

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Tomasza Klinke

**pt. „Analiza przepływu powietrza wentylacyjnego
w tunelach metra”**

**WARSZAWA
1980**



B. 17 770

P O L I T E C H N I K A W A R S Z A W S K A

Wydział Inżynierii Sanitarnej i Wodnej

Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji

R O Z P R A W A D O K T O R S K A

mgr. inż. Tomasza Klinke

pt. " Analiza przepływu powietrza wentylacyjnego
w tunelach metra "

P r o m o t o r

doc. dr inż. Jerzy Makowiecki

Warszawa

1980



126-2-80-D

Panu Promotorowi

doc. dr.inż. Jerzemu Makowieckiemu

za opiekę i współpracę w czasie powstawania
niniejszej rozprawy

jak również Kolegom z Instytutu Ogrzewnictwa
i Wentylacji za pomoc w realizacji części ekspe-
rymentalnej i obliczeniowej -

składam serdeczne podziękowania

S P I S T R E Ś C I

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE	8
2. CEL I ZAKRES PRACY	13
3. PRZEGLĄD STANU BADAŃ I ROZWOJU DZIEDZINY WENTYLACJI I AERODYNAMIKI W OBIEKTACH KOLEI PODZIEMNYCH	14
4. ROZKŁAD CIŚNIENIA WZDŁUŻ TUNELU PODCZAS RUCHU POCIĄGU	27
4.1. Opis fizyczny zjawiska	27
4.2. Model teoretyczny	30
5. FIZYKALNE MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW POWIETRZA W TUNELACH METRA	47
5.1. Ogólne zasady fizykalnego modelowania	48
5.2. Kryteria podobieństwa dla modelowania procesów przepływu powietrza w tunelach metra	49
5.3. Skale modelowe	53
5.4. Opis modelu fragmentu metra oraz stanowiska badawczego	54
5.5. Pomiar współczynnika tarcia λ dla tuneli modelu metra	59
5.5.1. Metodyka pomiarów	59
5.5.2. Wyniki pomiarów	61
5.5.3. Analiza dokładności pomiarów	64
5.5.4. Analiza statystyczna doświadczalnej weryfikacji funkcji $\lambda = f(Re)$	67
5.6. Pomiar współczynnika oporu czołowego modelu pociągu	68

5.6.1. Uwagi ogólne	68
5.6.2. Metodyka pomiarów	71
5.6.3. Wyniki pomiarów	73
5.6.4. Analiza dokładności pomiarów	77
5.6.5. Ocena zgodności funkcji $c_x = f(Re)$ z danymi doświadczalnymi	79
5.7. Pomiar ciśnienia statycznego w tunelu podczas ruchu pociągu	80
5.7.1. Metodyka pomiarów	80
5.7.2. Wyniki pomiarów	82
5.7.3. Analiza dokładności pomiarów	86
5.7.4. Ocena zgodności funkcji opisującej rozkład ciśnienia statycznego w tunelu z danymi doświadczalnymi	87
6. WNIOSKI	88
WYKAZ PIŚMIENNICTWA	93

ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

a_p	- przyspieszenie powietrza poruszającego się w tunelu	m/s^2
a_s	- przyspieszenie powietrza poruszającego się w szczelinie pomiędzy pociągiem a tunelem	m/s^2
a_w	- przyspieszenie pociągu	m/s^2
α_x	- współczynnik oporu czołowego	-
α_{x0}	- współczynnik oporu ciśnieniowego	-
α_{xt}	- współczynnik oporu tarcia	-
D_t	- średnica tunelu	m
D_w	- średnica wagonu	m
Eu	- liczba Eulera	-
Fr	- liczba Froude'a	-
F_t	- pole powierzchni przekroju poprzecznego tunelu	m^2
F_w	- pole powierzchni przekroju poprzecznego pociągu	m^2
g	- przyspieszenie ziemskie	m/s^2
L	- długość	m
L_1	- długość tunelu przed pociągiem	m
L_2	- długość tunelu za pociągiem	m
L_t	- długość tunelu	m
L_w	- długość pociągu	m
l	- odległość pomiędzy przekrojami poprzecznymi tunelu	m
N	- liczba Newtona	-
p	- ciśnienie statyczne	Pa
P_x	- składowa oporu	N

R	- siła	N
R	- współczynnik korelacji krzywoliniowej	-
R	- rozstęp	Pa
Re	- liczba Reynoldsa	-
Re'	- liczba Reynoldsa obliczona przy uwzględnieniu wymiaru charakterystycznego pociągu	-
R_t	- promień tunelu	m
R_w	- promień wagonu	m
r	- empiryczny współczynnik korelacji	-
r	- promień elementarnej warstwy	m
S	- skala modelowa	-
S	- pole przekroju poprzecznego ciała	m ²
s	- odchylenie standardowe	-
u_∞	- prędkość niezakłóconego obecnością przeszkody przepływu równoległego w stronę dodatnią osi x	m/s
$\dot{V}$	- strumień objętości powietrza	m ³ /s
v	- prędkość powietrza	m/s
v_p	- średnia prędkość ruchu cyrkulacyjnych strumieni powietrza	m/s
$\bar{v}_p$	- uśredniona prędkość pulsacji	m/s
v_s	- średnia prędkość ruchu powietrza w szczelinie pomiędzy pociągiem a tunelem	m/s
v_w	- prędkość ruchu pociągu	m/s
β	- współczynnik wypełnienia	-
Δp	- różnica ciśnienia	Pa

Δp_t	- różnica ciśnienia pomiędzy końcami tunelu	Pa
Δp_w	- strata ciśnienia wzdłuż pociągu	Pa
$\Delta \tau$	- przyrost naprężenia stycznego zależny od prędkości pociągu	Pa
δ	- średni błąd kwadratowy	-
ε	- intensywność burzliwości	-
ζ	- współczynnik oporu miejscowego	-
λ	- współczynnik tarcia	-
λ_t	- współczynnik tarcia dla tunelu	-
μ_t	- współczynnik lepkości turbulentnej	kg/ms
ν	- współczynnik lepkości kinematycznej	m ² /s
ρ	- gęstość powietrza	kg/m ³
σ	- błąd względny	%
τ	- naprężenie styczne między elementarnymi warstwami przepływającego powietrza	Pa
τ_t	- naprężenie styczne na powierzchni ściany tunelu	Pa

1. WPROWADZENIE

Zaspokojenie wzrastających potrzeb komunikacyjnych w dużych aglomeracjach miejskich wiąże się, jak to wskazują doświadczenia wielu krajów, z budową sieci metra.

Wentylacja podziemnych obiektów metra jest zagadnieniem złożonym i niełatwym do rozwiązania ze względu choćby na rozległość linii oraz specyficzne czynniki zmieniające stan powietrza, do których zalicza się przede wszystkim zyski ciepła, wilgoci, zanieczyszczenia gazowe i pyłowe oraz efekty aerodynamiczne towarzyszące ruchowi pociągów [3], [8], [13], [15], [16], [39], [43], [63], [64], [68], [69], [96], [97], [99], [102], [106].

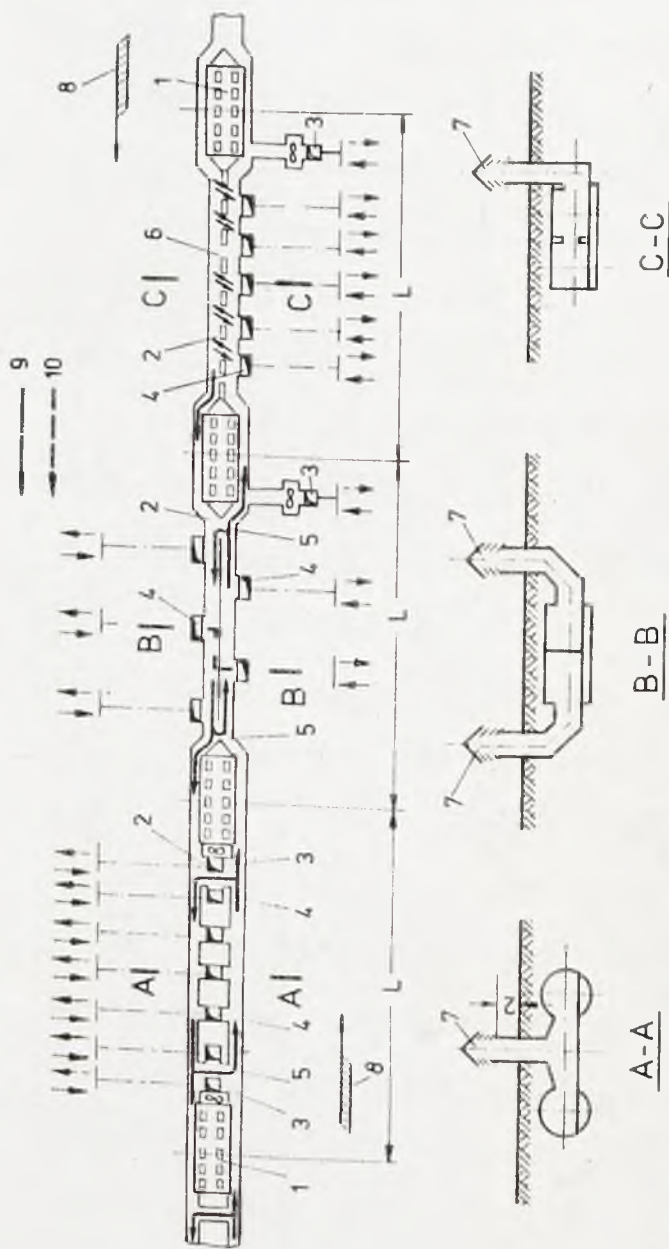
Do zadań wentylacji tuneli i stacji metra należą :

- dostarczenie niezbędnej ilości powietrza dla pasażerów i obsługi,
- stworzenie odpowiednich warunków termicznych i wilgotnościowych przez usunięcie nadmiaru ciepła i wilgoci,
- pobudzenie krążenia powietrza konieczne dla wyrównania warunków temperaturowo-wilgotnościowych
- tłumienie efektów aerodynamicznych powstających podczas ruchu pociągów.

Wentylacja realizowana być może jako naturalna lub mechaniczna. Wentylacja naturalna działa na skutek ruchu powietrza wywołanego efektami meteorologicznymi / ruch powietrza atmosferycznego, zmiany jego temperatury, wilgotności itp. / oraz w wyniku tłokowego działania poruszających się wzdłuż tunelu pociągów.

Przy zastosowaniu wentylacji mechanicznej powietrze jest odciągane lub tłoczone do tunelu, bądź też jednocześnie nawiewane i wywiewane przy pomocy wentylatorów. W tym wypadku ruch powietrza w tunelach i na stacjach zachodzi na skutek różnicy ciśnienia wywołanego wspomnianymi wyżej efektami meteorologicznymi, tłokowym działaniem pociągów oraz pracą wentylatorów.

Na rys. 1.1 przedstawiono typowy schemat wentylacji naturalnej. Stosunkowo niewielkie ciśnienie, będące jedynie konsekwencją ruchu pociągów i efektów meteorologicznych / rzędu 100 - 150 Pa /, powoduje, iż system ten ma bardzo ograniczony zasięg działania i stosowany może być dla tuneli zagłębionych do 20 m. Poszczególne szyby wentylacyjne rozmieszcza się w odległości 100 - 150 m od siebie, najlepiej w sposób szachownicowy. Ponieważ jednak warunki na powierzchni nie zawsze pozwalają na takie właśnie rozmieszczenie szybów, sytuuje się je wówczas z jednej strony tunelu, rozdzielając obydwie tunele albo słupami albo ażurową ścianką o wolnej powierzchni otworów nie mniejszej niż 60 % [15], [16]. Szyby wentylacyjne, w zależności od położenia pociągów w dane chwili, pracują na przemian jako nawiewne lub wywiewne. Dla zmniejszenia odczuwania efektów aerodynamicznych towarzyszących ruchowi pociągów, w przypadku rozdzielonych tuneli, stosuje się łączniki cyrkulacyjne o przekroju 70 - 120 m², umieszczone w odległości 30 - 100 m od każdego wlotu do przestrzeni stacji [63], [66], [69]. W chłodnych okresach roku, w tych strefach klimatycznych, gdzie średnia temperatura najzimniejszego miesiąca jest mniejsza od 0°C,



Rys 11

Schemat wentylacji naturalnej metra.

- 1 - stacje metra;
- 2 - tunele szlakowe;
- 3 - stacyjne szyby wentylacyjne z wentylatorami;
- 4 - szlakowe szyby wentylacyjne bez wentylatorów;
- 5 - przebitki (łączniki) cyrkulacyjne;
- 6 - ażurowa ścianka rozdzielająca tunele;
- 7 - czerpnia lub wyrzutnia powietrza;
- 8 - kierunek ruchu pociągów;
- 9 - kierunek ruchu powietrza;
- 10 - kierunek ruchu powietrza przy rewersyjności w stacyjnych szybach wentylacyjnych.

zamyka się szlakowe szyby wentylacyjne umieszczone bliżej niż $1/3$ długości szlaku od osi stacji, by nie doprowadzić do zbyt dużego jej ochłodzenia. Dążność do polepszenia warunków na stacjach powoduje instalowanie dodatkowych przewodów wentylacyjnych z wentylatorami rewersyjnymi - odciągającymi powietrze w chłodnym okresie roku i nawiewającymi w okresie ciepłym. Omawiany system wentylacji realizować można między innymi wówczas, gdy odległość między stacjami jest nie większa niż 750 m, zaś maksymalna częstotliwość kursowania pociągów mniejsza niż 24 pary/h [15], [16].

Wentylacja naturalna spotykana jest w dawniej budowanych liniach metra. Jak wynika z dostępnej literatury - w przeważającej ilości przypadków nie spełnia postawionych przed nią zadań [15], [16], [68], [69], [99], [102], [106], [141].

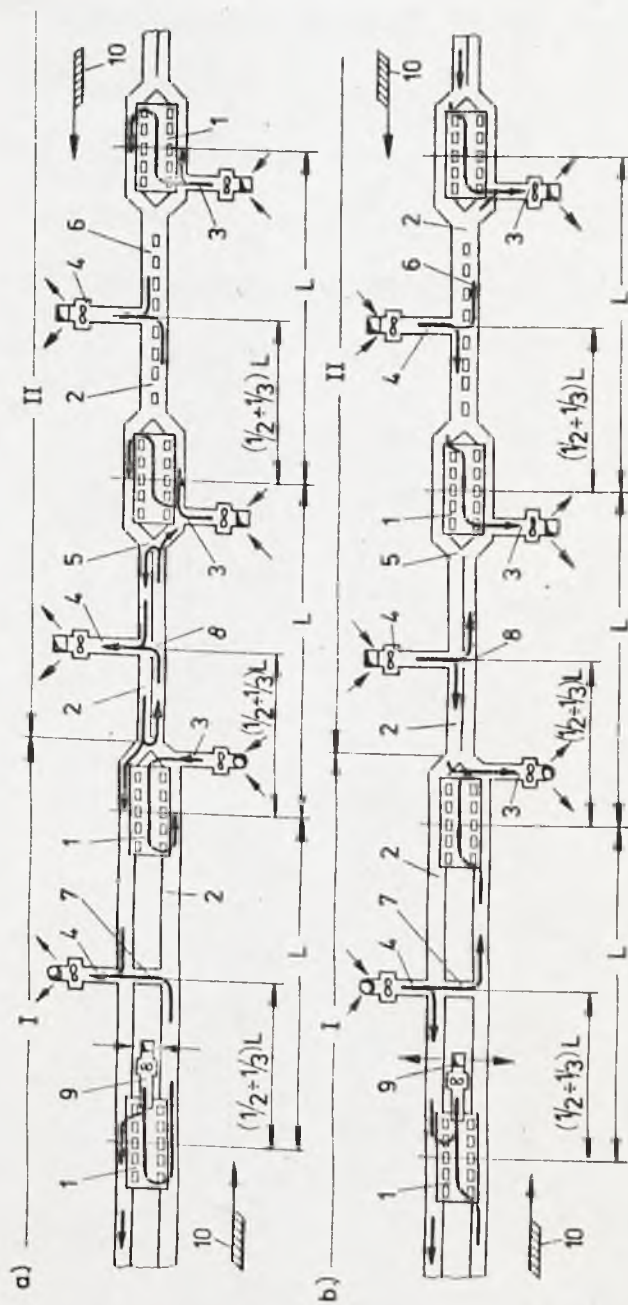
Wszystkie rozwiązania wentylacji mechanicznej podzielć można, ogólnie rzecz ujmując, na jedno- i dwukierunkowe. W systemie wentylacji jednokierunkowej, niezależnie od pory roku, powietrze nawiewane i wywiewane jest na przemian przez maszynownie, usytuowane w zależności od przyjętego rozwiązania, na stacjach lub na szlaku. Wentylację jednokierunkową stosuje się w strefach klimatycznych, dla których średnia temperatura w najzimniejszym miesiącu jest wyższa od 0°C . W systemie wentylacji dwukierunkowej powietrze jest dostarczane przez szyby wentylacyjne i wentylatory na stacje w ciepłym okresie roku, natomiast na szlak pomiędzy stacjami w chłodnym. Powietrze jest usuwane odpowiednio odwrotnie: zimą ze stacji, latem ze szlaku.

Rozwiązanie takie pozwala na nawiewanie na stację, zimą - powietrza już ogrzanego w tunelu, natomiast latem - na utrzymanie stosunkowo niskiej temperatury w hali peronowej. Wentylację dwukierunkową / rewersyjną / stosuje się w strefach klimatycznych, w których średnia temperatura w najzimniejszym miesiącu jest niższa od 0°C .

Prosty i uniwersalny schemat, typowy dla wentylacji dwukierunkowej, przedstawiono na rys. 1.2. Jest to rozwiązanie niejako podstawowe, którego kolejne modyfikacje prowadzą do powstania innych - bardziej lub mniej skomplikowanych. Przedstawione rozwiązanie może być stosowane w systemach metra płytkiego i głębokiego, przy dowolnej długości tuneli szlakowych, przy maksymalnej częstotliwości kursowania pociągów ≥ 24 pary/h [16]. Powietrze zewnętrzne dostarczane do tunelu wentyluje bezpośrednio jedynie jego część. Pozostała część wentylowana jest cyrkulacyjnymi strumieniami powietrza będącymi konsekwencją ruchu pociągów. Podobnie, jak to miało miejsce w systemie wentylacji naturalnej, również tutaj, dla zmniejszenia efektu tłoka powietrznego projektuje się, w przypadku rozdzielonych ośkowicie tuneli, łączniki międzYTunelowe

Przedstawione wyżej rozwiązania wentylacji tuneli i stacji metra są wybrane jedynie przykładowo z wielu proponowanych i opisanych szczegółowo w literaturze, także w publikacjach autora niniejszej rozprawy [63], [64], [66], [67], [68], [69].

Efektywność działania wentylacji zależy nie tylko od przyjętego w danym obiekcie schematu rozdziału powietrza, ale również od prawidłowości obliczenia ilości zanieczyszczeń,



Rys.1.2 Schemat wentylacji mechanicznej metra ze stacjami i szlakowymi (w środku odcinka międzystacyjnego) maszynowniami wentylacyjnymi.

1-stacje metra; 2-tunele szlakowe; 3-stacyjne szyby wentylacyjne z maszynowniami; 4-szlakowe szyby wentylacyjne z maszynowniami; 5-łączniki cyrkulacyjne; 6-azurowa ścianka rozdzielająca tunele; 7-łączniki wentylacyjne; 8-otwory w ściance rozdzielającej tunele szlakowe, zastępujące łącznik wentylacyjny; 9-stacyjne szyby wentylacyjne, które mogą być prowadzone pod schodami; 10-kierunek ruchu pociągów; I,II-odpowiednio odcinek metra typu głębokiego i płytkiego;

a.)praca instalacji w okresie ciepłym;

b.)praca instalacji w okresie chłodnym;

Strzałkami zaznaczono kierunek ruchu powietrza

strumienia objętości powietrza wentylacyjnego oraz prawidłowego określenia rozkładu ciśnienia wzdłuż poszczególnych odcinków tuneli / wywołanego ruchem pociągów /, a zatem jednocześnie prędkości ruchu cyrkulacyjnych strumieni powietrza będących źródłem efektu tłoka powietrznego. Jak wynika z przeglądu dostępnej literatury, jednym z trudniejszych elementów do określenia w procesie projektowania jest przebieg zmian ciśnienia powietrza wzdłuż tunelu.

2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem rozprawy jest poznanie i opis matematyczny zjawiska przepływu powietrza i związanego z nim rozkładu ciśnienia w tunelu metra w czasie niejednostajnego ruchu pociągu, z małą prędkością.

Zaproponowany model teoretyczny - w odniesieniu do bliskiego pola - opiera się na analizie sił działających w szczelinie pomiędzy pojazdem a tunelem. Zadanie to zostało podjęte w warunkach braku publikowanych opisów tego typu rozwiązań postawionego problemu - tak w literaturze krajowej jak i zagranicznej. Przedstawiona praca stanowi więc próbę rozwiązania tego zagadnienia.

Opracowano i podano model teoretyczny przebiegu zmian ciśnienia wzdłuż tunelu.

Przedstawiono opis i wyniki fizykalnych badań modelowych fragmentu metra przeprowadzonych w celu zweryfikowania oraz sprawdzenia poprawności i jakości modelu matematycznego.

W programie badań przewidziano : pomiary współczynnika tarcia λ dla tuneli, pomiary współczynnika oporu czołowego pociągu oraz pomiary rozkładu ciśnienia wzdłuż pojedynczego tunelu i na stacji, przy nieustalonym ruchu pociągu.

Dzięki uzyskaniu pozytywnego wyniku porównania przeprowadzonych analiz teoretycznych i badań modelowych, praca może być wykorzystana, oczywiście po prawidłowym uwzględnieniu warunków naturalnych, w procesie systemowego rozwiązywania problemów wentylacji obiektów metra.

3. PRZEGLĄD STANU BADAŃ I ROZWOJU DZIEDZINY WENTYLACJI I AERODYNAMIKI W OBIEKTACH KOLEI PODZIEMNYCH

Początki działu wiedzy, jakim jest dziś wentylacja tuneli kolei podziemnych, sięgają końca ubiegłego wieku. Pierwsze prace dotyczą wentylacji budowanych obiektów. Z upływem czasu rozwiązane zostają zagadnienia oporu aerodynamicznego pociągu poruszającego się w tunelu. Analizowane są rozkłady ciśnienia przy jeździe jednego, a następnie dwóch pociągów w tunelu. Równolegle badacze pracują nad zmniejszeniem wahań ciśnienia na stacjach, w tunelach i w wagonach. Ustalone zostają kryteria komfortu cieplnego, opracowane metody obliczania i rozdziału powietrza wentylacyjnego w obiektach kolei podziemnej. ETO pozwala głębiej i lepiej analizować zjawiska zachodzące w tunelach i na stacjach przy zadanym ruchu pociągu. Jednocześnie prowadzone są rozległe badania w obiektach istniejących i na modelach fizycznych. Skonstruowanie pociągów poruszających się z dużymi prędkościami stworzyło szereg zupełnie nowych problemów, które są do dziś rozwiązywane.

W roku 1906 Stix [114] podał, wprowadzając prosty, ale w miarę dokładnie opisujący istotę zjawiska, model matematyczny pozwalający określić wielkość oporu aerodynamicznego, jaki pokonuje pociąg poruszający się ze stałą prędkością w długim tunelu o przekroju kołowym. Autor, dla wyznaczenia oporu ciała, stosował hydrauliczne współczynniki strat.

Podobnie postąpił nieco później / 1927 r. / Tollmien [125]. Badacz rozważał wjazd, a następnie ruch pociągu

ze stałą prędkością wzdłuż tunelu. Tollmien próbował, między innymi, opisać przebieg zmian ciśnienia wokół mijających się pociągów w tunelu. Na uwagę zasługuje również fakt, iż autor ten, jako jeden z pierwszych, przeprowadził fizyczne badania modelowe dotyczące przejazdu pociągu przez tunel.

Duże znaczenie wśród tych wczesnych prac mają niewątpliwie badania Suttera [38], [76], [102]. Jak jego poprzednicy, Sutter oparł większość swoich szczegółowych analiz na współczynnikach strat hydraulicznych. Autor podał i wyjaśnił wpływ poszczególnych czynników na aerodynamiczny opór pociągu w tunelu.

Obliczaniem oporu aerodynamicznego pociągów poruszających się w otwartej przestrzeni i w tunelach zajmował się również Abramowicz [2], [15], [16], [38], [76], [99], [102]. Zależności i współczynniki podane przez niego, obowiązujące przy ruchu ustalonym, stosowane są z powodzeniem do dnia dzisiejszego w inżynierskich obliczeniach, dotyczących objętości masy cyrkulacyjnych strumieni powietrza poruszających się w tunelu, bezwymiarowego współczynnika tarcia powietrza o wagon pociągu czy choćby samego oporu pociągu [15], [16], [67], [68].

Podobnymi zagadnieniami zajmował się Blaho [102] przeprowadzając badania na modelach fizycznych. Analizował on problem wpływu chropowatości ścian tunelu i liczby Reynoldsa na opór aerodynamiczny pociągu poruszającego się w tunelu.

Opór pociągu, efekt tłoka powietrznego, zmiany

ciśnienia w tunelu były również tematem pracy / w 1942 r. / Daugherty'ego [20] , [102] . Autor podał pewne zależności przydatne do obliczania wentylacji tuneli kolejowych.

Główne schematy wentylacji obiektów metra oraz zasady obliczania i rozdziału powietrza wentylacyjnego przedstawił w 1950 r. Arbuzow [3] .

Na początku lat sześćdziesiątych Hara i Ohkushi [48] , [49] , [50] , [51] , [102] badali wpływ kształtu przodu pociągu oraz profilu odcinka wlotowego na wahania ciśnienia powietrza w tunelu. Autorzy zajmowali się również zmianami ciśnienia przy mijaniu się pociągów w tunelach dwutorowych.

W nieco późniejszym okresie Hara pracował nad metodami pozwalającymi określić opór aerodynamiczny pociągu poruszającego się w tunelu [102] .

Temat ten analizował również Fukuchi [31] , [102] badając na modelach fizykalnych i w obiektach rzeczywistych zależność między oporem aerodynamicznym pojazdu poruszającego się ze stałą prędkością wzdłuż tunelu a jego długością.

Oporem aerodynamicznym oraz rozkładem ciśnienia na ścianach pociągu poruszającego się z dużą stałą prędkością w otwartej przestrzeni i w tunelu zajmował się Gaillard [33] . Wyniki przytoczone przez niego uzyskane zostały na podstawie fizykalnych badań modelowych.

Podobne zagadnienia rozważał w tym czasie Chilton [14] , [102] prowadząc badania w obiekcie rzeczywistym, w chwili wjazdu pociągu do tunelu. Badania i pomiary obejmowały chwilowe ciśnienia na zewnątrz pociągu i wewnątrz wagonów.

Pod koniec 1965 roku Yamamoto [102] , [136] pracował nad możliwością zmniejszenia fali ciśnieniowej powietrza przez odpowiednie ukształtowanie wlotu do tunelu, co jest ważne zwłaszcza przy dużych prędkościach pociągów. Problem wzrostu ciśnienia przy wjeździe do tunelu w zależności od powierzchni tarcia pociągu, powierzchni jego przekroju poprzecznego, prędkości ruchu itp., analizowany był przez wspomnianego badacza w nieco późniejszym okresie [137] . Yamamoto rozważał również / 1968 r. / zmiany ciśnienia w tunelu powstające wskutek przejazdu pociągu ze stałą prędkością, używając do tego celu jednowymiarowego modelu hydraulicznego [135] .

Na początku 1966 roku Brown opracował podstawy teorii wentylacji podziemnych tuneli szybkich kolei. Podał metodę pozwalającą określać prędkość oraz zmiany temperatury cyrkulacyjnych strumieni powietrza w tunelach [102] .

Zmianami ciśnienia w tunelach kolei podziemnej zajmowali się Sue i Jacobs [117] /1966 r. / oraz Mills i Wilson [87] , [102] / 1967 r. /. Fale ciśnienia powstające w tunelach metra na skutek poruszających się w nich z dużą prędkością pociągów, badane były przez wyżej wymienionych przy użyciu stołu wodnego i dwuwymiarowych modeli tuneli i pociągów. Wyniki badań porównano z przewidywanymi, opartymi na prostym, jednowymiarowym modelu matematycznym.

W tym samym czasie nieustalone przepływy powietrza w tunelach kolei podziemnych analizowane były przez Browna i Shah'a [9] , [102] .



W 1968 roku Codikow [15] przedstawił pracę będącą podsumowaniem ówczesnego stanu wiedzy w dziedzinie wentylacji obiektów metra.

Gouse ze współpracownikami [37], [38], badał opór aerodynamiczny pojazdów o różnych kształtach, poruszających się w tunelach o przekroju kołowym, z różnymi prędkościami, w sposób jednostajny. Autorzy porównali wyniki teoretyczne z eksperymentalnymi uzyskanymi na specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku badawczym. Określono również, dla przyjętych warunków badań, wpływ na opór ciał ich kształtu, długości tunelu, porowatości ścian i współczynnika wypełnienia β . Tematyka ta kontynuowana była nieco później przez Hoppego i Gouse'go [57], [102].

Opór pojazdów poruszających się w tunelach analizowany był również przez Hammita [44], [45], [46], [47]. Autor zajmował się ustalonym i nieustalonym ruchem pociągu, przy uwzględnieniu i nieuwzględnieniu ściśłości powietrza.

Zmniejszenie oporu aerodynamicznego pociągu w tunelu przez zmianę rodzaju napędu rozważane było w tym czasie również przez Skinnera [110].

Obszerne prace związane z ruchem pojazdów z dużymi prędkościami w długich, o przekroju kołowym tunelach, przeprowadzili w latach 1968 - 1969 Gregorek i Engle [40], [41], [42], [102]. Fizyczne badania modelowe dotyczyły między innymi określenia aerodynamicznego oporu pojazdów, rozkładu ciśnienia statycznego w tunelach oraz powstających tam prędkości ruchu powietrza. Wyniki eksperymentów zgodne były w zasadzie z teoretycznymi przewidywaniami oraz, w określonym

zakresie, z wynikami wcześniejszych prac Gouse'go.

W tym czasie Garrett podał zasady klimatyzowania stacji metra. [102] .

Aerodynamiką pociągów poruszających się z dużymi prędkościami w długich tunelach zajmowali się Magnus i Panunzio [78] , [79] , [94] , [95] , [102] / 1969 r. /. Fizykalne badania modelowe przeprowadzone przez wymienionych autorów obejmowały pomiary oporu kilku rodzajów pojazdów, pomiary ciśnienia statycznego i dynamicznego powietrza w polu dalekim. Analizowano również dokładnie bliskie pole strumienia. Wszystkie badania prowadzone w warunkach ustalonych,

W tym samym roku Itonaga i Masuda pracowali nad problemem klimatyzowania hal peronowych stacji podziemnych linii kolejowych [102] .

Zmiany ciśnienia powietrza w tunelu powstające na skutek ruchu pociągów są również odczuwane przez pasażerów znajdujących się w wagonach. Te nieprzyjemne wrażenia występują zwłaszcza przy dużych przyspieszeniach. Temat ten analizowany był przez Ohkushi'ego i Nishimura'ę [92] , [102] , po przeprowadzeniu przez badaczy interesujących pomiarów w obiektach rzeczywistych. Autorzy podali zależności pozwalające oszacować wielkość i przebieg zmian ciśnienia w wagonach.

Modele matematyczne wymiany ciepła oraz ruchu powietrza w jednotorowym tunelu metra opracowane zostały na początku lat siedemdziesiątych przez Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas Inc. [96] , [97] , [102]. Na podstawie wspomnianych modeli opracowano kompleksowy program komputerowy

pozwalający obliczać prędkość, temperaturę i wilgotność względną powietrza w poszczególnych przekrojach tuneli, szynów wentylacyjnych itp., w funkcji czasu, przy założeniu określonego harmonogramu ruchu pociągów, parametrów powietrza zewnętrznego, temperatury gruntu itd.

Podobna praca opublikowana została nieco później / 1973 r. / przez Hoovera i współpracowników [102] .

Dziedziną wentylacji obiektów metra zajmował się również Poliakow [99] . Praca jego opiera się jednak w większości na wcześniejszych analizach, między innymi Abramowicza i Arbuzowa.

Ogólny model matematyczny rozkładu ciśnienia statycznego przy nieustalonym ruchu cylindrycznego ciała w długim, skończonym, o przekroju kołowym tunelu, podał w 1971 roku Sajben [107] .

W tym samym czasie w Stanach Zjednoczonych ustalono kryteria komfortu cieplnego dla obiektów podziemnych kolei miejskich [102] .

Analogiczne zagadnienia analizowane były w 1972 r. przez Nagahama'ę [102] . Autor podał również zasady obliczania i rozdziału powietrza wentylacyjnego w tunelach jednotorowych i na stacjach.

Analiza zmienności ciśnienia w pobliżu pociągu w zależności od chropowatości ścian tunelu była tematem pracy Harrisa [52] , [102] / 1973 r. /. Teoretyczne rozważania porównane zostały przez autora z danymi eksperymentalnymi.

W tym samym czasie Swarden [102] , [118] , [119] zajmował się nie rozwiązany do końca przez poprzedników

problemem wjazdu pociągu z dużą prędkością do tunelu, uzupełniając teorię szerokimi badaniami eksperymentalnymi. Wyniki okazały się przydatne w projektowaniu pociągów oraz wlotów i wylotów tuneli.

Równolegle do prac omówionych wyżej Strom [102] , [116] podjął metodą analitycznego określenia oporu aerodynamicznego i zapotrzebowania na moc elektryczną dla pociągu poruszającego się w tunelu.

Dayman i Kurtz [22] , [23] , [74] , [75] przedstawili w tym czasie uproszczony model matematyczny opisujący rozkład ciśnienia wokół pociągu poruszającego się ze stałą, małą prędkością wzdłuż pojedynczego tunelu o stałym przekroju. Rozważania teoretyczne uzupełnione zostały wynikami fizycznych badań modelowych przeprowadzonych na specjalnie do tego celu wykonanym stanowisku [83] , [84] . Wspomniane badania pozwoliły wnioskować o wpływie długości pociągu, współczynnika wypełnienia, mimosirowości itd. na współczynnik c_x . Wyniki eksperymentów rzuciły wiele światła na zależność między prędkością ruchu pociągu a prędkością przepływu cyrkulacyjnych strumieni powietrza i współczynnika β .

Fox i Vardy [29] , [30] , [102] , [128] przedstawili możliwości łagodzenia chwilowych ciśnień powietrza powodowanych przejazdem pociągów z dużymi prędkościami w tunelach przez stosowanie odpowiednio ukształtowanych wlotów, porowatych ścian rozdzielających tunele przeciwnych kierunków czy odpowiednio umieszczonych szybów wentylacyjnych.

W 1973 roku Gaillard [32] zaprezentował wyniki badań oporu aerodynamicznego pociągów poruszających się w tunelach

i w otwartej przestrzeni. Autor rozpatrywał wpływ wielu czynników na wzrost oporu - takich jak mimośrodowość położenia pociągu w tunelu, kształt przodu pociągu, wzajemne mijanie się pociągów. Prezentowana praca była kontynuacją omawianej już wyżej [35] .

Danziger [102] podał w tym okresie opis komputerowego programu analizującego między innymi przepływy i parametry powietrza w tunelach i na stacjach metra przy zadanym, nieustalonym ruchu pociągów.

Fizykalnymi badaniami modelowymi kolei podziemnych zajmował się również Seeman ze współpracownikami [102] , [108] , [109] . Omawiane badania prowadzone były przy bardziej realnych kształtach tuneli i pociągów oraz ich prędkościach. Wyniki eksperymentów porównano z podaną wcześniej przez Harrisa teorią.

Jednocześnie w tym okresie oporem aerodynamicznym pociągów w tunelach zajmował się Gackenholtz [102] .

Na początku 1974 roku Lukas [76] przedstawił pracę doktorską dotyczącą badania oporu aerodynamicznego i pól prędkości przy ruchu krótkich ciał cylindrycznych w rurze, przy dużym współczynniku wypełnienia. Praca ta, choć nie była ściśle poświęcona pociągom kolei podziemnych, przyniosła wiele ciekawych wyników / jak choćby wielkość poszczególnych składników oporu aerodynamicznego, proporcje pomiędzy nimi, ich zmienność przy różnych liczbach Reynoldsa i różnym β /.

W Polsce, w roku 1974, Kubiński [73] przedstawił wyniki badań rozkładu prędkości strumienia powietrza w podmuchach

wywołanych jazdą pociągów. Badania wykonane były na obiektach rzeczywistych. Autor zajmował się również zmianami ciśnienia statycznego działającego na ściany wagonów i na powierzchnię czołową lokomotywy przy mijaniu się pociągów. Opracowanie to, choć nie odpowiadające ściśle problematyce poruszanej w niniejszej rozprawie, warte jest odnotowania ze względu na metody pomiarowe, pewne wnioski oraz sam fakt, że jest pierwszą i jedyną, jak dotychczas, pracą wykonaną w Polsce na ten temat.

Tymczasem w Anglii Henson i Fox [54], [55], [102] pracowali nad przewidywaniem rozkładu wartości chwilowych ciśnień w dowolnych przekrojach tuneli wywołanych ruchem pociągów. Wyniki komputerowych obliczeń przeprowadzonych według podanej metody są wystarczająco zgodne z fizykalnymi badaniami modelowymi i badaniami na obiektach istniejących. Stałe udoskonalanie i rozwijanie metody doprowadziły do opracowania szerokiego programu komputerowego, który pozwala również obliczać prędkość ruchu powietrza na stacjach, w tunelach podziemnych przejść itp. wywołanych jednoczesną pracą wentylatorów wentylacji podstawowej i ruchem pociągów. Przykładowe wyniki takich właśnie obliczeń, jak również praktyczne wykorzystanie programów opracowanych, przedstawili w 1976 r. Henson i Lowndes [53], [56].

Pomiarami chwilowych ciśnień w tunelach zajmowali się również Gawthorpe i Pope [34]. Szczególną uwagę zwrócono na moment mijania się pociągów oraz wpływ szybów wentylacyjnych na wielkość powstających ciśnień. Badania przeprowadzone były przez autorów w obiektach rzeczywistych.

Zmniejszenie wahań ciśnienia przez zastosowanie szybów wentylacyjnych odpowiednio umiejscowionych i o odpowiednim przekroju było tematem pracy Vardyego [129] .

Woods i Pope [133], kontynuując niejako wcześniejsze prace pierwszego z nich [132] , rozważali w tym czasie charakter zmian ciśnienia przy wjeździe pociągu do tunelu w zależności od kształtu pociągu i rzeczywistego współczynnika wypełnienia. Przedstawiona przez autorów metoda określania wahań ciśnienia przy pomocy komputera daje zgodne wyniki z badaniami wykonanymi w obiektach istniejących.

Nad problemem przewidywania wartości zmiennego ciśnienia wzdłuż tunelu metra, na stacjach, w przejściach itp. pracowali również Behring i Hitchcock [7] . Podane przez nich uproszczone metody dla przypadku ruchu pojedynczego pociągu, lub dwóch mijających się, dają wyniki stosunkowo zgodne z pomiarami przeprowadzonymi w istniejących obiektach metra.

Nayak ze współpracownikami [90] zaprezentował wyniki fizykalnych badań modelowych mających na celu dostarczenie wyczerpujących informacji na temat mechanizmu przepływów w pierścieniu pomiędzy tunelem a poruszającym się pociągami. Przepływy symulowane były w dwuwymiarowym kanale z poruszającą się przesuwą ścianką.

Zmniejszeniem efektu tłokowego przez optymalne rozmieszczenie łączników międzYTunelowych zajmował się Valensi ze współpracownikami [127] . Praca, prócz teoretycznego modelu, obejmowała również fizykalne badania modelowe przeprowadzone na stole wodnym.

W latach 1975 - 1976 ukazała się w Stanach Zjednoczonych praca zbiorowa poświęcona zasadom projektowania wentylacji w obiektach kolei podziemnych, stanowiąca syntezę dotychczasowych wiadomości w tej dziedzinie [102] .

Podobny charakter miała również praca Pursalla i Kinga [102] .

W 1976 roku Cudlin i Harman [19] zajmowali się teorią transportu pneumatycznego. Rozważania teoretyczne poparto fizykalnymi badaniami modelowymi.

Przedstawiony wyżej przegląd badań i rozwoju dziedziny wentylacji i aerodynamiki w obiektach kolei podziemnych nie obejmuje pozycji opisujących wykonane instalacje, ich działanie itd. / jak choćby [8] , [39] /, bowiem prace te nie mają charakteru badawczego i analitycznego.

Z zaprezentowanego przeglądu rozwoju dyscypliny wynika jasno, że najistotniejszy problem, który był i jest w dalszym ciągu tematem prac wielu badaczy - to rozkład ciśnienia wzdłuż tunelu podczas ruchu pociągu.

Pierwsze, bardzo proste modele teoretyczne opisujące wspomniane zagadnienie, opierały się na współczynnikach strat hydraulicznych [114], [125] . W późniejszych opracowaniach, dokładniej precyzujących istotę zjawiska, uwzględniano w sposób bezpośredni lub pośredni współczynnik tarcia dla ścian wagonu [9] , [15] , [16] , [20] , [23] , [31] , [32] , [42] , [45] , [54] , [57] , [74] , [95] , [107] , [116] , [127] , który jest wielkością uciążliwą do określenia, lub opierano się na wcześniej podanych przez innych badaczy zależnościach opisujących profil prędkości powietrza w szczelinie

między wagonem a tunelem [90] .

Żaden z dotychczasowych modeli matematycznych nie opierał się na znalezieniu uniwersalnego rozkładu prędkości powietrza w szczelinie, na podstawie działających tam sił, przy pośrednim uwzględnieniu współczynnika tarcia dla powierzchni wagonu.

4. ROZKŁAD CIŚNIENIA WZDŁUŻ TUNELU PODCZAS RUCHU POCIĄGU

4.1. Opis fizyczny zjawiska

Mechanizm powstawania rozkładu ciśnienia wzdłuż tunelu, w którym porusza się pociąg, a zatem również cyrkulacyjnych strumieni powietrza będących źródłem efektu tłoka powietrznego, jest skomplikowany. Opis zachodzących zjawisk, dla jego uproszczenia, przeprowadza się często przy założeniu stałej prędkości ruchu pociągu [15], [16], [29], [30] [34], [45], [66], [99].

Pociąg, wjeżdżając do tunelu, spręża przed sobą powietrze. Obserwuje się wówczas silny wzrost ciśnienia, którego zmienność w czasie zależna jest w tym momencie od ukształtowania przedniej części pociągu [34]. Powstała w ten sposób fala zgęszczeniowa przesyłana jest wzdłuż tunelu z prędkością dźwięku w stosunku do prędkości miejscowego przepływu powietrza [29], [30], [34], [45], [66], [126]. Powietrze przed pociągiem zaczyna się poruszać w kierunku zgodnym z ruchem pociągu, zaś w szczelinie pomiędzy pociągiem a tunelem w kierunku przeciwnym. Podczas gdy pociąg coraz bardziej "zagłębia się" w tunelu, zwiększa się długość pierścienia między zewnętrzną powierzchnią pociągu a wewnętrzną powierzchnią tunelu; rośnie więc siła tarcia występująca na tych powierzchniach, utrzymując w ten sposób gradient ciśnienia wzdłuż wspomnianego pierścienia. Zwiększający się opór aerodynamiczny pociągu powoduje równocześnie wzrost ciśnienia przed pociągiem, które to ciśnienie

zużywa się częściowo na pokonanie siły tarcia powietrza o ściany tunelu przed pojazdem. [34], [45]. Jeżeli przyjąć, o czym wspomniano już wyżej, że pociąg wjeżdża do tunelu ze stałą prędkością, wówczas po pierwszym gwałtownym wzroście, ciśnienie rośnie dalej, ale nieco wolniej - w takim tempie, jak wzrasta opór aerodynamiczny pociągu, bowiem przestają odgrywać rolę siły bezwładności [34]. Wzrost ciśnienia obserwowany jest do chwili, gdy koniec pociągu znajdzie się w tunelu. W tym momencie powietrze, które płynęło między tunelem i pociągiem w kierunku wlotu tunelu, teraz, po opuszczeniu tego pierścienia zaczyna się poruszać w kierunku do wnętrza tunelu. W chwili wjazdu końca pociągu do tunelu, powstaje za pojazdem strefa podciśnienia, tworzy się fala rozrzedzeniowa rozchodząca się wzdłuż tunelu, ku jego wlotowi i wzdłuż pierścienia między zewnętrzną powierzchnią pociągu i wewnętrzną powierzchnią tunelu. Następuje gwałtowny spadek ciśnienia przed pociągiem oraz przyspieszenie przepływu strumienia powietrza w szczelinie [34], [45]. Gdy wspomniana fala rozrzedzeniowa osiągnie przednią część pierścienia - tworzą się z niej dwie fale - rozrzedzeniowa i zgęszczeniowa, z których pierwsza wraca wzdłuż pierścienia, druga zaś dąży do wylotu z tunelu [29], [30], [34].

Występujące siły tarcia w tunelu osłabiają energię fal powstających zarówno na przodzie pociągu jak i na jego tyle. Fala zgęszczeniowa, która powstała w momencie wjazdu pociągu do tunelu, odbija się od jego wylotu, tworząc falę przeciwnego znaku. Utworzona fala rozrzedzeniowa poruszając

się wzdłuż tunelu, w kierunku przeciwnym do ruchu pociągu, napotyka na swej drodze pojazd. Tu powstają z niej fale następne. Zmiany ciśnienia rejestrowane na przodzie pociągu są wynikiem superpozycji fal odbijanych od przodu i tyłu pociągu oraz od wlotu i wylotu z tunelu [29], [30], [34], [118], [119], [133], [134]. Pasażerowie znajdujący się w pociągu odczuwają podobny przebieg zmian ciśnienia jak opisany wyżej [92], [102]. Analogiczne zmiany ciśnienia rejestrowane są również w poszczególnych przekrojach tunelu [29], [30], [34], [45], [66], [118], [119], [132], [133].

Ponieważ pierwotne fale - zgęszczeniowa i rozrzedzeniowa są stopniowo osłabiane - częściowo przez tarcie, częściowo zaś przez kolejne odbicia, w tunelu, po pewnym czasie, prędkość ruchu powietrza przed i za pociągiem oraz w przestrzeni między pociągiem i tunelem, jak również gradienty ciśnienia wzdłuż pociągu i tunelu - uzyskają stałe wartości [29], [30], [34]. Ciśnienie przed pociągiem będzie sukcesywnie malało przy jednoczesnym wzroście podciśnienia za pojazdem. Wraz z ustaleniem się prędkości ruchu powietrza oraz gradientów ciśnienia, stałą wartość przybiera również opór aerodynamiczny pociągu.

Przebieg zmian ciśnienia, jego chwilowe wartości jak również czas do chwili wystąpienia stanu ustalonego zależą od prędkości ruchu pojazdu, od jego długości, ukształtowania przodu i tyłu pojazdu, od chropowatości ścian tunelu i pociągu, od długości tunelu, jego rodzaju, ukształtowania wlotu i wylotu, od stosunku powierzchni przekroju poprzecznego

pociągu do przekroju poprzecznego tunelu, wreszcie od obecności i usytuowania innych pociągów w stosunku do badanego.

Może się zdarzyć, że przy odpowiedniej konfiguracji wymienionych wyżej czynników, tunel będzie na tyle krótki, iż nie wystąpi w nim ostatecznie ustalony ruch powietrza.

Jest rzeczą oczywistą, że w przypadku pociągów poruszających się z małymi prędkościami / rzędu max. 80 - 100 km/h, które to wartości są typowe dla klasycznych linii metra /, zmiany ciśnienia występujące tak w wagonach jak i w poszczególnych przekrojach poprzecznych tunelu nie są duże, wpływając tym samym ujemnie raczej na środowisko stacji i stosunkowo nieznacznie zaburzają komfort jazdy [16] , [21] , [66] , [102] , [106] .

Problemy powyższe nabierają wagi dla pociągów szybkich.

4.2. Model teoretyczny

Znajomość rozkładu ciśnienia wzdłuż tunelu a zatem również w sposób pośredni - prędkości ruchu cyrkulacyjnych strumieni powietrza, jest niezbędnym czynnikiem w procesie prawidłowego projektowania wentylacji obiektów metra. Proces ten polegać powinien nie tylko na prawidłowym obliczeniu ilości powietrza wentylacyjnego oraz przyjęciu określonego schematu jego rozdziału, ale również na ochronie pasażerów przed nagłymi zmianami ciśnienia. W przypadku klasycznej linii metra wspomniana ochrona odnosi się , zgodnie z uwagami zamieszczonymi wyżej, praktycznie jedynie do stacji, w szerokim tego słowa znaczeniu.

Umiejętność określenia ciśnienia w dowolnym przekroju

n - tego odcinka tunelu metra w zadanym czasie, przy określonym ruchu pociągów, pozwala także kompleksowo analizować przepływy powietrza w systemie tuneli i kanałów wentylacyjnych metra, również przy działającej wentylacji mechanicznej. Rozwiązania tego problemu nie można osiągnąć wyłącznie na drodze teoretycznej, ponieważ nawet najbardziej drobiazgowo założenia dotyczące dla przykładu kształtu pociągu, czy rodzaju powierzchni tunelu, nie usuną nigdy wątpliwości co do stopnia dokładności opartych na tych założeniach obliczeń. Trzeba więc, jak zwykle w takim przypadku, przyjąć zasadę, że na drodze teoretycznej należy ustalić, jeżeli to możliwe, tylko charakter poszukiwanej zależności, natomiast występujące w niej stałe muszą być zweryfikowane doświadczalnie. Poszukiwana funkcja powinna określać zależność różnicy ciśnienia powietrza na początku i na końcu danego odcinka tunelu od wymiarów tunelu i pociągu, objętości strumienia masy cyrkulacyjnych strumieni powietrza, prędkości i przyspieszenia pociągu.

Dla rozwiązania postawionego problemu założono, co wcześniej uczynili Hara [50], Hammitt [46], Sajben [107] czy Dayman [23], że przepływ powietrza w tunelu, wywołany przejazdem pociągu, dzieli się na dwa obszary, a mianowicie: obszar bliskiego pola przepływu^{1/} obejmujący przepływ powietrza wokół pociągu oraz w odległości kilku równoważnych średnic tunelu przed i za pociągiem / dokładne wartości nie są podane /, obszar dalekiego pola przepływu^{2/} obejmujący pozostałą część tunelu.

1/ - - -
ang. Near Flowfield.
2/ - - -
ang. Far Flowfield.

O ile dalekie pole może być prawidłowo opisane przy użyciu danych dotyczących przepływów w przewodach, o tyle opis pola bliskiego stanowi problem bardziej złożony.

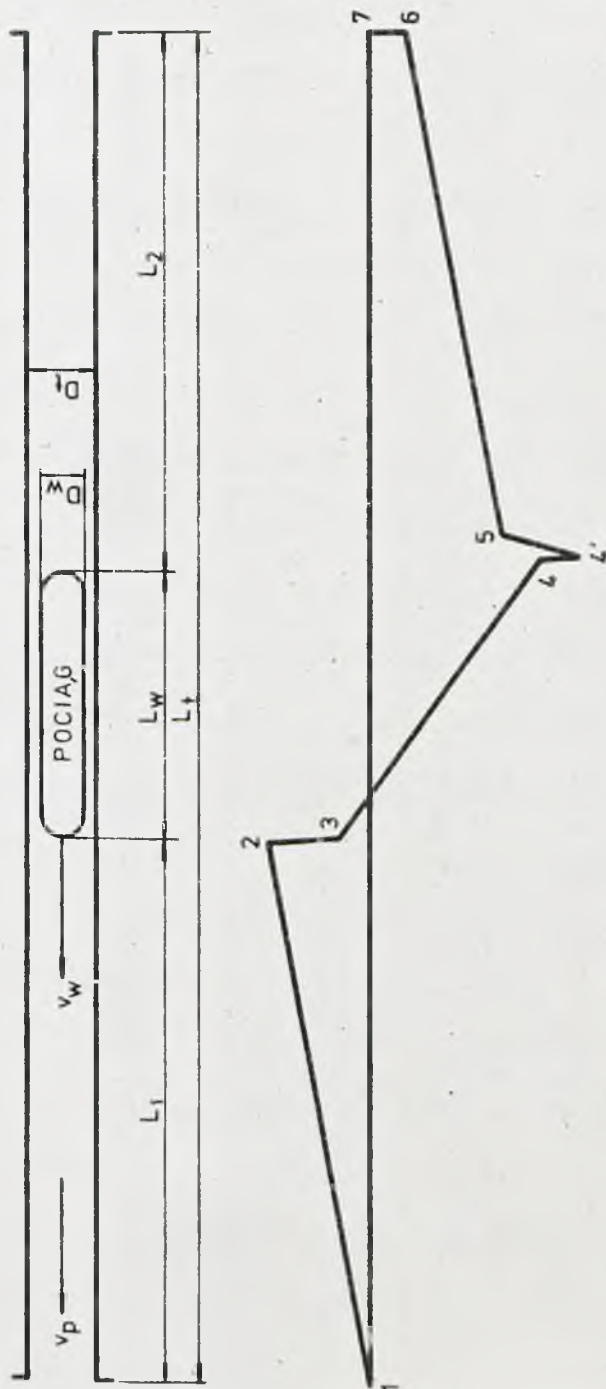
W większości przypadków przepływ w polu bliskim uważać można za stały, ze zmiennymi warunkami brzegowymi [46], [50], [90].

Dla znalezienia funkcji określającej różnicę ciśnienia powietrza na początku i końcu danego odcinka tunelu, w którym porusza się pociąg, założono prócz tego w niniejszej pracy, co następuje :

- rozpatrywany jest pojedynczy tunel o przekroju kołowym,
- tunel po obu stronach / wlot, wylot / zakończony jest zbiornikami ciśnieniowymi, w których nie musi panować jednakowe ciśnienie powietrza,
- w tunelu nie ma wentylacji mechanicznej,
- w tunelu porusza się ze stałą prędkością cylindryczny pojazd o średnicy mniejszej od średnicy tunelu / klasyczny napęd metra /,
- powietrze przepływające tunelem jest nieściśliwe, a jego prędkość i parametry fizyczne są stałe w czasie.

Zgodnie z rozkładem ciśnienia statycznego wzdłuż tunelu i poruszającego się ze stałą prędkością v_w pociągu, przy upraszczającym założeniu jednakowego ciśnienia na obu końcach tunelu, napisać można / porównaj rys. 4.1. / :

$$p_6 - p_1 = [(p_2 - p_1) + (p_6 - p_5)] - [(p_2 - p_3) + (p_3 - p_4) + (p_4 - p_4) - (p_5 - p_4)] \quad (4.1)$$



Rys. 4.1 Rozkład ciśnienia statycznego wzdłuż tunelu.

Jest to podstawowa zależność pozwalająca określić prędkość ruchu cyrkulacyjnych strumieni powietrza v_p przy zadanej prędkości pojazdu v_w , wymiarach pociągu, tunelu itp.

Poniżej wyprowadzono zależności opisujące poszczególne wielkości ciśnienia występujące we wzorze (4.1.).

W pierwszym rzędzie rozpatrzono spadek ciśnienia w pierścieniu pomiędzy zewnętrzną powierzchnią pojazdu a wewnętrzną powierzchnią tunelu. Dla znalezienia zależności opisującej rozkład prędkości w pierścieniu, w niniejszej pracy, rozpatrzono działające tam siły. Założono, co jest w pełni zgodne z rzeczywistością [21], [23], [32], [68], [90], [95], że w szczelinie między poruszającym się pojazdem / pociągami /, a otaczającym go tunelem będzie występował w pełni rozwinięty / wprowadzie nie na całej długości [90] / ruch burzliwy. Podobnie ruch burzliwy będzie występował w polu dalekim [1], [3], [6], [7], [9], [15], [16], [20], [21], [22], [23], [31], [32], [33], [37], [38], [40], [41], [42], [44], [50], [52], [57], [62], [65], [68], [75], [79], [87], [90], [96], [99], [102], [103], [107], [108], [110], [127], [135].

Prawo tarcia Newtona dla tunelu napisać więc można w postaci [11], [100], [101], [131]:

$$\tau = -\mu_r \frac{dv}{dr} \quad (4.2)$$

Jeżeli założyć, że ciśnienie całkowite powietrza w każdym punkcie przekroju poprzecznego jest takie samo [100], [131]

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0$$

to można przyjąć, iż naprężenie styczne τ zależy liniowo od promienia warstwy :

$$\pi r^2 \cdot \Delta p = \tau \cdot 2\pi r \cdot l$$

$$\tau = \frac{\Delta p}{2l} \cdot r = \frac{\Delta p \cdot R_t}{2l} \cdot x; \quad x = \frac{r}{R_t} \quad (4.3)$$

W przypadku, gdy rozpatruje się naprężenie styczne między elementarnymi warstwami przepływającego powietrza w szczelinie między tunelem a pojazdem, konieczne jest uwzględnienie dodatkowego naprężenia stycznego, którego wartość i kierunek zależne są od prędkości pociągu. Wówczas :

$$\tau = \Delta\tau + (\tau_t - \Delta\tau) \cdot x; \quad x_w < x < 1 \quad (4.4.)$$

przy czym

$$x_w = \frac{R_w}{R_t}$$

Podstawiając do równania (4.2.) wartość naprężeń stycznych określoną wzorem (4.4.) otrzymuje się :

$$\Delta\tau + (\tau_t - \Delta\tau) \cdot x = -\mu_r \frac{dv}{dr}$$

lub

$$\Delta\tau + (\tau_t - \Delta\tau) \cdot x = -\mu_r \frac{1}{R_t} \cdot \frac{dv}{dr}$$

stąd

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{R_t}{\mu_r} [\Delta\tau + (\tau_t - \Delta\tau) \cdot x]$$

Jest to równanie różniczkowe, którego rozwiązanie

$$v = - \frac{\Delta\tau \cdot R_t}{\mu_\tau} \cdot x - \frac{(\tau_t - \Delta\tau) R_t}{\mu_\tau} \cdot \frac{x^2}{2} + C$$

przy założeniu warunku brzegowego

$$v = 0 \quad \text{dla} \quad x = 1$$

ma postać

$$v = \frac{R_t}{2\mu_\tau} [\Delta\tau (1-x)^2 + \tau_t (1-x^2)] \quad (4.5)$$

$\Delta\tau$ występujące w powyższej zależności wyznaczono zakładając, że prędkość przepływu powietrza w warstwie przylegającej do pociągu jest równa prędkości pojazdu:

$$V = V_w \quad \text{dla} \quad x = x_w$$

Stąd

$$\Delta\tau = \frac{2\mu_\tau}{R_t} \cdot \frac{V_w}{(1-x_w)^2} - \tau_t \frac{(1-x_w^2)}{(1-x_w)^2} \quad (4.6)$$

Podstawiając wartość $\Delta\tau$ określoną tym równaniem do zależności (4.5) otrzymuje się:

$$v = \left(\frac{1-x}{1-x_w} \right)^2 \cdot \left[V_w - \frac{R_t \cdot \tau_t}{2\mu_\tau} (1-x_w^2) \right] + \frac{R_t \cdot \tau_t}{2\mu_\tau} (1-x^2), \quad (4.7)$$

lub

$$v = A(1-x^2) + B(1-x)^2, \quad (4.7a)$$

gdzie

$$A = \frac{R_t \cdot \tau_t}{2\mu_\tau}$$

$$B = \frac{V_w - A(1-x_w^2)}{(1-x_w^2)}$$

Jest to prawo rozkładu prędkości. Dotyczy ono przestrzeni zawartej między ścianą tunelu i poruszającym się pociągiem. Na podstawie tego prawa można obliczyć średnią wartość prędkości przepływającego powietrza w pierścieniu v_s . Można to osiągnąć całkując funkcję v w przedziale (R_w, R_t)

$$\pi R_t^2 (1 - x_w^2) \cdot v_s = \int_{R_w}^{R_t} v \cdot 2\pi r dr$$

Uwzględniając z kolei, że

$$r = R_t \cdot x$$

a więc

$$r dr = R_t^2 \cdot x dx$$

otrzymano

$$\pi R_t^2 (1 - x_w^2) \cdot v_s = 2\pi R_t^2 \int_{x_w}^1 v \cdot x dx$$

lub

$$(1 - x_w^2) \cdot v_s = 2 \int_{x_w}^1 v \cdot x dx \quad (4.8.)$$

Biorąc pod uwagę zależność (4.7a.), wzór (4.8.) przyjmie postać

$$(1 - x_w^2) \cdot v_s = 2A \int_{x_w}^1 (1 - x^2) \cdot x dx + 2B \int_{x_w}^1 (1 - x)^2 \cdot x dx,$$

zaś po scałkowaniu

$$(1 - x_w^2) \cdot v_s = A \frac{(1 - x_w^2)^2}{2} + 2B \cdot b, \quad (4.9.)$$

przy czym

$$b = \frac{1}{2}(1 - x_w^2) - \frac{2}{3}(1 - x_w^3) + \frac{1}{4}(1 - x_w^4).$$

Na podstawie prawa ciągłości napisać można

$$(1 - x_w^2) \cdot v_s = v_w \cdot x_w^2 - v_p \quad (4.10.)$$

Podstawiając wzór (4.10.) do wyprowadzonego wyżej (4.9.) otrzymuje się

$$v_w \cdot x_w^2 - v_p = A \frac{(1 - x_w^2)^2}{2} + 2b \frac{v_w - A(1 - x_w^2)}{(1 - x_w)^2} ,$$

zaś po kolejnych przekształceniach

$$\begin{aligned} v_w \cdot x_w^2 - v_p &= A \frac{(1 - x_w^2)^2}{2} + \frac{2bv_w}{(1 - x_w)^2} - \frac{2bA(1 - x_w^2)}{(1 - x_w)^2} = \\ &= A(1 - x_w^2) \left[\frac{(1 - x_w^2)}{2} - \frac{2b}{(1 - x_w)^2} \right] + \frac{2b}{(1 - x_w)^2} v_w = \\ &= \frac{A}{2} (1 - x_w^2) \left[(1 - x_w^2) - \frac{4b}{(1 - x_w)^2} \right] + \frac{2b}{(1 - x_w)^2} v_w \end{aligned}$$

i następnie

$$v_w \cdot x_w^2 - v_p = \frac{A}{2} k + W \cdot v_w , \quad (4.11.)$$

gdzie

$$k = (1 - x_w^2) [(1 - x_w^2) - 2W] ,$$

$$W = \frac{2b}{(1 - x_w)^2} .$$

Przekształcając z kolei zależność (4.11.) otrzymano

$$\frac{A}{2} \cdot k = v_w (x_w^2 - W) - v_p .$$

Jeżeli

$$X_w^2 - W = C$$

wówczas

$$\frac{A}{2} \cdot k = v_w \cdot C - v_p \quad (4.12.)$$

Podstawiając do powyższego wzoru (4.12.) zależność określającą współczynnik A / patrz (4.7a.) /, przy jednoczesnym uwzględnieniu, iż naprężenie styczne na ścianie tunelu zgodnie z zależnością (4.3.) wynosi

$$\tau_t = \frac{\Delta p \cdot R_t}{2l} \quad (4.13.)$$

otrzywać można następujący ciąg zależności:

$$\frac{R_t^2 \cdot \Delta p}{8\mu_\tau l} \cdot k = v_w \cdot C - v_p ,$$

$$\Delta p = \frac{8\mu_\tau l}{R_t^2 \cdot k} \cdot (v_w \cdot C - v_p) ,$$

stąd dalej

$$\Delta p = \frac{8\nu_\tau \cdot \varrho \cdot l}{R_t^2 \cdot k} \cdot (v_w \cdot C - v_p) = \frac{64\nu_\tau \cdot l}{v_p \cdot D_t^2 \cdot k} \cdot \frac{(v_w \cdot C - v_p)}{2} \cdot v_p \cdot \varrho ,$$

$$v_p \neq 0$$

$$\Delta p = \frac{64}{\frac{v_p \cdot D_t}{\nu_\tau}} \cdot \frac{l}{D_t \cdot k} \cdot \frac{v_w \cdot v_p \cdot C - v_p^2}{2} \cdot \varrho \quad (4.14.)$$

$$v_p \neq 0$$

Wykorzystując fakt, że powyższe równanie analogiczne jest do wzoru w tzw. postaci Darcy - Weisbacha, napisać można:

$$\Delta p = \lambda_t \cdot \frac{l}{D_t \cdot k} \cdot \frac{V_w \cdot V_p \cdot C - V_p^2}{2} \cdot \rho \quad (4.15.)$$

Występujące w tym wzorze stałe k i c odnoszą się do cylindrycznego pojazdu poruszającego się współosiowo w tunelu o przekroju kołowym. Dla prawidłowego opisu warunków rzeczywistych należy wprowadzić do zależności (4.15.) dodatkowe współczynniki uwzględniające nie tylko rzeczywiste wymiary pociągu i tunelu ale również fakt, iż współczynnik lepkości turbulentnej w dalekim polu przepływu nie jest taki sam jak w pierścieniu pomiędzy pociągiem a tunelem. Biorąc prócz tego pod uwagę długość pociągu L_w / choć ściśle rzecz ujmując opisywana strata ciśnienia nie będzie występowała na długości L_w - w praktyce pomija się ten fakt [23], [32], [90], [107] /, otrzymuje się:

$$\Delta p = p_3 - p_4 = \lambda_t \cdot \frac{L_w \cdot C_1}{D_t \cdot k} \cdot \frac{V_w \cdot V_p \cdot C \cdot C_2 - V_p^2}{2} \cdot \rho \quad (4.16.)$$

Pozostałe straty ciśnienia występujące w obszarze bliskiego pola przepływu oblicza się przy pomocy prostych i sprawdzonych zależności podanych w [23], [90].

Tak więc stratę ciśnienia na przodzie pociągu wyliczyć można z zależności:

$$p_2 - p_3 = x_w^2 (2 - x_w^2) \left(\frac{1 - \frac{V_p}{V_w}}{1 - x_w^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \rho V_w^2 \quad (4.17.)$$

Stratę ciśnienia $p_4 - p_{4'}$ powstającą przy końcu pociągu określa się ze wzoru

$$p_4 - p_{4'} = \left(\frac{1 - \frac{V_p}{V_w}}{1 - X_w^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \rho V_w^2 \quad , \quad (4.18)$$

choć ze względu na jej bardzo małą wartość może być całkowicie pominięta [23] , [74] , [90] .

Znacznie większą wartość ma odzyskane ciśnienie statyczne występujące za poruszającym się pojazdem, w jego cieniu aerodynamicznym

$$p_5 - p_{4'} = 2 \cdot \frac{X_w^2}{1 - X_w^2} \left(1 - \frac{V_p}{V_w} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \rho V_w^2 \quad . \quad (4.19)$$

Ponieważ, zgodnie z celem niniejszej pracy, interesującą wielkością jest w tym wypadku przede wszystkim całkowita strata ciśnienia wzdłuż pociągu, nie zaś jej poszczególne odczyny, dokonano sumowania zależności (4.17.) , (4.18.) , (4.19.) / uwzględniając przy tym rozkład ciśnienia według rys. 4.1. /, otrzymując w ten sposób łączną stratę ciśnienia na przedniej i tylnej części pociągu:

$$\begin{aligned} & (p_2 - p_3) + (p_4 - p_{4'}) - (p_5 - p_{4'}) = \\ & = \frac{1}{2} \rho V_w^2 \left[X_w^2 (2 - X_w^2) \left(\frac{1 - \frac{V_p}{V_w}}{1 - X_w^2} \right)^2 + \left(\frac{1 - \frac{V_p}{V_w}}{1 - X_w^2} \right)^2 - 2 \cdot \frac{X_w^2}{1 - X_w^2} \left(1 - \frac{V_p}{V_w} \right)^2 \right] . \end{aligned}$$

Po przekształceniach otrzymuje się

$$(p_2 - p_3) + (p_4 - p_{4'}) - (p_5 - p_{4'}) = \left(\frac{V_w - V_p}{1 - X_w^2} \right)^2 \cdot (1 + X_w^4) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (4.20.)$$

lub, po uwzględnieniu równania ciągłości,

$$(p_2 - p_3) + (p_4 - p_{4'}) - (p_5 - p_{4'}) = (V_p + V_s)^2 \left(1 + \frac{1}{X_w^4} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (4.20a.)$$

Podobnie, jak to ma miejsce przy wyprowadzeniu zależności (4.16.), dla prawidłowego określenia funkcji opisującej warunki rzeczywiste, wprowadzono współczynnik c_3 /uwzględniający niedokładności modelu teoretycznego / dla łącznej straty ciśnienia na przodzie i na tyle pociągu, co jest zgodne z wnioskami pracy [23] .

Wówczas

$$(p_2 - p_3) + (p_4 - p_{4'}) - (p_5 - p_{4'}) = c_3 \left(\frac{V_w - V_p}{1 - X_w^2} \right)^2 \left(1 + X_w^4 \right) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (4.21.)$$

lub

$$(p_2 - p_3) + (p_4 - p_{4'}) - (p_5 - p_{4'}) = c_3 (V_p + V_s)^2 \left(1 + \frac{1}{X_w^4} \right) \cdot \frac{\rho}{2} \quad (4.21a.)$$

Znalezienie strat ciśnienia w obszarze dalekiego pola nie nastręcza trudności, bowiem, o czym już wspomniano, skorzystać można w tym wypadku z zależności opisujących przepływ w przewodach powietrznych. Tak więc przy przyjęciu stałego współczynnika tarcia λ dla całej długości tunelu [15], [16], [23], [32], [62], [65], [68], [107], oraz

ograniczeniu obszaru bliskiego pola do długości pojazdu [23], [45], [107] napisać można

$$p_2 - p_1 = \lambda_t \cdot \frac{L_1}{D_t} \cdot \frac{v_p^2 e}{2} , \quad (4.22.)$$

$$p_6 - p_5 = \lambda_t \cdot \frac{L_2}{D_t} \cdot \frac{v_p^2 e}{2} , \quad (4.23.)$$

a zatem

$$(p_2 - p_1) + (p_6 - p_5) = \lambda_t \cdot \frac{L_t - L_w}{D_t} \cdot \frac{v_p^2 e}{2} . \quad (4.24.)$$

Strata ciśnienia na wlocie do tunelu wyrażona może być jako

$$p_7 - p_6 = p_1 - p_6 = \zeta \cdot \frac{v_p^2 e}{2} . \quad (4.25.)$$

Po podstawieniu zależności (4.16.) ÷ (4.25.) do wzoru (4.1.) po niewielkich przekształceniach otrzymuje się:

$$\left(\zeta + \lambda_t \cdot \frac{L_t - L_w}{D_t} \right) \frac{v_p^2 e}{2} + \left[\lambda_t \cdot \frac{L_w C_1}{D_t k} \cdot \frac{v_w \cdot v_p \cdot C \cdot C_2 - v_p^2}{2} e - C_3 \left(1 + \frac{1}{x_w^4} \right) (v_p + v_s)^2 \cdot \frac{e}{2} \right] = 0 \quad (4.26.)$$

W powyższej zależności założono, że człon opisujący straty ciśnienia przy przepływie powietrza w pierścieniu między tunelem a poruszającym się pociągami ma znak ujemny.

W ogólnym przypadku, jeśli będą istniały dodatkowe straty miejscowe w tunelu oraz wystąpi różnica ciśnienia pomiędzy

jego końcami, wzór (4.26.) przyjmie postać

$$\Delta p_t = \left(\sum \xi + \lambda_t \frac{L_t - L_w}{D_t} \right) \cdot \frac{v_p^2 \rho}{2} \pm$$

$$\pm \left[\lambda_t \frac{L_w C_1}{D_t \cdot k} \cdot \frac{v_w \cdot v_p \cdot C \cdot C_2 - v_p^2}{2} \rho - C_3 \left(1 + \frac{1}{x_w^4} \right) (v_p + v_s)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \right], \quad (4.27.)$$

przy czym

$$"+ " \text{ gdy } \frac{v_p}{v_w} < x_w^2, \text{ a } "- " \text{ gdy } \frac{v_p}{|v_w|} > x_w^2.$$

Zmiana znaków w powyższej zależności odnosząca się do całkowitej straty ciśnienia wzdłuż pociągu uwzględnia inny niż założono kierunek przepływu powietrza w szczelinie lub przeciwny do przyjętego kierunek ruchu powietrza w tunelu / które to przypadki prawie nigdy nie występują w praktyce [15], [16], [23], [45], [90], [102], [107], [127] /. Jest sprawą oczywistą, iż w przypadku zaistnienia takiej sytuacji, musiałyby ulec zmianie wartości C_3 oraz $\sum \xi [107]$.

Zależność (4.27.) odnosi się do sytuacji ustalonego ruchu pociągu. Przy zmiennej prędkości pojazdu w stratach ciśnienia trzeba uwzględnić również występujące siły bezwładności. Jeżeli przyjąć oznaczenia

$$\frac{dv_p}{dt} = a_p, \quad \frac{dv_w}{dt} = a_w, \quad \frac{dv_s}{dt} = a_s,$$

to na podstawie równania (4.10.) określić można zależność między przyspieszeniami / lub opóźnieniami / powietrza przed lub za pociągiem, przyspieszeniem / opóźnieniem / powietrza w pierścieniu między ścianą tunelu a pociągiem i przyspieszeniem / opóźnieniem / pociągu:

$$(1 - x_w^2) \frac{dv_s}{dt} = x_w^2 \frac{dv_w}{dt} - \frac{dv_p}{dt}$$

lub

$$(1 - x_w^2) a_s = x_w^2 \cdot a_w - a_p \quad (4.28.)$$

Analizując rozkład ciśnienia w tunelu wywołany jedynie siłami bezwładności napisać można [90]

$$\varrho(L_1 + L_2) \cdot a_p - \varrho L_w \cdot a_s = 0$$

Uwzględniając z kolei wartość a_s obliczoną z równania (4.28.) otrzymuje się:

$$\varrho(L_1 + L_2) a_p - \varrho L_w \left(\frac{x_w^2 \cdot a_w}{1 - x_w^2} - \frac{a_p}{1 - x_w^2} \right) = 0$$

$$a_p \left[(L_t - L_w) + \frac{L_w}{1 - x_w^2} \right] = a_w \frac{L_w x_w^2}{1 - x_w^2}$$

następnie

$$a_p = \frac{L_w \cdot x_w^2}{(1 - x_w^2)(L_t - L_w) + L_w} \cdot a_w$$

Dla nieustalonego ruchu pociągu w tunelu wzór (4.27.)

przyjmie postać

$$\Delta p_t = \left(\Sigma \xi + \lambda_t \frac{L_t - L_w}{D_t} \right) \frac{V_p^2 \varrho}{2} \pm \left[\lambda_t \frac{L_w C_1}{D_t \cdot k} \cdot \frac{V_w V_p C C_2 - V_p^2}{2} \cdot \varrho + \right. \\ \left. - C_3 \left(1 + \frac{1}{x_w^4} \right) (V_p + V_s)^2 \cdot \frac{\varrho}{2} \right] + (L_t - L_w) \cdot \varrho \cdot a_p \quad (4.30.)$$

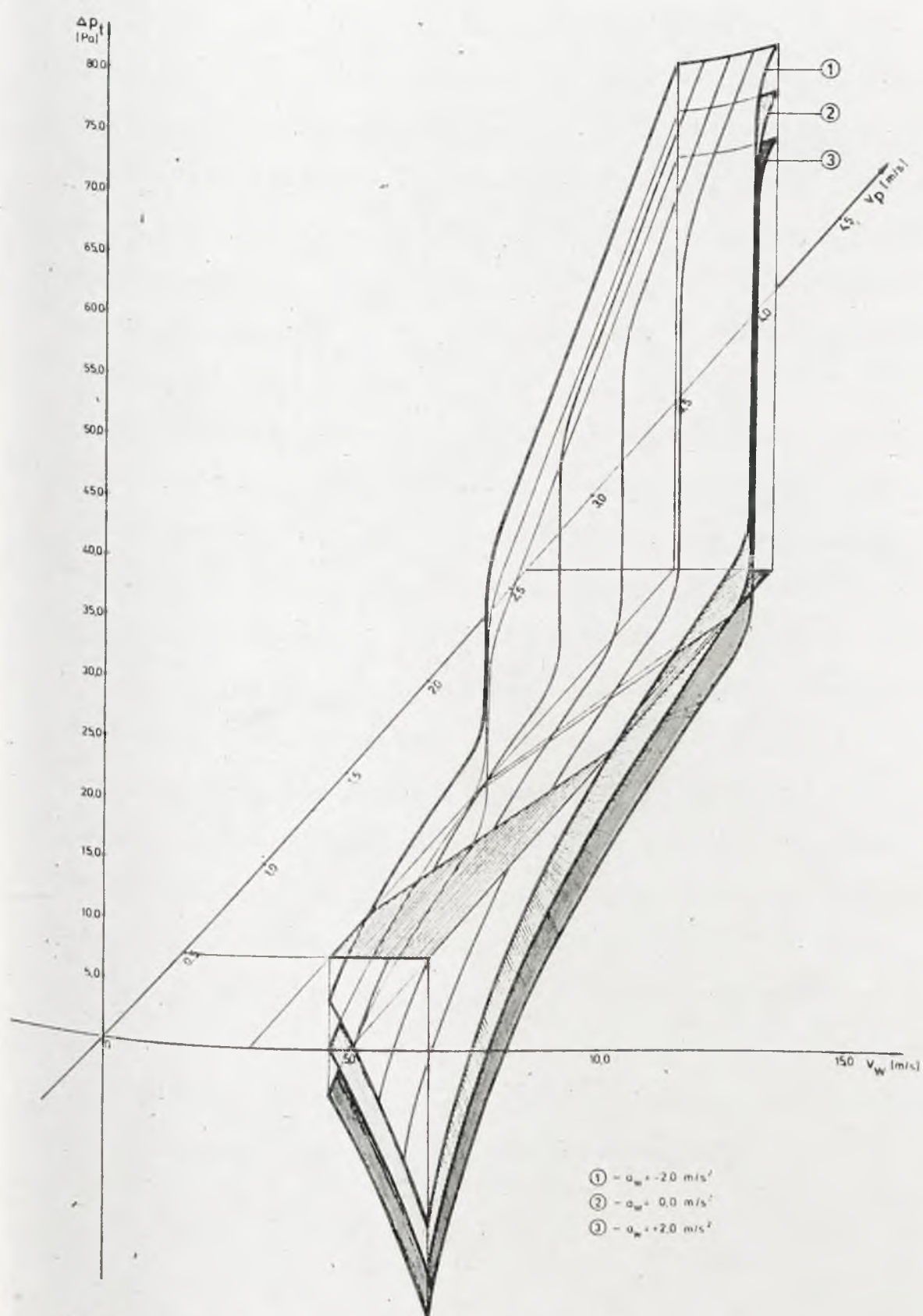
lub po uwzględnieniu zależności (4.29.)

$$\Delta p_t = \left(\Sigma \xi + \lambda_t \frac{L_t - L_w}{D_t} \right) \frac{V_p^2 \varrho}{2} \pm \left[\lambda_t \frac{L_w C_1}{D_t \cdot k} \cdot \frac{V_w V_p C C_2 - V_p^2}{2} \cdot \varrho + \right. \\ \left. - C_3 \left(1 + \frac{1}{x_w^4} \right) (V_p + V_s)^2 \cdot \frac{\varrho}{2} \right] + \varrho \cdot L_w \cdot x_w^2 \cdot a_w \frac{L_t - L_w}{(1 - x_w^2)(L_t - L_w) + L_w} \quad (4.31.)$$

$$" + " \quad \text{gdy} \quad \frac{V_p}{V_w} < x_w^2 ,$$

$$" - " \quad \text{gdy} \quad \frac{V_p}{|V_w|} > x_w^2 .$$

Na rys. 4.2. pokazano przebieg zmian Δp_t w funkcji V_p oraz V_w przy trzech różnych wartościach przyspieszenia pociągu. Wykres wykonany został w oparciu o wyniki obliczeń



Rys 42 Przebieg zmian Δp_t w funkcji: $v_p (v_p = 0.5 \pm 2.6 \text{ m/s})$ oraz $v_w (v_w = 3.0 \pm 5.0 \text{ m/s})$

przeprowadzonych przy pomocy programu EVENTEV dla EMC Odra 1204^{1/}. W obliczeniach wykorzystano dane otrzymane w rozdziale 5 niniejszej pracy.

Dla praktycznego korzystania z zależności (4.31.) prócz danych dotyczących wymiarów tunelu, pociągu, prędkości ruchu i przyspieszeń pojazdu, oporów miejscowych czy współczynnika λ , konieczna jest również znajomość stałych α_1 , α_2 oraz α_3 .

W przedstawiony wyżej sposób opisać można rozkład ciśnienia wywołany przez każdy pociąg poruszający się w dowolnym tunelu, zatem, stosując metodę superpozycji wykorzystać opracowany model matematyczny do określania rozkładu ciśnienia w rozgałęzionych sieciach metra, tak przy wentylacji naturalnej jak i mechanicznej. Pozwala to rozwiązać wiele problemów wentylacji obiektów metra. Analizie może być poddana efektywność stosowania poszczególnych systemów rozdziału powietrza z punktu widzenia zmniejszenia oddziaływania efektów aerodynamicznych. Opracowany model umożliwi dobrać optymalne, od strony wentylacyjnej, wymiary łączników międzYTunelowych. Obliczyć można również przy jego pomocy natężenie przepływu objętości powietrza na stacjach, w podziemnych tunelach przejść dla pieszych, wyjściach na powierzchnię itp.

1/ Program znajduje się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

5. FIZYKALNE MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW POWIETRZA

W TUNELACH METRA

Część występujących w modelu teoretycznym stałych / rozdział 4 / powinna być, jak już wspomniano, znaleziona na drodze doświadczalnej.

Z oczywistych względów nie można było przeprowadzić badań na istniejącym, rzeczywistym obiekcie metra.

Zbudowano więc model fragmentu metra w zmniejszonej skali i określono, na podstawie badań na nim przeprowadzonych, wartości poszczególnych stałych a następnie oceniono przydatność i jakość znalezionej funkcji przez porównanie określonego przez nią / w danej chwili czasowej / przebiegu ciśnienia wzdłuż tunelu, przy ruchu pociągu, z przebiegiem zmierzonym na modelu fizykalnym. Budowę fizykalnego modelu fragmentu metra oparto na projekcie przyszłej linii metra warszawskiego [141] / metro klasyczne płytkie /.

Należy zaznaczyć, że większość tego typu badań przeprowadzona była dotychczas na modelach fizykalnych mało przypominających obiekty rzeczywiste [23], [37], [38], [40], [41], [42], [57], [76], [78], [79], [87], [94], [95], [117], [135]. Jedynie tylko modele Daymana [23], Tollmiera [125], Seemana [109] czy Valensiego [127] były analogiczne w większej części do obiektów rzeczywistych. Modelowano dotychczas przede wszystkim tunele i pociągi, nie zajmując się przy tym równocześnie stacjami, jak to zrobiono w przypadku niniejszej pracy.

5.1. Ogólne zasady fizykalnego modelowania

Podstawy fizykalnego modelowania związane z teorią podobieństwa są znane z literatury [5], [12], [61], [68], [85], [86], [88], [89], [101], [112], [121], [124], [131], [138], [139] .

Modelowi i jego naturalnemu wzorcowi należy zapewnić warunki jednoznaczności, na które składają się:

- podobieństwo geometryczne,
- podobieństwo stałych wielkości fizycznych ciał w odpowiadających sobie punktach modelu i naturalnego obiektu,
- podobieństwo warunków granicznych,
- podobieństwo warunków czasowych,
- równość liczbowa określających kryteriów podobieństwa / wystarczy uzyskać równość liczb kryterialnych w dowolnej parze odpowiadających sobie przekrojów modelu i wzorca /.

Zjawiska przebiegające w obiekcie i w modelu opisane są za pomocą analogicznych równań, różniących się jednak tym, że wielkości fizyczne dotyczące modelu mają na ogół inne wartości liczbowe niż odpowiednie wielkości dotyczące obiektu naturalnego. Wielkości fizyczne dotyczące modelu powiązane są skalami modelowania z odpowiednimi wielkościami w obiekcie naturalnym. Tak więc przy spełnieniu warunków podobieństwa dwóch procesów fizycznych, stosunki jednoimiennych wielkości w odpowiadających sobie pod względem geometrycznym punktach modelu i obiektu są stałe,

niezależnie od miejsca i czasu. Zapewnienie podobieństwa warunków jednoznaczności oraz liczbowej równości kryteriów podobieństwa jest przy modelowaniu często trudne lub nawet niemożliwe do zrealizowania. Zachodzi wówczas konieczność stosowania modelowania przybliżonego, które także daje dobre wyniki.

5.2. Kryteria podobieństwa dla modelowania procesów przepływu powietrza w tunelach metra

Ruch pociągu w modelowanym fragmencie metra jest, zgodnie z założeniem, nieustalony. Pociąg jadąc tunelem oddziałuje na znajdujące się tam powietrze jak niepełny tłok, powodując tym samym również nieustalone w czasie przemieszczanie się powietrza wzdłuż tunelu.

Dla uzyskania więc podobieństwa zjawisk przepływu powietrza muszą być spełnione kryteria podobieństwa mechanicznego zapewniające: podobieństwo kinematyczne - proporcjonalność prędkości i przyspieszeń w modelu i obiekcie rzeczywistym oraz podobieństwo dynamiczne - proporcjonalność sił występujących w obu układach [124] , [138] .

W ogólnym przypadku, analizując zależność (4.31.) lub stosując analizę wymiarową, wyprowadzić można sześć kryteriów podobieństwa, których równość w modelu i w obiekcie naturalnym musi być spełniona [138] :

- kryterium Eulera

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v_p^2} = \text{idem} , \quad (51.)$$

- kryterium Reynoldsa

$$Re = \frac{V_p \cdot L}{\nu} = \text{idem} , \quad (5.2)$$

- kryterium Froude'a

$$Fr = \frac{g \cdot L}{V_p^2} = \text{idem} , \quad (5.3)$$

- kryterium Newtona

$$N = \frac{R}{\rho \cdot L^2 \cdot V_p^2} = c_x = \text{idem} , \quad (5.4)$$

- stosunek prędkości ruchu pociągu
i przepływu powietrza

$$\frac{V_w}{V_p} = \text{idem} , \quad (5.5)$$

- intensywność burzliwości

$$\varepsilon = \frac{\overline{V_p}}{V_p} = \text{idem} . \quad (5.6)$$

Sens fizyczny powyższych kryteriów omówiony jest w literaturze [68] , [88] , [89] , [121] , [124] , [138] , [139] .

Ponieważ przy badaniu wymuszonego przepływu powietrza w tunelach poszukiwaną wielkością jest spadek ciśnienia należy więc określić funkcję w postaci:

$$Eu = f(Re, Fr, c_x, \frac{V_w}{V_p}, \varepsilon) . \quad (5.7)$$

Już wstępne obliczenia wskazują, że gdy czynnikiem roboczym zarówno w obiekcie rzeczywistym jak i w modelu jest powietrze, niemożliwe jest równoczesne spełnienie

warunku Fr i Re , gdyż związki pomiędzy odpowiadającymi sobie prędkościami i wymiarami liniowymi wyliczone z tych kryteriów są niezgodne.

Chęć spełnienia warunku $Re = Re'$ pociągnęłaby za sobą, przy zmniejszonej skali modelu, zwiększenie prędkości przepływu powietrza tylokrotnie, ile razy zmniejszono wymiary modelu. By jednocześnie zachować warunek v_w/v_p należałoby również wielokrotnie zwiększyć prędkość modelu pociągu w stosunku do wzorca, co oczywiście jest nierealne. Dlatego też zrezygnowano z zachowania kryterium Re , dycydująco się tym samym na modelowanie przybliżone.

Fizykalne modelowanie przybliżone opiera się na pewnych właściwościach ruchu płynu lepkiego, a mianowicie stabilności i samomodelowaniu [5], [85], [124]. Przez pojęcie stabilności rozumie się zdolność lepkiego płynu będącego w ruchu do przyjmowania ściśle określonego rozkładu prędkości w strumieniu. Rozkład ten zależny jest od wartości liczby Re , kształtu kanału i przebytego odcinka drogi. W miarę wzrostu wartości Re ponad wartość krytyczną, profil prędkości zmienia się początkowo szybko, następnie wolniej, a przy rozwiniętej burzliwości pozostaje praktycznie stały. Dotyczy to oczywiście przepływu poza tzw. odcinkiem początkowym [68], [85]. Zdolność samomodelowania wyraża się zanikiem zależności przebiegania zjawiska od kryterium określającego proces wtedy, gdy kryterium to przekracza określoną wartość. W zakresie modelowania przepływu powietrza w tunelach metra, ze zdolności samomodelowania korzysta się w odniesieniu do kryterium Re . Im kształt kanału, przez

który przepływa płyn jest bardziej złożony, czy też kształt przedmiotu mniej opływowy, tym wartość liczby Re , powyżej której występuje zdolność samomodelowania, jest mniejsza [5]. Należy zaznaczyć, że przy ustabilizowanym burzliwym przepływie rozkład prędkości, rozkład ciśnienia oraz współczynniki hydraulicznego oporu utrzymują w przybliżeniu stałą wartość, co można traktować jako oznaki wystąpienia samomodelowania [5], [85], [112].

Określenie liczby Re_{kr} , przy której rzeczywiście występuje już zjawisko samomodelowania, było w tym wypadku niecelowe, bowiem prędkość cyrkulacyjnych strumieni po - wietrza powstających na skutek ruchu pociągu była zależna od tak wielkiej ilości czynników, iż na etapie projektowania modelu praktycznie niemożliwa do przewidzenia. Niemniej zakładano, że przy stosunkowo dużym współczynniku wypełnienia, który postanowiono utrzymać, liczba Re powinna być wyższa niż 10^4 , a wartość ta w literaturze przyjmowana jest często jako pewna wartość graniczna dla przewodów prostych [61], [89], [112], [124].

Rezygnacja z zachowania warunku $Re = Re'$ wiązała się także z możliwością otrzymania nieco innych wartości współczynnika α_x pociągu, niż w warunkach rzeczywistych. Założono / między innymi na podstawie spostrzeżeń Gaillarda [32], Gouse'go [38] i Daymana [23] /, że współczynnik ten dosyć prędko osiąga stałą wartość, niezależną od Re / w szczególności dla $Re > Re_{kr}$ /, co oczywiście musiało być potem, podczas badań, sprawdzone.

Postanowiono również zrezygnować z zachowania kryterium intensywności burzliwości ε , bowiem nie można jeszcze dowolnie stwarzać warunków, którym odpowiadałaby określona wartość współczynnika ε [4], [85], [138]. Z drugiej zaś strony nie znano również dokładnej wartości intensywności burzliwości w rzeczywistym tunelu metra, poza ogólnym stwierdzeniem, iż jest ona duża [15], [16], [102], [126]. Wydaje się, że również duża będzie burzliwość przepływu powietrza w modelu. Zagadnienie ilościowego wpływu turbulencji przepływu na opór rozmaitych ciał nie jest jeszcze do tej pory dostatecznie zbadane [138]. Wpływ intensywności burzliwości ośrodka na wyniki modelowania maleje przy dużych prędkościach strumienia [85].

Uwzględniając powyższe przesłanki zależność (5.7.) przyjmie postać

$$Eu = f(Fr, C_x, \frac{V_w}{V_p}) \quad (5.8)$$

5.3. Skale modelowe

Skale modelowe są elementem umożliwiającym przeliczenie wyników badań modelowych na warunki obiektu naturalnego. W niniejszej pracy skale wyznaczone na podstawie liczb kryterialnych. Przyjęto, iż $S_g = 1$ oraz $S_\rho = 1$. Ze względu na potrzebę modelowania dostatecznie dużego fragmentu metra oraz ograniczone możliwości zlokalizowania modelu w odpowiednim pomieszczeniu, zdecydowano, że minimalna skala geometryczna wyniesie $S_1 = 0,05$ [68]. Zestawienie skal modelowych przedstawiono w tabelicy 5.1.

Tablica 5.1.

S K A L A	W A R T O Ś Ć	U W A G I
Skala długości S_L	0,05	przyjęta
Skala prędkości S_v	0,22	—
Skala czasu S_T	0,22	—
Skala różnicy ciśnienia $S_{\Delta p}$	0,05	—
Skala przyspieszenia ziemskiego S_g	1	przyjęta
Skala siły S_R	$1,25 \times 10^{-6}$	—
Skala gęstości powietrza S_ρ	1	przyjęta

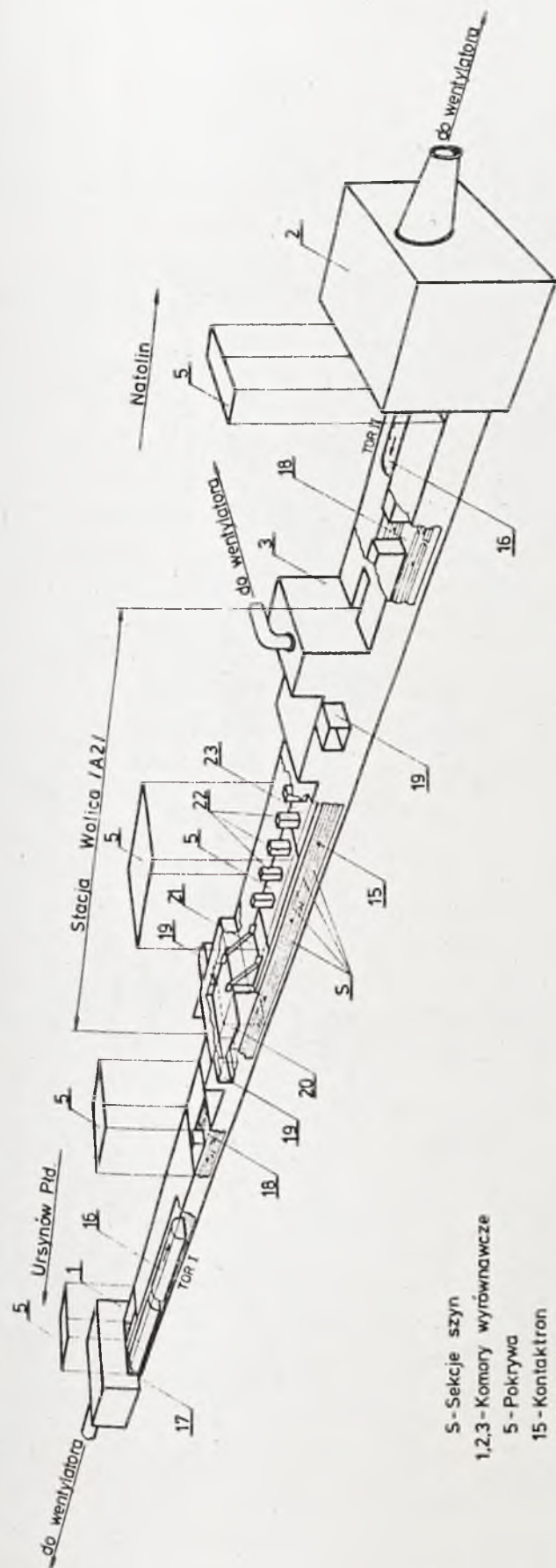
5.4. Opis modelu fragmentu metra oraz stanowiska badawczego

Do badań modelowych wybrano jedną ze stacji projektowanej linii metra warszawskiego, mianowicie stację Wolica, wraz z przyległymi po obu jej stronach odcinkami tuneli. Modelowano właśnie tę stację, gdyż jej typ wraz z ukształtowaniem przyległych tuneli występuje w projekcie najczęściej [68], [141].

Całkowita długość modelowanego fragmentu metra / łącznie ze stacją / wynosi 558 m, co po przyjęciu skali geometrycznej $S_L = 1 : 20$ odpowiada długości modelu rzędu 27,9 m.

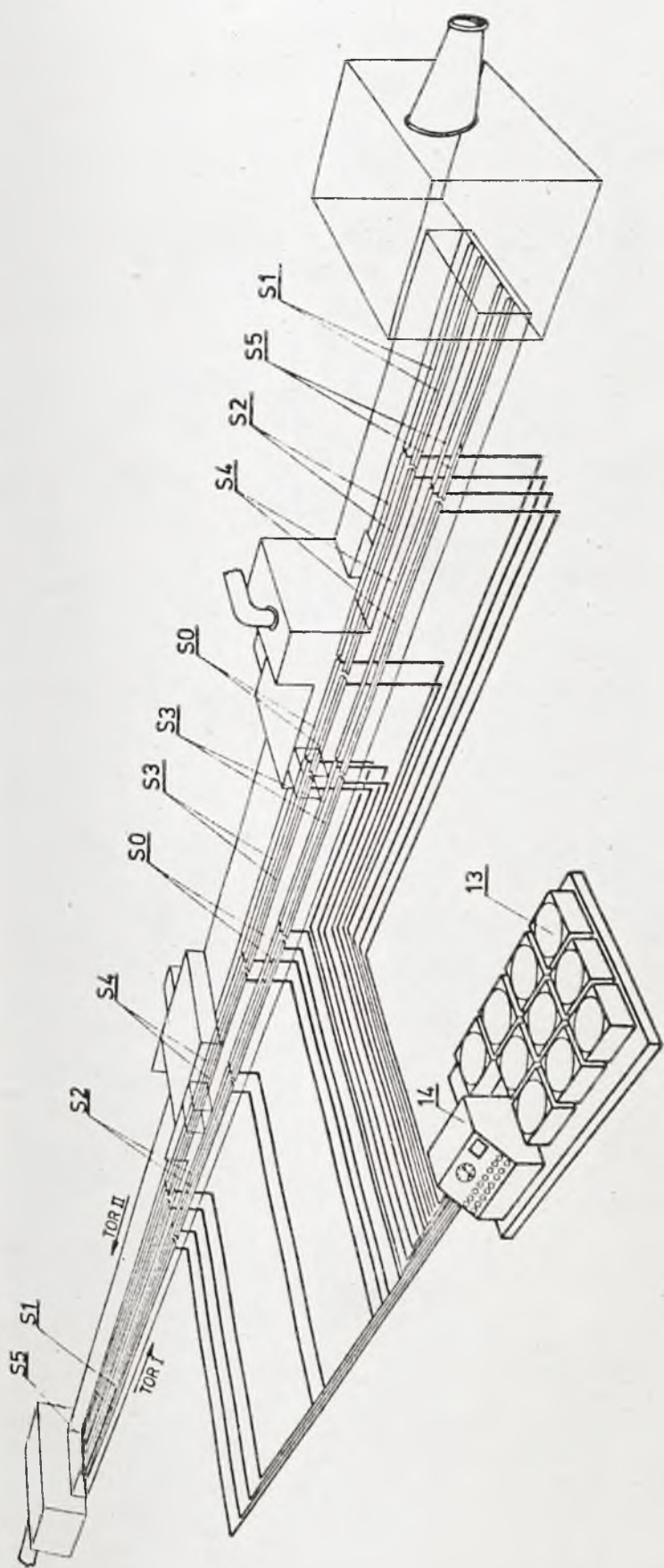
Model stacji wykonany został z drewna, twardej płyty pilśniowej oraz szkła organicznego / rys.5.1., rys.5.6., rys.5.7. /. Starano się odwzorować wszystkie ważniejsze elementy konstrukcji, które mają wpływ na kształtowanie się przepływu powietrza. Nie wykonano dokładnie wyjść ze stacji na powierzchnię, ponieważ praktycznie nie wpływa to na rozkład ciśnienia w tunelu [56].

Model tuneli monolitycznych, prefabrykowanych, przyległych do stacji, wykonany został również z twardej płyty pilśniowej i kształtowników drewnianych /rys.5.1., rys.5.5./. Nie wykonano uzbrojenia tunelu, jest to bowiem sprawa bardzo żmudna i uciążliwa, wcale nie gwarantująca otrzymania prawidłowego współczynnika tarcia [1], [15], [16], [65], [103], [104], [111]. Tunele zaopatrzone zostały w łączniki, których odległość od stacji jak również przekrój, można



- S - Sekcje szyn
- 1,2,3 - Komory wyrównawcze
- 5 - Pokrywa
- 15 - Kontakttron
- 16 - Pociąg
- 17 - Siatka ochronna
- 18 - Łącznik międzytunelowy
- 19 - Wejście dla pieszych
- 20 - Sala wejściowa
- 21 - Schody
- 22 - Filary stropu hali peronowej
- 23 - Peron

Rys. 5.1 Model stacji metra - Wolica /A2/-
wraz z przylegającymi do niej
odcinkami tuneli.

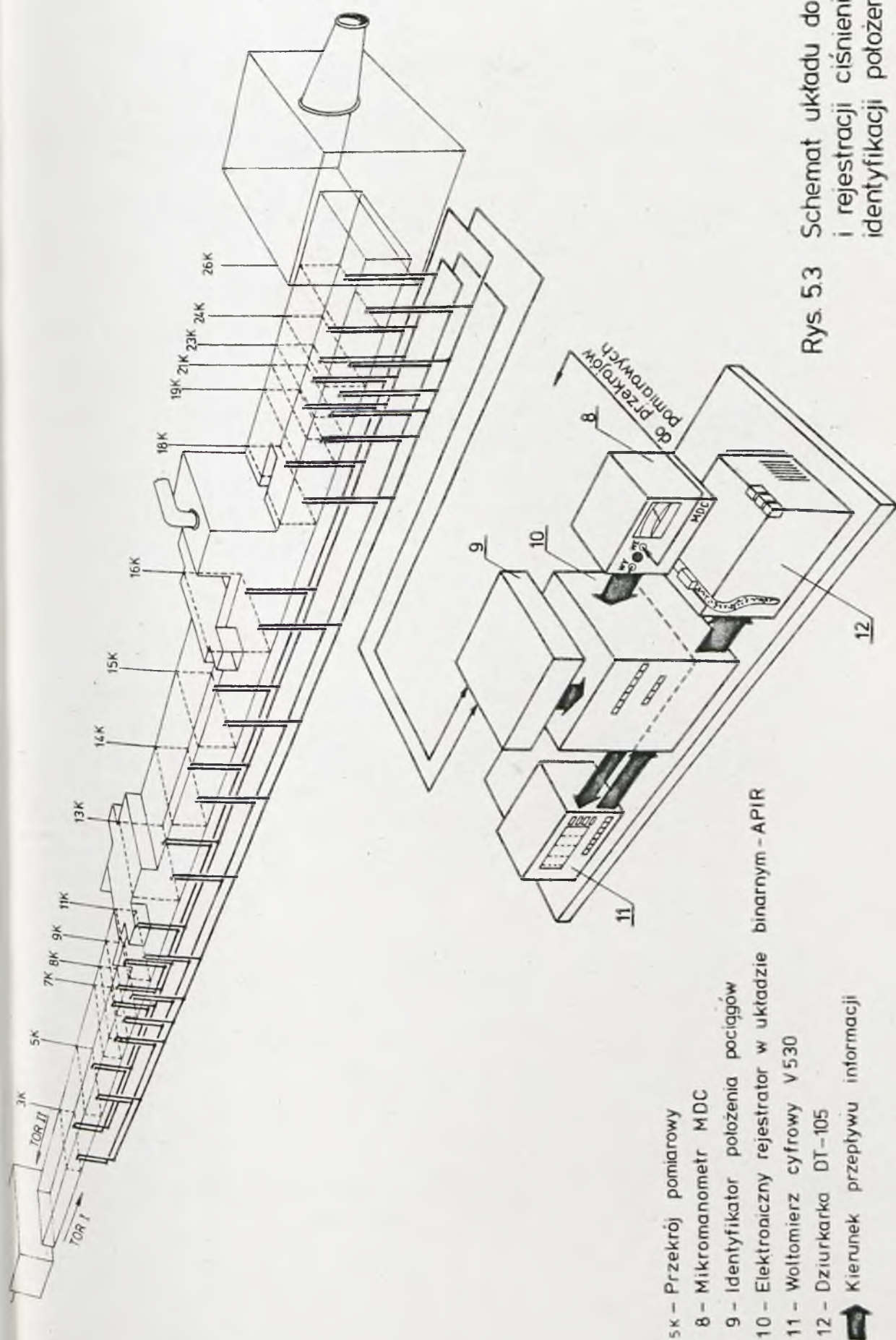


13 - Autotransformator

14 - Urządzenie sterujące ruchem pociągów

S0+S5 - Sekcje szyn

Rys. 5.2 Schemat elektrycznego układu zasilania pociągów w modelu metra.



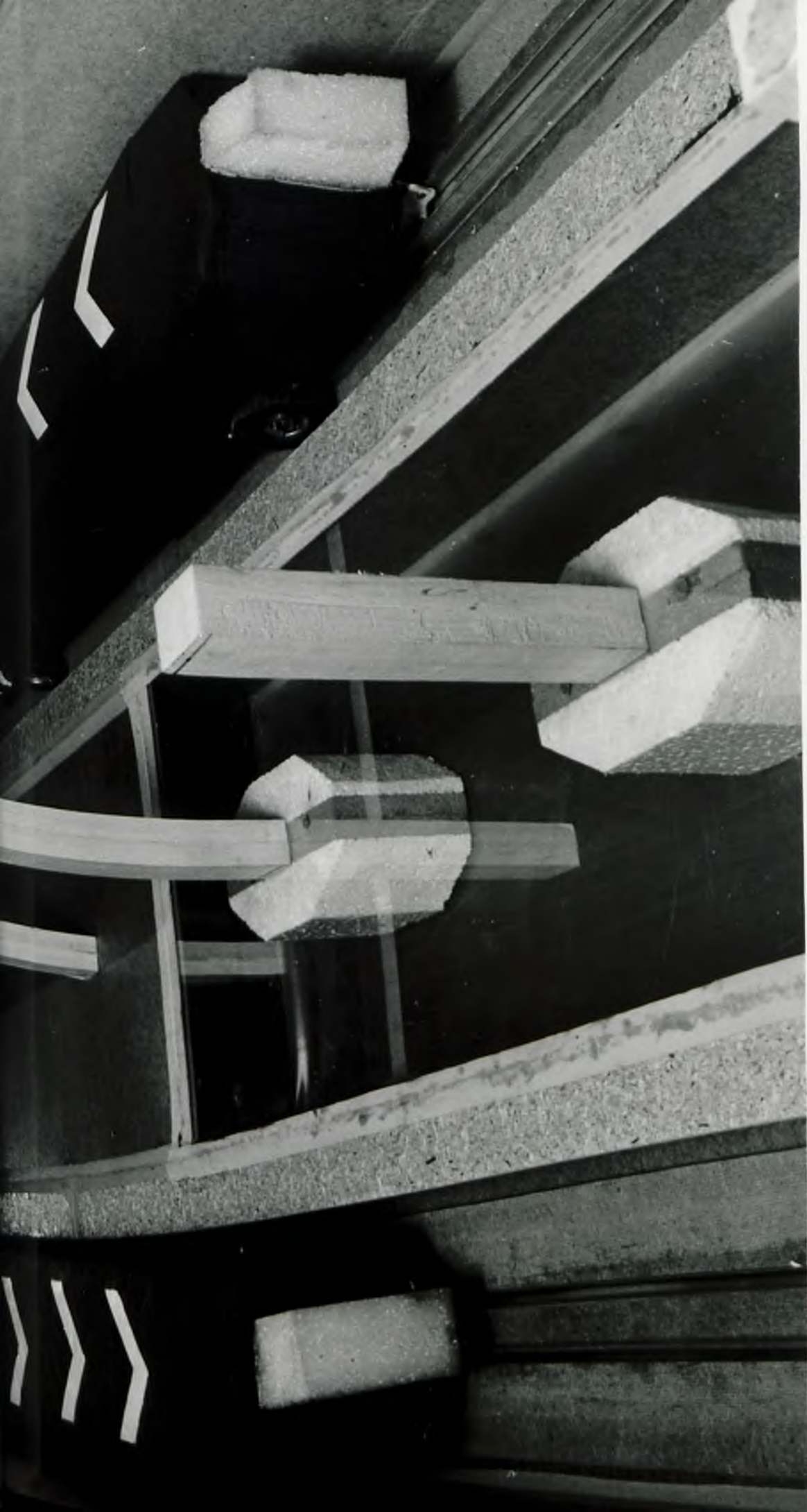
Rys. 5.3 Schemat układu do pomiaru i rejestracji ciśnienia oraz identyfikacji położenia pociągów.

- 5K - Przekrój pomiarowy
- 8 - Mikromanometr MDC
- 9 - Identyfikator położenia pociągów
- 10 - Elektroniczny rejestrator w układzie binarnym - APIR
- 11 - Voltomierz cyfrowy V530
- 12 - Dziurkarka DT-105

➔ Kierunek przepływu informacji



Rys. 5.5 Fragment modelu metra.



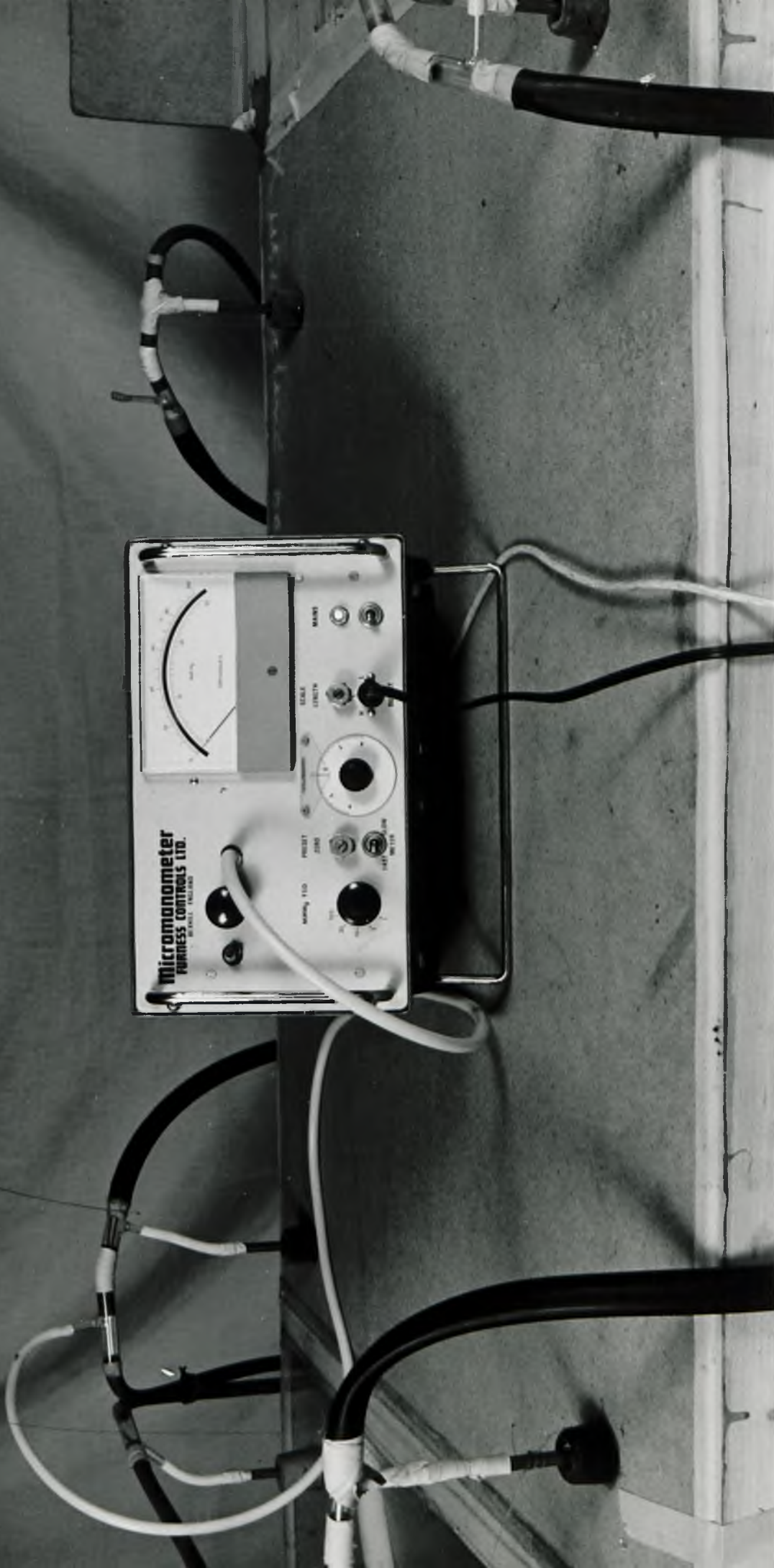
Rys. 5.6 Model stacji metra ze stojącymi pociągami.
Widok po usunięciu pokrywy.



Rys. 5.7 Model stacji metra.
Widok z poziomu peronu.



Rys. 58 Model wagonu metra .



Rys. 5-9 Mikromanometr MDC



Rys. 5.10 Zestaw aparatury do pomiaru i rejestracji ciśnienia oraz identyfikacji położenia pociągów.

zmieniać w określonych granicach. Konstrukcja modelu umożliwia również całkowite przegrodzenie łączników. Otrzymuje się wówczas dwa tunele rozdzielone na całej długości pełną ścianką.

Odrębny problem stanowił model pociągu / rys. 5.6., rys.5.7., rys.5.8. /. Nie mógł on mieć długości wynikłej ze skali liniowej - niemożliwa byłaby wówczas realizacja ruchu pociągu / długość modelu pociągu musiałaby wynosić wtedy około 6 m /. Wykonano więc dwa zestawy 2-wagonowe o długości 1,92 m każdy / zestaw 2-wagonowy dla każdego toru/. Zestawy takie, wprowadzisz rzadko, ale jeżdżą w obiektach naturalnych [15], [16]. Modele wagonów wykonane zostały ze styropianu. Każdy wagon wyposażony jest w silnik elektryczny prądu stałego. Względny techniczny nie pozwoliły realizować typowej dla metra sieci trakcyjnej w postaci szyny prądowej [141]. Powyższe rzutowało na konieczne odstępstwa w budowie podwozia modelu w stosunku do wzorca, polegające między innymi na zastosowaniu czterech gumowych kół.

Każdy wagon wyposażony jest w obudowane szczołki węglowe / łączące silniki elektryczne z szynami, do których doprowadza się napięcie /, łożyska prowadzące, zaś każdy zestaw - w swego rodzaju zderzaki z gąbki. Wagony wykonane w postaci bryły bez uwzględnienia pewnych szczegółów wyposażenia jak okna, drzwi itd. [12], [88], [138]. Konieczne zmiany i uproszczenia modeli wagonów w stosunku do pierwotnego wzoru zmieniają niewątpliwie wartość współczynnika c_x modelu pociągu w stosunku do obiektu naturalnego; ponieważ

nie znano jednak równocześnie współczynnika oporu czołowego wzorca ^{1/}, postawiono - dla badań służących stricte sprawdzeniu prawidłowości założeń oraz samego modelu matematycznego - zmienić tylko wówczas model pociągu, gdy jego zmierzony σ_x odbiegnie od podanego w literaturze przedziału wartości dla pociągów metra.

Do podłoża modelu, w tunelach i na stacji, przymocowano szyny wykonane z kątowników aluminiowych. Na całym modelowanym odcinku metra tory podzielono na sześć sekcji, w tym jedna bez napięcia / rys.5.2. /. Sekcje te połączone z siecią elektryczną za pomocą autotransformatorów. W układ włączone jest także urządzenie ^{2/} sterujące ruchem pociągów. Pozwala ono na realizowanie różnych wariantów ruchu pociągów np. : jednoczesny wjazd obu pociągów z przeciwnych kierunków na stację, jednoczesny ich odjazd itp. Opisany układ elektryczny umożliwia, po ustawieniu odpowiednich wartości napięcia na autotransformatorach, osiągnięcie w modelu prawie wszystkich etapów ruchu pociągu.

Dla ewentualnych badań rozkładu ciśnienia przy ruchu pociągów i działającej wentylacji, model wyposażono w instalację nawiewno - wywiewną / rys. 5.4. /.

Powietrze nawiewane i wywiewane jest z modelu przy pomocy trzech wentylatorów ^{3/}.

1/ W źródle [141] brak jest jakichkolwiek na ten temat wiadomości, zaś Codikow w kolejnych wydaniach książki [15], [16] podaje rozbieżne informacje.

2/ Wykonane we własnym zakresie.

3/ Zastosowano odkurzacze przemysłowe, $V = 450 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 15 \text{ kPa}$.

Instalację wentylacyjną wykonano tak, że możliwe jest zarówno nawiewanie powietrza do obu tuneli przy jednoczesnym wywiewie / przez specjalnie do tego celu przystosowane otwory i przewody wykonane na stacji / powietrza przez stację, co odpowiada kierunkowi przepływu powietrza, jaki jest realizowany w tunelach i na stacjach w okresie zimowym, jak i wywiewanie powietrza przez tunele przy jego nawiewie na stację, co z kolei jest charakterystyczne dla okresu letniego / porównaj rys. 1.2./ [15], [16], [63], [64], [68], [69], [99], [141]. Regulacja objętości strumienia masy powietrza nawiewanego i wywiewanego przez wentylatory realizowana jest przy pomocy przepustnic.

Dla zapewnienia równomiernego przepływu powietrza w tunelach modelu i wyeliminowaniu wahań ciśnienia, zespoły wentylacyjne połączone zostały z modelem przez komory wyrównawcze / rys. 5.1., rys. 5.4. /. Komory te usytuowane na obu końcach tuneli oraz nad stacją / rys. 5.5. /.

Pomiędzy komorami wyrównawczymi a wentylatorami znajdował się dostatecznie długi, prosty odcinek przewodu blaszanego, w którym zamontowano: kryzę do pomiaru objętości strumienia masy przepływającego powietrza, pierścien Recknagla do pomiaru ciśnienia statycznego w przewodzie, termometr do pomiaru temperatury przepływającego powietrza oraz wykonano dwa otwory pod kątem 90° pozwalające na pomiar rozkładu ciśnienia w przewodzie przy pomocy rurek ciśnienia całkowitego i statycznego. Termometry zostały także umieszczone w komorach wyrównawczych oraz w otoczeniu modelu, co pozwalało

w sposób ciągły kontrolować ewentualną wymianę ciepła pomiędzy powietrzem przepływającym w tunelach a powietrzem otaczającym.

Dla pomiarów ciśnienia statycznego wzdłuż całego modelu fragmentu metra wyznaczone 27 charakterystycznych przekrojów. W każdym z nich zainstalowano pierścień zbierający impulsy ciśnienia mierzone w czterech punktach leżących na obwodzie każdego z przekrojów, a gdy to było niemożliwe na skutek np. trudnego dostępu, przynajmniej w trzech punktach [70]. Ciśnienie statyczne mierzono mikromanometrem MDC / rys.5.9. /.

Przy pomiarach rozkładu ciśnienia wewnątrz tuneli i na stacji istotną sprawą było oznaczenie aktualnego położenia pociągu w czasie pomiaru. Problem ten rozwiązano przez zainstalowanie w niektórych przekrojach pomiarowych / oznaczonych literą "K" - rys.5.3., rys.5.4. / pomiędzy szynami - kontaktronów, których zwarcie przez magnes umieszczony pod podwoziem wagonu, w chwili jego przejazdu przez dany przekrój, było rejestrowane jako sygnał elektryczny.

Mierzone ciśnienie oraz położenie pociągu w tunelu rejestrowane były na taśmie przy pomocy specjalnie zaprojektowanego i wykonanego układu złożonego z identyfikatora położenia pociągów, rejestratora APIR, woltomierza cyfrowego V-530 oraz dziurkarki DT - 105. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys.5.4. zaś sam zestaw aparatury do pomiaru i rejestracji ciśnienia oraz identyfikacji położenia pociągów na rys.5.10.

Jak wynika z opisu, wykonany model fragmentu metra

może służyć, co było intencją autora, do dużo szerszych badań niż wymagane do niniejszej pracy.

Nie wszystkie jednak wyniki pomiarów, co należy podkreślić, po przeliczeniu przez odpowiednie skale mogą być reprezentatywne dla obiektu rzeczywistego. Odnosi się to dla przykładu, do zmierzonych spadków ciśnienia podczas przejazdu pociągu przez tunel. Rozkład ciśnienia, a zatem również przepływy powietrza, są w tym przypadku prawdopodobnie różne w modelu i w rzeczywistości ze względu choćby na inną długość tuneli modelu i obiektu naturalnego oraz na fakt istnienia w modelu komór wyrównawczych / jeśli nawet założymy jednakowe wartości w modelu i wzorcu λ i σ_x /.

Wpływ koniecznych zmian i uproszeń wprowadzonych w budowie modelu mógłby być oceniony dopiero po przeprowadzeniu badań na obiekcie naturalnym, co miałoby znaczenie także dla przyszłych, podobnych prac.

Niemniej, o czym już wspomniano, wprowadzone uproszczenia i zmiany nie odgrywają roli w sprawdzeniu poprawności modelu analitycznego.

5.5. Pomiar współczynnika tarcia λ dla tuneli modelu metra

5.5.1. Metodyka pomiarów

Zasadnicze pomiary współczynnika tarcia λ dla tuneli poprzedzono pomiarami i czynnościami wstępnymi, do których należało: przecechowanie kryz, sprawdzenie szczelności modelu, określenie czasu i dokładności stabilizacji

temperatury wewnątrz modelu tunelu oraz dokładności natężenia przepływu objętości powietrza.

Kryzy zamontowane w blaszanych przewodach łączących komory wyrównawcze z wentylatorami zostały przecechowane dla ośmiu przepływów każda. Dla każdej z kryz określono zależność pozwalającą obliczyć strumień objętości przepływającego powietrza w funkcji spadku ciśnienia na kryzie.^{1/}

Szczelność modelu sprawdzona została na drodze pomiaru bilansu powietrza nawiewanego i wywiewanego z modelu.

Podczas przepływu przez wentylatory powietrze podnosi swoją temperaturę. Widoczne jest to zwłaszcza przy znacznym dławieniu przepływu^{2/}. Wstępne pomiary dowiodły, że temperatura powietrza w modelu stabilizuje się maksymalnie po upływie 10 min. od momentu zmiany przepływu. Temperatura powietrza mierzona była legalizowanymi termometrami rtęciowymi z dokładnością $\pm 0,1$ K.

Spadki ciśnienia mierzone były na prostym odcinku tunelu pomiędzy przekrojami 8 - 12, na długości 8,85 m. Pomiary strat ciśnienia wykonywano mikromanometrem MDC z dokładnością ± 1 %.

Wykonano 6 serii pomiarowych dla 19 strumieni objętości powietrza, oddzielnie dla każdego z dwóch przyległych tuneli.

W czasie badań uzyskiwano dokładność stabilizacji

1/ W pracy nie podano omawianych zależności, bowiem nie mają one istotnego znaczenia z merytorycznego punktu widzenia.

2/ Podczas badań powietrze ogrzewało się po przejściu przez wentylator maksymalnie o około 4 K.

temperatury wewnątrz modelu $\Delta t = \pm 0,5 \text{ K}$ oraz dokładność natężenia przepływu objętości powietrza $\Delta \dot{V} = \pm 0,020 \dot{V}$.

5.5.2. Wyniki pomiarów

Celem badań było określenie zmienności współczynnika tarcia λ modelu tunelu metra w możliwie szerokim zakresie objętości strumienia masy powietrza / co oczywiście limitowane było możliwościami aparatury pomiarowej, wentylatorów /, a następnie porównanie z przewidywanymi wartościami dla tuneli projektowanego metra warszawskiego.

Współczynnik λ obliczone wykorzystując znany wzór Darcy - Weisbacha. Analiza wartości współczynników tarcia dla tunelu I i tunelu II wykazała praktycznie nieistotne różnice. Przyjąć można, że obydwa tunele mają jednakowo zmienny współczynnik tarcia. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5.11. Każdy punkt $\lambda = f(\text{Re})$ na omawianym rysunku jest średnią arytmetyczną z 12 pomiarów.

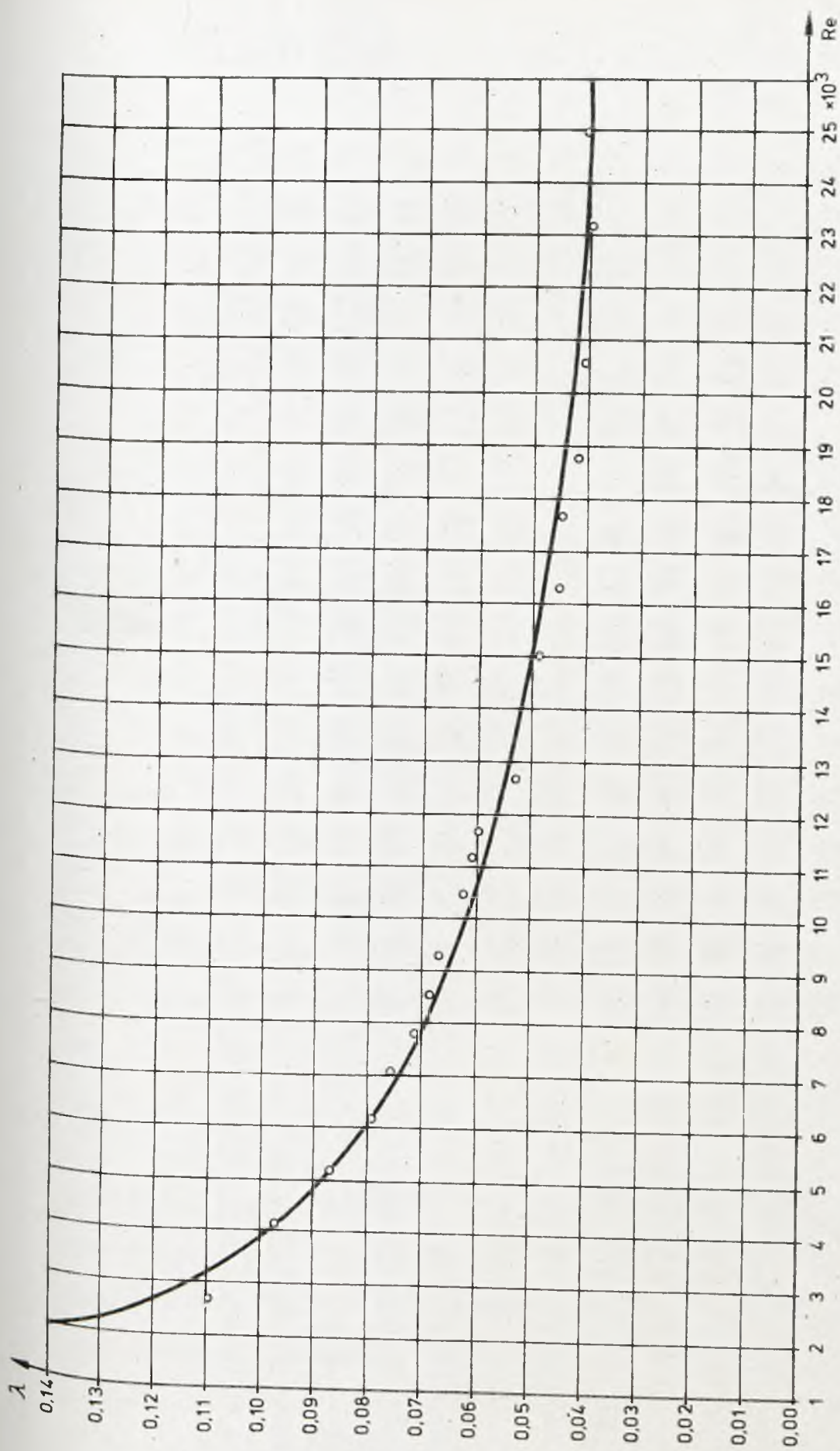
Zbiór punktów aproksymowano zależnością wykładniczą [24], [68], [104]

$$\lambda = A \cdot \text{Re}^{\alpha} \quad (5.9)$$

Logarytmując powyższe wyrażenie sprowadzono funkcję wykładniczą do postaci

$$\ln \lambda = \ln A + \alpha \cdot \ln \text{Re} \quad (5.10)$$

Podstawiając nowe zmienne



Rys. 5.11 Zależność $\lambda = f(Re)$ dla modelu tunelu metra.

$$x = \ln Re , \quad (5.11.)$$

$$y = \ln \lambda , \quad (5.12.)$$

$$a' = \ln A , \quad (5.13.)$$

$$b' = \alpha , \quad (5.14.)$$

otrzymano funkcję liniową

$$y = a' + b' \cdot x . \quad (5.15.)$$

Dla tak otrzymanych wielkości $x(i)$ i $y(i)$ określających punkty pomiarowe obliczono współrzędne $\bar{x}$ i $\bar{y}$ wyznaczające położenie " środka ciężkości " zbioru

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i) , \quad (5.16.)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y(i) , \quad (5.17.)$$

przez który powinna przechodzić poszukiwana funkcja. Następnie, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, wyznaczono funkcję aproksymującą. W tym celu określono funkcję pomocniczą

$$F[x(i)] = \sum_{i=1}^n [y(i) - y_0(i)]^2 = \sum_{i=1}^n [y(i) - (a' + b' \cdot x(i))]^2 , \quad (5.18.)$$

gdzie: $y_0(i)$ - wielkość zmiennej zależnej określona z aproksymowanej funkcji (5.15.) dla określonej wielkości $x(i)$.

Ażebym określić wielkość stałych a' i b' przeprowadzono minimalizację funkcji $F[x(i)]$.

W tym celu powinny być spełnione następujące warunki:

$$\frac{\partial F}{\partial a'} = 0 , \quad (5.19.)$$

oraz

$$\frac{\partial F}{\partial b'} = 0 \quad (5.20)$$

skąd można wyznaczyć wielkość współczynników a' i b'

$$b' = \frac{\sum_{i=1}^n x(i) \cdot y(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \cdot \sum_{i=1}^n y(i)}{\sum_{i=1}^n [x(i)]^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n x(i) \right]^2}, \quad (5.21)$$

$$a' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[y(i) - b' \cdot \sum_{i=1}^n x(i) \right] \quad (5.22)$$

Powracając do poprzednich zmiennych otrzymuje się

$$b' = \frac{\sum_{i=1}^n \ln Re(i) \cdot \ln \lambda(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln Re(i) \cdot \sum_{i=1}^n \ln \lambda(i)}{\sum_{i=1}^n [\ln Re(i)]^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \ln Re(i) \right]^2}, \quad (5.23)$$

oraz

$$a' = \exp \left\{ \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \ln \lambda(i) - b' \sum_{i=1}^n \ln Re(i) \right] \right\} \quad (5.24)$$

Wielkości liczbowe współczynników a' i b' określono korzystając ze standardowego programu przygotowanego dla

EMC - Tektronix 31 [140] otrzymując zależność $\lambda = f(Re)$

w postaci

$$\lambda = 6,395 \cdot Re^{-0,503} \quad (5.25)$$

przy współczynniku korelacji $r = - 0,988^{1/}$.

Funkcję opisaną wzorem (5.25.) przedstawiono również, obok wspomnianych wyżej punktów otrzymanych w wyniku pomiarów na rys.5.11. Jak wynika z przedstawionego wykresu $\lambda \approx \text{const}$ praktycznie dla $Re > 2 \times 10^4$, osiągając wartość $\leq 0,04$.

Obliczona wartość współczynnika tarcia λ dla projektowanych tuneli metra warszawskiego waha się w granicach $0,032 \div 0,035$ / tunel monolityczny / [65], [68]^{2/}. Są to wartości dla niepełnego uzbrojenia, które w trakcie wstępnego projektu nie mogło być w pełni określone [141]. Przy pełnym uzbrojeniu tuneli współczynnik tarcia byłby nieco większy [15], [16].

W świetle powyższego wydaje się, że otrzymany współczynnik tarcia λ modelu fragmentu tunelu metra jest całkowicie satysfakcjonujący.

5.5.3. Analiza dokładności pomiarów

Dokładność wyznaczania wielkości pomiarowych zestawiono w tablicy 5.2.

1/ Sposób określenia współczynnika korelacji omówiono w punkcie 5.5.4.

2/ λ obliczono przy pomocy programu LAMBDA M dla EMC Odra 1204 opracowanego w Instytucie Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej. W wyposażeniu tuneli uwzględniono szyny, szynę prądową, kable wraz ze wspornikami oraz wsporniki bez kabli.

Tablica 5.2.

Lp.	RODZAJ I SPOSÓB OKREŚLANIA WIELKOŚCI	OZNACZENIE	JEDN. MIARY	B Ł A, D
1	Temperatura (termometry szklane)	δt_s	K	$\pm 0,080$
2	Różnica temperatury (termometry szklane)	$\delta(\Delta t_s)$	K	$\pm 0,113$
3	Strumień objętości (kryza JSA)	$\delta \dot{V}$	m ³ /s	$\pm 0,020 \cdot \dot{V}^1)$
4	Różnica ciśnienia (mikromanometr MDC)	$\delta(\Delta p)$	N/m ²	$\pm 0,139$
5	Wymiary liniowe tunelu rurociągu	δL_t	m	$\pm 0,001$
		δL_r	m	$\pm 0,001$
6	Parametry fizyczne płynu (z tablic)	różne		$\pm 0,000$

1) Zgodnie z PN-65/M - 53950

Dla oceny dokładności pomiarów współczynnika tarcia λ w funkcji liczby Reynoldsa posłużono się średnim błędem kwadratowym.

Zakładając dowolną zależność funkcyjną między wielkością złożoną Z a mierzonymi wielkościami podstawowymi $x_a, x_b, x_c, \dots, x_n$ w postaci

$$Z = f(x_a, x_b, x_c, \dots, x_n) \quad (5.26)$$

średni błąd kwadratowy oblicza się ze wzoru [70] :

$$\delta(Z) = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_a} \cdot \delta(x_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_b} \cdot \delta(x_b)\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \cdot \delta(x_n)\right)^2} \quad (5.27)$$

gdzie:

$\frac{\partial Z}{\partial x}$ - pochodne cząstkowe wielkości złożonej Z ,

$\delta(x)$ - średnie błędy bezwzględne wielkości podstawowych.

Uwzględniając powyższe, średni błąd kwadratowy współczynnika tarcia λ wynosi:

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial (\Delta p)} \cdot \delta(\Delta p)\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial L_r} \cdot \delta L_r\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial L_t} \cdot \delta L_t\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial \varrho} \cdot \delta \varrho\right)^2} \quad (5.28)$$

Ponieważ $\delta \varrho = 0$, zależność (5.28.) przyjmie postać

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial \lambda}{\partial (\Delta p)} \cdot \delta(\Delta p)\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial L_r} \cdot \delta L_r\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial L_t} \cdot \delta L_t\right)^2} \quad (5.29)$$

Podobnie średni błąd kwadratowy wyznaczenia liczby Re wynosi:

$$\delta Re = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial L_r} \cdot \delta L_r\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial v} \cdot \delta v\right)^2} \quad (5.30)$$

zaś pomijając składnik $\frac{\partial Re}{\partial v} \cdot \delta v$ z racji $\delta v = 0$

$$\delta Re = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial L_r} \cdot \delta L_r\right)^2} \quad (5.31.)$$

Błędy względne wyznaczonych wielkości określone są z zależności:

- współczynnika tarcia λ

$$\sigma \lambda = \frac{\delta \lambda}{\lambda} \cdot 10^2 \quad (5.32.)$$

- liczby Reynoldsa

$$\sigma Re = \frac{\delta Re}{Re} \cdot 10^2 \quad (5.33.)$$

Dla większości wykonanych pomiarów obliczony błąd względny współczynnika tarcia $\sigma \lambda$ przy maksymalnym strumieniu objętości powietrza / $Re = 25000$ / nie przekracza 4 %. Przy $Re \approx 10000$ błąd względny współczynnika tarcia λ nie przekracza 10 %. Dla bardzo małego natężenia przepływu objętości powietrza / $Re \approx 2600$ / $\sigma \lambda$ dochodzi do 60 % / która to wartość nie ma praktycznie znaczenia, bowiem ruch powietrza w modelu wywoływany przejazdem pociągu odbywa się przy wielokrotnie większych liczbach Re - patrz pkt. 5.7.2. /. Związane to jest z ograniczonymi możliwościami istniejących przyrządów przy pomiarach bardzo małych spadków ciśnienia.

Obliczony błąd względny liczby Reynoldsa σRe nie przekracza dla większości pomiarów 2,4 % przy minimalnym strumieniu objętości powietrza i 1,4 % przy maksymalnie

osiągniętym natężeniu przepływu objętości^{1/}.

Ponadto można stwierdzić, że obliczone błędy względne odnoszą się do pojedynczego pomiaru, natomiast wszystkie wielkości były określane jako średnie z 12 pomiarów, a zatem błędy względne są w rzeczywistości mniejsze. Również rozrzut punktów pomiarowych na rys. 5.11. wykazuje dobrą zgodność wielkości zmierzonych z otrzymaną zależnością (5.25.).

5.5.4. Analiza statystyczna doświadczalnej weryfikacji funkcji $\lambda = f(\text{Re})$

W celu określenia dokładności "dopasowania" omawianej w punkcie 5.5.2. funkcji wykładniczej opisanej równaniem (5.9.) do zbioru punktów $y_0(i)$ uzyskanych z bezpośrednich pomiarów zastosowano następujące wskaźniki przedstawione w literaturze [70], [82], [115], [140]:

- odchylenie standardowe punktów pomiarowych od "środka ciężkości" zbioru określonego równaniami (5.16.), (5.17.)

$$S_x = \frac{\sum_{i=1}^n [x(i)]^2 - \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n x(i)]^2}{n-1}, \quad (5.34.)$$

$$S_y = \frac{\sum_{i=1}^n [y(i)]^2 - \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n y(i)]^2}{n-1}, \quad (5.35.)$$

^{1/} Obliczenia błędów znajdują się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

- empiryczny współczynnik korelacji

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x(i) \cdot y(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i) \cdot \sum_{i=1}^n y(i)}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n [x(i)]^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n x(i) \right]^2 \right\} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^n [y(i)]^2 - \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n y(i) \right]^2 \right\}}} \quad (5.36.)$$

Graniczne wartości współczynnika korelacji r_{gr} w zależności od przyjętego poziomu ufności α_u podano w literaturze [70], [82]. Współczynnik korelacji dla zależności (5.25.) jest bliski jedności, a zatem zachodzą mocne zależności korelacyjne.

5.6. Pomiar współczynnika oporu czołowego modelu pociągu

5.6.1. Uwagi ogólne

Przy opływie ciała jednorodnym strumieniem płynu lepkiego obowiązuje prawo względności ruchu, w myśl którego reakcja wywierana przez płyn na ciało stałe zależy tylko od prędkości względnej ciała stałego i płynu. Wielkość reakcji jest przy tej samej prędkości względnej taka sama dla ciała nieruchomego, opływanego płynem i ciała poruszającego się w płynnym ośrodku nieruchomym [11].

Reakcja płynu na ciało stałe jest sumą wypadkowych sił stycznych wywołanych lepkością, występujących na powierzchni ciała i sił ciśnieniowych, skierowanych normalnie do poszczególnych elementów powierzchni opływanego ciała. Istotnym czynnikiem, obok lepkości, wpływającym na wielkość sił ciśnieniowych jest, w zakresie dużych prędkości ruchu względnego ciała stałego i ośrodka gazowego, ściśliwość tego ośrodka [4], [11], [101].

W przypadku ciał mających oś symetrii lub płaszczyzną symetrii równoległą do kierunku ruchu względnego, nie występuje składowa reakcji prostopadła do kierunku ruchu / siła nośna /, a jedynie składowa reakcji równoległa do kierunku ruchu / opór /. Składową oporu wyraża się jako

$$P_x = c_x \cdot \frac{\rho \cdot u_\infty^2}{2} \cdot S \quad (5.37)$$

Liczbę bezwymiarową c_x wskazującą na proporcjonalność oporu do kwadratu prędkości / tzw. " prędkości w nieskończoności ", a więc prędkości niezakłóconego obecnością przeszkody przepływu równoległego w stronę dodatnią osi x /, gęstości ośrodka i powierzchni odniesienia nazywa się współczynnikiem oporu czołowego [4], [11]. W ogólnym przypadku wielkość tego współczynnika zależy od kształtu ciała, przyjętej powierzchni odniesienia, od liczby Reynoldsa i liczby Macha [4], [11], [12], [101], [139]. Najczęściej powierzchnia odniesienia równa jest powierzchni rzutu opływanej bryły na płaszczyznę prostopadłą do kierunku niezaburzonego strumienia [4], [11], [12], [26], [100], [101], [120], [138]. Rzadziej powierzchnia odniesienia przyjmowana jest np. jako powierzchnia omywana [37], [38], [77], [106].

Ogólnie stwierdzić można, że całkowity współczynnik oporu składa się ze współczynnika oporu ciśnieniowego i współczynnika oporu tarcia [11]:

$$C_x = C_{xc} + C_{xt} \quad (5.38)$$

Określony w ten sposób współczynnik nie obejmuje składnika tzw. oporu falowego występującego przy bardzo dużych prędkościach przepływu.

W przypadku pociągu poruszającego się w tunelu, przyjąć można za [23], iż siła działająca na pojazd składa się z pięciu następujących elementów:

- oporu na przodzie pociągu,
- siły tarcia na ścianach cylindrycznych pojazdu,
- gradientu ciśnienia występującego w obszarze pierścienia / pomiędzy pociągiem a tunelem / wskutek istniejącego tarcia powierzchniowego na cylindrycznej ścianie pojazdu,
- gradientu ciśnienia występującego w obszarze pierścienia wskutek tarcia powierzchniowego na ścianie otaczającego pojazd tunelu,
- oporu na tyle pociągu.

Należy zaznaczyć, że podział ten jest całkowicie umowny, bowiem praktycznie wszystkie wyszczególnione wyżej elementy wzajemnie na siebie oddziałują i być może, niektóre z nich, powinny być rozpatrywane razem. Niemniej przedstawiony wyżej podział siły oporu aerodynamicznego umożliwia prawidłowy jej analityczny opis [23]. W literaturze znaleźć można inne propozycje podziału siły oporu na poszczególne elementy, dające oczywiście w rezultacie ten sam efekt końcowy [38], [76], [90], [107], [110], [127].

Wielu badaczy podaje wzory na współczynnik oporu czołowego pociągu w oparciu o badania przeprowadzone na obiektach naturalnych [15], [16], [32], [50], [102]. Inni

podają zależności analityczne.

Współczynnik oporu czołowego pociągu odnoszony jest często do powierzchni czołowej pojazdu i jego prędkości względem ścian tunelu. Wówczas

$$C_x = \frac{P_x}{F_w \cdot \frac{\rho \cdot V_w^2}{2}} \quad (5.39.)$$

W takiej formie wzór na współczynnik oporu podają między innymi Gouse [38], Dayman [21], [23], Nayak [89], Valensi [127], Sajben [107]. Oczywiście każdy ze wspomnianych badaczy wprowadza inne zależności opisujące siłę P_x , a zatem wzory końcowe są w rezultacie różne.

Współczynnik oporu czołowego pociągu odnoszony jest czasem do pola powierzchni przekroju tunelu i jak wyżej, prędkości pojazdu względem ścian tunelu [45], [102], lub do pola powierzchni czołowej pojazdu i różnicy prędkości ruchu pociągu i powietrza [91], [125].

5.6.2. Metodyka pomiarów

Przy określaniu współczynnika oporu czołowego pociągów metra należy uwzględniać wpływ ścian tunelu [28], [37], [38]. W zależności od typu rozpatrywanego tunelu i pociągu, jego opór aerodynamiczny podczas jazdy w tunelu jest 2 ÷ 8-krotnie większy niż w otwartej przestrzeni [32], [99], [114]. Dlatego też badania współczynnika C_x tego typu pojazdów nie są z reguły przeprowadzane w tunelach aerodynamicznych, bowiem otrzymane tam wartości nie uwzględniałyby prawidłowego wpływu ścian, a raczej byłyby właściwe dla pociągów

poruszających się w otwartej przestrzeni [21] , [28] , [38] .

W niniejszej pracy postanowiono więc, dla zbadania współczynnika oporu czołowego modelu pociągu, wykorzystać wykonany model tunelu metra. Ideałem byłaby możliwość ciągłego pomiaru σ_x przy ruchu pociągu w tunelu [22] , [23]. Jednak poważne trudności techniczne, brak odpowiedniej aparatury niezbędnej przy tego rodzaju pomiarach, spowodowały zastosowanie metody pośredniej pomiędzy wykorzystaną kiedyś przez Langerę [125] i stosowaną ostatnio przez Daymana i współpracowników [23] , [82] , [84] .

Pociąg ustawiony został w tunelu I / podczas wszystkich serii pomiarowych zawsze tak, iż jego początek był w przekroju 7 K /, do którego nawiewano powietrze. Równocześnie mierzono stratę ciśnienia pomiędzy przekrojami 3 i 12 . Zastosowana metoda nie zapewnia, niestety, pełnego odwzorowania warunków brzegowych, bowiem ściany tunelu są w tym przypadku nieruchome w stosunku do pociągu. Ocenia się, że błąd wynikły z niedotrzymania powyższego waha się w granicach 3 - 5 % [25] .

Podobnie jak przy pomiarach λ , przed przystąpieniem do zasadniczych badań, sprawdzono szczelność modelu, określono czas i dokładność stabilizacji temperatury wewnątrz modelu tunelu, otrzymując w tym wypadku identyczne wyniki jak w punkcie 5.5.1. Temperatura powietrza mierzona była legalizowanymi termometrami rtęciowymi z dokładnością $\pm 0,1$ K. Pomiary strat ciśnienia wykonywano mikromanometrem MDC z dokładnością ± 1 %. Wykonano 6 serii pomiarowych dla 21 przepływów, dla trzech różnych przypadków, a mianowicie:

pociągu złożonego z jednego wagonu, z dwóch wagonów oraz dwóch wagonów połączonych opaską / opaska zakrywała całkowicie szczelinę pomiędzy dwoma połączonymi wagonami /.

W czasie badań uzyskiwano dokładność stabilizacji temperatury wewnątrz modelu $\Delta t = \pm 0,5$ K oraz dokładność natężenia przepływu objętości powietrza $\Delta \dot{V} = \pm 0,02$ $\dot{V}$.

5.6.3. Wyniki pomiarów

Przeprowadzone pomiary miały na celu znalezienie wartości współczynnika oporu czołowego α_x modelu pociągu oraz stałych α_1 i α_3 występujących w zależności (4.31.).

Zgodnie z uwagami zawartymi w punkcie 4.2. stratę ciśnienia wzdłuż pociągu można wyrazić wzorem:

$$\Delta p_w = \pm \left[\lambda \cdot \frac{L_w \cdot C_1}{D_t \cdot k} \cdot \frac{V_w \cdot V_p \cdot C \cdot C_2 - V_p^2}{2} \cdot \rho - C_3 \left(1 + \frac{1}{X_w^4} \right) (V_p + V_s)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \right] \quad (5.40.)$$

$$"+ " \quad \text{gdy} \quad \frac{V_p}{V_w} < X_w^2,$$

$$"- " \quad \text{gdy} \quad \frac{V_p}{|V_w|} > X_w^2.$$

W przypadku, gdy pociąg będzie nieruchomy / $v_w = 0$ /, zaś ruch powietrza wywoływany będzie wentylacją mechaniczną, wtedy

$$\Delta p_w = \lambda \cdot \frac{L_w \cdot C_1}{D_t \cdot k} \cdot \frac{V_p^2 \cdot \rho}{2} + C_3 \left(1 + \frac{1}{X_w^4} \right) (V_p + V_s)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \quad (5.41.)$$

Na podstawie prac [23], [32] założono, iż występujące w powyższej zależności stałe α_1 i α_3 , przy danym współczyn-

niku wypełnienia β , długości tunelu, określonej liczbie Re itp., nie zależą praktycznie od długości pociągu.

Δp_w , dla poszczególnych strumieni objętości powietrza, znajduje się po odjęciu od zmierzonego spadku ciśnienia na odcinku 2 - 12 oporu liniowego tej części tunelu, w której nie ma pociągu / opór liniowy tunelu łatwo jest obliczyć przy danym natężeniu objętości przepływu powietrza wykorzystując znaną poprzednio funkcję $\lambda = f(Re)$ /.

Znaleziony w powyższy sposób opór aerodynamiczny pociągu Δp_w wykazywał nieznaczne różnice w poszczególnych seriach pomiarowych dla określonej długości i rodzaju pociągu / to znaczy dla jednego wagonu, dla dwóch wagonów połączonych opaską i dwóch wagonów bez opaski /. Stałe c_1 i c_3 obliczone zostały w oparciu o pomiary dla pociągu jednowagonowego oraz złożonego z dwóch wagonów połączonych opaską / opaska eliminowała dodatkowy opór wynikający z istniejącej szczeliny pomiędzy wagonami [2] ; przy jej zastosowaniu otrzymywano w miarę jednorodną powierzchnię dla całego zestawu / przy pomocy prostego programu OCE^{1/} opracowanego dla EMC Odra 1204. Otrzymane zbiory punktów aproksymowane zostały zależnością wykładniczą przy pomocy standardowego programu przygotowanego dla EMC - Tektronix 31 [140] / porównaj pkt.5.5.2./ . W wyniku aproksymacji otrzymano następujące zależności:

$$c_1 = 0,0912 \cdot Re^{0,261} \quad (5.42.)$$

1/ Program znajduje się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

przy współczynniku korelacji $r = 0,809$ oraz

$$c_3 = 615,922 \cdot Re^{-0.817} \quad (5.43.)$$

przy współczynniku korelacji $r = 0,879^{1/}$.

Powyższe zależności pokazano na rys. 5.12. oraz rys. 5.13.

Na rysunkach przedstawiono również wartości $c_1 = f(Re)$ oraz $c_3 = f(Re)$ obliczone przy pomocy programu OCE / wartości c_1 oraz c_3 w każdym punkcie, dla określonej liczby Re są średnią arytmetyczną z 6 pomiarów /. Jak wynika z wykresów stałe c_1 i c_3 osiągają równocześnie praktycznie stałą wartość dla $Re \geq 2 \cdot 10^4$.

Współczynnik oporu czołowego modelu pociągu określono w oparciu o wzór (5.39.) / odnosząc go do prędkości napływającego powietrza [125] / uwzględniając zgodnie z [23], że

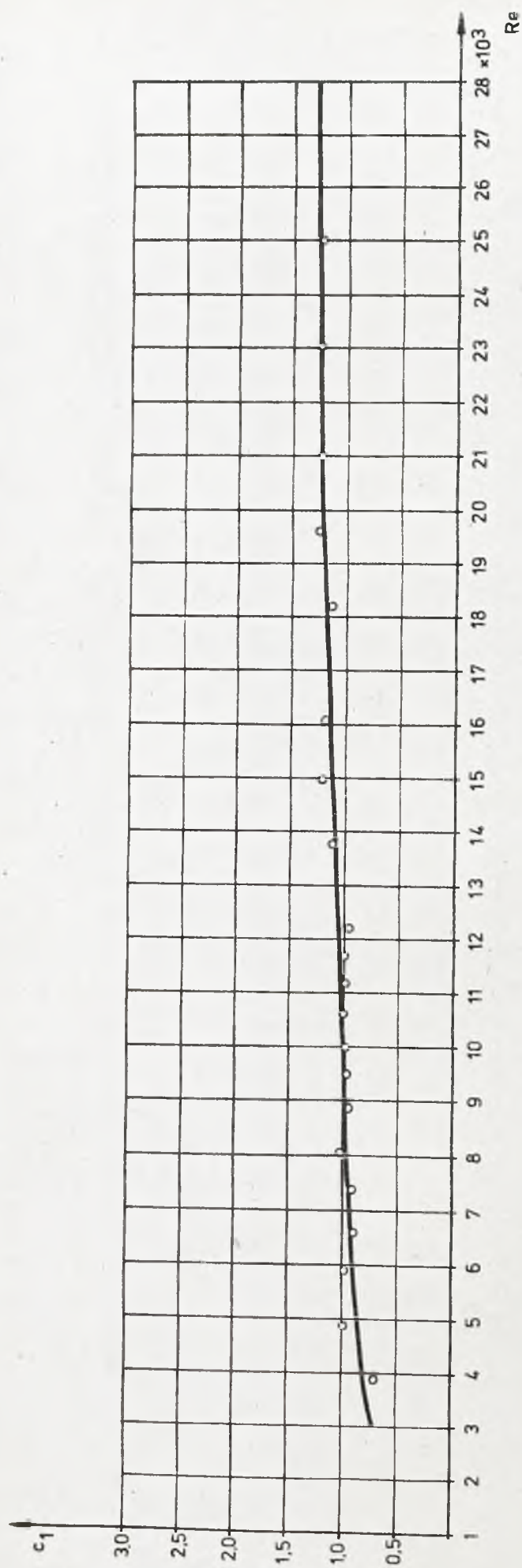
$$P_x = \Delta p_w \cdot F_t \quad , \quad (5.44.)$$

a więc wówczas

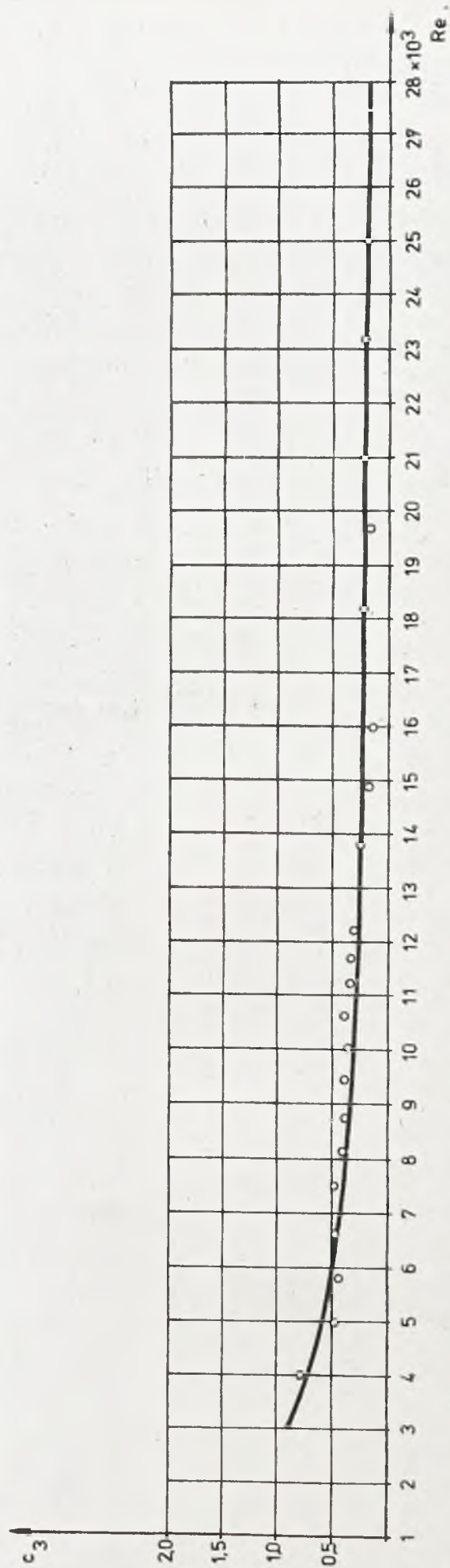
$$C_x = \frac{\Delta p_w \cdot F_t}{F_w \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}} \quad (5.45.)$$

Otrzymane według powyższej zależności wartości c_x w funkcji liczby Reynoldsa przedstawiono na rys. 5.14. oraz rys. 5.15. / wartość c_x w każdym punkcie dla określonej liczby Re jest średnią arytmetyczną z 6 pomiarów /. Na omawianych rysunkach zamieszczono również krzywe $c_x = f(Re)$ / $c_x = f(Re)$ /

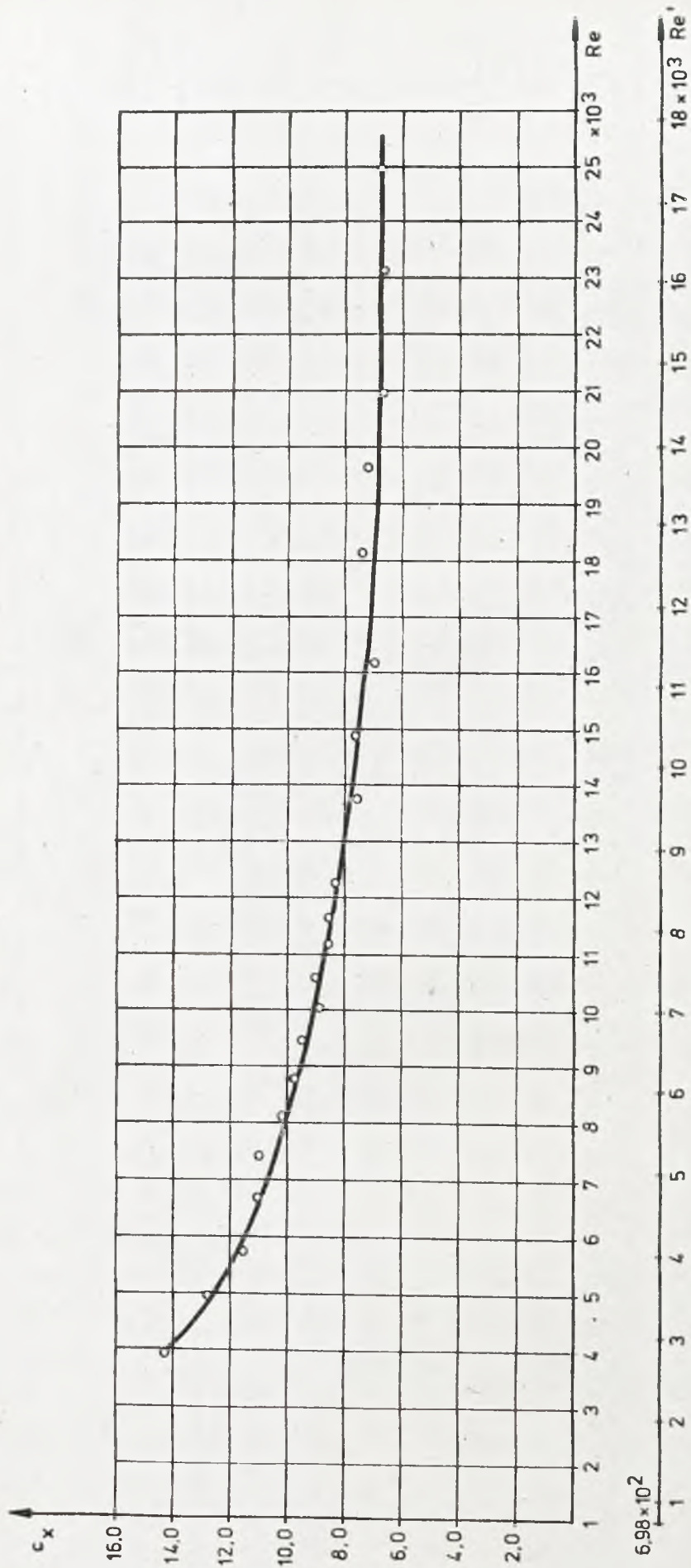
1/ Uwagi odnośnie empirycznego współczynnika korelacji zawarte są w punkcie 5.5.4.



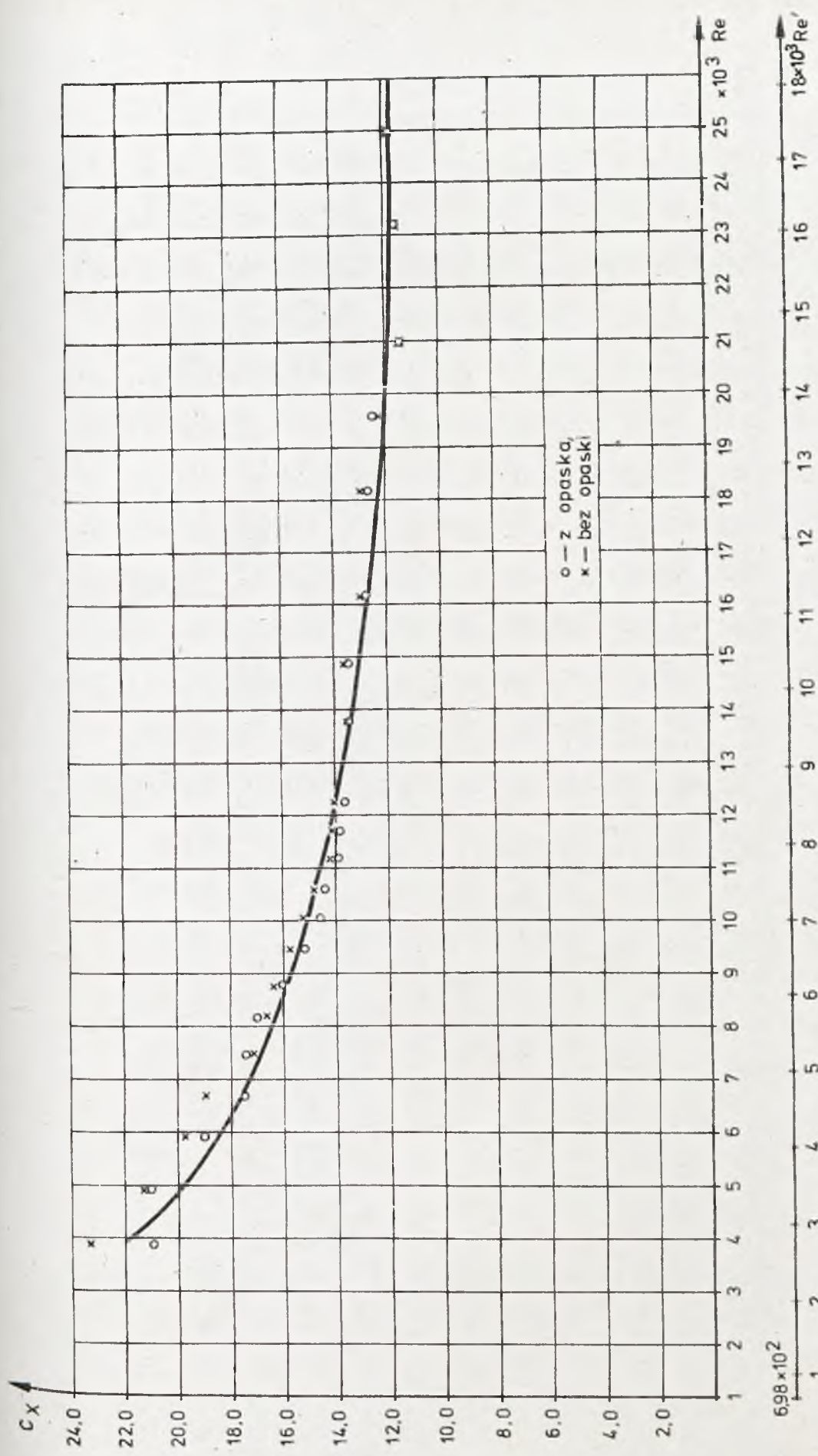
Rys. 5.12 Zależność $c_1 = f(Re)$.



Rys. 5.13 Zależność $c_3 = f(Re)$



Rys. 5.14 Współczynnik oporu modelu pociągu w funkcji liczby Reynoldsa ($\frac{L_w}{D_w} = 6,76$)



Rys. 5.15 Współczynnik oporu modelu pociągu w funkcji liczby Reynoldsa ($\frac{L_w}{D_w} = 13,65$).

otrzymane w wyniku podstawienia we wzorze (5.45.) oporu aerodynamicznego pociągu obliczonego z zależności (5.41.) przy uwzględnieniu (5.42.) oraz (5.43.) . Obliczeń tych dokonano na EMC Odra 1204 przy pomocy programu OC EX^{1/}.

Na rys. 5.15. zamieszczono również wartości współczynnika oporu dla dwóch wagonów nie połączonych opaską. Brak opaski zwiększa w sposób zauważalny współczynnik c_x pociągu dla $Re \leq 1,4 \times 10^4$. Powyżej tej wartości współczynniki oporu czołowego dla pociągu złożonego z dwóch wagonów bez opaski są praktycznie takie same jak dla pociągu składającego się z dwóch wagonów połączonych opaską. Stała wartość współczynnika c_x zarówno dla pociągu jednowagonowego jak i pociągu złożonego z dwóch wagonów / z opaską lub bez / ustala się w przybliżeniu dla $Re \geq 2 \times 10^4$ / $Re \geq 1,4 \times 10^4$ /. Wówczas dla pociągu jednowagonowego $c_x \approx 6,8$ zaś dla dwuwagonowego $c_x \approx 11,8$. Otrzymane wartości mieszczą się w granicach podawanych w literaturze [21] , [22] , [23] , [32] , [38] , [49] , [75] , [99]. Z drugiej zaś strony należy mieć na uwadze fakt, że współczynnik oporu czołowego pociągu jest wielkością charakterystyczną dla danego układu pociąg - tunel.

Do dalszych badań dotyczących rozkładu ciśnienia wzdłuż tunelu przy ruchu pociągu zastosowano pojazd dwuwagonowy bez opaski / łatwiejsze przemieszczanie się /,

- - - - -

^{1/} Program znajduje się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

bowiem gwarantowało to pewniejszy pomiar za pomocą posiadanej aparatury.

5.6.4. Analiza dokładności pomiarów

Podczas przeprowadzonych badań uzyskano dokładność wyznaczenia wielkości pomiarowych jak w punkcie 5.5.3. tablica 5.2.

Dla oceny dokładności pomiarów współczynnika oporu czołowego c_x w funkcji liczby Reynoldsa posłużono się średnim błędem kwadratowym. Uwzględniając zależność (5.27.) średni błąd kwadratowy współczynnika c_x wynosi:

$$\delta c_x = \sqrt{\left(\frac{\partial c_x}{\partial (\Delta p_w)} \cdot \delta (\Delta p_w)\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial F_t} \cdot \delta F_t\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial F_w} \cdot \delta F_w\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial \varrho} \cdot \delta \varrho\right)^2} \quad (5.46.)$$

Ponieważ $\delta \varrho = 0$ zależność (5.46.) przyjmie postać

$$\delta c_x = \sqrt{\left(\frac{\partial c_x}{\partial (\Delta p_w)} \cdot \delta (\Delta p_w)\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial F_t} \cdot \delta F_t\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial F_w} \cdot \delta F_w\right)^2 + \left(\frac{\partial c_x}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2} \quad (5.47.)$$

Średni błąd kwadratowy wyznaczenia liczby Reynoldsa wynosi zgodnie z uwagami zawartymi w punkcie 5.5.3.

$$\delta Re = \sqrt{\left(\frac{\partial Re}{\partial v_p} \cdot \delta v_p\right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial L_r} \cdot \delta L_r\right)^2} \quad (5.48.)$$

Błędy względne omawianych wielkości określa się z następujących zależności:

$$\sigma_{c_x} = \frac{\delta c_x}{c_x} \cdot 10^2 \quad , \quad (5.49.)$$

$$\sigma_{Re} = \frac{\delta Re}{Re} \cdot 10^2 \quad (5.50)$$

Błąd względny współczynnika oporu czołowego obliczono oddzielnie dla każdego zestawu pociągu^{1/}. I tak w przypadku pociągu jednowagonowego, dla większości wykonanych pomiarów, σ_{c_x} przy maksymalnym strumieniu objętości powietrza / $Re = 25000$ / nie przekracza 14 %. Dla bardzo małego natężenia przepływu objętości powietrza / $Re = 3900$ / błąd względny c_x nie przekracza 45 %. Tak duży błąd związany był w tym wypadku / podobnie jak przy pomiarach współczynnika tarcia λ / z ograniczonymi możliwościami pomiarowymi używanych przyrządów. Błąd względny c_x dla pociągu dwuwagonowego bez opaski nie przekracza 27 % przy $Re = 3900$ oraz 8 % przy $Re = 25000$. Podobnie kształtuje się błąd względny współczynnika oporu czołowego dla pociągu dwuwagonowego z opaską.

Obliczony błąd względny liczby Reynoldsa σ_{Re} dla większości pomiarów / porównaj pkt. 5.5.3. / nie przekracza 2,2 % przy najmniejszym strumieniu objętości powietrza i 1,4 % przy maksymalnie osiągniętym natężeniu przepływu objętości.

Podane wyżej błędy względne odnoszą się do

- - - - -
^{1/} Obliczenia błędów znajdują się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

pojedynczych pomiarów.

Jak wynika z zamieszczonych rysunków / rys. 5.14., rys. 5.15. / rozrzut punktów pomiarowych wykazuje dobrą zgodność wielkości zmierzonych z krzywymi teoretycznymi.

5.6.5. Ocena zgodności funkcji $c_x = f(Re)$
z danymi doświadczalnymi

W celu określenia zgodności wielkości zmierzonych z krzywymi teoretycznymi $c_x = f(Re)$ dla poszczególnych zestawów pociągów posłużono się współczynnikiem korelacji krzywoliniowej, który według [82] wyraża się wzorem:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\hat{x}_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{x})^2}} \quad , \quad (5.51.)$$

gdzie $\hat{x}_i$ wyznaczone jest z krzywej teoretycznej.

W wyniku obliczeń przeprowadzonych przy pomocy programu COECORR opracowanego dla komputera SHARP COMPUTER ELSI MATE PC 1200 otrzymano^{1/}:

- dla zestawu jednowagonowego $R = 0,993$
- dla zestawu dwuwagonowego z opaską $R = 0,979$
- dla zestawu dwuwagonowego bez opaski $R = 0,977$.

Otrzymane wartości wskazują na silne zależności korelacyjne.

- - - - -

^{1/} Program znajduje się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.

5.7. Pomiar ciśnienia statycznego w tunelu podczas ruchu pociągu

5.7.1. Metodyka pomiarów

Każda seria pomiarowa poprzedzona była sprawdzeniem szczelności modelu / porównaj pkt. 5.5.1. / oraz prędkości jazdy pociągu na poszczególnych odcinkach tunelu.

Zasadnicze pomiary rozkładu ciśnienia statycznego w tunelu podczas ruchu pociągu wykonywano na stanowisku badawczym przedstawionym na rys. 5.4. i rys. 5.10. Średnia wartość ciśnienia statycznego w danym przekroju mierzona była przy pomocy mikromanometru MDC z dokładnością $\pm 1\%$. Jednocześnie mierzono temperaturę powietrza wewnątrz i na zewnątrz modelu legalizowanymi termometrami rtęciowymi z dokładnością $\pm 0,1$ K. Podczas badań temperatury te były niezmiennie i sobie równe.

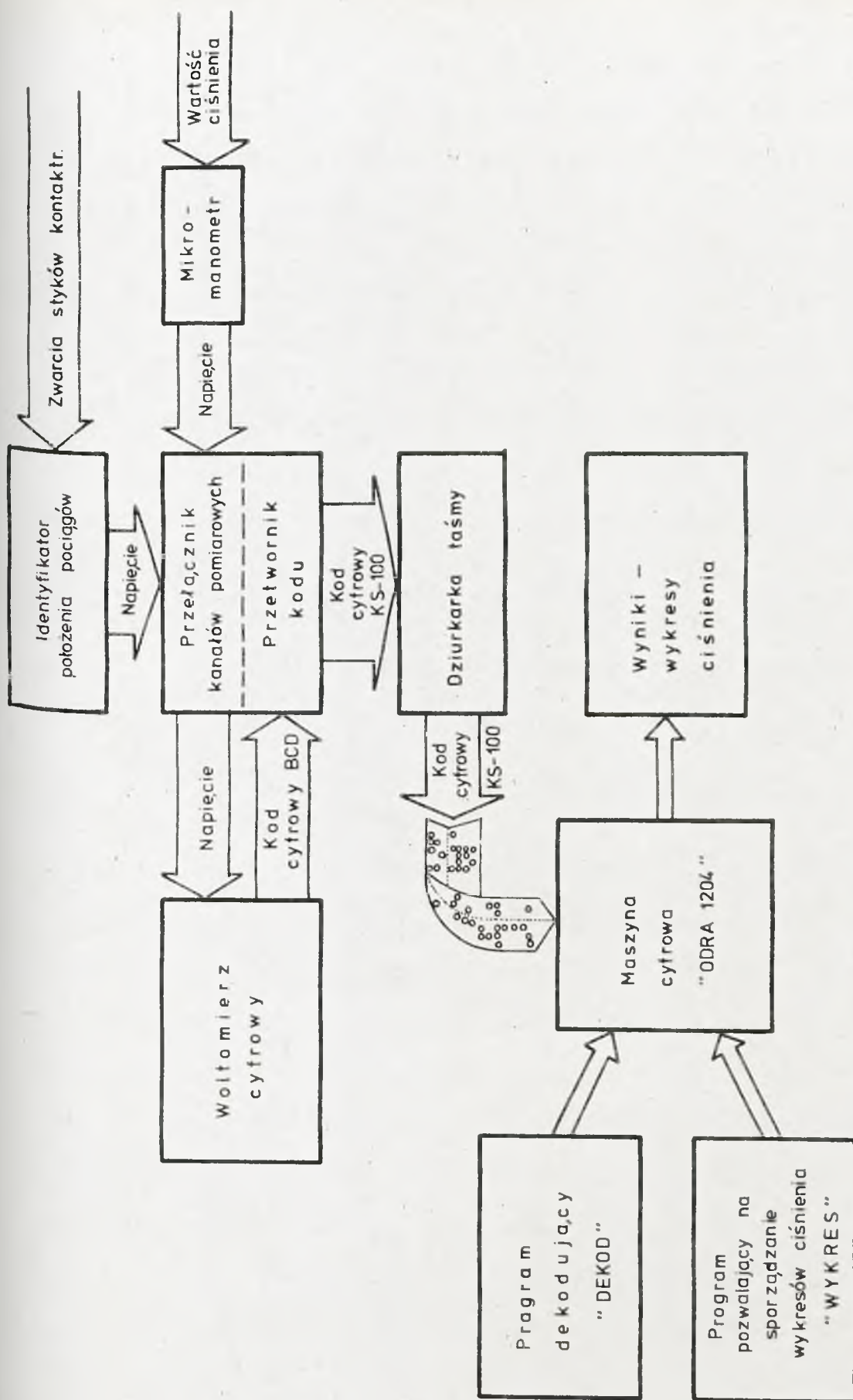
Po włączeniu wszystkich urządzeń i podłączeniu mikromanometru do n-tego przekroju pomiarowego uruchamiano pociąg. Pociąg dojeżdżał do stacji i zatrzymywał się w wyznaczonym miejscu. Po upływie 5 - 6 sekund pociąg ruszał i zatrzymywał się na końcu tunelu^{1/}. Rejestrowane przez mikromanometr impulsy ciśnienia zamieniane były w nim na impulsy napięciowe, które przechodzą przez przełącznik kanałów mierzono woltomierzem cyfrowym V - 530 a następnie po przetworzeniu w elektronicznym rejestratorze typu

1/ Wszystkie opisywane badania prowadzono przy ruchu pociągu po torze I.

APIR^{1/}, przekazywane były do dziurkarki DT - 105. Przez ten sam rejestrator przekazywano do dziurkarki impulsy elektryczne docierające do układu znaczącego od kontaktronów na skutek ich zwierania przez przejeżdżający pociąg. W ten sposób wynik pomiaru ciśnienia wraz z zaznaczeniem momentu przejeżdżania pociągu nad każdym kontaktronem otrzymywano z dziurkarki w postaci perforowanej taśmy. W procesie rejestracji wykorzystano opracowaną w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej zasadę kodowania danych pomiarowych KS - 100 oraz algorytmy dekodowania dla EMG Odra 1204. Schemat przepływu informacji w procesie pomiaru i przetwarzania danych pokazano na rys. 5.16.

Po wykonaniu pomiaru zgodnie z powyższym opisem cofano pociąg do pozycji wyjściowej. Jeżeli przy pomiarze w n -tym przekroju odległości czasowe pomiędzy poszczególnymi zvarciami kontaktronów były zgodne z założonymi / wynikającymi ze zmienności prędkości ruchu pociągu w czasie /, mikro - manometr łączono z następnym $n + 1$ przekrojem i powtarzano całą operację. W przeciwnym wypadku dokonywano powtórnie pomiaru w przekroju $n -$ tym. Często, dla uzyskania zgodnych z ustalonymi odległości czasowych pomiędzy zvarciami poszczególnych kontaktronów, pomiary w określonym przekroju wykonywane były kilkakrotnie. Pomiary i rejestracja ciśnienia dokonywane były co 0,08 s z dokładnością $\pm 1 \%$. Dla każdego przekroju wykonano 7 serii pomiarowych, właściwych

1/ Urządzenie wykonano w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.



Rys. 5.16 Schemat przepływu informacji w procesie pomiaru i przetwarzania danych.

pod względem czasu pomiędzy zvarciami poszczególnych kontaktów, przy założonej jednakowej zmienności prędkości ruchu pociągu wzdłuż tunelu.

5.7.2. Wyniki pomiarów

Badania miały na celu znalezienie wartości stałej c_2 / patrz pkt. 4.2. /, określenie rozkładu ciśnienia statycznego wzdłuż tunelu przy ruchu pociągu a następnie porównanie powyższego z rozkładem otrzymanym przy pomocy zweryfikowanego modelu teoretycznego.

Na rys. 5.17. pokazano przykładowy wydruk wykresu ciśnienia otrzymany w wyniku przetworzenia danych pomiarowych przy pomocy programów DEKOD i WYKRES na EMC Odra 1204^{1/}. Na wykresie odczytać można wielkość ciśnienia statycznego w danym przekroju pomiarowym / tu w przekroju 7 serii C / w określonej chwili czasowej liczonej od momentu startu pociągu. Na wykresie zaznaczone są również zvarcia kontaktów określające położenie pociągu w czasie. Wykorzystując tego typu wykresy ze wszystkich serii pomiarowych, określono wartości ciśnienia statycznego w każdym przekroju tunelu przy położeniu pociągu w poszczególnych przekrojach z kontaktami. Ponieważ ruch pociągu modelowany był wiernie w stosunku do warunków naturalnych na odcinku 7 K - 15 K oraz 16 K - 24 K, wartości ciśnienia statycznego we wszystkich przekrojach tunelu określono w momentach, gdy pociąg

- - - - -

^{1/} Programy opracowane i udostępnione przez Instytut Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej.

MNOZNIK = d-1

SYM.	CZAS	-111	-A3	-55	-76	2	31
BIN.	SEK.	[=====]					
	.08	1	:				
	.16	1	:				
	.24	1	:				
	.32	1	:				
	.40	1	:				
	.48	1	:				
	.56	1	:				
	.64	2	:				
	.72	2	:				
****	.80	3	:				
	.88	4	:				
	.96	5	:			10	
	1.04	5	:			10	
	1.12	6	:			10	
	1.20	6	:			10	
	1.28	10	:			10	
	1.36	12	:			10	
	1.44	17	:			10	
	1.52	18	:			10	
	1.60	21	:			10	
	1.68	21	:			10	
	1.76	24	:			10	
	1.84	25	:			10	
	1.92	25	:			10	
	2.00	25	:			10	
	2.08	26	:			10	
	2.16	26	:			10	
	2.24	28	:			10	
****	2.32	24	:			10	
	2.40	24	:			10	
	2.48	26	:			10	
****	2.56	16	:			10	
	2.64	-26	:			10	
****	2.72	-36	:			10	
	2.80	-58	:			10	
****	2.88	-A8	:			10	
	2.96	-A8	:			10	
	3.04	-91	:			10	
****	3.12	-111	:			10	
	3.20	-101	:			10	
	3.28	-A2	:			10	
	3.36	-A0	:			10	
	3.44	-A4	:			10	
	3.52	-A4	:			10	
	3.60	-78	:			10	
	3.68	-76	:			10	
	3.76	-76	:			10	
****	3.84	-62	:			10	
	3.92	-5A	:			10	
	4.00	-48	:			10	
	4.08	-41	:			10	
	4.16	-36	:			10	
	4.24	-74	:			10	
	4.32	-18	:			10	
	4.40	-16	:			10	
	4.48	-10	:			10	
****	4.56	-8	:			10	
	4.64	-6	:			10	
	4.72	-4	:			10	
	4.80	-5	:			10	
	4.88	-3	:			10	
	4.96	-2	:			10	
	5.04	-3	:			10	
	5.12	-4	:			10	
	5.20	-5	:			10	
	5.28	-1	:			10	
	5.36	-2	:			10	
****	5.44	-1	:			10	
	5.52	-2	:			10	
	5.60	-2	:			10	
	5.68	-2	:			10	
	5.76	-2	:			10	
	5.84	-2	:			10	
	5.92	-2	:			10	
	6.00	-2	:			10	
	6.08	-1	:			10	
	6.16	-1	:			10	
	6.24	-1	:			10	
	6.32	-1	:			10	
	6.40	-2	:			10	
	6.48	-1	:			10	
	6.56	-1	:			10	
	6.64	-1	:			10	
	6.72	-1	:			10	
	6.80	-1	:			10	
	6.88	-1	:			10	
	6.96	-1	:			10	
	7.04	-1	:			10	
	7.12	-1	:			10	
	7.20	-1	:			10	
	7.28	-1	:			10	
	7.36	-1	:			10	
	7.44	-1	:			10	
	7.52	-1	:			10	
	7.60	-1	:			10	
	7.68	0	:			10	
	7.76	-1	:			10	
	7.84	-1	:			10	
	7.92	-1	:			10	
	8.00	-1	:			10	
	8.08	-1	:			10	
	8.16	-1	:			10	
	8.24	-1	:			10	
	8.32	-1	:			10	
	8.40	-1	:			10	
	8.48	-1	:			10	
	8.56	-1	:			10	
	8.64	-1	:			10	
	8.72	-1	:			10	
	8.80	-1	:			10	
	8.88	-1	:			10	
	8.96	-1	:			10	
	9.04	-1	:			10	
	9.12	-1	:			10	
	9.20	-1	:			10	

znajdował się odpowiednio w przekrojach 7 K, 8 K, 9 K, 11 K, 13 K, 18 K, 19 K, 21 K, 23 K i 24 K^{1/} / przekroje 14 K, 15 K znajdują się na stacji - ruch pociągu z małą prędkością nie wywołuje praktycznie żadnych zmian ciśnienia w tunelach /. Dla wyeliminowania błędów grubych do zbioru wyników pomiarowych zastosowano test Dixona.

Dla określenia stałej c_2 konieczna jest, prócz oczywiście innych wielkości wchodzących do wzoru (4.31.), znajomość prędkości cyrkulacyjnych strumieni powietrza v_p przy danej prędkości ruchu pociągu v_w . Ze względu na brak odpowiedniej aparatury, która pozwoliłaby zmierzyć wspomnianą prędkość, jej wartość wyliczono zgodnie z zaleceniami zawartymi w [23]. Wzięto pod uwagę wyniki pomiarów zmian ciśnienia statycznego w tunelu w momencie, gdy pociąg pokonuje odcinek 18 K - 21 K, mając tam stałą prędkość ruchu $v_w = 3,44$ m/s. Zbiór punktów $\Delta p = f(L_t)$ aproksymowano funkcją liniową^{2/}. Z wielkości rzędnej / pochylenia prostej /, wykorzystując wzór Darcy-Weisbacha oraz znalezioną poprzednio funkcję $\lambda = f(Re)$ / zależność (5.25.) / określono prędkość powietrza, która wyniosła $v_p = 1,615$ m/s. Stałą c_2 obliczono na EM0 Odra 1204

1/ Momenty rozpędzania pociągu na początku tunelu jak i jego hamowania na końcu nie tylko nie odpowiadały warunkom naturalnym ale prócz tego charakteryzowały się dosyć przypadkowymi odległościami czasowymi zwierania kontaktronów.

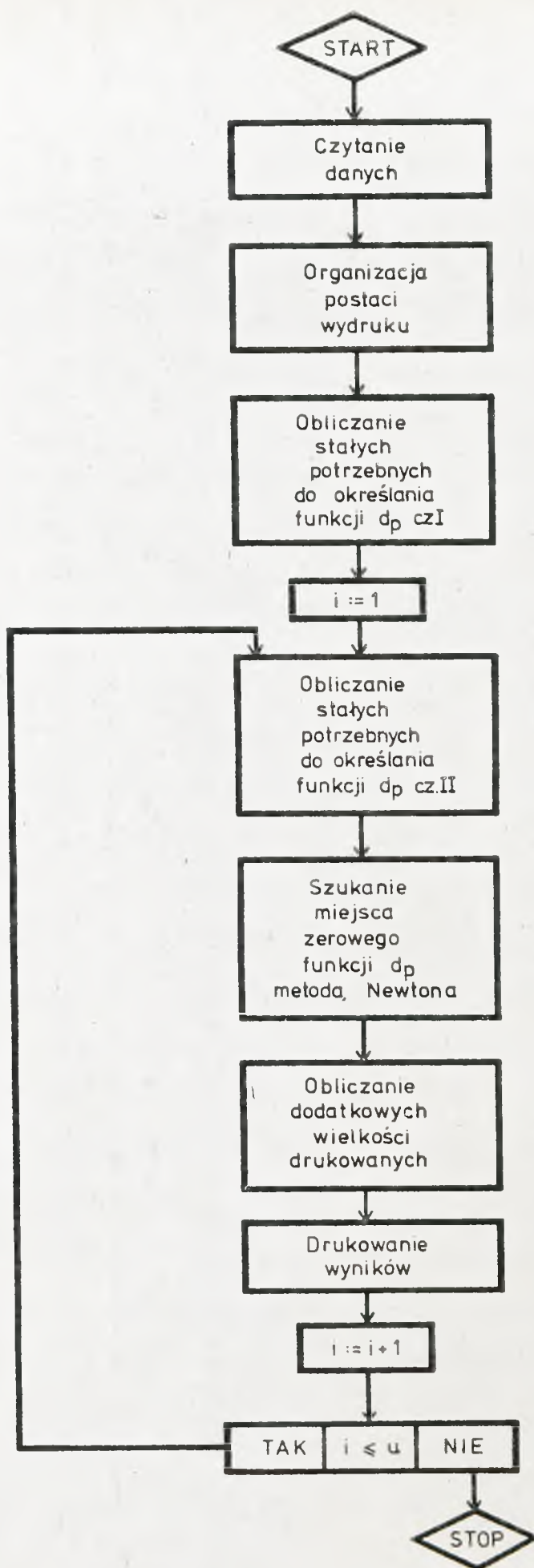
2/ Przy pomocy standardowego programu dla EMC - Tektronix 31.

przy pomocy programu VORTEV^{1/} w oparciu o zależności (4.31.) , (5.25.) , (5.42.) , (5.43.) przy uwzględnieniu wyżej podanych wartości v_p i v_w oraz wymiarów modelu fragmentu metra^{2/}. W wyniku obliczeń otrzymano $c_2 = 0,06$.

Dla określenia rozkładu ciśnienia statycznego wzdłuż pojedynczego tunelu przy ruchu pociągu, wykorzystując uprzednio podany model matematyczny / pkt. 4.2. /, opracowano program TEVECT^{3/} dla EMC Odra 1204. Program oblicza prędkość ruchu cyrkulacyjnych strumieni powietrza / v_p /, ich przyspieszenie / a_p /, straty ciśnienia w tunelu / A /, straty ciśnienia wzdłuż pociągu / C / oraz straty powstałe wskutek istniejących sił bezwładności / B / . Dodatkowo drukowane są: prędkość ruchu pociągu / v_w /, jego przyspieszenie / a_w / ^{4/}, liczba Reynoldsa / Re / oraz współczynnik strat liniowych tunelu λ / Λ /.

Na rys. 5.18. podano schemat blokowy omawianego programu,

- - - - -
- 1/ Program znajduje się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.
 - 2/ Do zależności (4.31.) wchodzi również Σp , która to wartość określona została częściowo na podstawie rozkładu ciśnienia, częściowo zaś przy pomocy dodatkowych prostych pomiarów, które tutaj nie zostały przytoczone, bowiem nie mają istotnego znaczenia z merytorycznego punktu widzenia.
 - 3/ Program znajduje się w archiwum Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej.
 - 4/ Prędkość ruchu pociągu oraz jego przyspieszenie są wielkościami zadawanymi. W przypadku obliczeń przeprowadzonych dla modelu fragmentu metra v_w oraz a_w określone były z funkcji znalezionej na podstawie pomierzonych średnich prędkości pociągu na poszczególnych odcinkach tunelu.



Rys. 5.18 Schemat blokowy programu „TEVECT”

zaś w tablicach 5.3. oraz 5.4. wydruk wyników obliczeń wykonanych dla przypadku ruchu pociągu w modelu fragmentu metra^{1/}. Otrzymane wyniki posłużyły do sporządzenia wykresów ciśnienia statycznego w tunelu I przy kolejnych położeniach pociągu. Rozkłady ciśnienia statycznego przedstawiono na rys.rys. 5.19. do 5.28. Jednocześnie na omawianych rysunkach nanie-siono zmierzone wartości ciśnienia w poszczególnych przekro-jach. Dla przejrzystości wykresów każdy punkt obrazujący wartość ciśnienia w danym przekroju jest średnią arytmetyczną z około 7 pomiarów. Dla każdego tak określonego punktu zaznaczono dodatkowo przedział ufności / sposób oszacowania przedziału ufności omówiono w punkcie 5.7.3. /. Nie zazna-czono ciśnienia w przekrojach, które w danej chwili czasowej mijają pociąg, bowiem zbyt mała ilość przekrojów pomiarowych utrudnia interpretację wyników.

Przedstawione rozkłady ciśnienia wzdłuż tunelu otrzy-mane przy pomocy zweryfikowanego doświadczalnie modelu teo-retycznego wykazują dobrą zgodność z pomierzonymi. Uprosz-czenia modelu, jak również niedoskonałość matematycznego opisu ruchu pociągu powodują, zwłaszcza przy ruchu nieusta-lonym, gorsze przystawanie wyników pomiarów do rozkładów ciśnienia obliczonych przy pomocy zweryfikowanego modelu teoretycznego. Na niektórych rysunkach zwraca uwagę istnie-nie strefy odzyskiwania ciśnienia statycznego za pociągami, w śladzie aerodynamicznym. Przy ruchu jednego pociągu

- - - - -

^{1/} Uwzględniając więc w danych do programu wartości wyliczo-nych uprzednio stałych itp.

Tablica 5.3.
Tor lewy

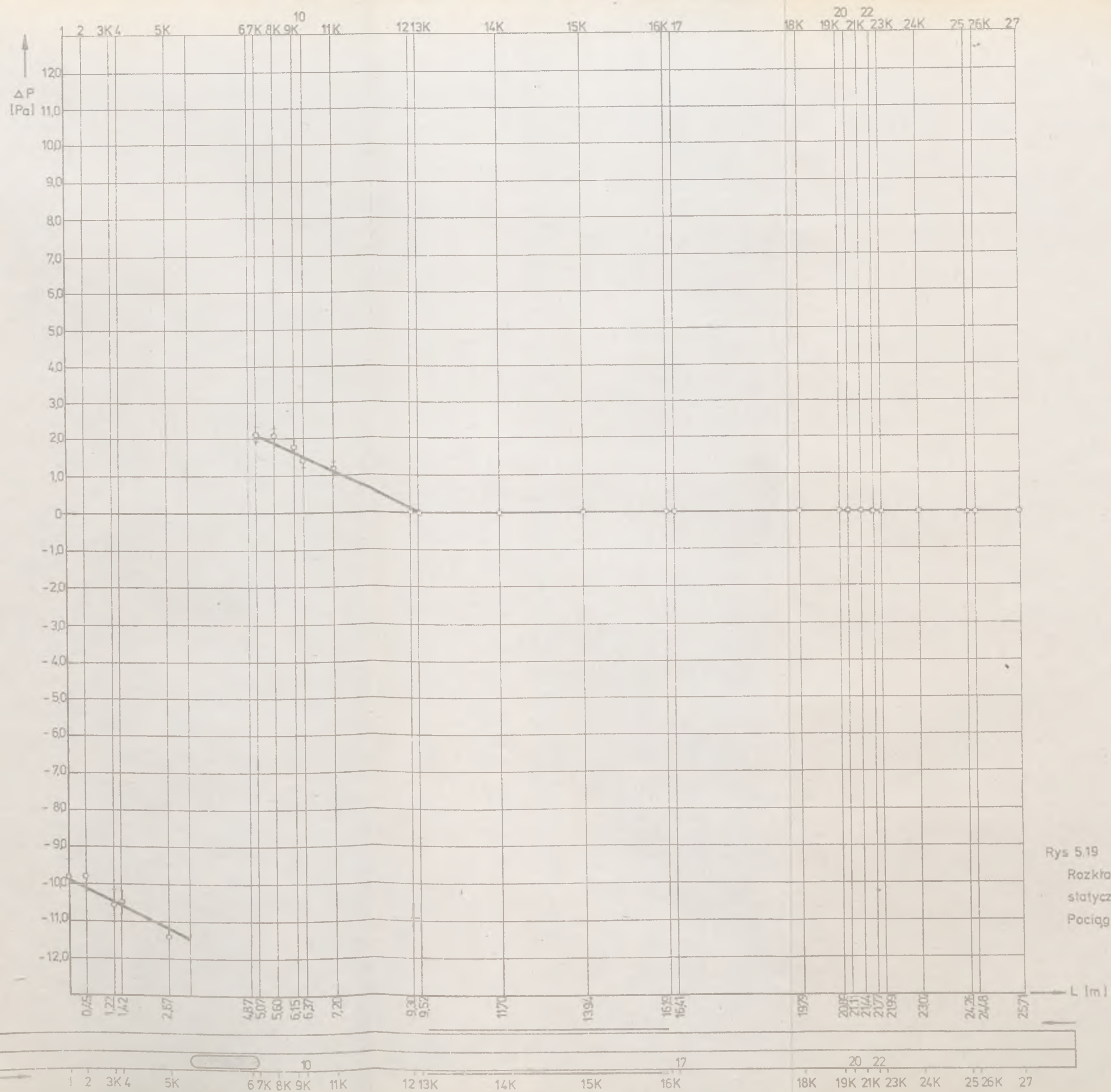
POLITECHNIKA WARSZAWSKA
INSTYTUT OGRZEWNICTWA I WENTYLACJI
PROGRAM : TEVECT:
WYNIKI OBLICZEN

VW	AW	VP	AP	A	B	C	RE	LAMBDA
4.500	.000	2.085	.000	13.896	.000	-13.896	29652.879	.03589
4.500	.000	2.085	.000	13.896	.000	-13.896	29652.879	.03589
4.500	-1.250	1.607	-.102	9.010	2.367	-11.377	22861.674	.04091
4.200	-1.406	1.425	-.114	7.386	2.662	-10.048	20274.001	.04346
3.500	-.694	1.242	-.056	5.886	1.314	-7.200	17664.785	.04658

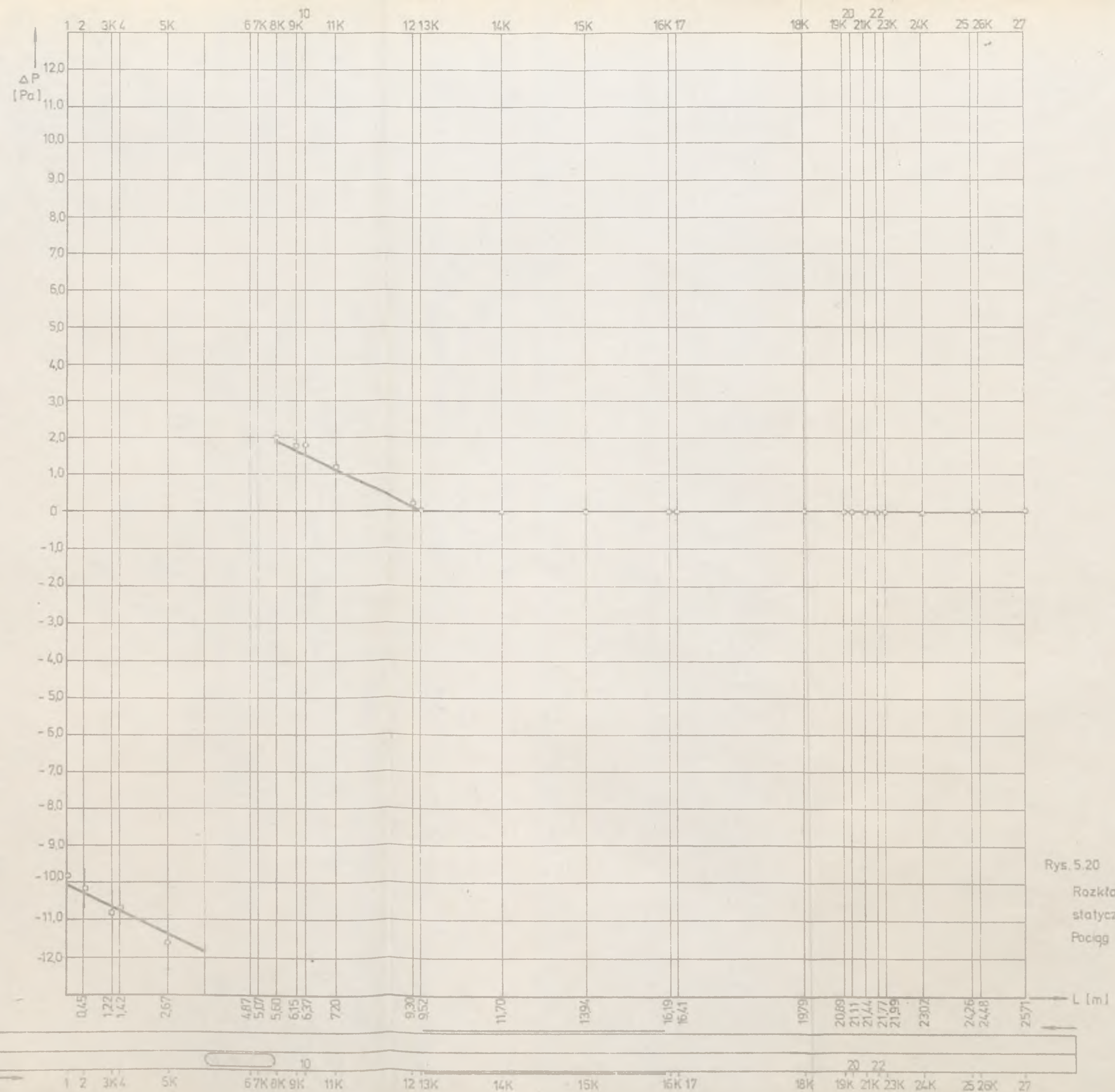
Tablica 5.4.
Tor prawy

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
INSTYTUT OGRZEWNICTWA I WENTYLACJI
PROGRAM : TEVECT:
WYNIKI OBLICZEN

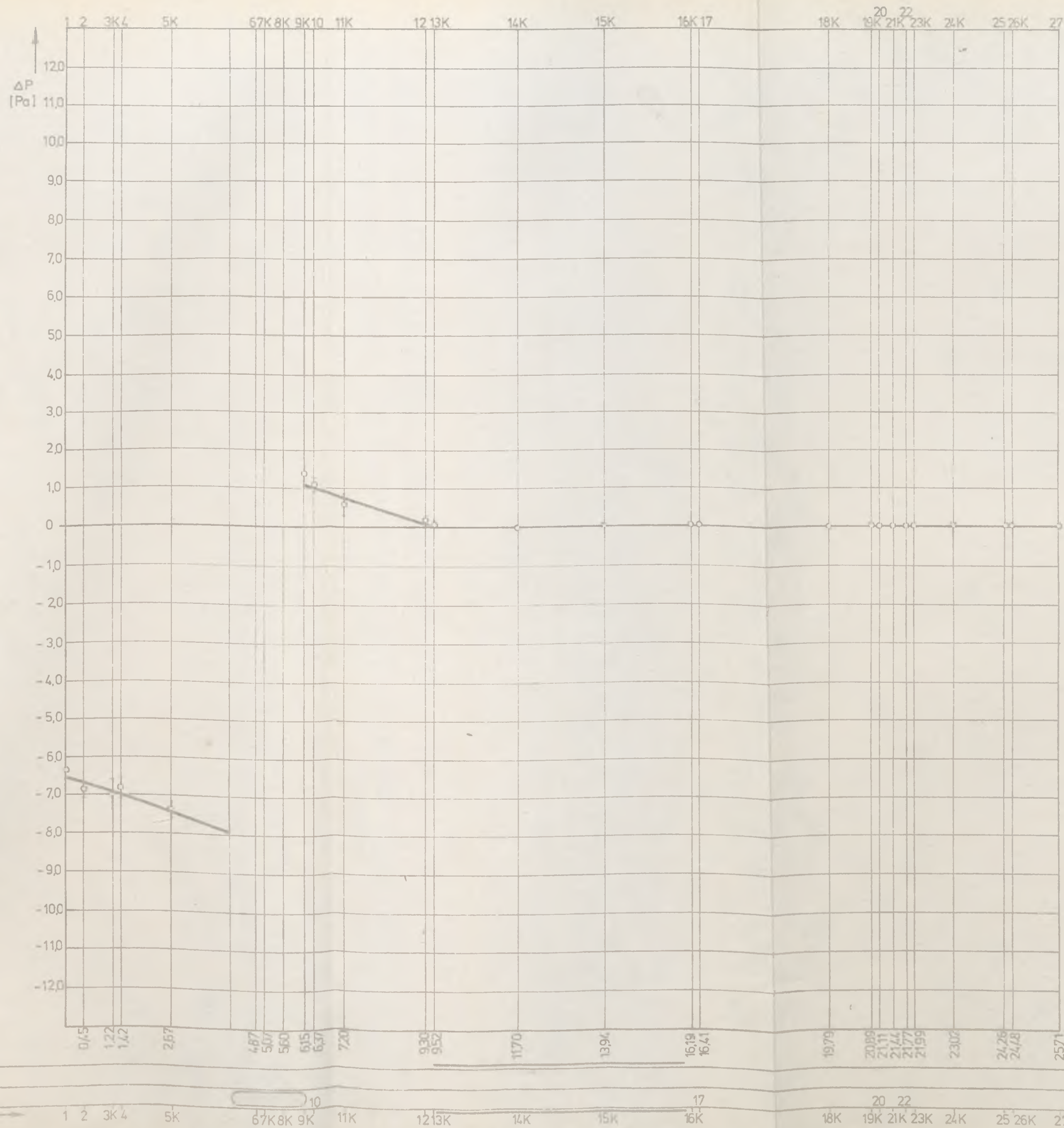
VW	AW	VP	AP	A	B	C	RE	LAMBDA
3.440	.000	1.615	.000	9.025	.000	-9.025	22964.604	.04082
3.440	.000	1.615	.000	9.025	.000	-9.025	22964.604	.04082
3.440	.000	1.615	.000	9.025	.000	-9.025	22964.604	.04082
3.440	-1.375	1.100	-.113	4.792	2.600	-7.392	15644.024	.04952
3.000	-1.339	.915	-.110	3.547	2.532	-6.079	13013.692	.05432



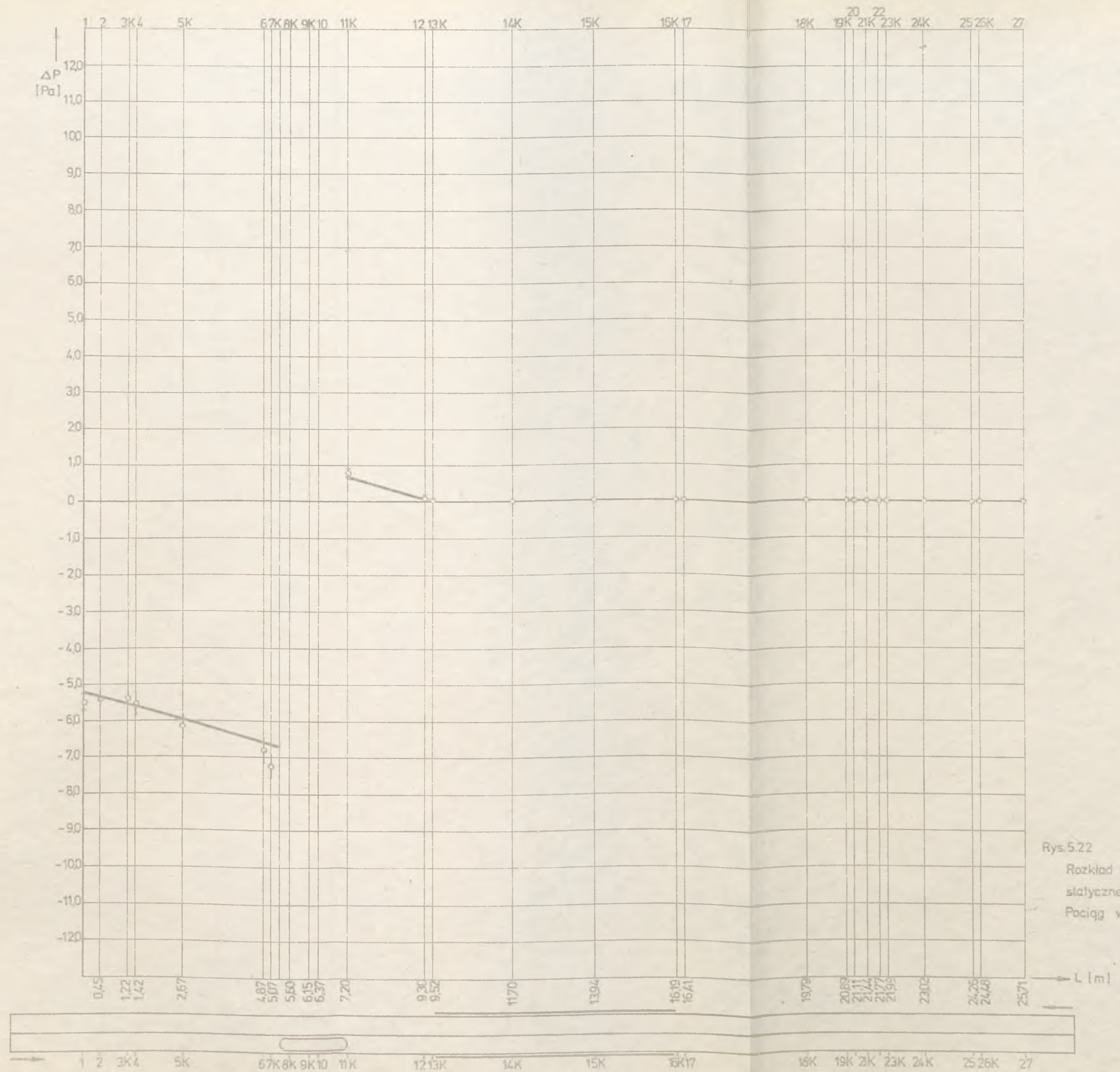
Rys 5.19
Rozkład ciśnienia
statycznego wzdłuż tunelu.
Pociąg w 7K.



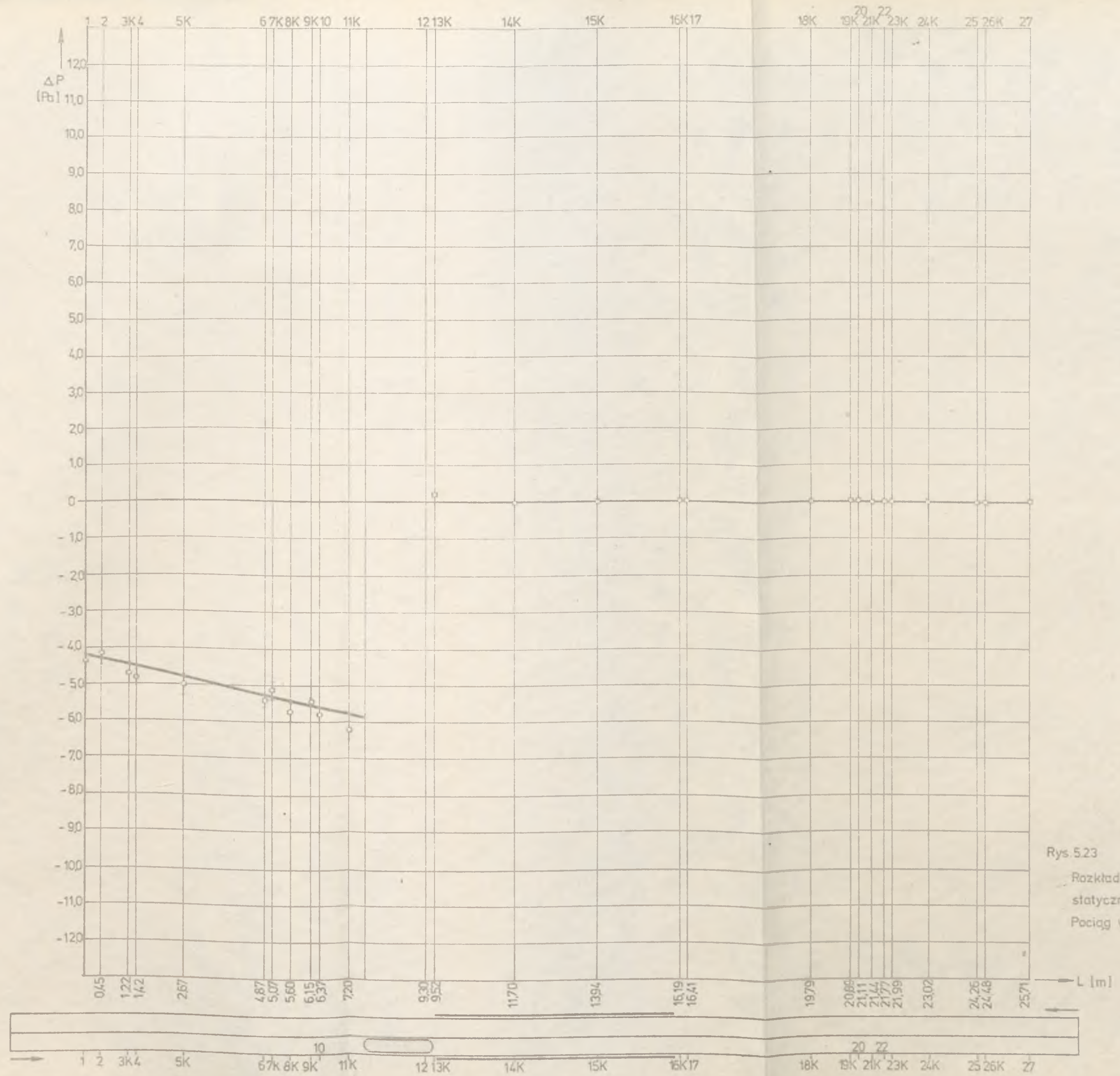
Rys. 5.20
Rozkład ciśnienia
statycznego wzdłuż tunelu.
Pociąg w 8K.



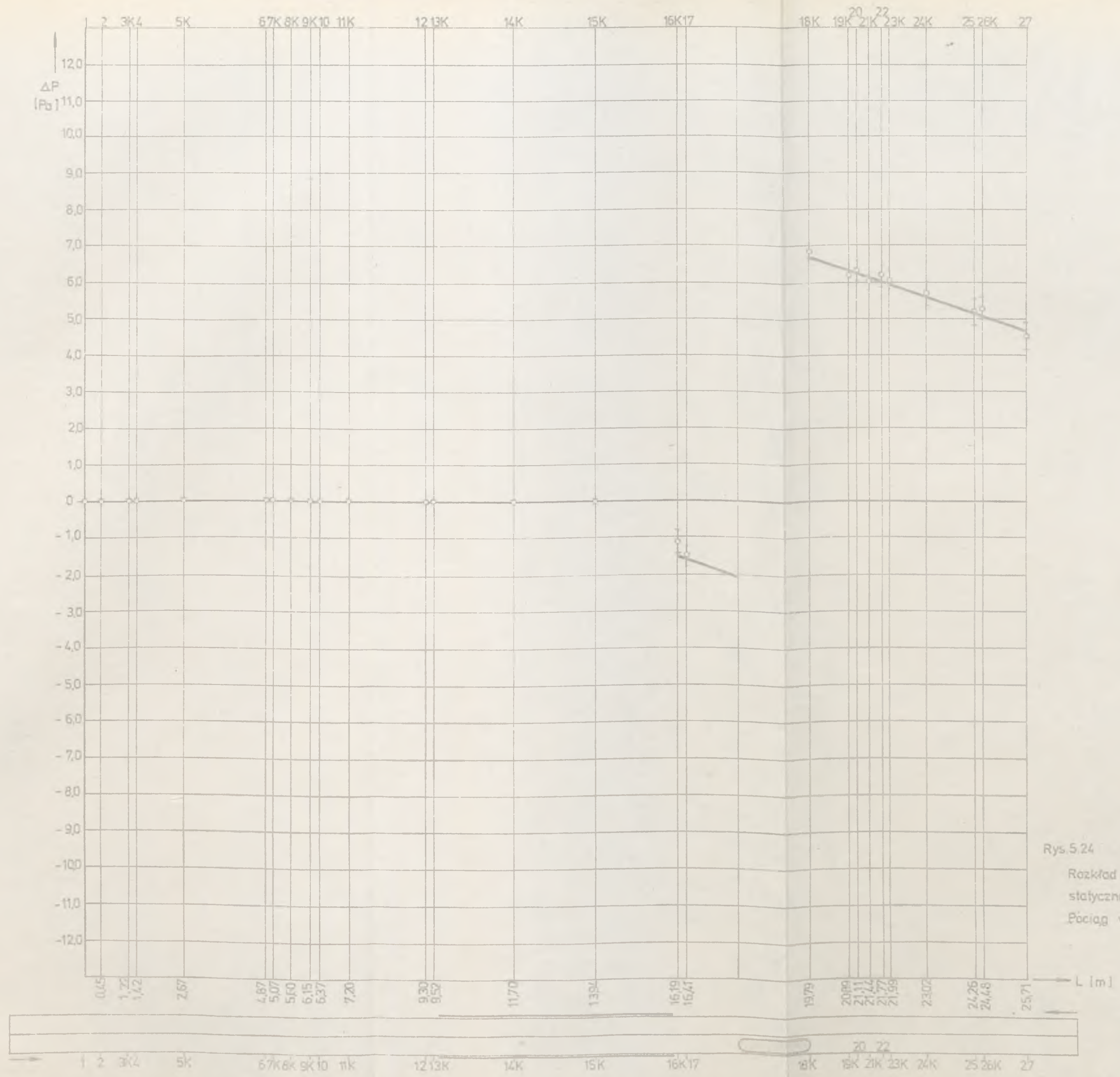
Rys. 5.21
Rozkład ciśnienia
statycznego wzdłuż tunelu.
Pociąg w 9K.



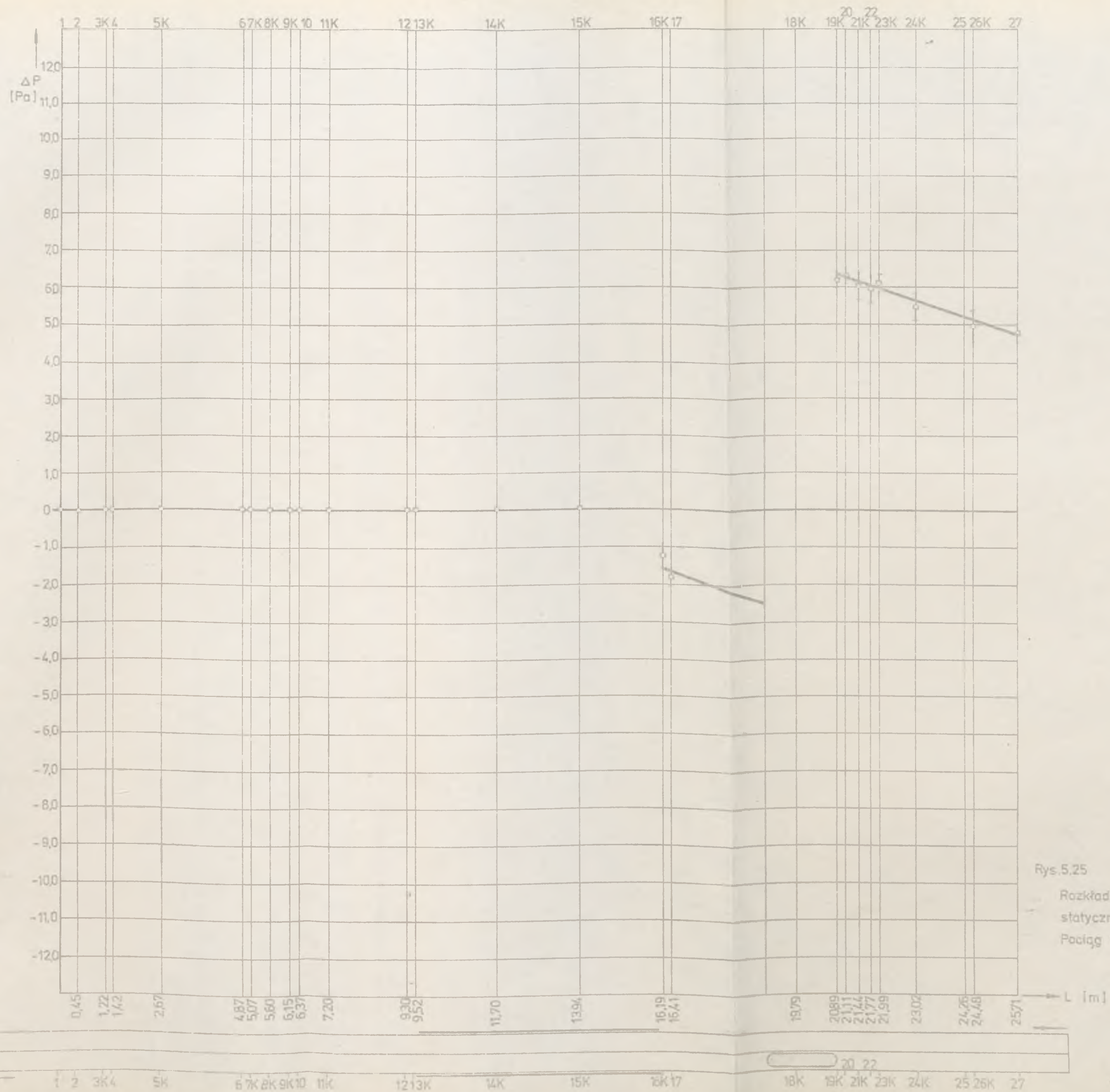
Rys. 5.22
Rozkład ciśnienia
statycznego wzdłuż tunelu.
Pociąg w 11K

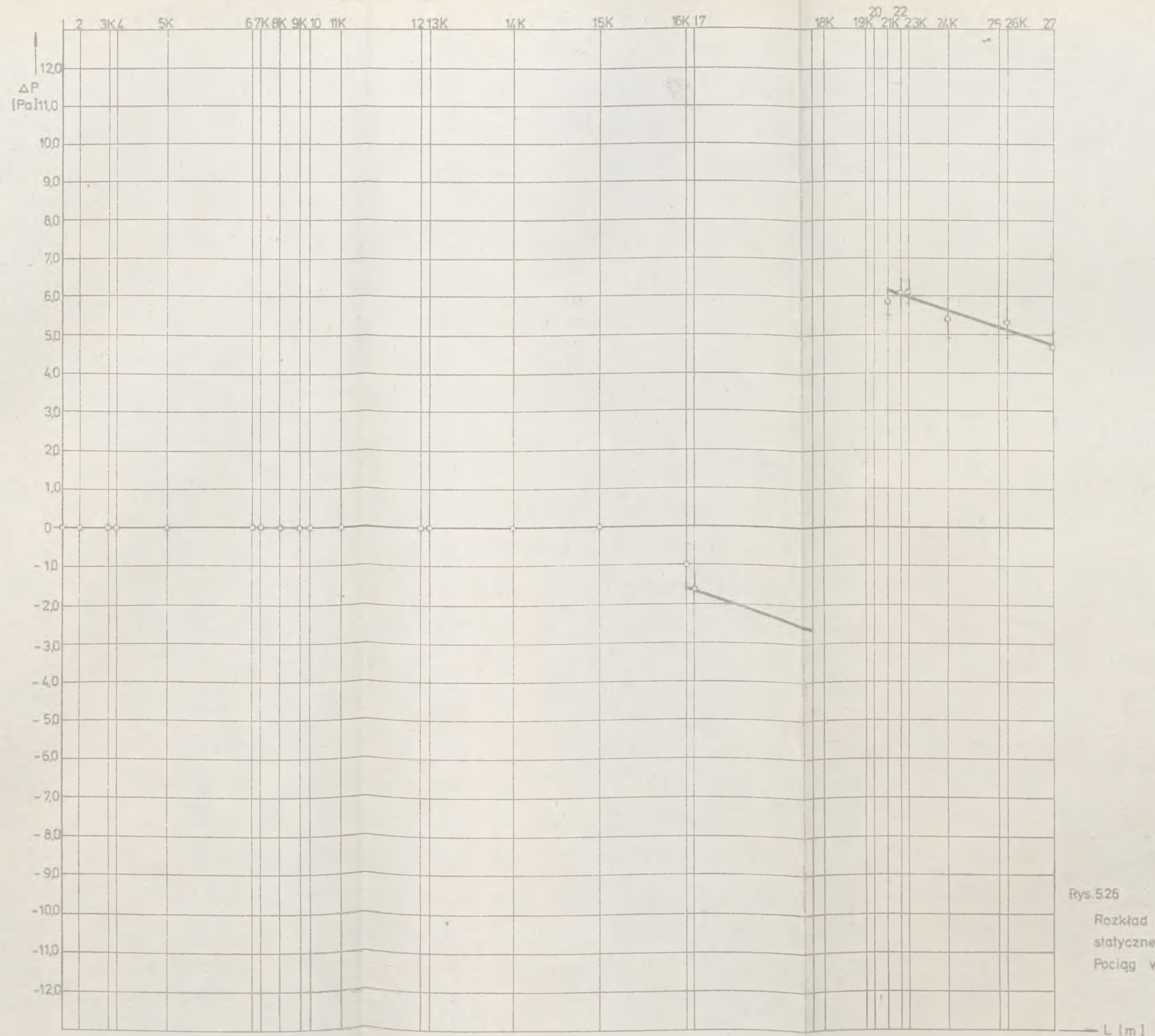


Rys. 5.23
 Rozkład ciśnienia
 statycznego wzdłuż tunelu.
 Pociąg w 13K.

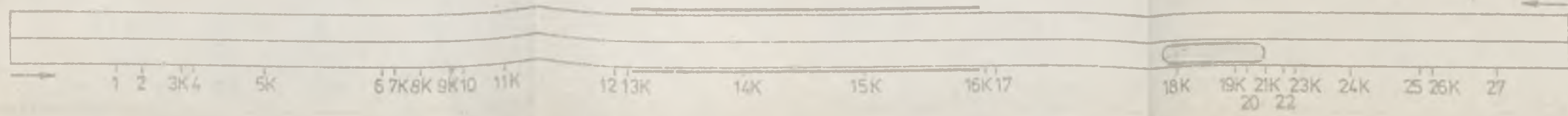


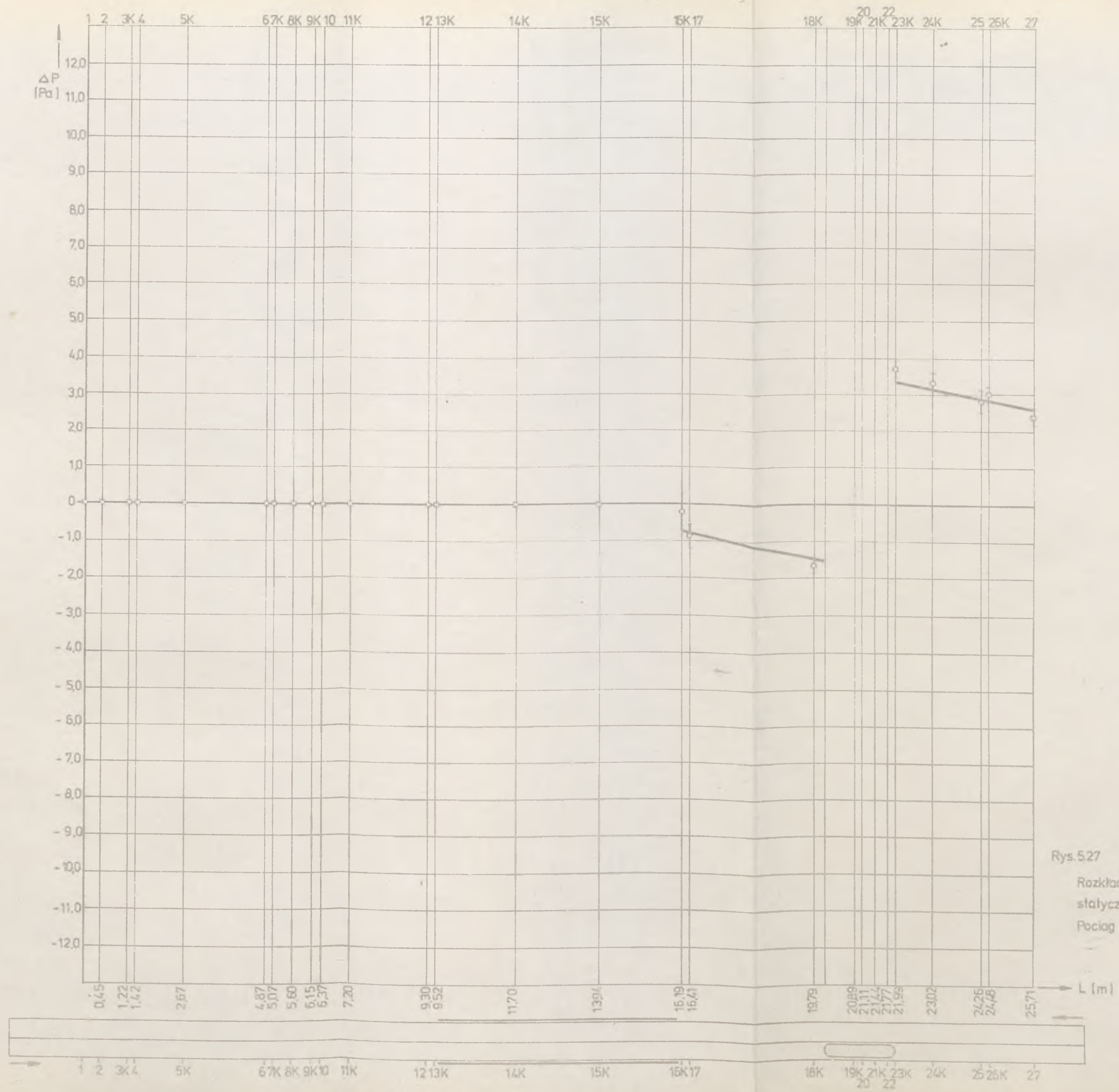
Rys. 5.24
 Rozkład ciśnienia
 statycznego wzdłuż tunelu.
 Pociąg w 18K



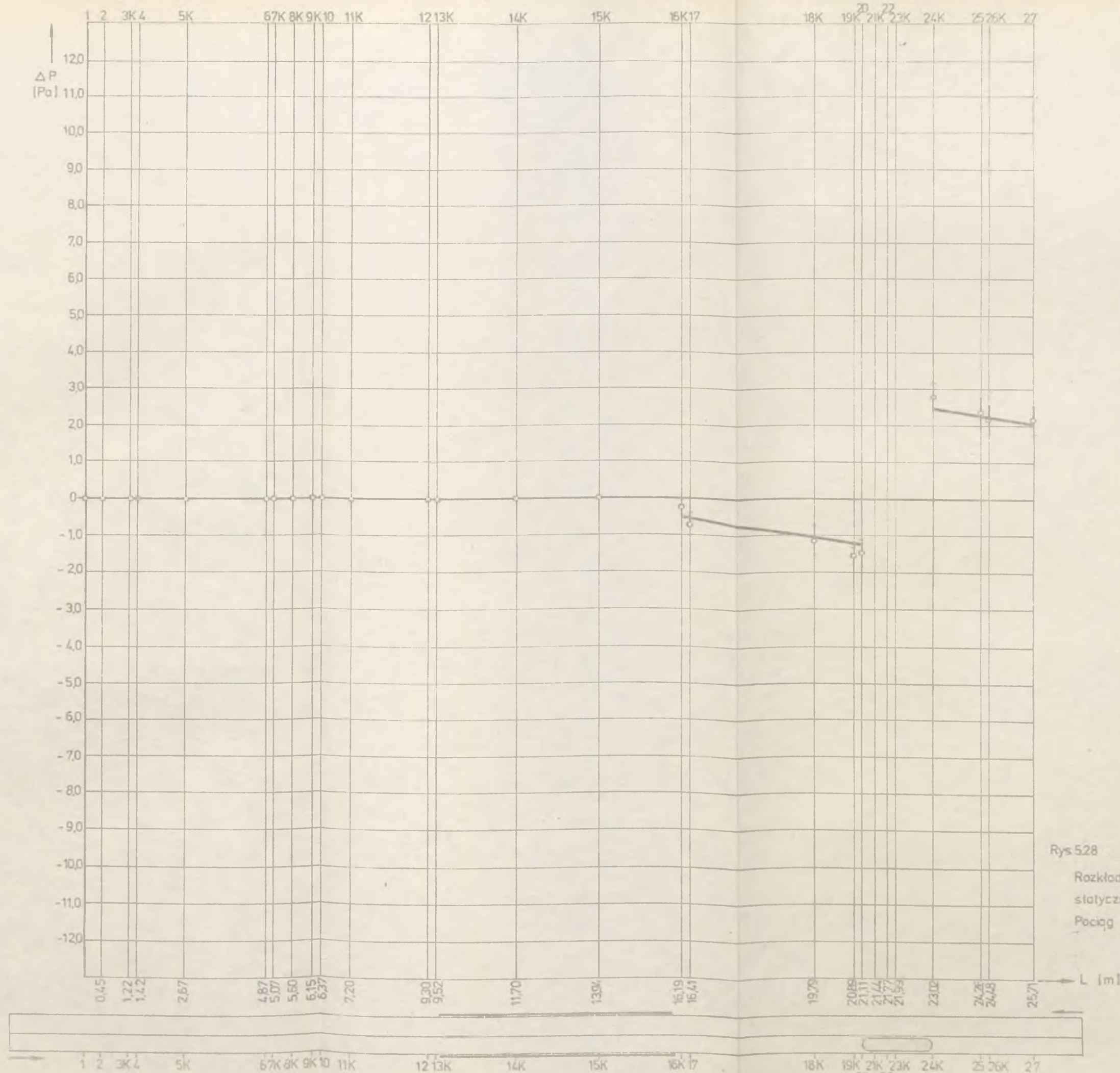


Rys.526
 Rozkład ciśnienia
 statycznego wzdłuż tunelu.
 Pociąg w 21K.





Rys. 5.27
Rozkład ciśnienia
statycznego wzdłuż tunelu
Pociąg w 23K.



Rys 528
Rozkład ciśnienia
statycznego wzdłuż tunelu.
Pociąg w 24K.

w tunelu , na stacji i w przeciwnym tunelu nie zarejestrowano praktycznie żadnych zmian ciśnienia, co wynika w tym przypadku raczej z ograniczonych możliwości dostępnej aparatury pomiarowej.

5.7.3. Analiza dokładności pomiarów

Dokładność wyznaczania poszczególnych wielkości pomiarowych zestawiono w tablicy 5.5.

Dla oceny precyzji pomiarów określono przedział ufności na podstawie testu t - Studenta z zastosowaniem rozstępu R . Wyniki pomiarowe dla każdego przekroju, przy danym położeniu pociągu, uporządkowano w ciąg rosnący a następnie obliczono rozstęp R według wzoru [70]

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad , \quad (5.52)$$

gdzie:

$X_{\max}$ - największa zmierzona wartość,

$X_{\min}$ - najmniejsza zmierzona wartość.

Poszukiwany przedział ufności określa się z zależności :

$$x_0 = \bar{x} \pm q_{\alpha}(n) \cdot R \quad , \quad (5.53)$$

gdzie:

$\bar{x}$ - średnia arytmetyczna z wyników pomiarowych,

R - rozstęp określony według (5.52.),

$q_{\alpha}(n)$ - parametr zależny od przyjętego poziomu ufności oraz liczby pomiarów.

Wartości $q_{\alpha}(n)$ określono według [70] przy przyjętym poziomie ufności $\alpha = 0,01$. Obliczone dla powyższego poziomu ufności

Tablica 5.5

Lp	RODZAJ I SPOSÓB OKREŚLANIA WIELKOŚCI	OZNACZENIE	JEDN. MIARY	Bł A,D
1	Temperatura (termometry szklane)	δt_s	K	$\pm 0,080$
2	Różnica temperatury (termometry szklane)	$\delta(\Delta t_s)$	K	$\pm 0,113$
3	Wymiary liniowe tunelu	δL_t	m	$\pm 0,001$
4	Ciśnienie statyczne (mikromanometr MDC)	δp	N/m ²	$\pm 0,148$
5	Czas (zegar elektroniczny)	$\delta \tau$	s	$\pm 0,0035$
6	Parametry fizyczne płynu. (z tablic)	różne		$\pm 0,000$

przedziały naniesiono na rys.rys. 5.19. do 5.28. Obliczone na podstawie modelu matematycznego wartości ciśnienia statycznego w większości przypadków mieszczą się wewnątrz obliczonych przedziałów ufności.

5.7.4. Ocena zgodności funkcji opisującej
rozkład ciśnienia statycznego w tunelu
z danymi doświadczalnymi

W celu określenia dokładności " dopasowania " funkcji opisującej rozkład ciśnienia statycznego wzdłuż tunelu podczas ruchu pociągu z danymi pomiarowymi, zastosowano współczynnik korelacji określony zależnością (5.51.) uwzględniając, że funkcja regresji jest liniowa.

Obliczenia przeprowadzono, podobnie jak w punkcie 5.6.5., przy pomocy programu COECORR, otrzymując współczynniki korelacji w granicach 0,708 - 0,970 z przewagą wartości powyżej 0,890 , co wskazuje na mocne zależności korelacyjne. Współczynnika R nie obliczono dla prostych i punktów doświadczalnych opisujących zmiany ciśnienia statycznego za pociągami w przypadku, gdy znajduje się on w 18 K, 19 K, 21 K oraz 23 K ze względu na małą ilość punktów pomiarowych.

6. WNIOSKI

W każdym zagadnieniu wentylacyjnym, obok ogólnych, występują problemy specyficzne dla danego typu obiektu.

Głównym zagadnieniem stanowiącym o specyfice wentylacji obiektów metra jest niewątpliwie efekt tłoka powietrznego towarzyszący ruchowi pociągów.

Przedstawiona praca, rozwiązując powyższe zagadnienie, dała jednocześnie metodę rozwiązywania systemów wentylacji metra.

W wyniku pracy wykazano quasi - prostoliniowy charakter zmian ciśnienia statycznego, wzdłuż pojedynczego tunelu, wywołany nieustalonym ruchem pociągu. Wprowadzenie do tunelu ruchomego elementu o określonym oporze, jakim jest poruszający się pociąg, nie wpływa, w ogólnym zarysie, na charakter zmian ciśnienia wzdłuż tunelu. Wymiarowanie poszczególnych elementów wentylacji powinno więc być oparte na wypracowanych dotychczas metodach.

Przeprowadzone badania wykazały istnienie za pociągiem strefy odzyskiwania ciśnienia statycznego, której zasięg jest bardzo mały w stosunku do długości pociągu. Zjawisko to jest powodem intensyfikacji ruchu powietrza za pociągiem.

Powyższe stwierdzenia są zgodne z wcześniejszymi spostrzeżeniami na ten temat, między innymi, Behringa [7], Daymana [23], Hammitta [45], [46], Nayaka [90], Sajbena [107], czy Valensiego [127].

Rejestrowane podczas pomiarów zmiany ciśnienia statycznego w przekrojach pomiarowych miały analogiczny przebieg do zmierzonych przez innych badaczy w obiektach rzeczywistych [21] , [29] , [30] , [34] , [102] , [128] , [133] .

Opracowany w rozprawie model teoretyczny zakładający prostoliniowy przebieg zmian ciśnienia wzdłuż tunelu, wywoływany ruchem pociągów, zastosowany może być w rozgałęzionych sieciach metra, zarówno przy wentylacji naturalnej jak i mechanicznej. Przy jego pomocy określić można w każdej chwili czasowej prędkość ruchu cyrkulacyjnych strumieni powietrza a zatem również natężenie przepływu objętości powietrza w tunelach wywołane ruchem pociągów, stanowiące podstawę zjawiska tłoka powietrznego. Stwarza to możliwość porównywania poszczególnych systemów wentylacji z punktu widzenia zmniejszenia oddziaływania efektów aerodynamicznych. Pozwala również uwzględnić i zwymiarować łączniki międzytunelowe / rys. 1.2. / po uprzednim wprowadzeniu dodatkowego oporu miejscowego.

Wykorzystując opracowany model analizować można natężenie przepływu objętości powietrza w tunelach, na stacjach, w podziemnych przejściach, w wejściach i wyjściach ze stacji na powierzchnię w warunkach symulowanej eksploatacji / np. przy uwzględnieniu oddziaływania określonych czynników meteorologicznych, wyłączenia wybranych wentylatorów itd. /.

Opracowane zależności pomocne są również przy

prawidłowym doborze wentylatorów wentylacji tunelowej, określeniu zmienności ich wydatku i wysokości podnoszenia w czasie, zapotrzebowania na moc elektryczną itp.^{1/}.

Wynikiem pracy jest określenie prostej zależności opisującej rozkład ciśnienia wzdłuż pojedynczego tunelu, w którym porusza się w sposób nieustalony pociąg. Występujący w omawianej zależności człon opisujący stratę ciśnienia wzdłuż pociągu nie wymaga uwzględniania współczynnika tarcia dla powierzchni pojazdu, co w sposób zasadniczy upraszcza weryfikację modelu teoretycznego. Dla określenia wielkości i charakteru zmian ciśnienia wzdłuż tunelu ma znaczenie łączna strata ciśnienia wzdłuż pociągu. Tak też potraktowano tę sprawę w prezentowanej pracy. Analiza elementów składowych omawianej straty ciśnienia była przedmiotem, między innymi, prac [23] , [90] , [107] , [127] .

Zaproponowany w pracy wzór określający wartość oporu czołowego pociągu uwzględnianego w równaniu ogólnym (4.31.) , pozwala, przy wykorzystaniu opracowanych programów dla EMC Odra 1204 oraz metodyki pomiarów, przy zastosowaniu łatwo dostępnej aparatury, znaleźć poszukiwaną wielkość

- - - - -

^{1/} W Instytucie Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej opracowany został program ANAWE dla EMC Odra 1204, w którym wykorzystano podany w niniejszej pracy model matematyczny. Program ten oblicza strumień objętości powietrza wentylacyjnego w poszczególnych odcinkach tuneli szlakowych, tuneli dla pieszych, przewodów wentylacyjnych stacji i szlaku dla całej linii metra. Program dobiera również wentylatory szlakowe i stacyjne [68] .

w szerokim zakresie strumienia objętości powietrza / również w warunkach naturalnych /.

Zastosowana w pracy metoda badania rozkładu ciśnienia statycznego wzdłuż tunelu fragmentu modelu metra umożliwia szybki i dokładny pomiar ciśnienia w poszczególnych przekrojach, przy jednoczesnej ciągłej rejestracji wielkości mierzonej i ścisłym określeniu kolejnych miejsc położenia poruszającego się pociągu.

Sugeruje się, w przyszłych szerszych badaniach, jakie powinny być przeprowadzone w celu pełniejszego opisu zjawisk zachodzących podczas przejazdu pociągów w tunelach i stacjach metra, zwiększyć ilość przekrojów pomiarowych, również wyposażonych w kontaktrony, przy równoczesnym zwiększeniu częstotliwości rejestracji.

Jak wynika z badań przeprowadzonych na modelu fragmentu metra, współczynnik tarcia λ dla tunelu jak również współczynnik oporu czołowego c_x pociągów / bez względu na ich długość / - osiągają praktycznie stałe wartości w przybliżeniu dla $Re \geq 2 \times 10^4$.

Współczynnik c_x dla pociągu dwuwagonowego, przy istnieniu szczeliny między wagonami, w stosunku do zestawu wyposażonego w opaskę, zwiększa się w sposób zauważalny dla $Re \leq 1,4 \times 10^4$.

Długość pociągu nie wpływa proporcjonalnie na wielkość jego oporu czołowego.

Badania wykazały, że ruch pociągu w modelu fragmentu metra wywołuje przepływ cyrkulacyjnych strumieni powietrza, w przeważającej większości przypadków przy $Re \geq 2 \times 10^4$ ^{1/}.

Ze względu na nieuniknione odstępstwa wykonanego modelu fizykalnego w stosunku do wzorca, niektóre wyniki pomiarów / jak np. współczynniki oporu czołowego pociągów, rozkład ciśnienia statycznego wzdłuż tunelu / po przeliczeniu przez odpowiednie skale mogą być traktowane jako wartości przybliżone dla obiektu rzeczywistego. Wpływ wprowadzonych w modelu fizykalnym uproszczeń i odstępstw oceniony mógłby być dopiero po wykonaniu odnośnych badań w naturze.

W oparciu o przedstawione wyżej spostrzeżenia i wnioski-badaniom / na modelu fizykalnym / oraz analizie- powinny być poddane w przyszłości zmiany ciśnienia w tunelach z łącznikiem cyrkulacyjnym, z ażurową ścianką itp., przy nieustalonym ruchu jednego a następnie dwóch pociągów, przy różnych ich prędkościach i wzajemnym położeniu, także przy działającej wentylacji mechanicznej. Podobnymi badaniami powinny być również objęte zmiany ciśnienia w poszczególnych przekrojach stacji. Analogiczne badania należy wykonać w odpowiednich obiektach naturalnych.

- - - - -

^{1/} Średnia prędkość cyrkulacyjnych strumieni powietrza wynosiła $v_p \geq 1,425$ m/s przy $F_t = 0,0482$ m².

WYKAZ PIŚMIENNICTWA

- [1] Abramow F. A., Dolinskij W. A., Idelczik J. I., Kersten I. O., Codikow W. J.: Aerodynamiczeskoje soprotiwlenije gornych wyrabotok i tonnieliej mietropolitiena. Niedra, Moskwa 1964.
- [2] Abramowicz G. N.: Tieorja turbulientnych struj. Fizmatgiz, GIFML, Moskwa 1960.
- [3] Arbuzow G. W.: Wientiliacija tonnieliej mietropolitienow. Transzełdorizdat, Moskwa 1950.
- [4] Arżanikow N. S., Malcew W. N.: Aerodynamika. PWN, Warszawa 1958.
- [5] Baturin W. W., Elterman W. M.: Wentylacja naturalna w zakładach przemysłowych. Arkady, Warszawa 1974.
- [6] Bauman H.: Evaluation of friction coefficients and mean wall roughness from pressure and volume flow measurements in tunnels. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. University of Kent at Canterbury, England. April 1973.
- [7] Behring A. G., Hitchcock W. W.: Simplified techniques for prediction and control of subway air pressure

transients. Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. Held at Churchill College, Cambridge, England. March 1976.

- [8] Bendelius A. G., Metsch W. W.: Environmental control for the Caracas Metro. ASHRAE Journal. September 1973.
- [9] Brown F. T., Shah R. P.: Unsteady flow in tunnels. Massachusetts Inst. Technol., Engng. Projects Lab. Report. September 1967.
- [10] Budryk W.: Wentylacja kopalni. Część I. Przewietrzanie wyrobisk. Wydawnictwo " Śląsk ", Katowice 1951.
- [11] Bukowski J.: Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1976.
- [12] Bukowski J.: Technika laboratoryjna pomiarów aerodynamicznych. Wydawnictwo Instytutu Aerodynamicznego w Warszawie, Warszawa 1933.
- [13] Champy L.: The ventilation of tunnels. The Saccardo System. Annales des Mines / New Series /, 17, 1900.
- [14] Chilton E. G.: Buffeting tests on the Hudson Tube. Final Report. Stanford Res. Inst. U.S.A., June 1965.

- [15] Codikow W. J.: Wientiliacija i tiepłosnabżenie mietropolitienow. Niedra, Moskwa 1968.
- [16] Codikow W. J.: Wientiliacija i tiepłosnabżenie mietropolitienow. Niedra, Moskwa 1975.
- [17] Coj S., Pietrowicz S. I.: Elektromodielirujuszczije pribory dla rasczieta wientiliacjonnych sietiej. Izdatielstwo Nauka, Ałma - Ata 1965.
- [18] Coj S., Rogow J. I.: Osnowy tieorii wientiliacjonnych sietiej. Izdatielstwo Nauka, Ałma - Ata 1965.
- [19] Gudlin J. J., Harman C. M.: Experimental results analysis of flow in a pneumatic tube system during a vehicle transit. Transactions of the ASME. Vol. 98. June 1976.
- [20] Daugherty R. L.: Piston effect of trains in tunnels. Trans. ASME. February 1942.
- [21] Dayman B., Heft R. C., Kurtz D. W., Macie T. W., Stallkamp J. A.: Alternative concepts for underground rapid transit systems. Report No. DOT - TST - 77 - 31, II B. U.S. Department of Transportation. March 1977.

- [22] Dayman B.: Considerations for design and operation of facilities to study the aerodynamics of vehicles traveling in tubes. AIAA Paper 70 - 225 / AIAA 8th Aerospace Sciences Meeting, New York /. January 1970.
- [23] Dayman B., Kurtz D. W.: Experimental studies relating to the aerodynamics of trains travelling in tunnels at low speeds. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. University of Kent at Canterbury, England. April 1973.
- [24] Dzasochow A. Ch., Dzasochowa E. W.: Rudnicznaja wientiliacija i metody jejo kontrolia. Metałurgizdat, Moskwa 1954.
- [25] Eck B.: Technische Strömungslehre. Springer-Verlag Berlin / Göttingen / Heidelberg 1961.
- [26] Fackrell J. E.: Blockage effects on two - dimensional bluff body flow. The Aeronautical Quarterly. Vol. XXVI. November 1975.
- [27] Ferencowicz J.: Wentylacja i klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1964.
- [28] Fidleris V., Whitmore R. L.: Experimental determination of the wall effect for spheres falling

axially in cylindrical vessels. British Journal of Applied Physics. Vol. 12, September 1961.

- [29] Fox J. A., Vardy A. E.: A new air shaft design for railroad tunnels. ASHRAE Journal. February 1973.

- [30] Fox J. A., Vardy A. E.: The generation and alleviation of air pressure transients caused by the high speed passage of vehicles through tunnels. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. University of Kent at Canterbury, England. April 1973.

- [31] Fukuchi G.: Comment on the aerodynamic drag of the train in the tunnel. Quart. Reps. Rlway. Tech. Res. Inst., 5,2. June 1964.

- [32] Gaillard M. A.: Aerodynamics of trains in tunnels. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. University of Kent at Canterbury, England. April 1973.

- [33] Gaillard M. A.: Messungen an Modellen zur Bestimmung der Luftkräfte und der Druckverteilung an Eisenbahnzügen im Tunnel. ZAMP, Vol. 16, Fasc. 6, 1965.

- [34] Gawthorpe R. G., Pope C. W.: The measurement and interpretation of transient pressures generated by trains in tunnels. Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England. 1976.
- [35] Gogół W.: Wymiana ciepła. Tablice i wykresy. WPW, Warszawa 1976.
- [36] Goodman T. R.: The aerodynamics of tube travel - effects of compressibility and the resistance of slender cylinders traveling in a tube. Oceanics Inc. TR - 67 - 36; 67-21. November 1967.
- [37] Gouse S. W., Noyes B. S., Swarden M.: Aerodynamic drag on a body traveling in tube. Massachusetts Inst. Technol. Engng. Projects Lab. Report DSR - 76108 - 3. October 1967.
- [38] Gouse S. W., Noyes E. S., Nwude J. K., Swarden M.: Aerodynamic drag on vehicles in tunnels. Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering. December 1969.
- [39] Greenspon M. E.: Environmental control of Washington Metro. ASHRAE Journal. February 1978.

- [40] Gregorek G. M.: Aerodynamic simulation for vehicles moving through long tubes. AIAA Paper 69 - 313. March 1969.
- [41] Gregorek G. M.: An experimental study of the aerodynamic resistance of vehicles moving through tubes. Ohio State Univ., Aeronautical and Astronautical Res. Lab. Report. April 1969.
- [42] Gregorek G. M., Engle J. H.: An experimental study of aerodynamics of vehicles traveling at high speeds through long tubes. High Speed Ground Transportation Jnl., 3, 2. May 1969.
- [43] Haerter A.: Tunellüftung. HLH 6/1960.
- [44] Hammitt A. G.: Aerodynamic analysis of tube vehicle systems. AIAA Journal Vol. 10 Nr 3. March 1972.
- [45] Hammitt A. G.: The aerodynamics of vehicles passing through tunnels. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England. 1976.
- [46] Hammitt A. G.: Unsteady aerodynamics of vehicles in tubes. AIAA Journal Vol. 13 Nr 1. April 1975.

- [47] Hammitt A. G., Hersh A., Murthy K., Peterson J., Bliss D.: Drag of vehicles traveling in tubes. AIAA Paper 68 - 160. 6th. Aerospace Sciences Meeting, New York, January 1968.

- [48] Hara T.: Aerodynamic force acting on a high speed train at tunnel entrance. Bull. ISME, 4, 15, June 1961.

- [49] Hara T.: Aerodynamic problems when a train rushes into a tunnel. Japanese Railway Engng., 2, 4. December 1961.

- [50] Hara T.: Method of measuring the aerodynamic drag of trains. Bull. ISME, 8, 31, 1965.

- [51] Hara T., Ohkushi J.: Model tests on aerodynamical phenomena of a high speed train entering a tunnel. Quart. Repts. Rlway. Tech. Res. Inst., 3, 4. December 1962.

- [52] Harris G. L.: Aerodynamic near field of a subway train in smooth and rough tunnels. California Inst. Technol. Transit Development Corp., Inc. Tech. Report UMTA - DC - 06 - 0010 - 73 - 1. January 1973.

- [53] Henson D. A.: Design of a ventilation systems for an english channel tunnel. ASHRAE Journal. February 1978

- [54] Henson D. A.: Pressure transients in tunnels.
Ph. D. thesis, Univ. of Leeds. 1969.
- [55] Henson D. A., Fox J. A.: Transient flows in tunnel complexes of the type proposed for the Channel Tunnel. Heat and Fluid Flow, 4, 1. April 1974.
- [56] Henson D. A., Lowndes J.F.L.: Practical applications of a method of assessing the ventilation and draught relief requirements for underground railways. Second International Symposium on the Aerodynamic and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. Churchill College, Cambridge, England. March 1976.
- [57] Hoppe R.G., Guose S.W.: Fluid dynamic drag on vehicles travelling through tubes. Carnegie - Mellon Univ., Department of Mech. Engng. Report CMU 1 - 59076 - 1. August 1969.
- [58] Idelczik I.J.: Sprawocznik po gidrawliczeskim soprotiwlenjam. Gosudarstwiennojje Energeticzeskoje Izdatielstwo, Moskwa - Leningrad 1960.
- [59] Idelczik I.J.: Sprawocznik po gidrawliczeskim soprotiwlenjam. Maszynostrojenije, Moskwa 1975.
- [60] Jankowski J.: Pompy i wentylatory w inżynierii sanitarnej. Arkady, Warszawa 1975.

- [61] Johnstone R.E., Thring M.W.: Instalacje doświadczalne. Modele i metody powiększania skali.
PWN, Warszawa 1960.
- [62] Klinke T.: Obliczanie współczynnika tarcia λ dla tuneli szlakowych metra. Komunikat na Sympozjum Sekcji Ogrzewania i Wentylacji Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN pt. " Racjonalne użytkowanie energii w ciepłownictwie, ogrzewnictwie i wentylacji ".
11 - 12.V.1979, Kołobrzeg.
- [63] Klinke T.: Zagadnienia wentylacji w obiektach metra. COW nr 1 /112/1979 oraz referat na VII Zjeździe Ogrzewników Polskich " Klimapol 78 ".
- [64] Klinke T.: Problemy wentylacji tuneli i stacji Szybkiej Kolei Miejskiej. Zeszyty problemowe SOETO,
Warszawa 1978.
- [65] Klinke T.: Obliczanie współczynnika strat liniowych λ dla tuneli szlakowych metra. Praca przekazana do druku. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej.
Zeszyt 14, Arkady.
- [66] Klinke T., Mieszkowski P.: Efekty aerodynamiczne w tunelach metra. COW nr 4/80.
- [67] Klinke T., Mieszkowski P.: Zasady wymiarowania łączników międzytunelowych w metrze. COW nr 5/80.

- [68] Klinke T., Targowski L., Turlejski S.: Analiza przepływu powietrza wentylacyjnego w tunelach metra. Warszawa 1978. Praca niepublikowana.
- [69] Klinke T.: Wentylacja tuneli i stacji metra. Warszawa 1978. Praca niepublikowana.
- [70] Kołodziejczyk L., Rubik M., Mańkowski S.: Pomiary w inżynierii sanitarnej. Arkady, Warszawa 1974.
- [71] Kononienko W.O., Malczewska N. E.: Sowmiestnaja rabota wientilatorow w promyszliennych wientilacyjnych sietlach. Sanitarnaja Technika. B. XII, Izdatielstwo Budiewielnik, Kijów 1972.
- [72] Kopeć E.: Model matematyczny przepływu powietrza w boczniczy kopalnianej sieci wentylacyjnej. Prace IOiK PAN. Seria B, z.5, 1974.
- [73] Kubski K.: Badania rozkładu prędkości strumienia powietrza w podmuchach wywołanych jazdą pociągu i wzajemnego wpływu mijających się pociągów na zmiany ciśnienia statycznego działającego na ściany wagonów i na powierzchnię ozołową lokomotywy. PKP. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa. Zakład Pojazdów Szynowych. Temat : MK. 107 - 08 - 00 - 00 - 05, Warszawa 1974.

- [74] Kurtz D.W.: Aerodynamics of vehicles in tubes.
Jet Propulsion Laboratory Quaterly Technical Review,
Vol. 1, nr 2, Pasadena, California. July 1971.
- [75] Kurtz D. W., Dayman B. : Experimental aerodynamic
studies for intra - urban trains travelling in tunnels.
AIAA Paper 73 - 155 / AIAA 11 th Aerospace Sciences
Meeting, Washington /. January 1973.
- [76] Lukas E. : Untersuchungen über der Luftwiderstand
und das Geschwindigkeitsfeld von bewegten zylindri-
schen Nabenkörpern in Rohren /"Rohrfahrzeuge"/
bei grosser Versperrung des Rohrquerschnittes.
Dissertation, Technische Universität München, 1974.
- [77] Maeda K., Ogura K. : A direct measurement of skin
frictional force on a circular cylinder in air flow.
Tamagawa Daigaku Kogakubu KIO, MEM. Fac., Eng.
Tamagawa University. Nr 12/1977.
- [78] Magnus D. E., Panunzio S. : Aerodynamics of high
speed ground vehicles in tubes. AIAA Paper 69 - 749.
/ CASI/AIAA Subsonic Aero- and Hydro- dynamics
Meeting, Ottawa /. July 1969.
- [79] Magnus D. E., Panunzio S., Medeckí H. : Experimental
evaluation of vehicle drag in long tubes. Final

Report. General Applied Science Labs., U.S.A.
GASL TR-723. May 1969.

- [80] Malicki M.: Tablice do obliczania przewodów wentylacyjnych. Arkady, Warszawa 1977.
- [81] Malicki M.: Wentylacja przemysłowa. Arkady, Warszawa 1967.
- [82] Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. WNT, Warszawa 1979.
- [83] Marte J.E.: The design and operation of a large tube - vehicle aerodynamic testing facility. AIAA Paper 72 - 1001 / AIAA 7th Aerodynamic Testing Conf., Palo Alto, California /. September 1972.
- [84] Marte J.E.: VICS - 120 a tube - vehicle system test facility. Proc. 19th Annu. Techn. Meet.: "Realism Environ. Test. and Contr., Anaheim Calif. Mt. Prospect, I 11, 1973.
- [85] Mierzwiński S., Majerski S.: Modelowanie procesów wentylacji. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej. Zeszyt 2. Arkady, Warszawa 1972.
- [86] Mierzwiński S., Nawrocki W., Pałasz J., Piotrowski J.: Zastosowanie fizykalnego modelowania w pracach nad

zmniejszeniem uciążliwości źródeł pylenia. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej. Zeszyt 6. Arkady, Warszawa 1976.

- [87] Mills J.M., Wilson D.G.: Study by hydraulic analogy of the passage of high - speed trains through tunnels. Massachusetts Inst. of Technol., Engng. Projects Lab. Report DSR 76112 - 2 / Final Report /. December 1967.
- [88] Müller L.: Teria podobieństwa mechanicznego. WNT, Warszawa 1961.
- [89] Müller L.: Zasady teorii podobieństwa. Poradnik Inżyniera Mechanika. Tom 1. WNT, Warszawa 1968.
- [90] Nayak U.S.L., Gralewski Z.A., Stevens S.J.:
The aerodynamic drag of tube vehicles travelling at low subsonic speeds. Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. Churchill College, Cambridge, England. March 1976.
- [91] Neppert H., Sanderson R.: Vergleich zwischen Modell- und Originalmessergebnissen sowie der Theorie zur Schnellbahn - Aerodynamik. ZEV. Glas. Ann. 101 / 1977 / Nr 4. April.

- [92] Ohkushi J., Nishimura B.: Pressure rise in passenger - car in tunnel / on existing narrow gauge line /. Quart. Reps. Rlway Tech. Res. Inst., 11, 1. March 1970.
- [93] Okiishi T.H., Serovy G.K.: An experimental study of the turbulent - flow boundary - layer development in smooth annuli. Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering. December 1967.
- [94] Panunzio S., Magnus D.E.: Analysis of the near flow field for tube - vehicle systems. General Applied Science Labs. Inc., U.S.A. GASL - TR - 732. September 1969.
- [95] Panunzio S., Magnus D.E.: Experimental investigation of the near flow field for tube vehicles. General Applied Science Labs. Inc., U.S.A. GASL - TR- 70 - - 749, FRA - RT - 71, 72. November 1970.
- [96] Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas Inc.: Development of basic mathematical models for subway environmental simulation. Interim Report. Inst. for Rapid Transit, Report UMTA - DC - MTD - 7 - 71 - 5. March 1971.
- [97] Parsons, Brinckerhoff, Quade & Douglas Inc.: Single - track subway environmental simulation model. Inst. for Rapid Transit, Tech. Report UMTA - DC - MTD - 7 - - 71 - 22. August 1971.

- [98] Pawiński J., Roszkowski J., Strzeński J. : Przewiet-
rzanie kopalń. Wydawnictwo " Śląsk ", Katowice 1979.
- [99] Poliakow A. Ch. : Projektowanie wentylacji tunnie-
lej. Izdatielstwo Litieratury Po Stroitelstvu,
Moskwa 1971.
- [100] Prandtl L. : Dynamika przepływów. PWN, Warszawa 1956.
- [101] Prosnak W. J. : Mechanika płynów. PWN, Warszawa 1970.
- [102] Pursall B. R., King A. L. : The aerodynamics and
ventilation of vehicle tunnels. BHRA Fluid
Engineering, Cranfield, 1976.
- [103] Pursall B. R. : The determination of friction factors
for the ventilation ducts of the Dartford Tunnel.
J. I. H. V. E. April 1967.
- [104] Pursall B. R. : The theoretical and practical deter-
mination of friction factors for vehicular tunnel ven-
tilation ducts. H. & VE. February 1964.
- [105] Recknagel - Sprenger : Ogrzewanie i klimatyzacja.
Poradnik. Arkady, Warszawa 1976.
- [106] Research on the dynamic of a vehicle in a tube.
Final Progress Report. Rensselaer Polytechnic Inst.,
TR - AE - 6406. AD 603024. June 1964.

- [107] Sajben M, : Fluid mechanics of train - tunnel systems in unsteady motion. AIAA Journal, Vol. 9 nr 8. August 1971.
- [108] Seeman G. R., Cullin C. A., Krachman H. E. : Subway aerodynamic scale model testing. A.S.M.E. Paper 73 - ICT - 57. September 1973.
- [109] Seeman G. R., Krachman H. E., El Raheb M. S. : Aerodynamic testing technique for scale model subway vent shafts and stations. A.S.M.E. Paper 73 - WA/Aut-10. November 1973.
- [110] Skinner J. H. : Tube vehicle drag. High Speed Ground Transportation Jnl., 3, 2. May 1969.
- [111] Skoczinski A. A., Ksientofonowa A. I., Chariew A.A., Idelczik I. J. : Aerodynamiczeskoje soprotiwlienije szachtnych stwołow i sposoby jego sniżenija. Uglietiechizdat, Moskwa, Leningrad 1953.
- [112] Staniszewski B. : Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979.
- [113] Starowierow I. G.: Sprawocznik projektirowszczika promyszliennych, żiłych i obszcziestwiennych zdani i sooruzenij. Izdatielstwo Litieratury Po Stroitielstwu, Moskwa 1969.

- [114] Stix O.: Studie über den Luftwiderstand von Eisenbahnfahrzeugen. Schweizerische Bauzeitung nr 3, Juli 1906.
- [115] Strzałkowski A., Sliżyński A.: Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów. PWN, Warszawa 1978.
- [116] Strom C. R.: Aerodynamic analysis of vehicles in tunnels. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. University of Kent at Canterbury, England. April 1973.
- [117] Suo M., Jacobs P.: Hydraulic analogy study of waves in tunnels. Massachusetts Inst. of Technol., Engng. Projects Lab. Report DSR - 76111. November 1966.
- [118] Swarden M. C., Wilson D. G.: Vehicle - tunnel entry at subsonic speeds. Final Report. Part I. Massachusetts Inst. of Technol., Report DSR - 76111 -3: FRA - RT - 70 - 28. March 1970.
- [119] Swarden M. C.: Vehicle - tunnel entry at subsonic speeds. Final Report. Part II. Massachusetts Inst. of Technol., Engng. Projects Lab. Report DSR - 76111 - 4 for U. S. Department of Transportation. / Report FRA - RT - 73 - 16 /. January 1973.

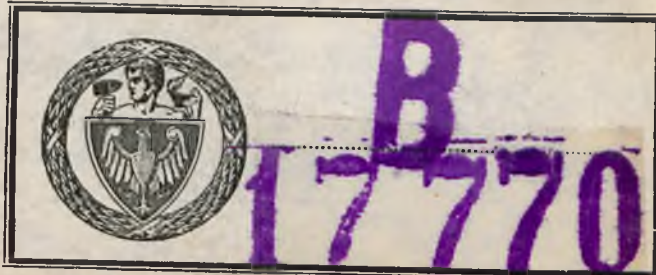
- [120] Szechenyi E. : Supercritical Reynolds number simulation for two - dimensional flow over circular cylinders. Journal of Fluid Mechanics. April 1974.
- [121] Szücs E. : Modelowanie matematyczne w fizyce i technice. WNT, Warszawa 1977.
- [122] Taljew A. N.: Raschiet miestnykh soprotivlenij. Gosudarstviennoje Izdatielstwo Litieratury po Stroitelstvu i Architekturie, Moskwa 1952.
- [123] Taljew W. N. : Aerodynamika wientiliacji. Gosudarstviennoje Izdatielstwo Litieratury po Stroitelstvu i Architekturie, Moskwa 1954.
- [124] Targowski L.: Modelowanie przepływów powietrza i wymiany ciepła w halach przemysłowych. Rozprawa doktorska. Politechnika Warszawska, 1978.
- [125] Tollmien W.: Luftwiderstand und Druckverlauf bei der Fahrt von Zügen in einem Tunnel. Zeitschrift des VDI, Februar 1927.
- [126] Trzaskoma W. P.: Tube vehicle system / TVS / technology review. MITRE Corporation. Report FRA - RT 71-44 for U.S. Dept. of Transportation. July 1970.

- [127] Valensi J., Favier D., Magallon D.: Theoretical and experimental investigation of the piston effect in a twin tunnel subway. Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England 1976.
- [128] Vardy A. E.: The alleviation of pressure transients in tunnels. Department of Civil Engineering, University of Leeds, England 1973.
- [129] Vardy A. E.: The use of airshafts for the alleviation of pressure transients in railway tunnels. Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. Churchill College, Cambridge, England. March 1976.
- [130] VDI - Richtlinien : Lüftung von Garagen und Tunneln. VDI 2053, Dezember 1969.
- [131] Walden H., Stasiak J.: Mechanika cieczy i gazów w inżynierii sanitarnej. Arkady, Warszawa 1971.
- [132] Woods W. A. : Wave action associated with a train entering a tunnel. International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. University of Kent at Canterbury, England. April 1973.

- [133] Woods W. A., Pope C. W.: Secondary aerodynamic effects in rail tunnels during vehicle entry. Second International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels. BHRA Fluid Engineering. Churchill College, Cambridge, England. March 1976.
- [134] Wytyczne wykonywania teoretycznych przejazdów trakcyjnych dla potrzeb PKP. Część II. Zasady wykonywania przejazdów teoretycznych. Centralny Ośrodek Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa. Zakład Pojazdów Szynowych. Temat nr 3066/17, Warszawa 1971.
- [135] Yamamoto A. : Aerodynamics of train and tunnel. Proc. 1st Int. Conf. on Vehicle Mechanics. Wayne State Univ., Detroit, Mich. July 1968.
- [136] Yamamoto A. : On the gradual pressure rise by a flared tunnel entrance. Quart. Reps. Rlway. Tech. Res. Inst., 6,4. December 1965.
- [137] Yamamoto A. : Pressure rise due to friction of a train at the entrance of a tunnel. Rlway. Tech. Res. Rep. 666. January 1969.
- [138] Zaks N. : Podstawy aerodynamiki doświadczalnej. Wydawnictwo MON 1957.

- [139] Zierep J. : Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów. PWN, Warszawa 1978.
- [140] Instrukcja " 31 statistics program Library "
Vol. 1, Tektronix, Inc., Beaverton, U.S.A.
- [141] I linia metra w Warszawie. ZTE, Metroprojekt 1975.





400000000111945