ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Górnictwo z. 65 Nr kol. 404

Andrzej Fryoz
Krystian Kropsz

# ZALEŻNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKA OPORU WYROBISK BEZ OBUDOWY OD LICZBY REYNOLDSA

Streszczenie. W artykule przedstawiono stan zagadnienia związanego z zależnością $\lambda = f(Re)$ dla wyrobiska bez obudowy. Stwierdzono, że dla liczb $Re < 3 \cdot 10^5$ wartość współczynnika oporu $\lambda$ szybko wzrasta. Przyjmowanie do obliczeń $\lambda$ = const. prowadzić może do znacznych błędów.

## 1. Wstęp

W nowoczesnym górnictwie wszystkie operacje dotyczące rozprowadzenia powietrza w kopalniach opiera się obecnie o elektroniczną lub analogową technikę obliczeniową. Konieczne jest uzyskiwanie rzetelnych danych wyjściowych, które w konsekwencji stanowią o dokładności obliczeń, a tym samym o skuteczności nowej metody kierowania przewietrzaniem w kopalniach. Takimi wyjściowymi danymi są opory wyrobisk górniczych, których jednak określanie napotyka na różne obiektywne trudności. Dla kopalń węgla, gdzie z reguły stosowane są wyrobiska z obudową, wielkości oporów elementarnych zostały już w wielu pracach stosunkowo dokładnie określone. Dla kopalń rud miedzi, cynku, soli i innych, gdzie większość wyrobisk pozostaje bez obudowy, a prędkości przepływu powietrza z uwagi na znaczne kubatury tych wyrobisk są małe, brak opracowań traktujących o oporach takich wyrobisk. Zachodzi więc konieczność ustalenia wpływu jaki może mieć na zmienność współczynnika oporu ($\lambda$) zmiana wielkości liczby Reynoldsa (Re) w wyrobiskach bez obudowy. Ilość tych wyrobisk stale rośnie z uwagi na rozwój górnictwa rud w świecie, w którym to górnictwie takie wyrobiska przeważnie dominują. Uzyskanie rozeznania w postawionym problemie pozwoli na ustalenie oporów elementarnych wyrobisk bez obudowy i w konsekwencji umożliwi programowanie wszelkich problemów wentylacyjnych kopalń w oparciu o ETO, co wpłynie na znaczne zwiększenie komfortu i bezpieczeństwa pracy w kopalniach.

## 2. Analityczne określenie współczynnika oporu $\lambda$ w funkcji liczby Re

Badania związane z określeniem współczynnika oporu $\lambda$ najczęściej prowadzono w hydromechanice dla rur prostoosiowych kołowych zarówno gładkich jak i chropowatych. Dla ruchu laminarnego otrzymano na drodze teoretycznej z prawa Hegena-Poiseuille'a wzór określający zależność $\lambda = f(Re)$ o postaci:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \tag{1}$$

Dla ruchu burzliwego współczynnik oporu $\lambda$ określa się poprzez doświadczenia, gdyż teoretycznie nie uzyskano poprawnych rozwiązań. Dla rur gładkich w zakresie liczb Re $<$ 80 000 najbardziej znany jest wzór Blasiusa

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \tag{2}$$

Dla zagadnień technicznych ważniejsze jest jednak określenie współczynnika oporu $\lambda$ dla przewodów ze ścianami chropowatymi. Przy przepływach laminarnych wzór (1) jest nadal ważny, a więc współczynnik $\lambda$ jest zależny jedynie od liczby Re. Stwierdzono doświadczalnie, że dla ruchu w pełni turbulentnego wartość współczynnika $\lambda$ jest niezależna od wielkości liczby Reynoldsa, a jedynie od wartości względnej chropowatości ($\varepsilon$) określanej jako stosunek średnicy hydraulicznej (d) do wielkości chropowatości ścian (k) przewodu. Współczynnik oporu $\lambda$ rur chropowatych określany jest dla ruchu w pełni turbulentnego najczęściej z zależności podanej przez Prandtla

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{d}{k} + 1,14 = 2 \log \frac{3,71 \cdot d}{k} \tag{3}$$

W obszarze między ruchem laminarnym a ruchem o zupełnie rozwiniętej turbulencji współczynnik oporu zależny jest zarówno od wartości chropowatości względnej ($\varepsilon$) jak i od wartości liczby Reynoldsa. Dla tego obszaru dla rur chropowatych najbardziej rozpowszechniona jest zależność $\lambda = f(d/k, Re)$, podana przez Colebrooka

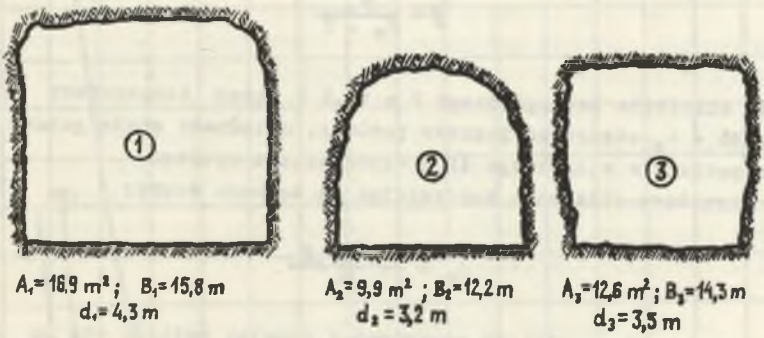
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{2,51}{Re} + \frac{k}{3,71\, d}\right) \tag{4}$$

Wzory (1,2,3,4) na obliczanie współczynnika oporu $\lambda$ wyprowadzone zostały w oparciu o przepływy w rurach o przekroju kołowym. Dla wyrobisk górniczych, których przekrój jest znacznie większy od przekrojów rur, a ponadto kształt przekroju wyrobisk często znacznie odbiega od kołowego usta-

lenie poprawnych wzorów na obliczanie współczynnika oporu napotyka na większe trudności. Zagadnienie jest jeszcze trudniejsze dla wyrobisk bez obudowy, gdzie często zarówno zmienny jest przekrój jak i chropowatość. Ponadto dochodzą do tego trudności związane z pomiarami w warunkach naturalnych, zwłaszcza w zakresie niższych liczb Reynoldsa. Badania modelowe tego problemu ze względu na trudności odwzorowania wyrobisk bez obudowy nie były prowadzone.

## 3. Określenie przebiegu funkcji $\lambda = f(Re)$ na drodze pomiarów w warunkach kopalnianych

Pomiary wykonano w trzech wyrobiskach bez obudowy, w których istniała możliwość regulacji natężenia przepływu powietrza w szerokim zakresie. Kształty przekrojów i ich parametry pokazano na rys. 1. Jako przekrój (A)




Rys. 1. Kształty przekrojów wyrobisk bez obudowy objętych pomiarami

i obwód (B) przyjęto wartości średnie uzyskane z pomiarów w kilku miejscach. Długości prostych i poziomych odcinków pomiarowych wynosiły od 150 do 200 m. Pomiar prędkości powietrza wykonywano anemometrami skrzydełkowymi firmy "Rossenmüller" w przekrojach zawężonych znajdujących się poza odcinkiem pomiarowym. Różnice ciśnień między punktami ograniczającymi odcinek pomiarowy wyrobiska mierzono sposobem manometrycznym przy użyciu węży igelitowych i mikromanometru pochyłego typu MPR-4. Ze względu na bardzo nieznaczną różnicę przekrojów w punktach ograniczających odcinek pomiarowy, końce wężów w tych punktach podłączano do sond ciśnienia statycznego. Ponadto w czasie pomiarów prędkości powietrza i różnicy ciśnień między punktami końcowymi odcinka pomiarowego mierzono temperaturę suchą ($t_s$), wilgotną ($t_w$), oraz ciśnienie bezwzględne (P = 13,6 b). Współczyn-

nik oporu $\lambda$ obliczano z przekształconego wzoru Darcy-Weisbacha na spadek naporu dla rozwiniętej turbulencji:

$$\lambda = \frac{2\,d}{\rho \cdot l} \cdot \frac{\Delta P_R}{w^2} \qquad (5)$$

gdzie:

d – średnica hydrauliczna równa $d = 4\,\frac{A}{B}$ ..... m,

$\Delta P_R$ – spadek naporu na odcinku pomiarowym $kp/m^2$, $N/m^2$,

l – długość odcinka pomiarowego ..... m,

w – średnia prędkość przepływu powietrza w wyrobisku m/s,

$\rho$ – gęstość powietrza w czasie pomiarów $kps^2/m^4$, $kg/m^3$.

Gęstość powietrza określano z przekształconego wzoru Clapeyrona

$$\rho = \frac{P}{R_z \cdot T} \qquad (6)$$

Wielkość ciśnienia bezwzględnego P = 13,6 b oraz temperaturę absolutną $T = 273{,}16 + t_s$ otrzymano poprzez pomiary, natomiast stałą gazową zastępczą dla powietrza wilgotnego ($R_z$) wyznaczono z wykresu.
Liczbę Reynoldsa obliczano korzystając ze znanego wzoru:

$$R_e = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} \qquad (7)$$

Ponieważ ciśnienia powietrza spotykane w kopalni zalicza się do umiarkowanych, dlatego przyjąć można, że lepkość dynamiczna w kopalniach zależy jedynie od temperatury (1). Do obliczeń lepkości dynamicznej posłużono się wzorem Sutherlanda

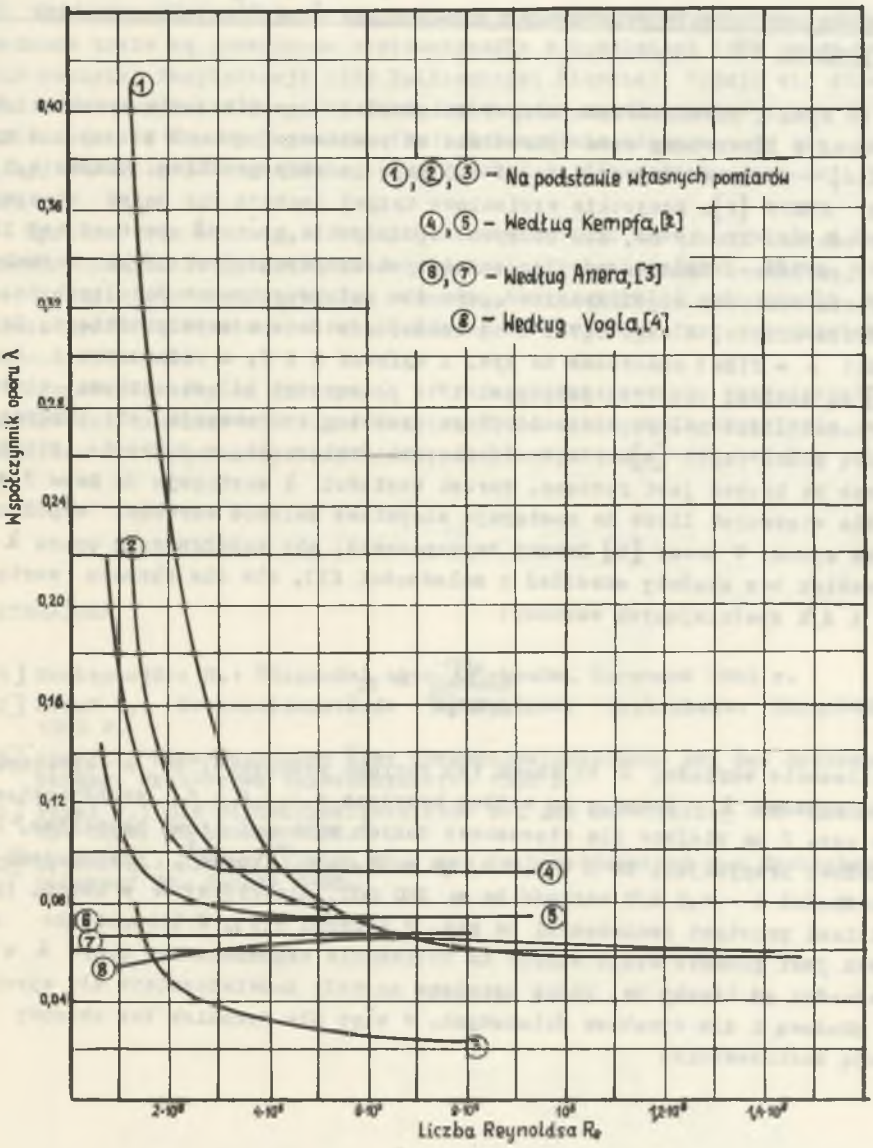
$$\mu = \mu_o \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273}\right)^{3/2} \qquad (8)$$

gdzie:

$\mu_o$ – lepkość dynamiczna powietrza w temperaturze $t = 0^oC$

$$\mu_o = 17{,}41 \cdot 10^{-7} \left(\frac{Kp\,s}{m^2}\right),$$

C – stała Sutherlanda charakterystyczna dla danego gazu (dla powietrza C = 112).




Rys. 2. Zależność współczynnika oporu $\lambda$ od liczby Reynoldsa Re dla wyrobisk bez obudowy

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykreślono trzy krzywe typu $\lambda = f(Re)$, które na rys. 2 oznaczono cyframi 1,2,3 odpowiednio do oznaczonych wyrobisk z rys. 1.

## 4. Stan zagadnienia związanego z określeniem $\lambda = f(Re)$ dla wyrobisk bez obudowy

Na rys. 2 przedstawiono krzywe zależności $\lambda = f(Re)$ dla wyrobisk bez obudowy z literatury oraz wykreślone na podstawie pomiarów własnych. Z rys. 2 widać, że tylko krzywe 1,2,3 i 4,5 mają podobny przebieg. Krzywe 4,5 podał KEMPF [2]. Wszystkie wymienione krzywe cechują się dosyć znacznymi wartościami liczby Re, dla których współczynnik oporu $\lambda$ jest od tej liczby niezależny. Ponadto wspólną cechą tych krzywych jest fakt szybkiego wzrostu wartości współczynnika oporu dla mniejszych wartości liczb Re. Pozostałe krzywe, a więc 6,7 i 8 są bardzo odmienne w swym przebiegu. Zależności $\lambda = f(Re)$ oznaczone na rys. 2 cyframi 6 i 7, a podane przez Anera [3] są liniami prostymi poziomymi i to począwszy od stosunkowo niskich wartości liczb Re. Zupełnie odrębnym przebiegiem cechuje się krzywa 8, którą podał Vogel [4]. Odrębność stanowi fakt, że w zakresie niższych liczb Re krzywa jest rosnąca. Wzrost wartości $\lambda$ następuje do $Re \approx 7.10^5$, a dla większych liczb Re następuje stopniowe malenie wartości współczynnika oporu. W pracy [5] Greuer zaproponował, aby współczynnik oporu $\lambda$ dla wyrobisk bez obudowy określać z zależności (3), ale dla obszaru wartości Re i d/k spełniających warunek:

$$\frac{Re\sqrt{\lambda}}{d/k\sqrt{8}} > 70 \tag{9}$$

Obliczanie wartości $\lambda$ ze wzoru (3) pociąga założenie, że w wyrobiskach bez obudowy $\lambda$ = const., co według krzywych 1,2,3,4 i 5 przedstawionych na rys. 2 ma miejsce dla stosunkowo dużych wartości liczb Reynoldsa. Przykładowo przyjmując, że d = 4,0 m, $\mu = 18,3.10^{-7}$ kps/m$^2$, otrzymujemy dla prędkości w = 1,0 m/s wartość $Re \approx 280\ 000$, dla której $\lambda \neq$ const. (poza liniami prostymi oznaczonymi na rys. 2 cyframi 6,7). W literaturze znanych jest ponadto wiele wzorów na obliczanie współczynnika oporu $\lambda$ w zależności od liczby Re, które ustalone zostały doświadczalnie dla wyrobisk z obudową i dla wyrobisk ścianowych, a więc dla wyrobisk bez obudowy nie mają zastosowania.

## 5. Zakończenie

Z analizy zebranych materiałów wynika, że badania przeprowadzone nad ustaleniem zależności $\lambda = f(Re)$ dla wyrobisk bez obudowy są nieliczne i znacznie różniące się wynikami.

Już sam ten fakt skłania do podjęcia dalszych badań nad tym problemem. Badania takie są prowadzone systematycznie w kopalniach LGOM przez Instytut Techniki Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej. Wydaje się słusznym już teraz zwrócenie uwagi na fakt, zmienności współczynnika oporu ($\lambda$) w zależności od liczby Reynoldsa (Re). Szczególnie błędnym może się okazać przyjmowanie współczynnika oporu jako stałego dla małych wartości liczb Re.

Wyrobisk bez obudowy, w których liczba Re jest mała, istnieje w kopalniach szczególnie dużo właśnie w rejonach eksploatacyjnych. Chcąc kierować wentylacją wewnątrz takich rejonów, trzeba ustalić ostatecznie wielkości oporów elementarnych w zależności od (Re) i to jest przedmiotem prowadzonych badań.

Poprawność ustaleń dokonanych w tym względzie rzutuje bezpośrednio na możliwości zastosowania z powodzeniem ETO do kierowania wentylacją w kopalniach stosujących systemy udostępnienia i eksploatacji też bez obudowy.

## LITERATURA

[1] Bretsznajder S.: Własności cieczy i gazów. Warszawa 1962 r.

[2] Kempf E.: Wetterwiderstände ausbauloser Grubenbaue. Bergakademie 1963 r.

[3] Aner L.: Untersuchungen über Strömungswiderstände bei der Grubenbewetterung. Freiberger Forschungshefte 1968 r.

[4] Vogel W.: Die Strömungswiderstände bei der Bewetterung von Grubenbaen. Diss. TH Aachen 1932.

[5] Greuer R.: Einige Angaben über den Wetterwiderstand von Grubenbauen. Glückauf 30. Januar 1960.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕЗАКРЕПЛЕННЫХ ВЫРАБОТОК ОТ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА

Р е з ю м е

В статье представлено положение вопроса связанного с зависимостю $\lambda = f(Re)$ для незакрепленных выработок. Установлено, что для $Re < 3.10^5$ стоимость коэффицента сопротивления $\lambda$ быстро увеличиваеться. Принимание к расчётам коэффицента сопротивления $\lambda$ постоянном может приводить к значительном ошибком.

THE RESISTANCE - COEFFICIENT AS FUNCTION OF REYNOLDS NUMBER FOR WORKINGS WITHOUT SUPPORT

S u m m a r y

In the paper the review of the problem concerning the relation $\lambda = f(Re)$ has been presented, for workings without support. The conclusion is, that the coefficient of resistance increase rapidly when the values of numbers $R_e$ are underling to $3 \cdot 10^5$.

When we accept in calculations the value constant for $\lambda$ it can results large errors.