = Q_{um}/4$ - wydajność pojedynczego zbieracza pracującego w zespole czterech zbieraczy $/n = 4/$.

Wydajności Q_{um} ujęcia dla $n = 4, 8$ i 12 zbieraczy zestawione są w tabeli 9-2. Na podstawie zależności /10-2/ dokonano oceny ilościowej współczynnika α wzajemnego oddziaływania zbieraczy. Wyniki badań zestawiono w tabeli 10-4. Analiza wyników obliczeń współczynnika α /tab. 10-4/ upoważnia do stwierdzenia, iż wzajemne oddziaływanie zbieraczy zależy przede wszystkim od liczby i długości rur filtrowych na ujęciu. Największe oddziaływanie - $\alpha \approx 0,8$ występuje przy maksymalnej liczbie zbieraczy $/n = 12/$ i najmniejszej ich długości $/l_f = 0,5 \text{ m}/$, natomiast przy mniejszej liczbie $/n = 8/$ zbieraczy o dużej długości $/l_f = 3,6 \text{ m}/$ współczynnik α przyjmuje wartości zbliżone do jedności. Ten stan rzeczy wynika ze znacznej nierównomierności dopływu wody do ujęcia - skoncentrowanego w przeważającej części w pobliżu studni zbiorczej.

10.2. Odniesienie wyników badań modelowych do rzeczywistości

Przedstawiony powyżej obraz pracy modelowego ujęcia promienistego można odnieść do warunków naturalnych przy pomocy zdefiniowanych na wstępie /p. 4/ skal podobieństwa. Wymaga to jednak sprawdzenia poprawności przeprowadzonych badań odnośnie rodzaju ruchu wody w złożu filtracyjnym oraz określenia wartości skali prędkości przepływu wody w zbieraczach.

Dla przepływu wody w złożu liniowe prawo filtracji Darcy jest ważne wówczas, gdy liczba $Re < 5$ /p. 4.2/. Warunek ten stanowi zarazem kryterium Reynolds'a podobieństwa zjawisk w modelu i w rzeczywistości.

T a b e l a 10-4

Wyniki badań współczynnika α wzajemnego oddziaływania zbieraczy

długość zbieracza l_z , mm	depresja w studni zb. s_p , mm	$H_W = 360$ mm						$H_W = 480$ mm									$H_W = 600$ mm								
		z = 120 mm			z = 240 mm			z = 120 mm			z = 240 mm			z = 360 mm			z = 240 mm			z = 360 mm			z = 480 mm		
		n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12	n=4	n=8	n=12
		Nr. zadania badawczego w dośw. III						Numer zadania badawczego w doświadczeniu II									Numer zadania badawczego w doświadczeniu I								
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
500	80	1,0	0,833	0,742	1,0	0,873	0,823	1,0	0,876	0,809	1,0	0,905	0,799	1,0	0,898	0,786	1,0	0,904	0,759	1,0	0,888	0,780	1,0	0,916	0,775
1000		1,0	0,900	0,943	1,0	0,938	0,865	1,0	0,978	0,891	1,0	0,933	0,846	1,0	0,910	0,773	1,0	0,916	0,856	1,0	0,936	0,778	1,0	0,907	0,743
1500		1,0	0,931	0,870	1,0	0,976	0,925	1,0	0,961	0,907	1,0	0,964	0,931	1,0	0,911	0,813	1,0	0,966	0,932	1,0	0,913	0,812	1,0	0,913	0,807
2500		1,0	0,946	0,899	1,0	0,964	0,913	1,0	0,964	0,911	1,0	0,972	0,934	1,0	0,930	0,879	1,0	0,944	0,908	1,0	0,942	0,877	1,0	0,946	0,866
3600		1,0	0,936	0,885	1,0	0,971	0,927	1,0	0,952	0,910	1,0	0,977	0,923	1,0	0,937	0,880	1,0	0,956	0,915	1,0	0,959	0,921	1,0	0,942	0,915
500	160	1,0	0,919	0,824	1,0	0,941	0,878	1,0	0,940	0,898	1,0	0,926	0,840	1,0	0,896	0,796	1,0	0,921	0,810	1,0	0,899	0,795	1,0	0,962	0,792
1000		1,0	0,952	0,861	1,0	0,950	0,868	1,0	0,967	0,931	1,0	0,911	0,820	1,0	0,929	0,812	1,0	0,939	0,825	1,0	0,963	0,832	1,0	0,916	0,771
1500		1,0	0,943	0,856	1,0	0,981	0,909	1,0	0,961	0,900	1,0	0,963	0,909	1,0	0,948	0,881	1,0	0,945	0,881	1,0	0,968	0,849	1,0	0,975	0,826
2500		1,0	0,966	0,883	1,0	0,967	0,923	1,0	0,954	0,901	1,0	0,961	0,934	1,0	0,954	0,876	1,0	0,942	0,894	1,0	0,947	0,858	1,0	0,979	0,879
3600		1,0	0,954	0,879	1,0	0,959	0,909	1,0	0,969	0,909	1,0	0,968	0,919	1,0	0,930	0,864	1,0	0,946	0,898	1,0	0,936	0,868	1,0	0,975	0,895
500	240	1,0	0,934	0,865	1,0	0,973	0,886	1,0	0,943	0,869	1,0	0,880	0,792	1,0	0,886	0,813	1,0	0,957	0,817	1,0	0,941	0,810	1,0	0,935	0,799
1000		1,0	0,965	0,875	1,0	0,964	0,883	1,0	0,942	0,881	1,0	0,913	0,843	1,0	0,950	0,846	1,0	0,978	0,851	1,0	0,935	0,832	1,0	0,951	0,811
1500		1,0	0,955	0,897	1,0	0,953	0,898	1,0	0,944	0,897	1,0	0,955	0,905	1,0	0,946	0,875	1,0	0,936	0,850	1,0	0,920	0,862	1,0	0,970	0,854
2500		1,0	0,963	0,924	1,0	0,948	0,907	1,0	0,954	0,929	1,0	0,962	0,919	1,0	0,963	0,904	1,0	0,955	0,904	1,0	0,948	0,888	1,0	0,986	0,894
3600		1,0	0,967	0,913	1,0	0,951	0,901	1,0	0,957	0,927	1,0	0,952	0,912	1,0	0,960	0,898	1,0	0,944	0,906	1,0	0,957	0,887	1,0	0,987	0,891

Maksymalne prędkości filtracji i odpowiadające im maksymalne wartości liczby Re występują na granicy filtra "naturalnego" przy dopływie wody do zbieraczy. Wyniki obliczeń V_{fmax} i Re_{max} występujące podczas największych wydajności q_{Mt} zbieraczy, pomierzonych w modelu /tab. 9-1/, zestawiono w tabeli 10-5, przy czym:

$$V_{fmax} = \frac{q_{Mt}}{\pi d_f l_f} \quad ; \quad Re_{max} = \frac{V_{fmax} d_{10}}{n_p^{0,33} \nu_t}$$

T a b e l a 10-5

Zestawienie wyników obliczeń V_{fmax} i Re_{max}

Nr doświadczenia	Parametry modelowego ujęcia wody			Największa wydajność zbieracza w modelu q_{Mt} $m^3/s \cdot 10^{-5}$	Wyniki obliczeń	
	Konstrukcyjne	Geologiczne	Ekspluatacyjne		V_{fmax}	Re_{max}
					$m/s \cdot 10^{-2}$	-
I	$n=1$ $l_f=0,50m$ $z=0,24m$ $d_f=0,02m$	$H_w=0,60m$ $d_{10}=0,215mm$	$H=0,16m$ $s_p=0,24m$ $t=289,05K$	4,583	1,459	0,390<5
II	$n=1$ $l_f=0,50m$ $z=0,12m$ $d_f=0,02m$	$H_w=0,48m$ $d_{10}=0,215mm$	$H=0,16m$ $s_p=0,24m$ $t=287,85K$	4,528	1,441	0,373<5
III	$n=1$ $l_f=0,50m$ $z=0,12m$ $d_f=0,02m$	$H_w=0,36m$ $d_{10}=0,215mm$	$H=0,16m$ $s_p=0,24m$ $t=292,35K$	<u>4,611</u>	<u>1,468</u>	<u>0,426<5</u>

Z kryterium podobieństwa Froude'a przepływu wody wewnątrz zbieraczy w modelu i w rzeczywistości określić można skalę prędkości

ξ_v , a następnie z prawa ciągłości przepływu objętościowego - skalę współczynnika filtracji ξ_{kf} złoża /p. 4.2/:

$$\xi_v = \xi_1^x = \xi_{kf}$$

/4-21/

Korzystając z definicji skali prędkości /4-4/ i podstawiając do wzoru /4-21/ $\xi_1 = 25$ otrzymamy:

$$\frac{V_N}{V_M} = 25^x, \quad /10-3/$$

gdzie: V_N, V_M - średnia prędkość przepływu wody w zbieraczach w skali naturalnej i modelowej,
 x - nieznany wykładnik potęgowy.

Rozwiązanie równania /10-3/ sprowadzało się do określenia wartości stosunku prędkości V_N w warunkach naturalnych do prędkości V_M w modelu, a następnie określenia wykładnika x . Ponieważ spadki hydrauliczne w zbieraczach modelu określone są w skali 1:1 /p.4.2/, to dla poszukiwanej wartości V_N/V_M stosunek strat hydraulicznych Δh_{sN} w skali naturalnej do strat Δh_{sM} w skali modelowej równy jest skali geometrycznej / $\xi_1 = 25$ /. Wysokość strat hydraulicznych Δh_{sN} powstających w zbieraczach, a także na wypływie wody ze zbieraczy do studni zbiorczej ujęcia obliczyć można ze wzorów /2-29/ ; /2-32/, ważnych dla przepływu burzliwego. Wymaga to jednak znajomości współczynnika m' charakteryzującego rozmieszczenie jednostkowych dopływów wody wzdłuż perforowanego odcinka zbieracza /p.2.2.2/. W warunkach modelowych m.in. ze względu na znaczną zmienność λ_p wzdłuż długości zbieraczy /przepływ laminarny, przejściowy, a także burzliwy /wartość Δh_{sM} nie może być obliczana ze wzorów /2-29/ ; /2-32/. Konieczne staje się więc podzielenie długości l_f zbieracza na k odcinków jednostkowych, na których dopływ wody może być traktowany jako równomierny / $m'=1$ /, wówczas:

$$\Delta h_s = \sum_{i=1}^k \Delta h_{pi} + \Delta h_{l0} + \Delta h_w, \quad /10-4/$$

gdzie: Δh_{pi} - wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody wewnątrz perforowanego odcinka zbieracza o długości jednostkowej $l_{fi} = 0,10 \text{ m} / 2,5 \text{ m}$ w skali naturalnej / m

Δh_{10} - wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody wewnątrz pełnościennego odcinka zbieracza o długości

$l_0 = 0,12 \text{ m} / 3,0 \text{ m w skali naturalnej} / , \text{ m}$

Δh_w - wysokość strat hydraulicznych powstających na wypływie wody ze zbieracza do studni zbiorczej ujęcia, m.

W celu rozwiązania tak postawionego zadania wykorzystano wyniki badań nierównomierności dopływu wody do zbieraczy /tab. 10-1 ÷ 10-3/, na podstawie których określano prędkości V_i przepływu wody w końcowym przekroju odcinków jednostkowych. Znajomość prędkości V_i umożliwia obliczenie z przekształconego wzoru /2-29/ straty hydraulicznej Δh_{pi} :

$$\Delta h_{pi} = \frac{1,86}{2g} /V_i^2 - V_{i-1}^2/ + \lambda_{pi} \frac{l_{fi}}{d_w} \cdot \frac{V_i^2}{2g} \left[\left(\frac{V_{i-1}}{V_i} \right)^2 + \frac{V_{i-1}}{V_i} + 1 \right] \cdot \frac{1}{3} ,$$

/10-5/

gdzie: V_{i-1} - średnia prędkość przepływu wody w początkowym przekroju odcinka jednostkowego zbieracza, m/s

λ_{pi} - współczynnik oporów liniowych w rurze perforowanej, odniesiony do prędkości V_i w końcowym przekroju odcinka jednostkowego, obliczany:

a/ w skali modelowej /p. 7.3.2/

- ze wzoru /7-11/ dla przepływów laminarnych,
- ze wzoru /7-12/ dla przepływów w strefie przejściowej,
- ze wzoru /7-13/ dla przepływów burzliwych;

b/ w skali naturalnej

- ze wzoru Siwonia [55,56] dla przepływów burzliwych /przyjmując $k_z = 1,5 \text{ mm}/$

$$\lambda_p = \left\{ -2 \cdot \log \left[\frac{5,28}{Re^{0,89}} + 0,269 \left(0,282 \varphi_o^{2,4} + \frac{k_z}{d_w} \right) \right] \right\}^{-2} + 0,0106 \varphi_o^{0,413}$$

/10-6/

Wysokość strat hydraulicznych wywołanych przepływem wody wewnątrz pełnościennego odcinka zbieracza, a także na wypływie wody do studni zbiorczej ujęcia obliczano ze wzoru:

$$\Delta h_{10} + \Delta h_w = (1 + \lambda_{10} \frac{10}{d_w}) \frac{v^2}{2g}, \quad /10-7/$$

gdzie: λ_{10} - współczynnik oporów liniowych w rurze pełnościennej /zafiltrowej/, obliczany:

a/ w skali modelowej /p. 7.3.1/

- ze wzoru /7-1/ dla przepływów laminarnych,
- ze wzoru /7-2/ dla przepływów w strefie przejściowej,
- ze wzoru /7-3/ dla przepływów burzliwych;

b/ w skali naturalnej /p. 7.3.1/

- ze wzoru /7-3/ dla przepływów burzliwych
- /przyjmując $k_z = 1,5 \text{ mm/}$.

Obliczeń wysokości strat Δh_{SN} i Δh_{SM} dokonano na maszynie cyfrowej ODRA 1305, zadając wartości V_N/V_M i porównując wyniki obliczeń $\Delta h_{SN} / \Delta h_{SM}$ ze skalą geometryczną ξ_1 modelu. Obliczenia przeprowadzono przy różnej długości i liczbie zbieraczy i różnej depresji w studni zbiorczej /tab. 10-1 do 10-3/. Dodatkowym sprawdzeniem obliczeń Δh_{SM} były pomiary wysokości strat hydraulicznych w modelu /rys. 9-9 do 9-11/.

Metodę obliczania strat hydraulicznych w skali modelowej i w skali naturalnej wyjaśnia tabela 10-6.

Ze względu na znaczną zmienność wartości λ_p w modelu na długości zbieraczy /szczególnie w strefie przepływów laminarnych/

OBLICZANIE STRAT HYDRAULICZNYCH W ZBIERACZACH UJECIA PROMIENISTEGO

SKALA MODELOWA

H=490 Sp=160 N=H Z=240

NR	QJ	QJSU1	V	RE	LO	A	LP	DH
=	D43/H	M3/S	M/S	-	-	-	-	M
1	2,30	0,00000064	0,0081	70,34	0,92616	0,0005	1,04748	0,000018
2	2,30	0,00000128	0,0163	140,68	0,46436	0,0015	0,52775	0,000050
3	2,30	0,00000192	0,0244	211,01	0,31008	0,0027	0,35341	0,000107
4	2,30	0,00000256	0,0325	281,35	0,23283	0,0039	0,26589	0,000155
5	2,30	0,00000312	0,0407	351,69	0,18643	0,0051	0,21324	0,000203
6	2,30	0,00000383	0,0488	422,03	0,15547	0,0063	0,17806	0,000251
7	2,30	0,00000447	0,0569	492,36	0,13334	0,0075	0,15288	0,000300
8	2,30	0,00000511	0,0651	562,70	0,11674	0,0087	0,13397	0,000349
9	2,30	0,00000575	0,0732	633,04	0,10391	0,0099	0,11923	0,000398
10	2,60	0,00000547	0,0824	712,55	0,09227	0,0116	0,10607	0,000453
11	2,60	0,00000712	0,0916	792,06	0,08305	0,0130	0,09553	0,000521
12	2,60	0,00000792	0,1008	871,58	0,07550	0,0144	0,08691	0,000578
13	2,60	0,00000964	0,1100	951,09	0,06921	0,0159	0,07972	0,000635
14	3,00	0,00000947	0,1206	1042,83	0,06315	0,0181	0,07278	0,000725
15	3,00	0,00001031	0,1312	1134,58	0,05806	0,0199	0,06696	0,000775
16	3,00	0,00001114	0,1418	1226,32	0,05373	0,0216	0,06200	0,000854
17	3,40	0,00001204	0,1538	1330,30	0,04955	0,0244	0,05720	0,000975
18	3,40	0,00001303	0,1659	1434,28	0,04597	0,0264	0,05310	0,001056
19	3,80	0,00001404	0,1793	1550,49	0,04254	0,0297	0,04916	0,001197
20	3,80	0,00001514	0,1928	1666,70	0,03958	0,0320	0,04577	0,001292
21	4,20	0,00001531	0,2076	1795,14	0,03676	0,0358	0,04253	0,001433
22	4,20	0,00001747	0,2225	1923,59	0,03432	0,0386	0,03972	0,001542
23	4,60	0,00001375	0,2387	2064,26	0,03199	0,0429	0,03704	0,001716
24	5,00	0,00002014	0,2564	2217,17	0,02979	0,0477	0,03452	0,001909
25	5,40	0,00002164	0,2755	2382,31	0,02823	0,0591	0,03885	0,002354
26	5,70	0,00002322	0,2937	2556,63	0,02653	0,0747	0,04562	0,002992
27	6,00	0,00002482	0,3169	2740,12	0,02455	0,0925	0,05159	0,003700
28	6,40	0,00002567	0,3325	2935,84	0,02198	0,1120	0,05502	0,004430
29	6,80	0,00002854	0,3636	3143,79	0,01925	0,1312	0,05742	0,005247
30	7,60	0,00003067	0,3905	3376,21	0,01666	0,1510	0,05685	0,006042
31	8,80	0,00003311	0,4216	3645,33	0,01413	0,1878	0,06036	0,007512
32	10,00	0,00003502	0,4570	3951,15	0,01110	0,2215	0,06011	0,008851
33	11,80	0,00003717	0,4987	4312,01	0,00803	0,2673	0,05935	0,010671
34	14,40	0,00004317	0,5426	4752,39	0,00589	0,3317	0,05855	0,013257
35	16,40	0,00004772	0,6076	5253,93	0,00376	0,4058	0,05779	0,016233
36	18,40	0,00005283	0,6727	5816,63	0,00267	0,4758	0,05708	0,019831

DHPH=0,11874

DHJM=0,02306

DHLUM=0,01181

SUMA STRAT=0,15361

SKALA NATURALNA

NR	QJ	QJSU1	V	RE	LO	A	LP	DH
=	M3/S	M3/S	M/S	-	-	-	-	M
1	0,00202635	0,00202635	0,0427	7231,84	0,04005	10,468	0,05175	0,000189
2	0,00202635	0,00412271	0,0854	18463,67	0,03571	10,357	0,04904	0,000525
3	0,00202635	0,00622516	0,1281	27995,51	0,03540	10,734	0,04402	0,001147
4	0,00202635	0,00833542	0,1708	36927,35	0,03470	11,354	0,04748	0,001755
5	0,00202635	0,01043177	0,2135	46159,18	0,03425	12,073	0,04714	0,002447
6	0,00202635	0,01252812	0,2562	55391,02	0,03393	12,853	0,04691	0,003225
7	0,00202635	0,01462448	0,2989	64622,86	0,03371	13,631	0,04674	0,004087
8	0,00202635	0,01677083	0,3417	73954,62	0,03353	14,440	0,04661	0,005034
9	0,00202635	0,01885717	0,3844	83936,53	0,03332	15,260	0,04650	0,006066
10	0,00236277	0,02123628	0,4326	93522,52	0,03326	16,592	0,04641	0,007591
11	0,00236277	0,02367677	0,4807	103558,51	0,03316	17,504	0,04633	0,009113
12	0,00236277	0,02597655	0,5292	114394,50	0,03307	18,415	0,04627	0,010543
13	0,00236277	0,02833635	0,5775	124930,42	0,03300	19,322	0,04622	0,012282
14	0,00273437	0,03103073	0,6332	135672,01	0,03292	20,706	0,04617	0,015921
15	0,00273437	0,03381510	0,6889	148413,54	0,03286	21,720	0,04612	0,017257
16	0,00273437	0,03654948	0,7446	160955,07	0,03281	22,734	0,04608	0,019542
17	0,00303896	0,03964044	0,8077	174602,13	0,03276	24,046	0,04605	0,023436
18	0,00303896	0,4274740	0,8708	188249,12	0,03272	25,153	0,04601	0,026574
19	0,00346354	0,04621024	0,9414	203501,77	0,03267	26,441	0,04598	0,031376
20	0,00346354	0,04967448	1,0120	218734,39	0,03264	27,633	0,04596	0,035420
21	0,00382813	0,05350260	1,0899	235012,53	0,03260	28,899	0,04593	0,041409
22	0,00382813	0,05733073	1,1679	252470,66	0,03257	30,170	0,04591	0,046527
23	0,00412271	0,06152144	1,2533	270934,34	0,03254	31,415	0,04589	0,053899
24	0,00453729	0,06603073	1,3462	291003,55	0,03251	32,685	0,04587	0,062391
25	0,00492187	0,07100260	1,4464	312678,22	0,03248	30,504	0,04585	0,072126
26	0,00519331	0,07612722	1,5523	335957,19	0,03246	27,642	0,04583	0,082523
27	0,00544875	0,08165667	1,6637	359940,25	0,03244	25,505	0,04581	0,094366
28	0,00583333	0,08750000	1,7825	385328,84	0,03241	24,142	0,04580	0,108157
29	0,00617792	0,09367722	1,9088	412022,96	0,03237	23,578	0,04578	0,123707
30	0,00692708	0,10062903	2,0499	440128,16	0,03237	23,892	0,04577	0,144394
31	0,00802083	0,10864583	2,2133	478449,97	0,03235	22,904	0,04575	0,172055
32	0,00911458	0,11775042	2,3990	518588,39	0,03233	23,164	0,04574	0,205245
33	0,01075521	0,12831562	2,6181	56551,73	0,03231	23,474	0,04573	0,250766
34	0,01312500	0,14164062	2,8855	623651,05	0,03229	23,824	0,04571	0,316070
35	0,01494792	0,15659854	3,1900	689578,06	0,03228	24,054	0,04570	0,390304
36	0,01677083	0,17335037	3,5316	765432,76	0,03226	24,253	0,04569	0,480946

DHPH=2,87842

DHJM=0,53570

DHLUM=0,24606

SUMA STRAT=3,76018

i przejściowych/ ściśle rozwiązanie zadania nie jest możliwe. Najmniejsze odchylenia wyników pomiarów i obliczeń uzyskano dla $V_N / V_M = 5,25$, stąd $x = 0,515$. Charakterystyki hydrauliczne pracy modelowego ujęcia promienistego dają się odnieść do rzeczywistości dla $\xi_V = \xi_{kf} = \xi_1^{0,515}$, tj. dla $k_f = 1,96 \cdot 10^{-3}$ m/s, a wydajności pomierzone w modelu przeliczyć można na wielkości naturalne /na podstawie 4-22/ za pomocą wzoru:

$$Q_N = 3281,25 \cdot Q_M \quad /10-8/$$

Uzyskane w pracy rezultaty badań mają znaczenie praktyczne, gdyż promieniste ujęcia infiltracyjne budowane w Polsce lokalizowane są w warstwach wodonośnych o współczynniku filtracji $k_f \in < 2,5 \cdot 10^{-4}, 2,13 \cdot 10^{-3} >$ m/s [61,65] .

11. ODWZOROWANIE MATEMATYCZNE DZIAŁANIA INFILTRACYJNEGO UJĘCIA PROMIENISTEGO

Na podstawie przeprowadzonej w p. 4.3 analizy wymiarowej charakterystyk hydraulicznych elementów ujęcia, określony został strukturalny wzór /jakościowy/ na wydajność ujęcia:

$$\frac{Q_u}{k_f r_0^2} = B_0 \cdot n^{b_1} \cdot \left(\frac{l_f}{r_0} \right)^{b_2} \cdot \left(\frac{z}{r_0} \right)^{b_3} \cdot \left(\frac{H_w}{r_0} \right)^{b_4} \cdot \left(\frac{s_p}{r_0} \right)^{b_5}, \quad /11-1/$$

który po zlogarytmowaniu przyjmuje postać liniową:

$$\log \frac{Q_u}{k_f r_0^2} = \log B_0 + b_1 \log n + b_2 \log \frac{l_f}{r_0} + b_3 \log \frac{z}{r_0} + b_4 \log \frac{H_w}{r_0} + b_5 \log \frac{s_p}{r_0}, \quad /11-2/$$

Wartości liczbowe wykładników potęgowych, a także wielkości B_0 występujących we wzorze /11-1/ wyznaczono metodą regresji wielokrotnej, stosując metodę mnożników Gaussa [59] - dla danych zestawionych w tabeli 9-3.

W uogólnionym zapisie wzór /11-2/ można przedstawić w formie:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5, \quad /11-3/$$

gdzie: $\hat{y}$ - oszacowana wartość y dla pomierzonych wartości

$$x_1, x_2, \dots, x_5,$$

$$x_1, x_2, \dots, x_5 - \text{zmiennne niezależne: } \log n, \log l_f/r_0, \dots, \log s_p/r_0,$$

b_0 - parametr dający oszacowaną wartość y dla

$$x_1, x_2, \dots, x_5 = 0$$

$b_1, b_2, \dots, b_5$ - współczynniki regresji.

Stopień dobrania wielokrotnej regresji liniowej mierzy się sumą kwadratów odchyień wartości pomierzonych od oszacowanych [59].

W celu określenia wartości współczynników regresji we wzorze /11-3/ spełniających równanie $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min$, należy rozwiązać następujący układ równań:

$$\begin{aligned} K b_0 + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + b_3 \sum x_3 + b_4 \sum x_4 + b_5 \sum x_5 &= \sum y \\ b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 + b_4 \sum x_1 x_4 + b_5 \sum x_1 x_5 &= \sum x_1 y \\ b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_2 x_1 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 + b_4 \sum x_2 x_4 + b_5 \sum x_2 x_5 &= \sum x_2 y \\ b_0 \sum x_3 + b_1 \sum x_3 x_1 + b_2 \sum x_3 x_2 + b_3 \sum x_3^2 + b_4 \sum x_3 x_4 + b_5 \sum x_3 x_5 &= \sum x_3 y \\ b_0 \sum x_4 + b_1 \sum x_4 x_1 + b_2 \sum x_4 x_2 + b_3 \sum x_4 x_3 + b_4 \sum x_4^2 + b_5 \sum x_4 x_5 &= \sum x_4 y \\ b_0 \sum x_5 + b_1 \sum x_5 x_1 + b_2 \sum x_5 x_2 + b_3 \sum x_5 x_3 + b_4 \sum x_5 x_4 + b_5 \sum x_5^2 &= \sum x_5 y \end{aligned} \quad /11-4/$$

gdzie: K - liczba zbiorów wartości pomierzonych $/y, x_1, x_2, \dots, x_5/$,

$b_1, b_2, \dots, b_5$ - współczynniki regresji cząstkowej.

Z rozwiązania pierwszego równania otrzymano:

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}_1 - b_2 \bar{x}_2 - b_3 \bar{x}_3 - b_4 \bar{x}_4 - b_5 \bar{x}_5, \quad /11-5/$$

Podstawiając wyrażenie /11-5/ do pozostałych równań układu /11-4/ otrzymano drugi zbiór równań bardziej przydatny obliczeń statystycznych:

$$b_1 \cdot \sum' x_1^2 + b_2 \cdot \sum' x_1 x_2 + b_3 \cdot \sum' x_1 x_3 + b_4 \cdot \sum' x_1 x_4 + b_5 \cdot \sum' x_1 x_5 = \sum' x_1 y$$

$$b_1 \cdot \sum' x_2 x_1 + b_2 \cdot \sum' x_2^2 + b_3 \cdot \sum' x_2 x_3 + b_4 \cdot \sum' x_2 x_4 + b_5 \cdot \sum' x_2 x_5 = \sum' x_2 y$$

$$b_1 \cdot \sum' x_3 x_1 + b_2 \cdot \sum' x_3 x_2 + b_3 \cdot \sum' x_3^2 + b_4 \cdot \sum' x_3 x_4 + b_5 \cdot \sum' x_3 x_5 = \sum' x_3 y$$

$$b_1 \cdot \sum' x_4 x_1 + b_2 \cdot \sum' x_4 x_2 + b_3 \cdot \sum' x_4 x_3 + b_4 \cdot \sum' x_4^2 + b_5 \cdot \sum' x_4 x_5 = \sum' x_4 y$$

$$b_1 \cdot \sum' x_5 x_1 + b_2 \cdot \sum' x_5 x_2 + b_3 \cdot \sum' x_5 x_3 + b_4 \cdot \sum' x_5 x_4 + b_5 \cdot \sum' x_5^2 = \sum' x_5 y$$

/11-6/

Równania układu /11-6/ wyrażone są w postaci odchyleń każdej wartości zmiennej od wartości średniej tej zmiennej / $\sum' xy = \sum (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})$ /. Postać ta pozwala na stosunkowo proste wyznaczenie: sumy kwadratów odchyleń zniesionych przez regresję, resztkowej sumy kwadratów, wariancji oszacowania i odchylenia standardowego, ze wzorów:

- suma kwadratów zniesionych przez regresję;

$$\sum' e^2 = b_1 \cdot \sum' x_1 y + b_2 \cdot \sum' x_2 y + b_3 \cdot \sum' x_3 y + b_4 \cdot \sum' x_4 y + b_5 \cdot \sum' x_5 y, \quad /11-7/$$

- resztkowa suma kwadratów odchyleń:

$$\sum' \hat{y}^2 = \sum' y^2 - \sum' e^2, \quad /11-8/$$

- wariancja oszacowania:

$$s^2 / \hat{y} = \frac{\sum' y^2}{k-k-1}, \quad /11-9/$$

gdzie: k - liczba zmiennych niezależnych,
 - odchylenie standardowe:

$$s_{\hat{y}} = \sqrt{s^2 / \hat{y}} \quad /11-10/$$

Istotność regresji wielokrotnej stwierdzić można porównując z odpowiednią wartością testu F stosunek sumy kwadratów zniesionych przez regresję do resztkowej sumy kwadratów, każda z nich podzielona przez odpowiednie stopnie swobody, tzn.:

$$F = \frac{\sum c^2 / k}{\sum \hat{y}^2 / (K-k-1)}, \text{ dla } k \text{ i } K-k-1 \text{ stopni swobody.}$$

/11-11/

Określenie wartości współczynników regresji w równaniach układu /11-6/ dokonano za pomocą statystyk, znanych jako mnożniki Gaussa, które są identyczne z elementami odwrotnej macierzy sumy kwadratów w tych zależnościach. Przytoczone poniżej równania ilustrują metodę obliczania w/w statystyk dla pięciu zmiennych niezależnych, występujących w równaniu /11-3/:

$$\begin{aligned} G_{11} \sum x_1^2 + G_{12} \sum x_1 x_2 + G_{13} \sum x_1 x_3 + G_{14} \sum x_1 x_4 + G_{15} \sum x_1 x_5 &= 1 \\ G_{11} \sum x_2 x_1 + G_{12} \sum x_2^2 + G_{13} \sum x_2 x_3 + G_{14} \sum x_2 x_4 + G_{15} \sum x_2 x_5 &= 0 \\ G_{11} \sum x_3 x_1 + G_{12} \sum x_3 x_2 + G_{13} \sum x_3^2 + G_{14} \sum x_3 x_4 + G_{15} \sum x_3 x_5 &= 0 \\ G_{11} \sum x_4 x_1 + G_{12} \sum x_4 x_2 + G_{13} \sum x_4 x_3 + G_{14} \sum x_4^2 + G_{15} \sum x_4 x_5 &= 0 \\ G_{11} \sum x_5 x_1 + G_{12} \sum x_5 x_2 + G_{13} \sum x_5 x_3 + G_{14} \sum x_5 x_4 + G_{15} \sum x_5^2 &= 0 \end{aligned}$$

/11-12/

$$\begin{aligned}
 G_{21} \Sigma' x_1^2 + G_{22} \Sigma' x_1 x_2 + G_{23} \Sigma' x_1 x_3 + G_{24} \Sigma' x_1 x_4 + G_{25} \Sigma' x_1 x_5 &= 0 \\
 G_{21} \Sigma' x_2 x_1 + G_{22} \Sigma' x_2^2 + G_{23} \Sigma' x_2 x_3 + G_{24} \Sigma' x_2 x_4 + G_{25} \Sigma' x_2 x_5 &= 1 \\
 G_{21} \Sigma' x_3 x_1 + G_{22} \Sigma' x_3 x_2 + G_{23} \Sigma' x_3^2 + G_{24} \Sigma' x_3 x_4 + G_{25} \Sigma' x_3 x_5 &= 0 \\
 G_{21} \Sigma' x_4 x_1 + G_{22} \Sigma' x_4 x_2 + G_{23} \Sigma' x_4 x_3 + G_{24} \Sigma' x_4^2 + G_{25} \Sigma' x_4 x_5 &= 0 \\
 G_{21} \Sigma' x_5 x_1 + G_{22} \Sigma' x_5 x_2 + G_{23} \Sigma' x_5 x_3 + G_{24} \Sigma' x_5 x_4 + G_{25} \Sigma' x_5^2 &= 0
 \end{aligned}$$

/11-13/

$$\begin{aligned}
 G_{31} \Sigma' x_1^2 + G_{32} \Sigma' x_1 x_2 + G_{33} \Sigma' x_1 x_3 + G_{34} \Sigma' x_1 x_4 + G_{35} \Sigma' x_1 x_5 &= 0 \\
 G_{31} \Sigma' x_2 x_1 + G_{32} \Sigma' x_2^2 + G_{33} \Sigma' x_2 x_3 + G_{34} \Sigma' x_2 x_4 + G_{35} \Sigma' x_2 x_5 &= 0 \\
 G_{31} \Sigma' x_3 x_1 + G_{32} \Sigma' x_3 x_2 + G_{33} \Sigma' x_3^2 + G_{34} \Sigma' x_3 x_4 + G_{35} \Sigma' x_3 x_5 &= 1 \\
 G_{31} \Sigma' x_4 x_1 + G_{32} \Sigma' x_4 x_2 + G_{33} \Sigma' x_4 x_3 + G_{34} \Sigma' x_4^2 + G_{35} \Sigma' x_4 x_5 &= 0 \\
 G_{31} \Sigma' x_5 x_1 + G_{32} \Sigma' x_5 x_2 + G_{33} \Sigma' x_5 x_3 + G_{34} \Sigma' x_5 x_4 + G_{35} \Sigma' x_5^2 &= 0
 \end{aligned}$$

/11-14/

$$\begin{aligned}
 G_{41} \Sigma' x_1^2 + G_{42} \Sigma' x_1 x_2 + G_{43} \Sigma' x_1 x_3 + G_{44} \Sigma' x_1 x_4 + G_{45} \Sigma' x_1 x_5 &= 0 \\
 G_{41} \Sigma' x_2 x_1 + G_{42} \Sigma' x_2^2 + G_{43} \Sigma' x_2 x_3 + G_{44} \Sigma' x_2 x_4 + G_{45} \Sigma' x_2 x_5 &= 0 \\
 G_{41} \Sigma' x_3 x_1 + G_{42} \Sigma' x_3 x_2 + G_{43} \Sigma' x_3^2 + G_{44} \Sigma' x_3 x_4 + G_{45} \Sigma' x_3 x_5 &= 0 \\
 G_{41} \Sigma' x_4 x_1 + G_{42} \Sigma' x_4 x_2 + G_{43} \Sigma' x_4 x_3 + G_{44} \Sigma' x_4^2 + G_{45} \Sigma' x_4 x_5 &= 1 \\
 G_{41} \Sigma' x_5 x_1 + G_{42} \Sigma' x_5 x_2 + G_{43} \Sigma' x_5 x_3 + G_{44} \Sigma' x_5 x_4 + G_{45} \Sigma' x_5^2 &= 0
 \end{aligned}$$

/11-15/

$$\begin{aligned}
 G_{51} \Sigma' x_1^2 + G_{52} \Sigma' x_1 x_2 + G_{53} \Sigma' x_1 x_3 + G_{54} \Sigma' x_1 x_4 + G_{55} \Sigma' x_1 x_5 &= 0 \\
 G_{51} \Sigma' x_2 x_1 + G_{52} \Sigma' x_2^2 + G_{53} \Sigma' x_2 x_3 + G_{54} \Sigma' x_2 x_4 + G_{55} \Sigma' x_2 x_5 &= 0 \\
 G_{51} \Sigma' x_3 x_1 + G_{52} \Sigma' x_3 x_2 + G_{53} \Sigma' x_3^2 + G_{54} \Sigma' x_3 x_4 + G_{55} \Sigma' x_3 x_5 &= 0 \\
 G_{51} \Sigma' x_4 x_1 + G_{52} \Sigma' x_4 x_2 + G_{53} \Sigma' x_4 x_3 + G_{54} \Sigma' x_4^2 + G_{55} \Sigma' x_4 x_5 &= 0 \\
 G_{51} \Sigma' x_5 x_1 + G_{52} \Sigma' x_5 x_2 + G_{53} \Sigma' x_5 x_3 + G_{54} \Sigma' x_5 x_4 + G_{55} \Sigma' x_5^2 &= 1
 \end{aligned}$$

/11-16/

Ze względu na symetrię przytoczonych układów równań /11-12/ do /11-16/ wartość G_{12} równa się G_{21} , $G_{13} = G_{31}$ itd. Powyższe układy równań można zapisać w postaci jednej macierzy:

	j =	1	2	3	4	5
$G_{1j} \sum x_1^2 + G_{1j} \sum x_1 x_2 + G_{1j} \sum x_1 x_3 + G_{1j} \sum x_1 x_4 + G_{1j} \sum x_1 x_5 =$		1	0	0	0	0
$G_{2j} \sum x_2 x_1 + G_{2j} \sum x_2^2 + G_{2j} \sum x_2 x_3 + G_{2j} \sum x_2 x_4 + G_{2j} \sum x_2 x_5 =$		0	1	0	0	0
$G_{3j} \sum x_3 x_1 + G_{3j} \sum x_3 x_2 + G_{3j} \sum x_3^2 + G_{3j} \sum x_3 x_4 + G_{3j} \sum x_3 x_5 =$		0	0	1	0	0
$G_{4j} \sum x_4 x_1 + G_{4j} \sum x_4 x_2 + G_{4j} \sum x_4 x_3 + G_{4j} \sum x_4^2 + G_{4j} \sum x_4 x_5 =$		0	0	0	1	0
$G_{5j} \sum x_5 x_1 + G_{5j} \sum x_5 x_2 + G_{5j} \sum x_5 x_3 + G_{5j} \sum x_5 x_4 + G_{5j} \sum x_5^2 =$		0	0	0	0	1

/11-17/

Macierz /11-17/ nie zawiera zmiennej zależnej. Po jej rozwiązaniu otrzymuje się współczynniki regresji cząstkowej w następującej postaci:

$$\begin{aligned}
 b_1. &= G_{11} \sum x_1 y + G_{12} \sum x_2 y + G_{13} \sum x_3 y + G_{14} \sum x_4 y + G_{15} \sum x_5 y \\
 b_2. &= G_{21} \sum x_1 y + G_{22} \sum x_2 y + G_{23} \sum x_3 y + G_{24} \sum x_4 y + G_{25} \sum x_5 y \\
 b_3. &= G_{31} \sum x_1 y + G_{32} \sum x_2 y + G_{33} \sum x_3 y + G_{34} \sum x_4 y + G_{35} \sum x_5 y \\
 b_4. &= G_{41} \sum x_1 y + G_{42} \sum x_2 y + G_{43} \sum x_3 y + G_{44} \sum x_4 y + G_{45} \sum x_5 y \\
 b_5. &= G_{51} \sum x_1 y + G_{52} \sum x_2 y + G_{53} \sum x_3 y + G_{54} \sum x_4 y + G_{55} \sum x_5 y
 \end{aligned}
 \quad /11-18$$

W celu wyznaczenia mnożników Gaussa, a następnie współczynników regresji wielokrotnej b_i i parametru b_0 równania wyjściowego /11-3/, a także oszacowanej wartości $\hat{y}$ dla pomierzonych wartości zmiennych, opracowano program w języku Fortran na maszynę cyfrową serii ODRA 1300. W programie wykorzystano podprogramy FSTANDREGRES i FKOREWIEL z biblioteki Centrum Obliczeniowego Politechniki

Wrocławskiej. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 11-1.

T a b e l a 11-1

Wyniki obliczeń współczynników regresji wielokrotnej

Lp.	Współczynnik regresji $b_i/x_i/$	Wartość liczbowa współczynnika regresji	Wartość liczbowa standaryzowanego współczynnika regresji	Poziom istotności współczynnika regresji wielokrotnej		
				Wartość testu T		Stwierdzamy poziom ufności
				tablicowa	obliczona	
1	$b_1 /x_1/$	0,8657	0,6642	2,617	75,902	0,01
2	$b_2 /x_2/$	0,4544	0,4525	2,617	51,713	0,01
3	$b_3 /x_3/$	-0,1802	-0,1433	2,617	13,165	0,01
4	$b_4 /x_4/$	0,1758	0,0589	2,617	5,409	0,01
5	$b_5 /x_5/$	0,7356	0,5644	2,617	64,498	0,01

Parametr b_0 do wzoru /11-3/ przyjmuje wartość: $b_0 = 1,4526$, natomiast parametr B_0 do wzoru /11-1/ - $B_0 = 28,351$.

Ogólny współczynnik korelacji $R = 0,9891$

Suma kwadratów odchyleń od średniej logarytmicznej zniesionych przez regresję /11-7/ $\sum \hat{e}^2 = 18,576$

Resztkowa suma kwadratów odchyleń /11-8/ $\sum \hat{y}^2 = 0,4099$

Wariancja oszacowania /11-9/ $s^2 / \hat{y} / = 0,00145$

Odchylenie standardowe /11-10/ $s / \hat{y} / = 0,0381$

Istotność regresji wielokrotnej /11-11/ $F = 2555,54$

Korelacja została stwierdzona na poziomie ufności 0,01.

Wprowadzając zestawione w tabeli 11-1 wartości liczbowe współczynników do wzoru /11-1/ otrzymujemy wzór na sprawdzoną wydajność ujęcia promienistego :

$$\frac{Q_u}{k_f r_o^2} = 28,351 n \quad 0,866 \left(\frac{1_f}{r_o} \right) 0,454 \left(\frac{z}{r_o} \right) -0,180 \left(\frac{H_w}{r_o} \right) 0,176 \left(\frac{s_p}{r_o} \right) 0,736 \quad /11-19/$$

Po przekształceniu wyrażenia /11-19/ otrzymujemy formułę, za pomocą której można obliczać wydajność infiltracyjnego ujęcia promienistego o zbieraczach umieszczonych symetrycznie pod dnem obszaru infiltracji:

$$Q_u = 28,351 k_f r_o^{0,814} n^{0,866} l_f^{0,454} z^{-0,180} H_w^{0,176} s_p^{0,736}$$

/11-20/

Dokładność wyprowadzonej formuły /11-20/ najlepiej ilustruje wykres na rysunku 11-1. Na wykresie tym naniesiono wyniki pomiarów wydajności w postaci punktów i prostą o równaniu /11-19/. Analiza zamieszczonego wykresu wskazuje, że wyniki uzyskane z pomiarów w znakomitej większości mieszczą się w przedziale dokładności $\pm 10\%$. Dokładność ta może być osiągnięta przy praktycznym stosowaniu formuły /11-20/, pod warunkiem nie przekroczenia granic stosowalności, wynikających z zakresu przeprowadzonych badań, tzn.:

$$4 \leq n \leq 12$$

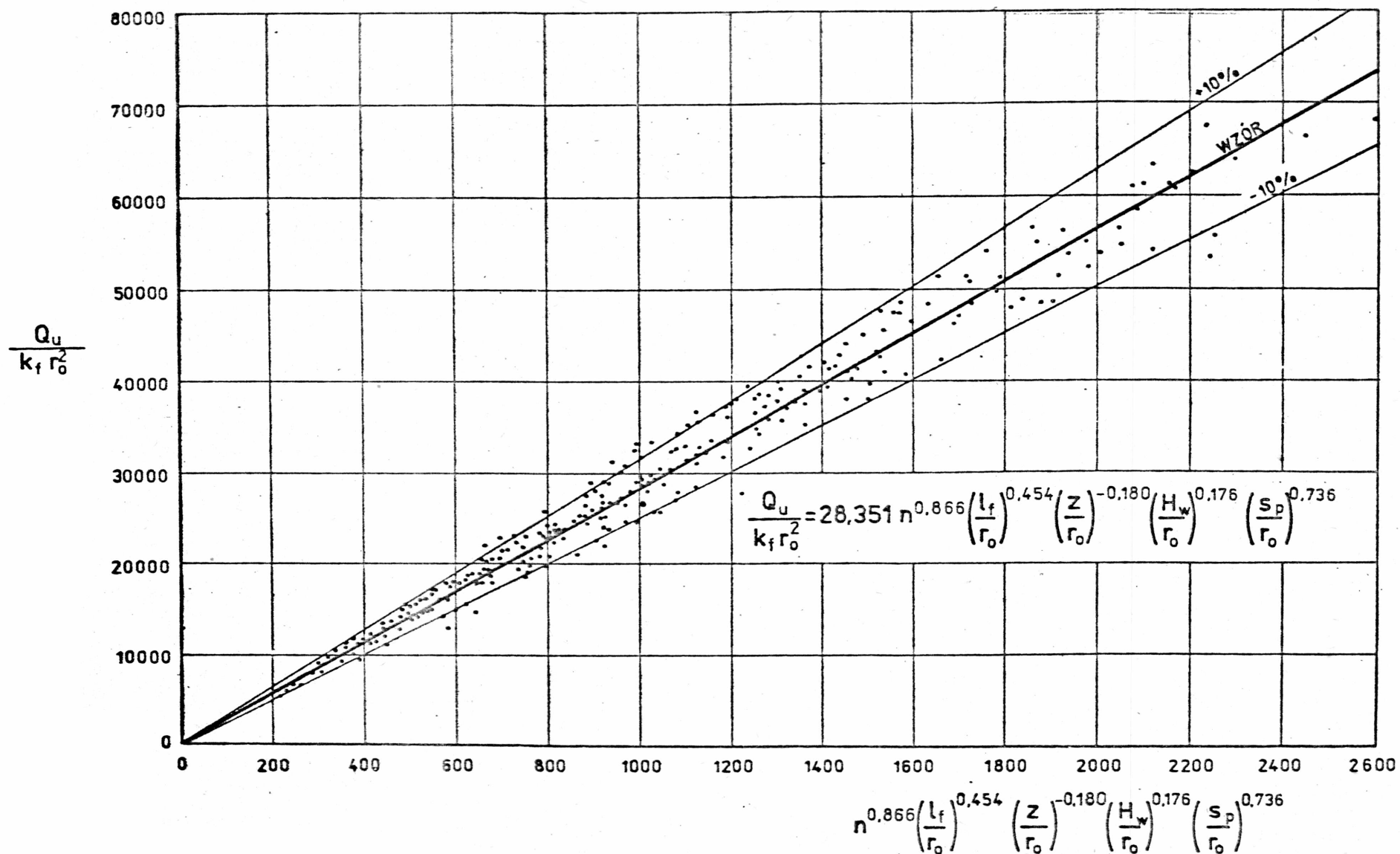
$$101,01 \leq l_f/r_o \leq 505,05$$

$$24,24 \leq z/r_o \leq 96,97$$

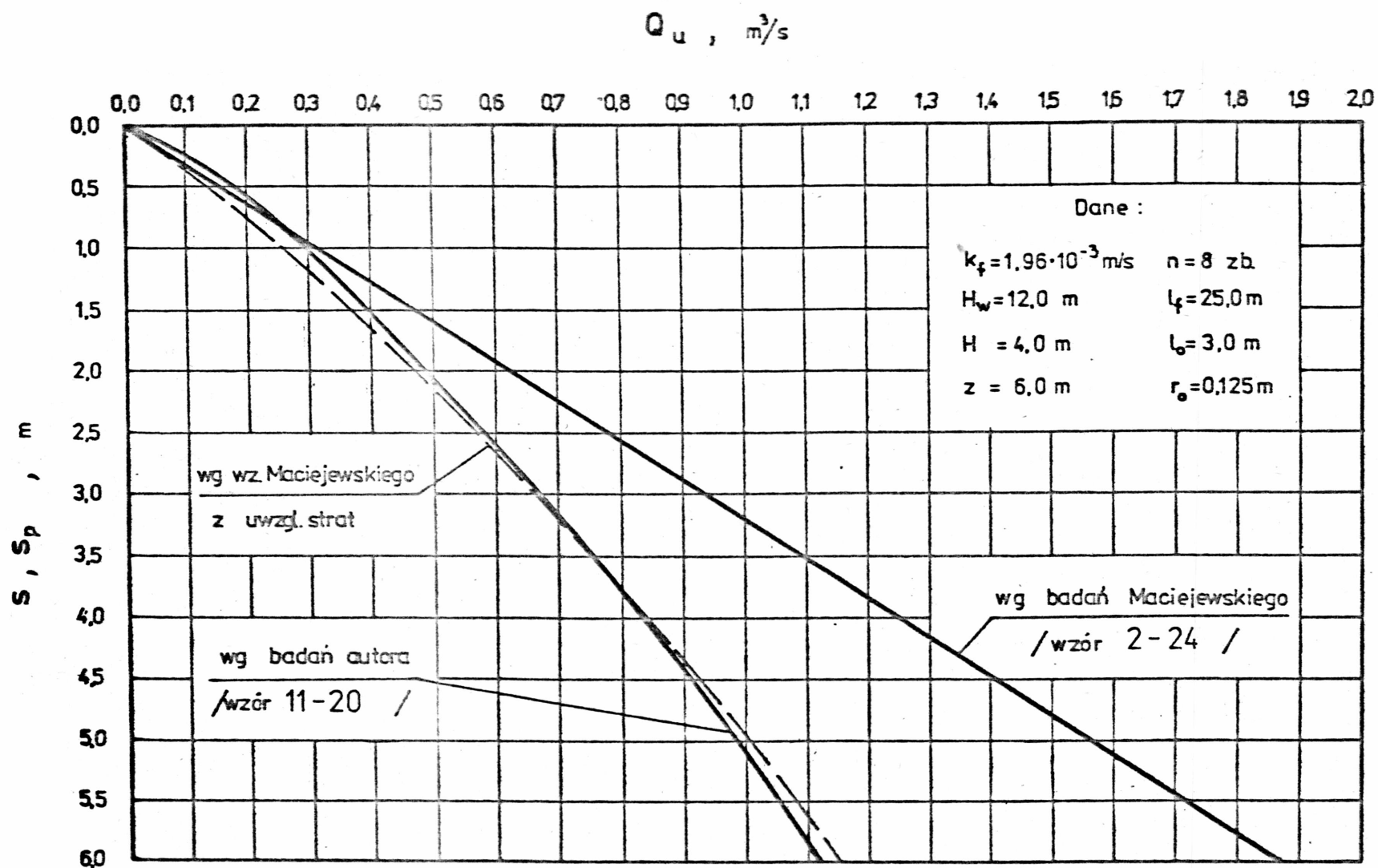
$$72,73 \leq H_w/r_o \leq 121,21$$

$$16,16 \leq s_p/r_o \leq 48,48$$

W celu porównania rezultatów badań wydajności infiltracyjnego ujęcia promienistego, osiągniętych na drodze modelowania fizycznego i elektrycznego, dokonano obliczeń wydajności ujęcia ze wzoru /11-20/ oraz ze wzoru /2-24/ Maciejewskiego /p.2.1.3/. Porównania dokonano dla przeciętnych parametrów konstrukcyjnych i hydrogeologicznych ujęć promienistych, wybudowanych w Polsce [61] przy zachowaniu warunków zapewniających w miarę równomierny wzdłuż długości zbieraczy napływ wody $l_f=25m$ /. Wyniki porównania zamieszczono na rysunku 11-2.



Rys. 11-1 Porównanie wyników pomiarów ze wzorem empirycznym.



Rys. 11-2 Porównanie rezultatów badań osiągniętych na drodze modelowania fizycznego i elektrycznego

Pominięcie strat energetycznych w dotychczas stosowanych modelach matematycznych infiltracyjnych ujęć promienistych prowadzi do znacznego zawyżenia obliczonej ich wydajności, sięgającego w warunkach jak w przykładzie średnio 40%. Formuła Maciejewskiego /2-24/ uzupełniona o człony uwzględniające straty hydrauliczne w zbieraczach [23] daje wyniki zbieżne z rezultatami badań osiągniętych na modelu fizycznym. Należy oczekiwać, iż wykazane tutaj różnice będą się zwiększały wraz ze wzrostem długości czynnej rur filtrowych - głównie na skutek nierównomierności napływu wody do zbieraczy, czego również nie uwzględniają dotychczasowe wzory.

12. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W przedłożonej rozprawie zbadano na przestrzennym modelu fizycznym wpływ długości, liczby i zagłębienia zbieraczy na wydajność ujęcia promienistego w warunkach infiltracji dennej. Na podstawie uzyskanych wyników wyprowadzono formułę empiryczną /11-20/, umożliwiającą obliczanie wydajności takich ujęć.

- Do zasadniczych rezultatów naukowych rozprawy zaliczyć należy:
- opracowanie metodologii badań ujęć promienistych na modelach fizycznych i interpretacji wyników pomiarów,
 - wykazanie na drodze eksperymentalnej znacznej nierównomierności napływu wody do zbieraczy wzdłuż ich długości, a także wpływu tej nierównomierności na wzajemne oddziaływanie zbieraczy,
 - uogólnienie wyników badań w postaci formuły empirycznej, na podstawie której można obliczać wydajność infiltracyjnych ujęć promienistych,
 - wykazanie wpływu sposobu rozmieszczenia otworów perforacji w rurach filtrowych na wartość współczynnika oporów liniowych rur perforowanych.

Przedłożona rozprawa skłania do następujących wniosków i uwag:

- 1/ Dotychczas opublikowane wzory i formuły empiryczne do obliczania wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych, w przeciwieństwie do przedstawionej w rozprawie, wyprowadzone /bądź ustawione/ zostały przy założeniu równomiernego dopływu wody do poszczególnych zbieraczy i przy pominięciu strat energetycznych powstających w zbieraczach w czasie przepływu wody.
- 2/ Przedstawiona formuła /11-20/ umożliwia dokonanie poprawnej, z fizycznego punktu widzenia, oceny wpływu wymienionych na wstępie parametrów na wydajność ujęcia.
- 3/ W warunkach infiltracyjnego zasilania ujęcia promienistego najistotniejszy wpływ na wydajność ma liczba zbieraczy. Specyfika tego zasilania powoduje, iż wzajemne oddziaływanie zbieraczy jest tutaj stosunkowo małe, a wydajność ujęcia szybko rośnie wraz ze wzrostem ich liczby. Wniosek ten odnosi się do ujęć, w których liczba zbieraczy nie przekracza 12.
- 4/ Istotny wpływ na wydajność ujęcia ma również długość zbieraczy, która w powiązaniu ze średnicą rur filtrowych i wodoprzepuszczalnością warstwy wodonośnej determinuje rozkład dopływu wody do zbieraczy. Stąd wydłużanie zbieraczy poza pewną granicę nie przynosi w efekcie istotnego wzrostu wydajności ujęcia.
- 5/ Zagłębienie zbieraczy jako parametr konstrukcyjny ujęcia, z hydraulicznego punktu widzenia, ma niewielkie znaczenie. Istotniejszym wydaje się być wpływ tego zagłębienia na jakość ujmowanej wody - parametr ten winien być więc przyjmowany wyłącznie z punktu widzenia jakości uzyskiwanej wody.
- 6/ Przyjęty w rozprawie model działania infiltracyjnych ujęć promienistych odnosi się do początkowego okresu ich eksploatacji.

Zjawisko kolmatacji dna źródła infiltracji i proces "starzenia" się zbieraczy, towarzyszące wieloletniej eksploatacji omawianych ujęć, mogą wpływać na zmianę tego modelu, a w szczególności na zmniejszenie się wydajności ujęcia.

Przedłożona rozprawa stanowi przyczynek do zagadnienia hydraulicznego obliczania ujęć promienistych w warunkach ciągłości strumienia wody infiltrującej w głąb warstwy wodonośnej. Pełniejsze rozwiązanie tego problemu wymaga znacznego rozszerzenia zakresu badań modelowych. Konieczne byłoby uwzględnienie w dalszych badaniach ziół o różnych wartościach współczynnika filtracji i zbieraczy o różnych średnicach, a także wyjaśnienie wpływu kolmatacji dna źródła infiltracji i warstwy wodonośnej na wydajność ujęcia oraz warunki hydrauliczne jego działania.

LITERATURA

1. Abramov S.K. : Podziemnyje drenaży v promyšlennom gorodskom stroitelstvie. Izd. Lit. po Stroit., Moskva 1967.
2. Alštul A.D. : Gidravličeskije soprotivlenija. Izd. Nedra, Moskva 1970.
3. Anatolievskij P.A., Razumov G.A.: Gorizontalnyje vodozabornyje skvažiny. Izd. Nedra, Moskva 1970.
4. Aravin V.J., Numerov S.N.: Filtracjonnyje rasčioty gidrotechničeskich soorужеnij. Stroizdat, Moskva 1948.
5. Archambault C., Deremaux G., Molinan P. : Les puits a drains reynnants. Techn. Sc. Municip., nr 1, 1974.
6. Bieske E.: Horizontalfilterbrunnen, ihre Herstellungsverfahren und Bauformen. GWF, nr 34, 1959.
7. Borievskij L.V., Jeremokin N.V.: Rasčet kolcovogo vodozabora s osadom razgruski podziemnych vod vo vnutriennoj časti. Vodosn. i Sanit. Tiechn. nr 5, 1969.
8. Czetwertyński E. : Hydraulika i hydromechanika. PWN, Warszawa 1958.
9. Čul'kov N.A. : Vzaimodiejstvie lučevych gorizontalnych filtrov v šachtnom kolodce, Vodosn. i Sanit. Tiechn. nr 6, 1960.
10. Čul'kov N.A.: Zastosowanie promienistych filtrów poziomych w studniach kopanych. Gidrotechnika i Melioracja nr 12, 1960.
11. Gabryszewski T.: Zasady ujmowania wód podziemnych za pomocą studni z filtrami poziomymi. Mat. na KNT PZITS, Poznań 1965.
12. Gębura J.: Projektowanie ujęć z filtrami poziomymi. Mat. na KNT PZITS, Warszawa 1970.
13. Gębura J., Kamiński A.: Studnie z drenami poziomymi, nowe ujęcie wodociągowe dla dużego miasta. GWTS nr 2, 1972.
14. Glinicki Z., Roman M.: O wpływie ruchu wody w poziomym drenie umieszczonym pod dnem rzeki na wydajność tego drenu. GWTS nr 6,7, 1959.

15. Glinicki Z., Roman M.: O obliczaniu poziomych ujęć wody spod dna rzeki. GWTS nr 6, 1960.
16. Hausbrandt S.: Rachunek wyrównawczy i obliczenia geodezyjne. PFWK, Warszawa 1970/71.
17. Hänsel H.: Podstawy rachunku błędów. WNT, Warszawa 1968.
18. Jasiński B., Olech A.: Doświadczenia eksploatacji studni z poziomymi filtrami w wodociągu wrocławskim. Mat. na KNT PZITS, Warszawa 1970.
19. Kordas B.: Wybrane zagadnienia teorii ujęć wód podziemnych. Księga Jubil. Politechniki Krakowskiej, zeszyt nr 1, Kraków 1966.
20. Kordas B.: Porównanie wydajności studzien o drenach promienistych i zespołu studzien pionowych. Gospodarka Wodna nr 11, 1962.
21. Kordas B., Maciejewski M.: Zastosowanie analogii elektrohydrodynamicznej do badania wydajności studni z drenami promienistymi założonymi pod dnem rzeki lub zbiornika. Gospodarka Wodna nr 2, 1975.
22. Kotowski A., Mielcarzewicz E.W.: Analiza fizykalna wpływu niektórych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na wydajność infiltracyjnych ujęć promienistych. Mat. na KNT PZITS, Poznań 1978.
23. Kotowski A., Oficjalska H., Siwoń Z.: Obliczanie charakterystyk wydajności infiltracyjnych ujęć promienistych przy zastosowaniu EMC. Mat. na KNT PZITS, Poznań 1978.
24. Lass G.: Berechnungsverfahren für Horizontalfilterbrunnen. Wasser und Boden nr 2, 1977.
25. Maciejewski M.: Określenie charakterystyk hydraulicznych studni

- o drenach promienistych założonej pod dnem rzeki lub zbiornika. Praca doktorska, Kraków 1972.
26. Maksimov M.V. i inni: Spravočnoje rukovodstvo gidrogeologa. Izd. Nedra, Moskva 1967.
 27. Mielcarzewicz E.W.: Analiza czynników wpływających na wydajność ujęcia promienistego. Mat. na KNT PZITS, Warszawa 1970.
 28. Mielcarzewicz E.W.: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Arkady, Warszawa 1977.
 29. Mielcarzewicz E.W., Siwoń Z.: Wstępne badania doświadczalnej studni z poziomymi zbieraczami. Zesz. Nauk. Polit. Wrocławskiej nr 113, Wrocław 1965.
 30. Milojewiś M.: Radial collector wells adjacent to the river bank. Journal of the Hydraulics div. nr 6, 1963.
 31. Nahrgang G., Falcke F.K.: Modellversuche über die Strömungsvorgänge an Horizontalbrunnen. GWF nr 4, 1954.
 32. Nemecek E.P.: Horizontalfilterbrunnen zur Grundwassergewinnung. Wasserwirtschaft - Wassertechnik nr 3, 1961.
 33. Niedzielski H., Wieczysty A.: Rezultaty badań eksperymentalnych studni z drenami poziomymi. Gospodarka Wodna nr 11, 1962.
 34. Niedzielski H., Wieczysty A.: Rezultaty badań eksploatacji i wykonawstwa studni z drenami poziomymi. Gospodarka Wodna nr 4, 1965.
 35. Ostrowski S.: Obliczanie ilości wpływu z filtrów poziomych wykonanych pod dnem rzeki. GWTS nr 8, 1957.
 36. Öllös G.: A czaposkutak hidraulikai kordešei. Vizügyi közlemények nr 2, 1962.
 37. Polubarinova-Kočina P.J.: Tiera dviženija gruntovyh wod. Gos.Izd. Tiechn.-Tieřiet. Lit., Moskva 1952.

38. Połubarinova-Kočina P.J.: Zadacza o sistemie gorizontalny ch skvažin. Arch.Mech. Stosow. nr 3, 1955.
39. Praca zbiorowa: Infiltracyjne ujęcia wody. Zesz.Nauk. Politechniki Krakowskiej nr 1, Kraków 1973.
40. Pustovoit B.V.: Mechanika dviženija židkostiej v trubach. Izd. Nedra, Leningrad 1971.
41. Razumov G.A.: Lučievyye vodozabory s gorizontalnymi filtrami pod dnom rieki. Vodosn. i Sanit. Tiechn. nr 12, 1960.
42. Razumov G.A.: Lučievyye vodozabory dla vodosnabženija gorodov i promyšlennosti. Izd. MKOH RSFSR, Moskva 1962.
43. Razumov G.A.: Gorizontalnyje vodozabornyje skvažiny. Izd. Nedra, Moskva 1970.
44. Rückert H.: Abmessung des Stützfilterquerschnittes bei HFB. Wasserwirtschaft - Wassertechnik nr 2, 1975.
45. Rückert H.: Neues Bemessungsverfahren für Horizontalfilterbrunnen. Wasserwirtschaft - Wassertechnik nr 7, 1979.
46. Sedov L.S.: Analiza wymiarowa i teoria podobieństwa w mechanice. WNT, Warszawa 1968.
47. Stefańczyk Z.: Ciśnienie w czynnych drenach ujęcia wody wykonanego pod dnem rzeki. Gospodarka Wodna nr 6, 1964.
48. Stefańczyk Z.: Wzory do obliczania wydatku indywidualnie pracującego drenu ułożonego pod dnem rzeki. GWTS nr 11, 1964.
49. Stefańczyk Z.: Czynniki rzutujące na odchylenie od projektowanych wydajności ujęć spod dna rzeki. Mat. na KNT PZITS nr 101, Warszawa 1970.
50. Stefański W.: Badania hydrauliczne poddennych studni promienistych z próbą optymalizacji parametrów ujęcia. Praca doktorska, Warszawa 1975.

51. Stefański W., Mitosek M.: Obliczanie wydajności poddennych studni z uwzględnieniem oporów przepływu w drenach. Mat. na KNT PZITS, Częstochowa 1979.
52. Strzałkowski A., Sliżyński A.: Matematyczne metody opracowania wyników doświadczeń. PWN, Warszawa 1969.
53. Siwoń Z.: Badania modelowe warunków przepływu wody w perforowanych filtrach ujęć promienistych. Praca doktorska, Wrocław 1971.
54. Siwoń Z.: O oporach przepływu cieczy w rurach perforowanych. Archiwum Hydrotechniki nr 4, 1974.
55. Siwoń Z.: Burzliwe przepływy cieczy w rurach perforowanych w warunkach nieciągłej zmiany masy strumienia. Prace Nauk. Polit. Wrocławskiej nr 33. Monografie nr 10, Wrocław 1976.
56. Siwoń Z.: Hydraulika rur z przepuszczalnymi ściankami. Archiwum Hydrotechniki nr 4, 1977.
57. Troskolewski A.T.: Hydromechanika. WNT, Warszawa 1954 i 1969.
58. Varga J.: Wiadomości o studniach z poziomymi zbieraczami i galeriach w korycie rzeki oraz nabyte doświadczenia. Vizügyi közlemények nr 1, 1958.
59. Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1973.
60. Walden H., Stasiak J.: Mechanika cieczy i gazów w inżynierii sanitarnej. Arkady, Warszawa 1971.
61. Walden H., Wyszowski K. i inni: Optymalizacja działania studni promienistych wraz z wytycznymi projektowania i eksploatacji w oparciu o analizę pracy istniejących ujęć. Inst. Zaop. w Wodę i Bud. Wodn. Polit. Warszawskiej, Warszawa 1974 /maszynopis/.

62. Wieczysty A.: Osiągnięcia w dziedzinie budowy infiltracyjnych ujęć wody. GWIS nr 6, 1969.
63. Wieczysty A.: Hydrogeologia inżynierska. PWN, Warszawa-Kraków 1970.
64. Wieczysty A., Flisowski J.: Zasady obliczeń hydrogeologicznych ujęć wód podziemnych. Zesz. nr 2. Wytyczne obliczeń wydatku pojedynczych ujęć wód podziemnych. Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1971.
65. Wyszkowski K., Kalisiewicz J.: Analiza techniczno-ekonomiczna budowy poddennych studni promienistych wraz z próbą optymalizacji kosztów. Mat. na KNT PZITS, Częstochowa 1979.
66. Zieliński R.: Tablice statystyczne. PWN, Warszawa 1972.
67. Zierep J.: Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów. PWN, Warszawa 1978.

SPIS RYSUNKÓW

- Rys. 2-1 Schemat ujęcia promienistego w warunkach infiltracji
- Rys. 5-1 Schemat stanowiska doświadczalnego
- Rys. 5-2 Schemat rozmieszczenia zbieraczy w modelu
- Rys. 5-3 Widok ogólny stanowiska doświadczalnego
- Rys. 5-4 Wnętrze zbiornika głównego
- Rys. 5-5 Tablice piezometryczne
- Rys. 6-1 Schemat stanowiska do badań współczynnika filtracji gruntu
- Rys. 6-2 Modele do obliczania współczynnika k_f na podstawie pompowań próbnych
- Rys. 6-3 Schemat stanowiska do badań współczynnika liniowych oporów tarcia zbieraczy
- Rys. 6-4 Schematy sposobu perforacji badanych rur
- Rys. 6-5 Program pomiarów
- Rys. 7-1 Wykres uziarnienia złoża modelu
- Rys. 7-2 Zależność współczynnika λ_o , λ_{pr} , λ i λ_p od liczby Re wg przeprowadzonych badań
- Rys. 7-3 Zależność współczynnika λ_o , λ_p i λ_{pr} od liczby Re w zakresie przepływu laminarnego i przejściowego, dla $\varphi_o = 0,199$
- Rys. 7-4 Zależność λ_{ot} / Re , φ_o dla przepływu laminarnego seria 1, 2 i 3 pomiarów
- Rys. 7-5 Zależność λ / Re , λ_t / Re i λ_p / Re w zakresie przepływu burzliwego dla 1, 2 i 3 serii pomiarów
- Rys. 7-6 Zależność λ_p / Re , φ_o dla różnych sposobów rozmieszczenia otworów perforacji

- Rys. 9-1 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / n /$ dla $H_w/r_o = 72,73$
- Rys. 9-2 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / n /$ dla $H_w/r_o = 96,97$
- Rys. 9-3 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / n /$ dla $H_w/r_o = 121,21$
- Rys. 9-4 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / l_f/r_o /$ dla $H_w/r_o = 72,73$
- Rys. 9-5 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / l_f/r_o /$ dla $H_w/r_o = 96,97$
- Rys. 9-6 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / l_f/r_o /$ dla $H_w/r_o = 121,21$
- Rys. 9-7 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / z/r_o /$ dla $H_w/r_o = 72,73$ i $121,21$
- Rys. 9-8 Zależność $Q_u/k_f r_o^2 = F / z/r_o /$ dla $H_w/r_o = 96,97$
- Rys. 9-9 Zmiany ciśnień piezometrycznych wzdłuż długości zbieracza dla $n = 1$
- Rys.9-10 Zmiany ciśnień piezometrycznych wzdłuż długości zbieracza $n = 2$
- Rys.9-11 Zmiany ciśnień piezometrycznych wzdłuż długości zbieracza dla $n = 3$
- Rys.9-12 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1$, $l_f = 1500$ mm
- Rys.9-13 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1$, $l_f = 2500$ mm
- Rys. 9-14 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 1$, $l_f = 3600$ mm
- Rys.9-15 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 2$, $l_f = 1500$ mm
- Rys.9-16 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 2$, $l_f = 2500$ mm
- Rys.9-17 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 2$, $l_f = 3600$ mm
- Rys.9-18 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 3$, $l_f = 1500$ mm

- Rys. 9-19 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 3$, $l_f = 2500$ mm
- Rys. 9-20 Układ linii ekwipotencjalnych w złożu filtracyjnym dla $n = 3$, $l_f = 3600$ mm
- Rys. 10-1 Zależność jednostkowego natężenia dopływu wody q_{10} od różnicy ciśnień Δh_f
- Rys. 11-1 Porównanie wyników pomiarów ze wzorem empirycznym
- Rys. 11-2 Porównanie rezultatów badań osiągniętych na drodze modelowania fizycznego i elektrycznego

SPIS TABEL

Tab. 4-1	Wymiary niektórych wielkości układu LT
Tab. 5-1	Zakres zmian parametrów modelowego ujęcia wody
Tab. 6-1	Notatnik pomiarowy badań - tablica piezometrów nr 1
Tab. 6-2	Notatnik pomiarowy badań - tablica piezometrów nr 2
Tab. 7-1	Zestawienie wyników badań składu chemicznego piasku
Tab. 7-2	Zestawienie wyników badań bakteriologicznych piasku
Tab. 7-3	Cechy fizyczne złoża modelowego
Tab. 7-4	Zestawienie wyników analiz sitowych gruntu
Tab. 7-5	Wartości współczynnika filtracji złoża modelowego obliczone na podstawie formuł empirycznych
Tab. 7-6	Wyniki pomiarów współczynnika filtracji za pomocą aparatu ZWK II
Tab. 7-7	Wyniki pomiarów współczynnika filtracji przy użyciu permeamtru wielocylinrowego
Tab. 7-8	Wyniki pomiarów współczynnika filtracji za pomocą rurki Kamieńskiego
Tab. 7-9	Wyniki pomiarów i obliczeń współczynnika filtracji - pompowania próbne na modelu
Tab. 7-10	Wartości współczynnika k_f złoża filtracyjnego wyznaczone różnymi metodami
Tab. 8-1	Maksymalne błędy względne wyznaczenia współczynnika filtracji
Tab. 8-2	Maksymalne błędy względne wyznaczenia współczynnika liniowych oporów zbieraczy modelowego ujęcia wody
Tab. 9-1	Zestawienie wyników pomiarów wydajności q_{Mt} pojedynczego zbieracza ujęcia promienistego (dm^3/h)

- Tab. 9-2 Zestawienie wyników pomiarów wydajności Q_{um283} ujęcia promienistego ($m^3s \cdot 10^{-4}$)
- Tab. 9-3 Zestawienie wyników obliczeń sprowadzonej wydajności ujęcia ($/Q_u/k_{fr0}^2 / \cdot 100$)
- Tab. 10-1 Wyniki badań nierównomierności napływu wody do zbieraczy przy $n = 4$
- Tab. 10-2 Wyniki badań nierównomierności napływu wody do zbieraczy przy $n = 8$
- Tab. 10-3 Wyniki badań nierównomierności napływu wody do zbieraczy przy $n = 12$
- Tab. 10-4 Wyniki badań współczynnika α wzajemnego oddziaływania zbieraczy
- Tab. 10-5 Zestawienie wyników obliczeń V_{fmax} i Re_{max}
- Tab. 10-6 Obliczanie strat hydraulicznych w zbieraczach ujęcia promienistego - tabulogram wyników
- Tab. 11-1 Wyniki obliczeń współczynników regresji wielokrotnej

Wykaz odbiorców:

1. Promotor	- 1 egz.
2. Recenzenci	- 2 egz.
3. Biblioteka Główna i OINT P.Wr.	- 1 egz.
4. Biblioteka I-15	- 1 egz.
5. Autor	- 2 egz.

Razem: 7 egz.

		1 2 3 4 5 6 7 8	9
	* N *	NN P V T T B N	1 0 0 6
	Nr. dziedz. nr	Zakres dz. nr	Nr. tematu.
	0 6 7 6	0 7 8 0	I 1 5 0 S 8 0 9 V V 0 1
	Nr. albumu.	Nr. archiwalny	
3 1 0 4 5 3		i 1 5 P - 0 7 1 8 0 *	
Symbol UKB. 628.11	Zródka wody.Ujęcia.	80:Inst.Inż. Ochr.Środow. PWr MNSzWiT	pol.

Opis bibliograficzny.

Kotowski Andrzej

Badania,modelowe wpływu wybranych paramet-
trów konstrukcyjnych infiltracyjnych ujęć
promienistych na ich wydajność.

Raporty Inst.Inż.Ochr.Środow.PWr 1980
ser. PRE nr 71

166 s. 10 rys. 26 tab. 30 wyk. bibliogr.
67 poz. / maszyn.powiel./

Rozprawa doktorska

Politechnika Wrocławska Instytut Inżynierii
Ochrony Środowiska, Wrocław

Promotor : prof.dr hab.inż. Edward Mielca-
rzewicz

166, 7

Charakter pracy: podstawowa
Materiały odpłatne: B

Rozpowszechnienie: -

Analiza dokumentacyjna

◀D W dotychczasowych opracowaniach dotyczących problemu dopływu wody do ujęcia promienistego pomijano wielkość strat energetycznych, powstających w czasie przepływu wody wewnątrz zbieraczy i związaną z tym nierównomierność dopływu wody do zbieraczy na ich długości. Stanowiło to znaczne uproszczenie modelu, prowadzące do przeceniania obliczanej wydajności ujęć promienistych. W pracy zbadano, na przestrzennym modelu fizycznym, jakościowy i ilościowy wpływ długości, liczby i zagłębienie zbieraczy na wydajność ujęcia promienistego w warunkach infiltracji dennej. Na podstawie uzyskanych wyników wprowadzono formułę empiryczną umożliwiającą obliczanie wydajności takich ujęć.

Imię i Nazwisko autora analizy

Andrzej Kotowski

Słowa kluczowe

◀S wodociągi, ujęcia wody, infiltracja.

**0480*00* 030069

◀A 068561 *B _____ *C _____ *D _____

*E _____ *F _____ *G _____ *H _____

Tytko-PRL WEB	CINTE	APW	Podpis red.	Podpis asyst. d/s badań	Potwierdzenie przyjęcia poprawki	Potwierdzenie przyjęcia karty w Oddziale Doku- mentacji
NIE	TAK	TAK				
Wpisać TAK lub NIE						