

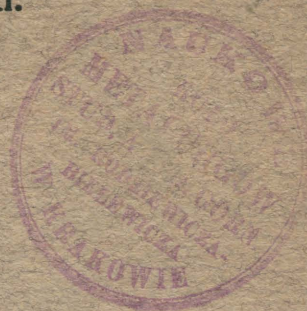
4086

607

W.....

39/XVII

inż. ROMAN DAWIDOWSKI.

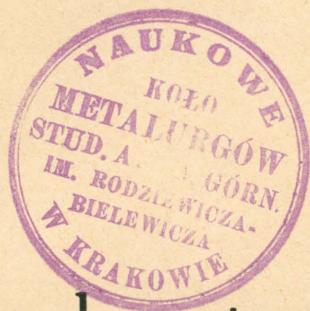


Opór różnych gatunków węgla przy spalaniu na rusztach.

Odbitka z „Przeglądu Technicznego”, r. 1926.

WARSZAWA
1926

Inż. ROMAN DAWIDOWSKI.



Opór różnych gatunków węgla przy spalaniu na rusztach.

Odbitka z „Przeglądu Technicznego”, r. 1926.

WARSZAWA
1926

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
w KRAKOWIE
BIBLIOTEKA

IV. 23278

NzB 6598

BIBLIOTEKA GŁÓWNA AGH



1000327444

Uświadomienie potrzeby ulepszenia gospodarki cieplnej rozpowszechniało się we wszystkich dziedzinach przemysłu jeszcze w ostatnich latach przed wojną światową, szczególnie zaś szybko wzmoгло się w czasie wojny, a zwłaszcza po wojnie, ze względu na niedobór paliwa w stosunku do zapotrzebowania, a później — z powodu konieczności potaniania produkcji.

Z punktu widzenia gospodarczo - technicznego jednym z ważniejszych zagadnień gospodarki cieplnej jest bezpośrednie spalanie węgla, tu bowiem teoria pozostaje poza postępem techniki w zakresie konstrukcji palenisk, z drugiej strony przy bezpośrednim spalaniu straty są najmniej uchwytne z powodu skomplikowanego przebiegu spalania.

Gdy rzucimy okiem na rys. 1 i uzmysłowimy sobie, że zużycie węgla w poszczególnych gałęziach przemysłu odbywa się przeważnie w drodze spalania bezpośredniego, a następnie dopiero obrót ciepła rozdrabnia się na poszczególne wtórne urządzenia cieplne, dojdziemy do przekonania, że nie bez słuszności oznaczony został proces bezpośredniego spalania węgla, jako ważne zagadnienie gospodarki cieplnej i jej postępu.

Co do organizacji prac nad ulepszeniem gospodarki cieplnej, naogół zaznaczyć należy, że pod tym względem — z powodu braku planowej akcji — nie dorównujemy ani w części zagranicy, gdzie — jak np. w Niemczech — liczne krajowe stacje węglowe oraz liczne stacje cieplne i towarzystwa dozoru kotłów, jak też i syndykaty węglowe, współzawodniczą w propagandzie oszczędności cieplnej. Niemniej liczne stowarzyszenia „walki z dymem” przeciwdziałają skutecznie plądze dymu, co łączy się pośrednio z akcją cieplną. Z rys. 1 wynika, że największe ilości węgla zużywają same kopalnie do celów własnych. Mylnem jest przytem zapatrywanie, jakoby węgiel t. zw. deputatowy stanowił przyczynę tak znacznego zużycia, gdyż węgiel ten nie stanowi poważnej rubryki w stosunku do zużycia na kopalniach węgla do celów technicznych. To też jest powodem, że np. w Niemczech punkt ciężkości akcji cieplnej w przemyśle przesuw

się coraz bardziej ku kopalniom i hutom, czego dalszym wynikiem musi być także szczególne zajęcie się uczelni tych obu zawodów teoretycznymi badaniami z dziedziny opałoznawstwa. Dla dalszego bowiem wyświeśtlenia samej teorii bezpośredniego spalania, nieodzowne są czysto naukowe doświadczenia wyższych uczelni, celem ustalenia całego szeregu zawiłych przebiegów fizycznych i ściśle z niemi złączonych chemicznych, z których się składa zjawisko spalania.

W dalszych wywodach artykułu zajmie się autor szczegółowo jednym z ważniejszych częściowych, fizycznych przebiegów spalania, a tym jest przepływ powietrza przez warstwy węgla różnych gatunków, których racjonalne spalanie zależy przeważnie bezpośrednio od tego przebiegu. Wprawdzie, przy zmianie rodzaju węgla na ruszcie, występują także inne uboczne względy, te jednak w gruncie rzeczy są wszystkie związane z przepływem powietrza, dla którego znowu miarodajnym jest opór rusztu, złożony z oporu szczelin rusztowych oraz z oporu znajdujących się na ruszcie warstwy węgla.

Wpływ przepływu powietrza w czasie spalania uwydatnia się ze znanego dynamicznego równania spalania Nusselta¹⁾

$$K = 0,1736 \frac{k_0^{0,214} p^{0,786} w^{0,786} F \cdot Z \cdot O_2}{T^{0,472} d^{0,16} L^{0,053}} \dots\dots 1)$$

W równaniu tem oznaczają:

K = ilość spalonego węgla w kg ,

k_0 = współczynnik przenikania gazu przy $0^\circ C$ i $1 at$,

p = ciśnienie gazu w kg/m^2 ,

w = średnia prędkość w m/sek ,

F = pole powierzchni węgla w m^2 ,

Z = czas spalania w $godz.$,

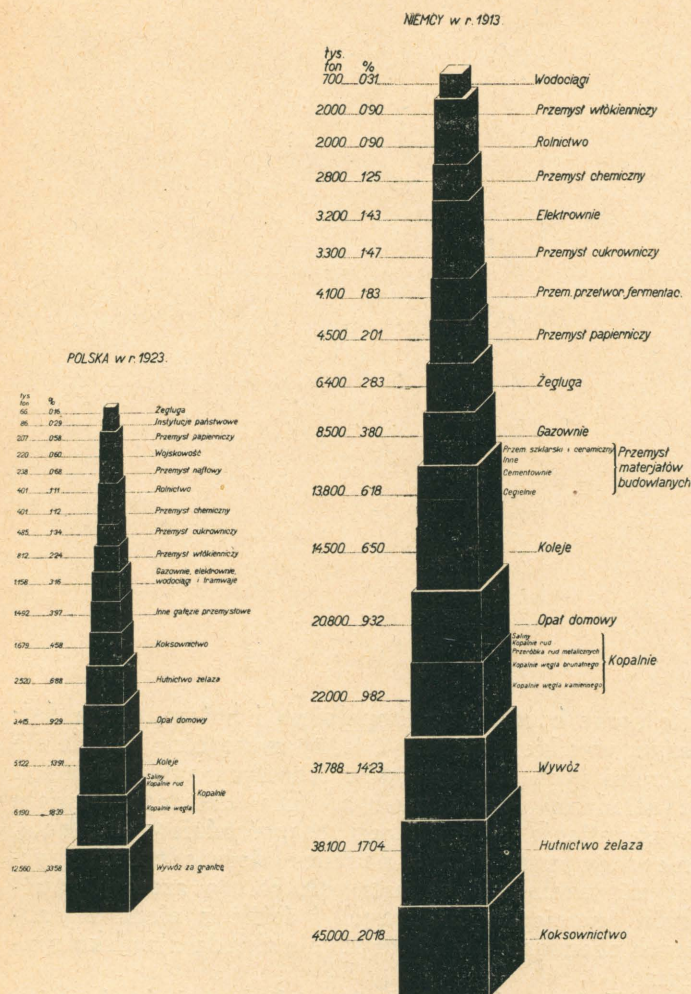
O = koncentracja tlenu,

T = temperatura bezwzględna,

d = średnica kanałów gazowych w m ,

L = długość kanałów w m .

¹⁾ Z. d. V. d. I. t. 60 (1916), str. 104/107.



Rys. 1. Przybliżone zużycie węgla w Niemczech w r. 1913 i w Polsce w r. 1923.

Gdy w równanie to wstawimy w miejsce prędkości objętość gazu przepływającego na godzinę przez jeden kanał w warstwie węgla, a to

$$w_0 = \frac{d^2 \pi w 3600 \cdot 288 p}{4 \cdot 10000 T}$$

to otrzymamy:

$$K = \frac{4,52}{10^5} \frac{k_0^{0,214} T^{0,214} w_0^{0,786}}{d^{1,732} L^{0,054}} F \cdot Z \cdot O_2 \dots (2)$$

Powyższe równanie Nusselta przedstawia idealny przebieg spalania, a nadto obejmuje jedynie zgazowywanie węgla w czasie spalania, z zupełnym pominięciem ważnego przebiegu w czasie spalania, jakim jest odgazowywanie węgla.

Mimo to, daje nam powyższe równanie jakościowo dokładny obraz spalania, jakkolwiek ilościowo wyniki równania z rzeczywistością się nie zgadzają. Równanie Nusselta zostało co do układu, a więc pod względem jakościowym, potwierdzone doświadczeniami prof. Losche'go²⁾, który nawet poczynił próby ku praktycznemu zastosowaniu tego równania do obliczenia t. zw. obciążenia rusztów ilością spalanego na godzinę węgla, a uczynił to w ten sposób, że w powyższe równanie zamiast powierzchni węgla F wstawił powierzchnię ścian kanałów w warstwie węgla $F = \rho d \pi L$, wskutek czego otrzymał obciążenie 1 m² rusztu na godz. ($Z = 1$ godz.)

²⁾ Z. d. V. d. I. t. 61, str. 721/726, 766/771 i 787/791.

$$B = \frac{4,52 k_0^{0,214} T^{0,214} w_0^{0,786}}{10^5 d^{0,732}} \rho \pi L^{0,946} O_2 = c T^{0,214} w_0^{0,786} L^{0,964} O_2 \frac{\rho}{d^{0,732}} \dots (3)$$

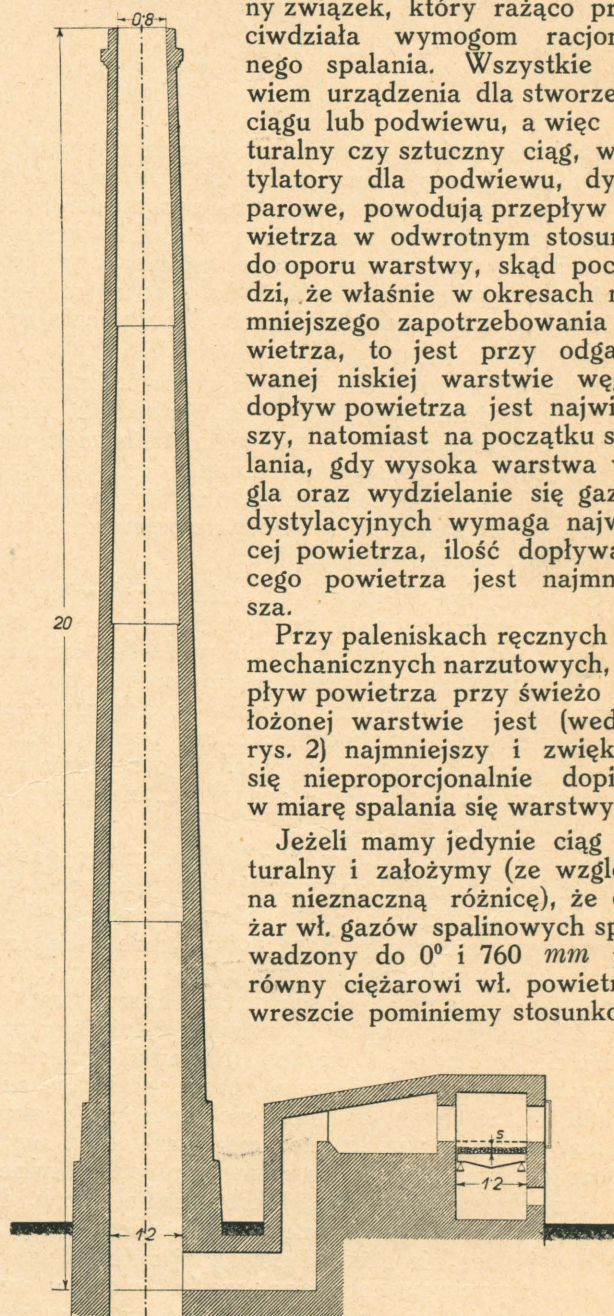
Podczas gdy równanie Nusselta wykazało, że dla ilości spalanego węgla i jakości spalania miarodajną jest oprócz temperatury także prędkość powietrza (w oraz p), nadmiar powietrza $\frac{1}{O_2}$ i kształt, a więc gatunek węgla (F , L , d), to z przekształconego równania prof. Losche'go wynika jeszcze wyraźniej, że najważniejszymi czynnikami są, oprócz temperatury, ilość powietrza (O_2 oraz w_0) i wysokość warstwy, względnie gatunek węgla (ρ , d , L). Zgadza się to z dotychczasowymi spostrzeżeniami praktycznymi.

Tymczasem w praktyce między urządzeniami używanymi do poruszania powietrza a oporem przeciwstawiającym się jego przepływowi zachodzi naturalny związek, który rażąco przeciwdziała wymogom racjonalnego spalania.

Wszystkie bowiem urządzenia dla stworzenia ciągu lub podwiewu, a więc naturalny czy sztuczny ciąg, wentylatory dla podwiewu, dysze parowe, powodują przepływ powietrza w odwrotnym stosunku do oporu warstwy, skąd pochodzi, że właśnie w okresach najmniejszego zapotrzebowania powietrza, to jest przy odgazowanej niskiej warstwie węgla, dopływ powietrza jest największy, natomiast na początku spalania, gdy wysoka warstwa węgla oraz wydzielanie się gazów dystylacyjnych wymaga najwięcej powietrza, ilość dopływającego powietrza jest najmniejsza.

Przy paleniskach ręcznych lub mechanicznych narzutowych, dopływ powietrza przy świeżo nałożonej warstwie jest (według rys. 2) najmniejszy i zwiększa się nieproporcjonalnie dopiero w miarę spalania się warstwy.

Jeżeli mamy jedynie ciąg naturalny i założymy (ze względu na nieznaczną różnicę), że ciężar wł. gazów spalinowych sprowadzony do 0° i 760 mm jest równy ciężarowi wł. powietrza, wreszcie pominiemy stosunkowo



Rys. 2. Ręcznie obsługiwane palenisko piecowe.

nieznaczące tarcie gazów w kanałach, otrzymamy równanie ciągu kominowego.

$$H \left(\frac{1}{1 + \alpha t_0} - \frac{1}{1 + \alpha t_1} \right) = \frac{v_s^2 \left(\frac{4 \zeta H}{d_m} \right)}{2g(1 + \alpha t_1)} + \frac{\text{Opór rusztu}}{1,293} \dots \dots \dots (4)$$

W równaniu tem oznacza:

- H — wysokość komina w m ,
- v_s — szybkość gazów spalin. w kominie w m/sek ,
- d — przeciętną średnicę komina w m ,
- ζ — współczynnik tarcia gazów w kominie,
- t_0 — temperaturę otoczenia w $^{\circ}C$,
- t_1 — średnią temperaturę gazów w kominie w $^{\circ}C$,
- g — przyspieszenie ziemskie = $9,81 m/sek^2$.

Jeżeli weźmiemy zamiast prędkości gazów w kominie proporcjonalną do niej prędkość v_l przyływu powietrza pod ruszt F (w m^2), to możemy wyrazić ciężar gazów równaniem:

$$G = F \cdot v_l \frac{1,293}{(1 + \alpha t_0)} = \frac{d_m^2 \pi}{4} v_s \frac{1,293}{(1 + \alpha t_1)} \dots \dots \dots 5)$$

Oznaczając niezmiennie przy tej samej temperaturze wyrazy nawiasów równania (4) jako stałe a oraz b , otrzymamy równanie:

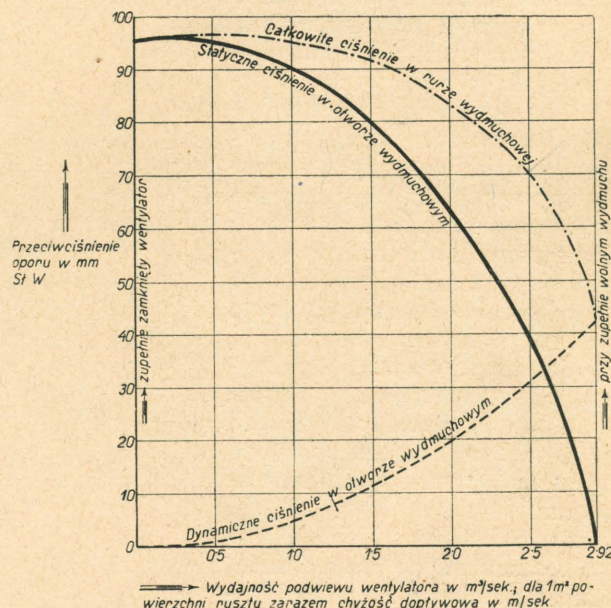
$$v_l = \sqrt{\frac{H \cdot a - \frac{\text{Opór rusztu}}{1,293}}{b}} \dots \dots \dots (6)$$

Wstawiając w to równanie dla przykładu wymiary urządzenia rysunku 2, mianowicie $d = 1 m$, $F = 1,2 \cdot 1,675 = 2,01 m^2$, $H = 20 m$, $t_1 = 300^{\circ}C$, $t_0 = 15^{\circ}C$, $\zeta = 0,007$, otrzymujemy zestawienie w tabeli 1 prędkości przyływu powietrza pod ruszt:

TABELA I.

Opór rusztu w mm sł. w.	10	8	6	4	2
Prędkość v_l w m/sek . .	1,31	1,81	2,2	2,54	2,83
Wysokość (w mm) warstwy węgla ³⁾ „groch” (wielkość kawałków 10–20 mm)	105	34	23	11	4,5

³⁾ Dany pochodzące z podanych niżej obliczeń i pomiarów.



Rys. 3. Charakterystyka wydajności wentylatora w zależności od przeciwnieciśnienia.

Opisany niekorzystny stosunek przyływu powietrza zwiększa się naturalnie znacznie dla gatunków więcej droбноziarnistych i tej okoliczności należy przedewszystkiem przypisać trudności, na jakie natrafia spalanie węgla droбноziarnistych.

SKŁAD	Analiza węgla		Dolna wartość opałowa	Teoretyczne za- potrzebowanie powietrza		Teoretyczna ilość gazów spalinowych na 1 kg węgla								RAZEM	
	pierwia- stkowa	surowa		w kg na 1 kg węgla	w m ³ na 1 kg węgla	w kg					w m ³				
						CO ₂	H ₂ O	N ₂	SO ₂	Razem	CO ₂	H ₂ O	N ₂		SO ₂
C	83,51		6764,31	9,5689	7,415	3,056		7,348		10,404	1,553		5,8620		7,4150
H ₂ wolny	3,38		980,20	1,1652	0,903		0,304	0,895		1,199		0,379	0,7135		1,0925
H ₂ związany	0,26	1	—13,56				0,0232			0,0232		0,02886			0,02886
O ₂	2,06	1													
N ₂	1,00							0,01		0,01			0,0079		0,0079
S _s	0,32		8,00	0,01379	0,01067			0,0106	0,00639	0,01699			0,00845	0,00222	0,01067
Woda	5,52	5,52	—33,12				0,0552			0,0552		0,06866			0,06866
Popiół	3,95					3,056	0,3824	8,2636	0,00639	11,70839	1,553	0,47652	6,59185	0,00222	8,62359
Części lotne		19,46				Razem: Teoretyczny skład gazów spalin. w % objęt.					Razem:				
Uzyskanie koksu		75,02									18,01	5,53	76,43	0,03	100 %
Jakość koksu	stopiony, bardzo rozpadający się (II klasa)					T A B E Ł A I I .									
Razem . .	100%	100%	7705,83	10,74789	8,32867	Teoretyczne daty spalania węgla kamiennego z pokładu 29 kopalni „Wniek” Zakładów Hohenlohego w Welnowcu.									

TABELA II.

Teoretyczne daty spalania węgla kamiennego z pokładu 29 kopalni „Wujek” Zakładów Hohenlohego w Welnowcu.

Przy użyciu wentylatora do wytworzenia podwiewu, ten niekorzystny stosunek przyływu powietrza znajduje wyraz w charakterystyce wentylatora, ponieważ każdy wentylator, podobnie jak to zaznaczono na rys. 3 dla wentylatora użytego w czasie opisanych niżej doświadczeń, przy wolnym wydmuchu, a więc bez przeciwcisnienia, dostarcza największą ilość powietrza, która w miarę wzrostu oporu gwałtownie spada.

Ten niekorzystny spadek przyływu powietrza w miarę wzrostu warstwy węgla uwidacznia się również przy rusztach łańcuchowych, jak wogóle przy rusztach o posuwie mechanicznym. Mianowicie, wskutek nachylonej warstwy węgla, niepożądany przyrost ilości przepływającego powietrza wzmacnia się tu stopniowo wzdłuż rusztu, w kierunku jego ruchu. Znowu więc mamy w miejscach najmniejszego zapotrzebowania powietrza, t. j., na końcu rusztu, największy przyływ, podczas gdy na początku rusztu świeżo nałożona warstwa węgla jest w najgorszych pod względem dopływu powietrza warunkach.

Przy paleniskach obsługiwalnych ręcznie ma się przynajmniej możliwość tłumienia nadmiaru powietrza zaworem w miarę spalania się warstwy, podczas gdy przy paleniskach ruchomych ujednolinitość przyływu powietrza wzdłuż całego rusztu nie da się ani w przybliżeniu osiągnąć dotychczasowymi środkami.

Z uwidocznionego na rys. 4 wyniku próbnego spalania, przeprowadzonego pod kierownictwem autora z ramienia katedry opałoznawstwa Akademii górniczej w Krakowie, widać dokładnie, że spalanie na ruszcie łańcuchowym, które rozpoczęło się nadmiarem powietrza 6,5 — 1,72, t. j. 650 — 172%, w odległości 1 m od początku rusztu osiąga punkt kulminacyjny 0,24, t. j. 24% nadmiaru powietrza i następnie w odległości 2 m od początku rusztów, t. zn. w ostatniej trzeciej części rusztu, osiąga 241%, a w końcu nawet z 470 — 480% nadmiaru.

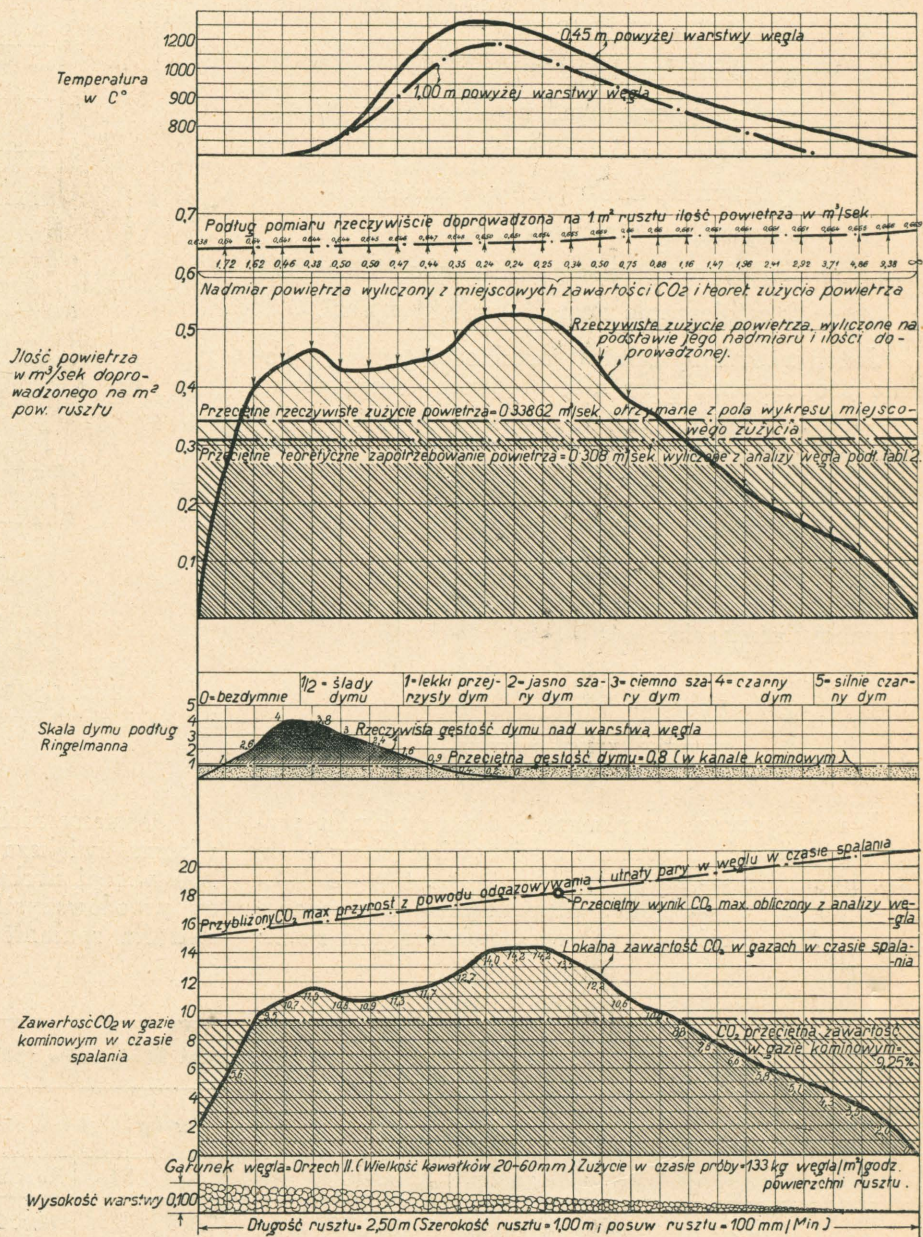
Do spalania doświadczalnego użyto węgla górnośląskiego z kopalni „Wujek” Zakładów Hohenlohego, którego charakterystyka, dla gatunku „orzec II” (wielkość kawałków 20—60 mm) podaje tabela II.

Podnieść należy, że dla przykładu zastosowano tu węgiel orzech II, który jako grubszy nie zachowuje się jeszcze pod względem przepustu powietrza tak niekorzystnie, jak gatunki drobniejsze, zwłaszcza miał.

Przytoczony na rys. 4 przykład jest wogóle zajmujący, gdyż zapomocą specjalnych urządzeń oprócz analizy gazów mierzono także w licznych miejscach rusztu przyływ powietrza oraz temperaturę, wska-

tek czego wyniki pomiaru przy uwzględnieniu zdjęć lokalnej gęstości dymu nad paleniskiem dają pouczający obraz przebiegu spalania w poszczególnych jego okresach.

Ze względu na to, że opór rusztu, zależny od gatunku węgla i wysokości warstwy, jest miarodajny dla rozdziału powietrza przy spalaniu, a tem samem stanowi jeden z najważniejszych czynników procesu spalania, rozpatrzyć należy, czy dzisiejszy stopień



Rys. 4.

rozwoju teorii tarcia gazów nie zezwala nam na obliczenie także oporu powietrza w warstwie różnych gatunków węgla.

Teoretyczne zasady tarcia gazów w warstwie węgla.

Tarcie powietrza przepływającego w rurach i kanałach powstaje — jak wiadomo — stąd, że skrajne cząsteczki przepływającego powietrza uderzają o mniej lub więcej chropowatą ścianę rur i wskutek tego tracą swoją energię kinetyczną przepływu.

Ażeby zatem przepływ był w całej pełni utrzymany, musi każda cząstka, niejako do ściany przy-

czepiona, otrzymać od następnych cząstek zasób utraconej energii, co powoduje w sumie spadek ciśnienia przepływającego gazu. Im szybciej cząsteczki uderzają o ścianę, tem większą jest strata energii, wskutek czego występujący jako spadek ciśnienia opór tarcia jest proporcjonalny do prędkości przepływającego gazu.

Ze względu na wielkość oporu, rozróżniamy dwa rodzaje przepływów, a to przepływ o strugach równoległych, czyli także t. zw. laminarny, oraz przepływ prądem wzburzonym (turbulencja). Pierwszy rodzaj przepływu znany jest od czasu doświadczeń Hagena z roku 1854 i Shaw'a i przy tym rodzaju przepływu opór tarcia jest proporcjonalny do pierwszej potęgi prędkości przepływu, podług prawa Poiseuille-Hagenbacha.

Prądem równoległym przepływają gazy jednak tylko przy małych prędkościach, jakie w technice rzadko spotykamy, wskutek czego w dalszym ciągu zajmować się będziemy tylko prądem wzburzonym gazów, przy którym opór tarcia wzrasta w przybliżeniu proporcjonalnie do kwadratu prędkości, jak to po raz pierwszy stwierdził Arson⁴⁾, który dla wyliczenia stosunku tarcia do szybkości zastosował do gazów wzór, ustalony już dawniej dla przepływu wody przez Prony'ego.⁵⁾

Ten sam stosunek oporu tarcia do prędkości potwierdziły następnie dla gazów doświadczenia Stockalpera w r. 1870⁶⁾, Devillez'a — 1879, A. Riedlera i Gutermuth'a w 1890⁷⁾, jak to znajdujemy w zestawieniu i pracach Lorenza⁸⁾, który podał równocześnie bardzo udatny dowód matematyczny dla uzasadnienia empirycznie stwierdzonego stosunku. Następnie Rietschel⁹⁾ położył zasługi około rozwoju teorii tarcia gazów w czasie przepływu gazów kanałami o różnym przekroju. Dalsze badania teorii tarcia gazów doprowadziły do ścisłego zidentyfikowania teorii tarcia gazów i cieczy lepkich, wskutek czego można było wyzyskać dla rozwoju teorii tarcia gazów ustalone o wiele ściślej, tak empirycznie jak i teoretycznie, zasady hydrauliki cieczy.

I tak, daleko wcześniej podał O. Reynolds¹⁰⁾ dla cieczy, że stosunek tarcia do drugiej potęgi prędkości znalazł tylko dla rur bardzo chropowatych, podczas gdy dla rur gładkich oznaczył Reynolds ten wykładnik w wysokości 1,8.

W roku 1913 ukazuje się obszerna praca H. Blasiusa¹¹⁾ i za nią pojawiają się prace dalszych autorów, jak np. z laboratorium w Akwizgranie¹²⁾,

⁴⁾ Expériences sur l'écoulement des gaz en longues conduites, par M. Arson, chef de la Compagnie Parisienne du Gaz, Paris 1867.

⁵⁾ Prony: Résumé de la théorie et des formules relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux et les canaux. Paris 1825.

⁶⁾ Stockalper: Dinglers Polytechn. Journal. September 1880.

⁷⁾ Z. d. V. d. I. 1891. Str. 188.

⁸⁾ Die Spannungsverluste in langen Druckleitungen. Z. d. V. d. I. 1892. S. 627.

Neuere Versuche über Spannungsverluste in Druckleitungen. Z. d. V. d. I. 1892. S. 835.

Porówn. Prof. H. Lorenz. Lehrbuch der technischen Physik Bd. II, 1904, S. 115 Verlag R. Oldenbourg.

⁹⁾ H. Rietschel: Leitfaden zum Berechnen und Entwerfen, von Lüftungs u. Heizungsanlagen. Aufl. 1894. J. Springer; Rietschel und Brabbé: Leitfaden 5. Auflage, 1913. Springer.

¹⁰⁾ O. Reynolds. Phil. Trans. 17.

¹¹⁾ H. Blasius: Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. Zesz. 131. S. 1.

¹²⁾ Zeitschrift für angew. Mechanik, zesz. 4, również zesz. 2 i 3.

Eh. v. Kármán, K. Polhausena, H. Latzko, L. Hopfa i E. Trefftz'a, którzy przeważnie zajmują się naukowym rozwojem teorii przepływu, przyczem omawiana jest



Rys. 5. Wygląd pojedynczej warstwy węgla „Orzech II“, o wielkości kawałków 20-60 mm (wielk. rzeczywista),



Rys. 6. Prześwity w pojedynczej warstwie węgla „groch“, o wielkości kawałków 10-20 mm (wielk. rzeczy.)

także ważna dla teorii tarcia gazów, ustalona przez prof. Prandtl'a¹³⁾ teoria tak zwanej warstwy gra-

¹³⁾ Physikalische Zeitschrift Tom. 11 (1910) S. 1072.

nicznej. Ostatnio ukazały się z tej dziedziny znamienne prace Maks. Jakoba¹⁴⁾ oraz M. Jakoba i S. Erka¹⁵⁾, w których to pracach wyprowadzony na podstawie prawa podobieństwa przez Blasiusa¹⁶⁾ wzór na tarcie gazów i cieczy został zmieniony stosunkowo nieznacznie, wskutek czego wzór ustalony przez Blasiusa, względnie Jakoba¹⁷⁾, uchodzi za końcowy wynik dotychczas znanych badań tarcia gazów.

Wzór Blasiusa brzmi:

$$H_1 - H_2 = \frac{h_1 - h_2}{\gamma} = (\lambda_R + \lambda_B) \frac{l v^2}{2 r g}, \quad . \quad . \quad 7)$$

gdzie λ_R jest współczynnikiem zależnym od tarcia, mianowicie

$$\lambda_R = c_1 \left(\frac{v}{v_0 \cdot 2 \cdot r} \right) c_2,$$

podczas gdy λ_B jest współczynnikiem przyspieszenia przepływu i wyraża się — w razie linjowego spadku ciśnienia — jak następuje:

$$\lambda_B = \frac{4 r \cdot dH}{H \cdot dx} = \frac{8 r}{l} \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2}.$$

We wzorze powyższym oznacza:

$H_1 - H_2$ = spadek ciśnienia w rurze, w *cm* słupa substancji płynącej.

$h_1 - h_2$ = spadek ciśnienia w rurze w *cm* słupa wody.

Następne oznaczenia w systemie C. G. S.:

v = ciężar właściwy gazu przy ciśnieniu

$$\frac{h_1 + h_2}{2},$$

g = przyspieszenie ziemskie,

$2r$ = średnica prześwitu rury,

l = długość rury,

v = średnia prędkość przepływającej substancji,

$\nu = g \frac{\eta}{\gamma}$ = viskozność (lepkość) kinetyczna, wzgl. kinetyczny współczynnik tarcia¹⁸⁾,

η = współczynnik viskozności, zwany także stałą viskozności¹⁸⁾,

¹⁴⁾ Max Jakob. Bestimmung von strömenden Gas und Flüssigkeitsmengen aus dem Druckabfall in Röhren Z. d. V. d. I. Tom. 66, Nr. 8, S. 178, 1912.

¹⁵⁾ Jakob M. und Erk, S. Der Druckabfall in glatten Röhren. Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens Zesz. 267. Der Druckabfall in glatten Röhren und die Durchflussziffer von Normaldüsen Z. d. V. d. I. 1924, S. 584.

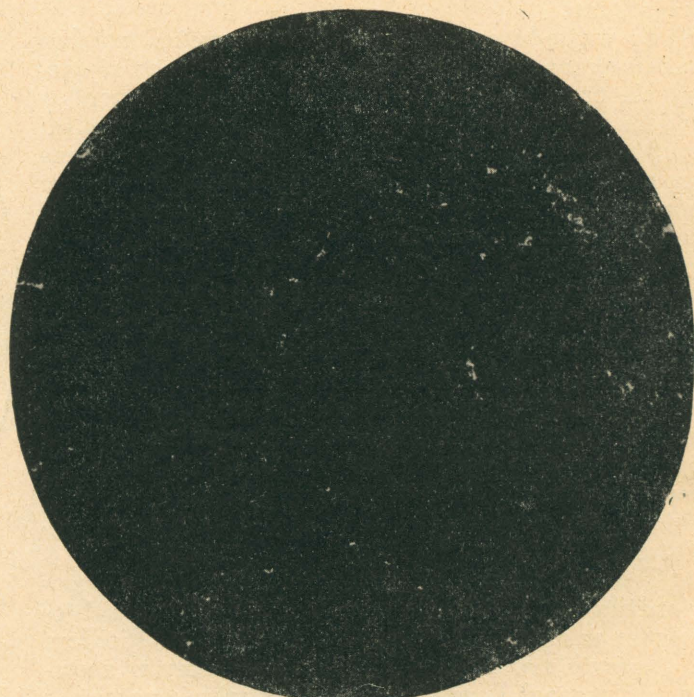
¹⁶⁾ H. Blasius. Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Forschungsarb. Zesz. 131, str. 1.

¹⁷⁾ Max Jakob. Bestimmung von strömenden Gas- und Flüssigkeitsmengen. Z. d. V. d. I. 1912. (t. 66.) Nr 8, str. 178.

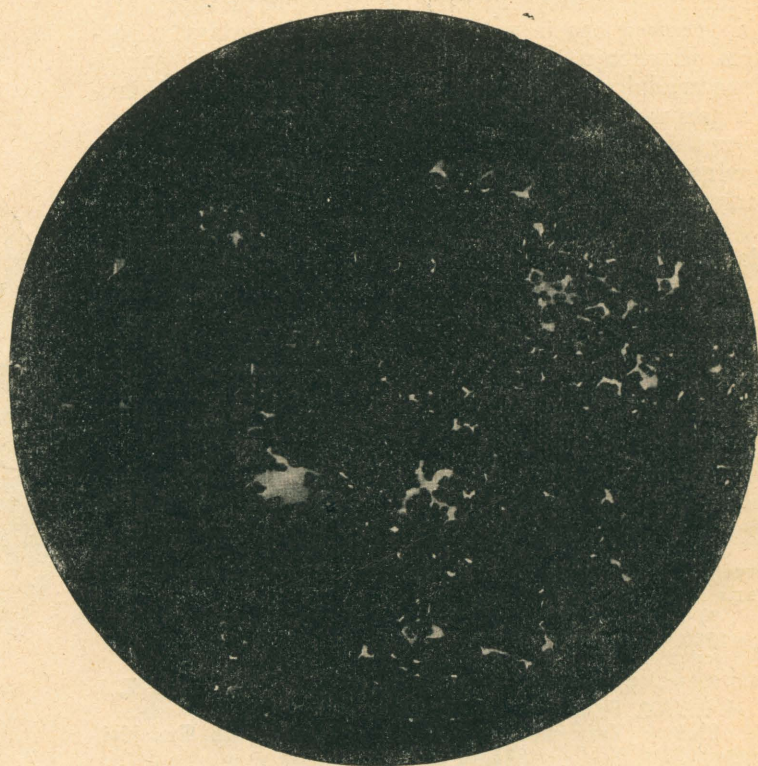
¹⁸⁾ Porówn. R. Biel. Mitteilungen über Forschungsarbeiten. Zesz. 44 (streszcz. w czasop. Z. d. V. d. I. Nr. 26, 1908, S. 1035), wzgl. Z. d. V. d. I. tom 65, Nr. 39, 1921.

H = ciśnienie w miejscu x długości kanału lub rury.

Wartości współczynników c_1 oraz c_2 zostały ustalone nast.:



Rys. 7. Prześwity w pojedynczej warstwie węgla „gryśik“ o wielkości ziarna 0-10 mm (wielk. rzecz.)



Rys. 8. Pojedyncza warstwa węgla „gryśik“ z rys. 7, w 10-krotnem powiększeniu linjowem.

	przez Blasiusa	przez Jakoba
c_1	0,3164	0,3272
c_2	0,25	0,253

Powyższe równanie ma jedynie zastosowanie w wypadku t. zw. „uspokojonej turbulencji, t. j. regularnego wzburzenia“, który to rodzaj przepływu jest prawie wyłącznie spotykany w technice przepływu gazów w rurach i kanałach i polega na tem, że gaz poruszając się tworzy mikroskopijne wiry, przy czem kierunek średniej prędkości płynących cząsteczek jest równoległy do osi rury, względnie kanału.

Stan graniczny przejścia przepływu laminarnego w prąd wzburzony da się oznaczyć zapomocą t. zw. liczby Reynolds'a, która jest równocześnie wymiarem udziału wiskości w procesie przepływu i nadaje się do wyliczenia przejścia prędkości w stan krytyczny. Przepływ laminarny, o prędkości niższej od krytycznej, występuje — jak wspomniano — w technice rzadko, częściej natomiast mamy do czynienia z ruchem o prędkości powyżej krytycznej, gdy następuje wzburzenie prądu.

Podług O. Reynoldsa¹⁹⁾, przechodzi prąd równoległy we wzburzony, gdy wspomniana liczba Reynoldsa

$$\frac{v_k d}{\nu} > 2000. \quad (8)$$

i tylko przy pewnych środkach ostrożności daje się utrzymać do granicy

$$\frac{v_k d}{\nu} \geq 13800. \quad (9)$$

W powyższym wzorze oznacza v_k krytyczną prędkość w *cm/sek*, d — średnicę kanału w *cm* i ν kinetyczną wiskość w *cm/sek*.

Nieścisłość liczby Reynoldsa wskazuje, że pod pewnym warunkiem następuje opóźnienie w przejściu prędkości w stan krytyczny, co według Biela¹⁶⁾ przypisać należy stopniowi chropowatości ścian.

W tym względzie wymienić należy pracę Noetera¹⁸⁾ i naogół podnieść należy, że sam charakter przebiegu przepływu wskazuje na nieodporność daleko idącej chwiejności stanu granicznego.

Teoretyczne wnioski dla ujęcia tarcia gazu w warstwie węgla.

Równanie 7 Blasiusa jest już zbyt szczegółowo rozczłonkowane, ażeby mogło być w tej formie użyte do oznaczenia wielkości tarcia w warstwie węgla, ponieważ tak w mianowniku równania, jak też i w spółczynnikach λ_R oraz λ_B mieszczą się wymiary kanałów, podczas gdy kanały te (pory warstwy) nie tylko co do wymiaru, lecz nawet co do kształtu nie są nam znane i z tego powodu wymiar tych kanałów nie może być wprowadzony do obliczenia.

Na rys. 5 do 8 uwidocznione są przekroje warstw technicznie najczęściej używanych gatunków węgla w pojedynczym układzie kawałków, zaś w tabeli 3 zestawione są cyfry, dotyczące wolnego przekroju szczelin warstwy.

TABELA 3.

Sortyment górno-śląski	Gatunek	Orzech II	Groch	Miał
	Wielkość kawałków w mm	20 — 60	10 — 20	0 — 10
Wysokość pojedynczej warstwy w mm		50	20	3
Ilość poszczególnych otworów przepływowych na 1 m ² powierzchni warstwy		1700	6700	10 900
% otworów w stosunku do całej powierzchni		2,55	2,31	9,4
Podobne gatunki węgla sortymentu zagłębia krakowskiego i dąbrowskiego	Gatunek	Orzech I	Orzech II	Grysik i miał
	Wielkość kawałków w mm	25 — 40	13 — 25	0 — 13

Widoczna z rysunków 5, 6, 7, 8 nieregularność przekrojów kanałów jest w rzeczywistości daleko większa, gdy zważymy, że przez przykrywanie się wzajemne kawałków węgla w szeregu warstw jedna nad drugą, kanały i pory otrzymują kształt znacznie bardziej skomplikowany.

Jeśli nie znamy wymiarów kanałów, to również nieznana jest w tych kanałach prędkość przepływu, która jest według równania 7 miarodajną dla obliczenia tarcia w porach. Wskutek tego musimy tarcie w warstwie węgla ustosunkować do innej zmiennej, któraby była ściśle proporcjonalna do średniej prędkości przepływu powietrza w kanałach, i tej zmiennej, ze względów praktycznych, szukać musimy wśród normalnych, powszechnie znanych dat paleniska, tak ażeby nie musiała być dopiero szczególnie dla wyznaczania tarcia oznaczana.

To naprowadziło autora na pomysł ustosunkowania w obliczeniu tarcia do kwadratu prędkości dopływu powietrza pod ruszt, ponieważ ta prędkość jest prawie zawsze znana lub też conajmniej jest łatwa do oznaczenia (ewent. w przybliżeniu) z analizy gazów kominowych i ilości spalanego węgla na m² rusztu i godzinę.

Ta prędkość dopływu v_D jest (podług rys. 9) też ściśle proporcjonalna do średniej prędkości v_d powietrza w rozgałęzionych kanalikach i porach warstwy, wskutek czego każda liczba proporcjonalna na do chyżości dopływowej v_D jest równocześnie proporcjonalna do prędkości przepływu w kanalikach v_d . Zatem do oznaczenia spadku ciśnienia, spowodowanego tarcie w warstwie, możemy się posługiwać równaniem:

$$\begin{aligned} \text{Spadek ciśnienia } \Delta p \text{ w mm sł. w.} &= a v_d^2 = \\ &= b \cdot a \cdot v_D^2 = a' v_D^2 \quad (10) \end{aligned}$$

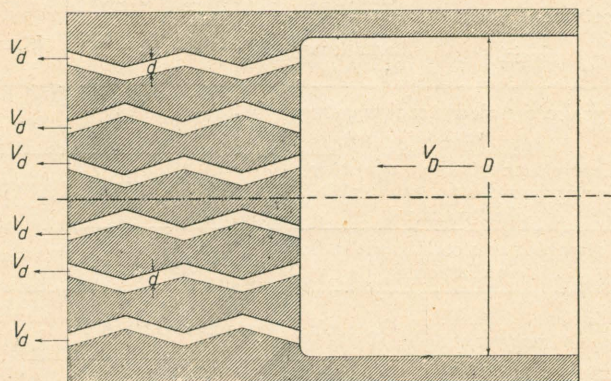
To pośrednictwo prędkości dopływu w zastosowaniu wzoru (7) Blasiusa do obliczenia tarcia w warstwie węgla ma jednak uzasadnienie tylko w zastosowaniu do prędkości znajdującej się w liczniku wzoru, ponieważ nieznaczna zmienność spółczynnika λ_R , spowodowana chyżością w mianowniku tego spółczynnika, nie jest w stanie zrównoważyć niedokładności uwarunkowanej nieznaną przekośmów kanałów i por warstwy. Wskutek tego, przy zestawianiu równania tarcia w warstwie węgla, musimy się cofnąć do tych czasów, gdy szczegółowy wzór Blasiusa nie był znany, a mimo to równania tar-

¹⁹⁾ O. Reynolds. Phil. Trans. 17.

²⁰⁾ R. Biel. Mitteilungen über Forschungsarbeiten Zesz. 44. (Wyciąg podano w Z. d. V. d. I. Nr 26, 908, S. 1035), wzgl. Z. d. V. I. Tom. 65, Nr 39, 1921.

²¹⁾ F. Noeter. Z. f. angew. Math. und Mech., zeszyt 2 i 3.

cia przepływu gazów przez lata dawały w obliczeniach do celów techniki zupełnie dostateczne wyniki.



Rys. 9.

Objaśnienie proporcjonalności prędkości.

A więc i w dalszym ciągu zostanie pominięty nieznaczny wpływ prędkości przepływu na wartość spółcz. λ_R , do którego wchodzi ona z wykładnikiem w postaci drobnego ułamka. Innymi słowy, spółczynnik λ_R włączymy jako stały do wspólnej stałej a lub R , które dla każdego gatunku węgla są także wyrazem równomierności kanałów w stosunku do pewnego idealnego wymiaru $2r$, mianowicie:

$$a = (\lambda_R + \lambda_B) \frac{\gamma l}{2r \cdot 2g} = \gamma R \frac{l}{2g}.$$

Przez to przeobraża się równanie (7) tarcia powietrza w warstwie węgla w prostą formułę:

$$h_1 - h_2 = \Delta p = \gamma \frac{Rv^2}{2g} s = a v^2 \cdot s, \quad (11)$$

w której oznaczają:

$\Delta p = h_1 - h_2$ = spadek ciśnienia powietrza w mm sł. w.

v = prędkość w m/sek dopływu powietrza pod ruszt,

s = wysokość warstwy węgla w m, odpowiadająca oznaczonej jako l we wzorze Blasiusa długości kanałów,

γ = ciężar właściwy powietrza,

g = przyspieszenie ziemskie,

R = empiryczny spółczynnik tarcia, proporcjonalny do prędkości dopływu powietrza.

Jak wspomniano wyżej, można prędkość dopływu pod ruszta obliczyć z obciążenia rusztu oraz z analizy gazów spalinowych, względnie z nadmiaru powietrza.

Jeśli np. na $1 m^2$ rusztu w ciągu godziny spalamy $150 kg$ węgla o wartości opałowej $7000 Kal$, przy teoretycznym zapotrzebowaniu $10 m^3/kg$ powietrza, i analiza gazów wykazuje $10,55\%$ CO_2 , to odpowiada to w stosunku do maksymalnej ilości $CO_2 = 19\%$ dla danego węgla nadmiarowi powietrza $1,8$, więc prędkość do wpływu pod ruszta wyniesie w tym wypadku:

$$v = \frac{150 \times 10 \times 1,8}{3600} = 0,75 \text{ m/sek.}$$

O spadku ciśnienia podwiewu w warstwach węgla znajdujemy w literaturze pewne, nawet z dobrych pomiarów pochodzące, wzmianki. Jednak daty te nie mogły stanowić podstawy do ogólnie przydatnego oblicze-

nia spadku ciśnienia i ta, zdaniem autora, trudność najprawdopodobniej polegała właśnie na braku tej wielkości, do której można byłoby ustosunkować spadek ciśnienia, a za jaką obrał autor chyżość dopływu powietrza pod ruszta. I tak znajdujemy np. u M. Genscha²²⁾ wzmianki o spadku ciśnienia w warstwie $200 mm$ węgla przy obciążeniu rusztu 140 i $210 kg/m^2/godz.$ dla węgla w kawałkach oraz dla suchego i mokrego miału przy nadmiarze powietrza $1,2$.

Oparcie spadku ciśnienia o nadmiar powietrza nie pozwala na wyzyskanie cyfr Genscha dla węgla o różnym składzie chemicznym, ponieważ tak teoretyczne zapotrzebowanie powietrza węgla przy spalaniu, jak też zależny od tego zapotrzebowania nadmiar powietrza ulega znacznym wahaniom, w zależności od jakości węgla.

Cyfrы Genscha, przeliczone przez autora zapomocą wzoru 11 na prędkość dopływu powietrza dla węgla o przeciętnym składzie chemicznym, wykazują dobrą zgodność z wynikami opisanymi w dalszym ciągu doświadczeń autora. Doświadczenia te przeprowadził autor przy współudziale asystenta Akademii p. M. Czyżewskiego, celem praktycznego zbadania wzoru 11 oraz celem oznaczenia spółczynników, a w szczególności R we wzorze 11, dla różnych gatunków węgla.

Wykonywanie doświadczeń.

Podane na rys. 10 urządzenie doświadczalne składało się z rusztu a o polu całkowitem $1 m^2$, który złożony był z prętów rusztowych $11 mm$ szerokości, tworzących szczeliny rusztowe szer. $7 mm$, wskutek czego wolne pole rusztów wynosiło $0,385 m^2$. Palenisko połączone było kanałem b z kominem $34 m$ wysokości, o $1,5 m$ średnicy, a tylko dla prób samym podwiewem przełączano palenisko zasuwać c na wydmuch d .

W czasie prób spalania przy naturalnym ciągu kominowym, powietrze wchodziło pod ruszt przez drzwiczki popielnika, oznaczone na rys. 10 liniami przerywanymi, natomiast przy zastosowaniu podwiewu dostarczał powietrza wentylator e , który był najdokładniej cechowany podług norm Związku inżynierów²²⁾.

Wentylator ten dostarczał powietrza w ilości od 0 do max. $2,92 m^3/sek$ podług charakterystyki ciśnienia podanej na rys. 3, które to powietrze regulowano zasuwać i .

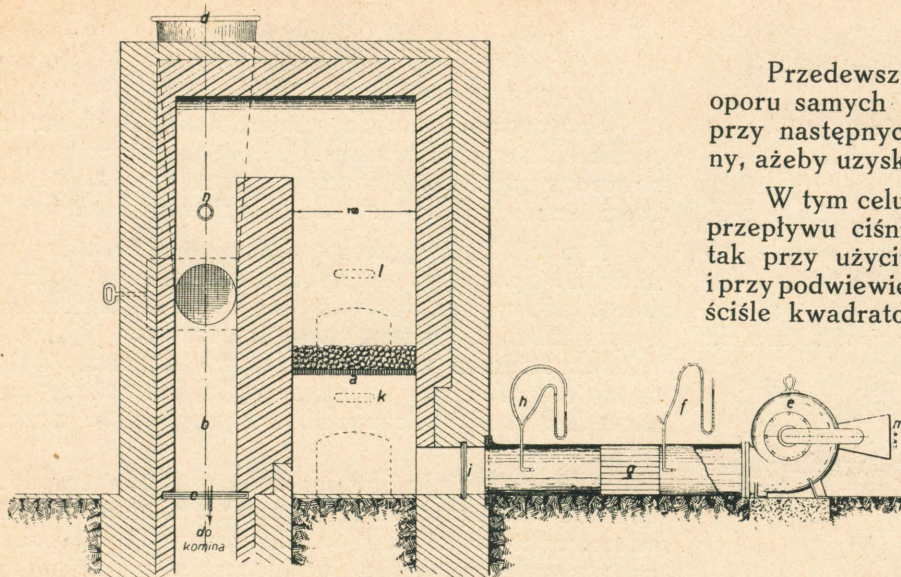
Koło skrzydłowe wentylatora, o szerokości $0,35 m$, miało $0,4 m$ średnicy zewnętrznej oraz $0,16 m$ średnicy wewnętrznej, sam zaś wentylator wykonywał 1680 obrotów na minutę i pędzony był zapomocą silnika elektrycznego. Przy cechowaniu, wyniósł spółczynnik wentylatora $f = 1,3$.

Tak dla pomiaru statycznego ciśnienia w f , jak też dla pomiaru ilości powietrza w h , zastosowano rurki Pitota w układzie Prandtla²³⁾, o spółczynniku $\beta = 1$, przyczem odległości zalecone we wspomnianych normach dla ustawienia przyrządów w rurze tłoczącej zachowano ściśle, tak przed, jak i poza prostownikiem g .

W miejscach k i l mierzono spadek ciśnienia również przyrządem Prandtla, a nadto w n wstawiony był dymomierz fotometryczny, sporządzony w Akademii Górniczej, który oświetlony elektrycznie nadawał się do pomiaru gęstości dymu w kanale.

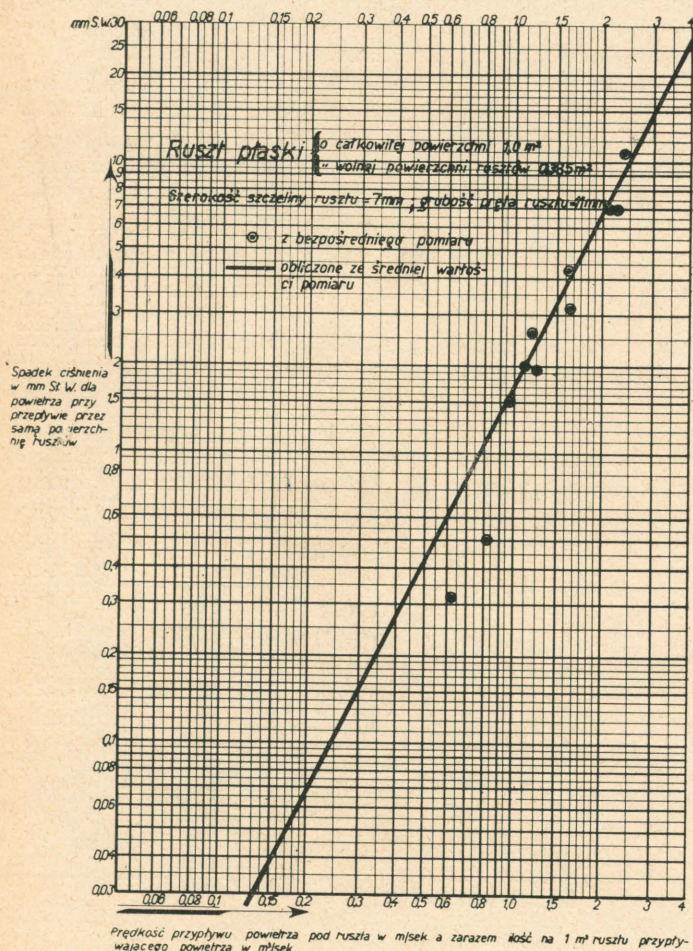
Urządzenie doświadczalne zaopatrzone było w liczne pirometry odciągowe oraz optyczne, a także,

²²⁾ Regeln für Leistungsversuche an Ventilatoren und Kompressoren V. D. I. - Verlag. Berlin, 1925.



Rys. 10. Schemat urządzenia doświadczalnego.

dla przybliżonej kontroli pomiaru ilości powietrza w rurze tłoczącej mierzono każdorazowe prędkości powietrza na końcu rury ssącej wentylatora za pomocą anemometru różniczkowego *m*. Na ruszt nakładano kolejno różne warstwy poszczególnych gatunków węgla, przyczem spadek ciśnienia mierzony był tak w czasie spalania, jak też i przed spalaniem.



Rys. 11.

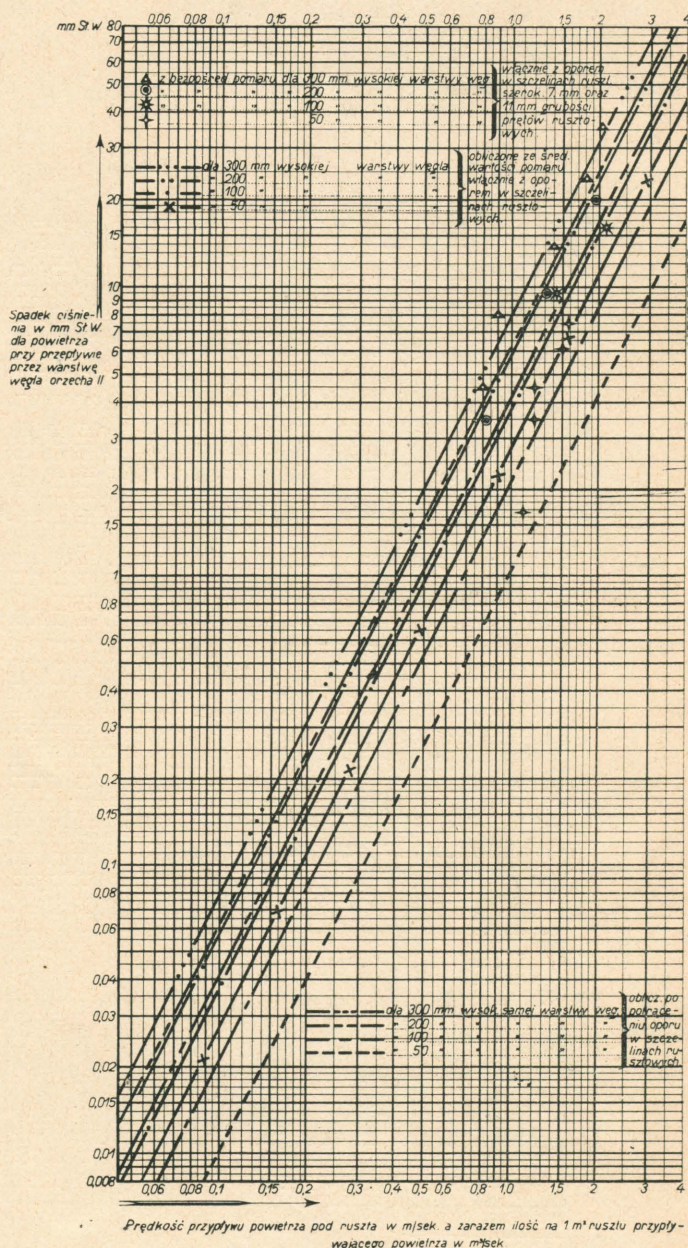
Spadek ciśnienia, jako funkcja logarytmiczna tarcia w szczelinach rusztowych i prędkości dopływu powietrza.

Wyniki doświadczeń.

Przedewszystkiem przystąpiono do oznaczenia oporu samych rusztów, ponieważ opór ten musiał być przy następnych doświadczeniach dokładnie potrącony, ażeby uzyskać opór samej tylko warstwy węgla.

W tym celu mierzono przy różnych prędkościach przepływu ciśnienie pod oraz nad gołym rusztem, i to tak przy użyciu samego ciągu kominowego, jak też i przy podwiewie, przyczem stwierdzono, według rys. 11, ściśle kwadratowy stosunek spadku ciśnienia i prędkości dopływającego powietrza.

Na rys. 11 podane są wyniki doświadczenia w podziałce logarytmicznej, a to celem przedstawienia funkcji jako linii prostej, według równania:



Rys. 12.

Spadek ciśnienia, jako funkcja logarytmiczna prędkości powietrza i tarcia w warstwie węgla górnolaskiego „groch” (10—20 mm), względnie orzech II (13—25 mm) z zagłębia dąbrowskiego i krakowskiego.

$$\log \Delta_p = \log \gamma \frac{R}{2g} s + 2 \log v, \dots (12)$$

która to prosta, przy drugiej potędze stosunku Δ_p i v , jest nachylna dokładnie pod kątem $\lg \alpha = 2$.

Gdy wybierzemy sobie jakikolwiek spadek ciśnienia jako rzędną pewnego punktu, to odcięta tego punktu prostej wskaże nam prędkość dopływu powietrza, z których to danych, zapomocą równań 11 i 12, można obliczyć współczynnik α lub R . Następnie możemy zastosować to równanie do obliczenia spadku ciśnienia dla dowolnej prędkości dopływu powietrza.

Naprzykład, dla wybranego dowolnie spadku ciśnienia $\Delta_p = 6,75$ mm sł. w., odczytujemy z wykresu jako odciętą prędkość $v = 2$ m/sek i po wyeliminowaniu obojętnej dla oporu samego rusztu wysokości s , otrzymujemy ogólny współczynnik:

$$\alpha = \frac{R}{2g} = \frac{\Delta_p}{v^2} = 1,6875, \dots (13)$$

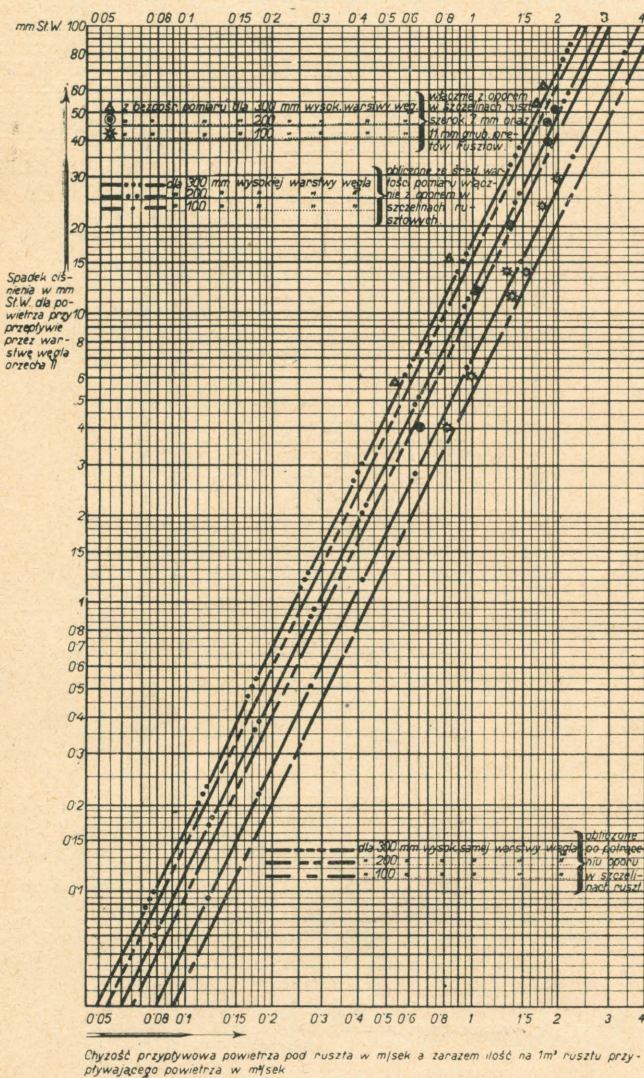
natomiast właściwy współczynnik proporcji

$$R = \frac{1,6875 \cdot 2g}{1,293} = 25,606.$$

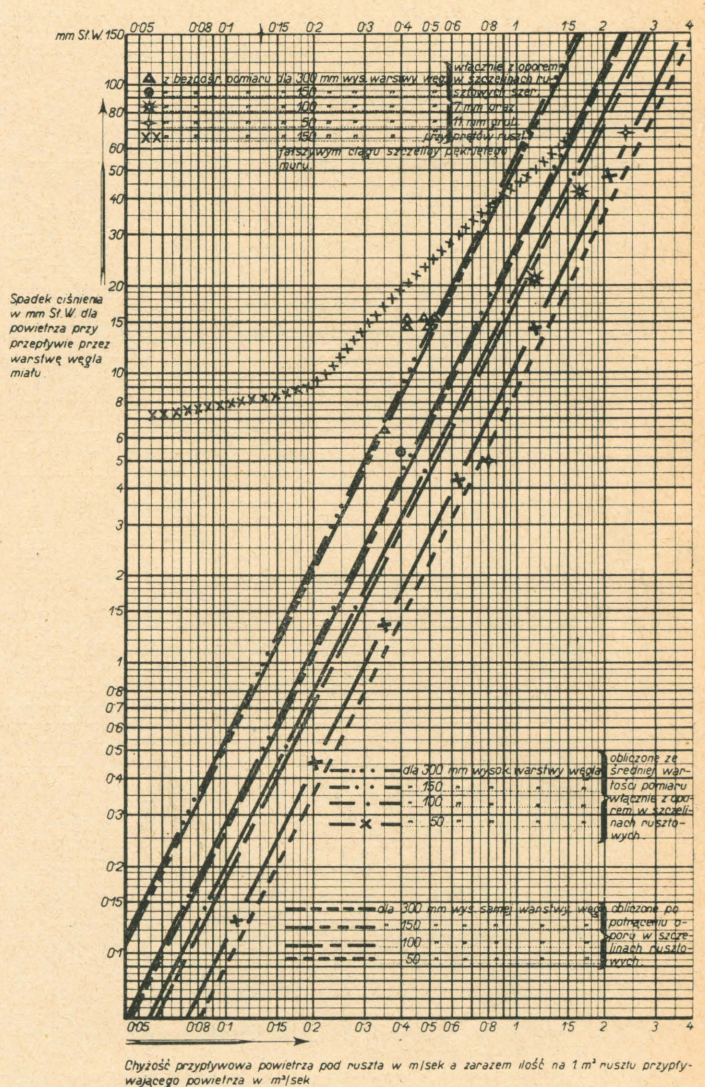
Spółczynniki α i R mogą zatem służyć do obliczenia spadku ciśnienia przy wszystkich prędkościach dopływu powietrza pod ruszt tej samej konstrukcji, o 7 mm szerokości szczeliny i 11 mm szerokości pręta rusztowego.

Rys. 12, 13, 14 przedstawiają ujęte w wykresy wyniki doświadczeń co do spadku ciśnienia w różnych warstwach tych gatunków węgla, które zestawione już były w tabeli 3. Przytem na wykresach tych podane są tak bezpośrednie wyniki pomiarów, to znaczy pełne opory rusztu wraz z warstwą węgla, jak też i opory samych warstw, wyliczone po potrąceniu oporu szczeliny rusztowych.

W podobny sposób, jak obliczono powyżej współczynniki tarcia szczelin rusztowych z równań 11 i 12 oraz z wykresu 11, tak też i wykresy 12, 13 oraz 14 zostały wyzyskane do wyznaczenia współczynników α i R , dla poszczególnych gatunków węgla, z wyłączeniem oporu szczeliny rusztu. Wyniki te zestawione są w tabeli 4.



Rys. 13. Spadek ciśnienia, jako funkcja logarytmiczna prędkości powietrza i tarcia w warstwie węgla górnośląskiego „groch” (10–20 mm), wzgl. podobnego gatunku węgla „orzech” (13–25 mm) z zagł. dąbrowskiego i krakowskiego.



Rys. 14. Spadek ciśnienia, jako funkcja logarytmiczna prędkości powietrza i tarcia w warstwie węgla górnośląskiego „miał” (0–10 mm), wzgl. podobnego gatunku węgla „grysik” i „miał” (0–13 mm) z zagł. dąbrowskiego i krakowskiego.

TABELA 4.

Sortyment górnoląski	gatunek wę- gla	Orzech II	Groch	Miał
	Wielk.kawał- ków w mm	20—60	10—20	0—10
Całkowity współczynnik tarcia	a	21,09	54,2	180,0
Współczynnik proporcji.	R	320,0	822,97	2731,32
Przybliżone gatunki wę- gla, sortymentu zagłębia krakowskiego i dąbrow- skiego	Gatunek wę- gla	Orzech I	Orzech II	Grysik i miał
	Wielk.kawał- ków w mm	25—40	13—25	0—13

W czasie licznych doświadczeń, dostrzegł autor, że przy miale trudną jest do osiągnięcia funkcja spadku ciśnienia i prędkości jako prosta logarytmiczna, ponieważ przy wyższych prędkościach spadek ciśnienia łatwo odbiega od prostej w dół, natomiast przy niższych prędkościach—odwrotnie, występują wychylenia od prostej w górę.

W pierwszym wypadku stwierdzono, że powodem wychyleń jest znane w generatorach gazu zjawisko tak zwanych kanalików, które polega na lokalnym przedmuchaniu wygodniejszych dróg przepływu powietrza, wskutek czego warstwa węgla stawia mniejszy opór, aniżeli to odpowiada jej wysokości.

W drugim wypadku, powodem odchylenia, naznaczonego na rys. 14 dla warstwy 150 mm krzyżykami, był tak zwany fałszywy ciąg, który tembardziej jest szkodliwy, im drobniejszy gatunek węgla tworzy warstwę.

W tym drugim wypadku początkowo trudno było dociec przyczyny odchylenia i dopiero gdy zasmarowano nieznaczne pęknięcie obmurza paleniska próbnego ponad rusztem, natychmiast odchylenie to ustąpiło.

Zastosowanie wyników doświadczeń.

Zapomocą równania 11 oraz zestawionych w tabeli współczynników, można rozwiązywać zadania, z których praktycznie najwięcej znamienne zostaną tu przytoczone.

Gdy uważać będziemy warstwę węgla za płytę porowatą, która według rys. 15 posiada pory w nieznannej ilości m , oraz o nieznanym przekroju f , i oznaczmy również nieznaną współczynnik tarcia w porach przez R_o oraz prędkość powietrza w porach przez v_o , to otrzymamy podług równań 10 i 11:

$$\Delta p = \gamma \frac{R_o v_o^2 s}{2g} = \gamma \frac{R v^2 s}{2g}, \quad \dots \quad 14)$$

przyczem między v_o , t. j. prędkością w porach, i prędkością dopływu powietrza v zachodzi następujący stosunek:

$$L B v = L B m f v_o,$$

jeśli L oznacza długość rusztu i B — szerokość rusztu. Z tego wynika dalszy stosunek:

$$\frac{v}{v_o} = m f = \frac{\sqrt{R_o}}{\sqrt{R}}, \quad \dots \quad 15)$$

który podajemy tylko dla jaśniejszego przedstawienia zagadnień.

Zagadnienie I. Obliczyć ilość powietrza w m^3 , przepływającego przez daną warstwę o wysokości s

znanego gatunku węgla (t. zn. R dane), gdy spadek ciśnienia Δp jest stały. Podług równania 13:

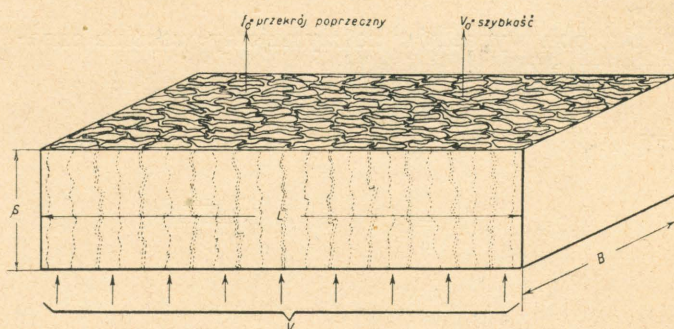
$$v = \frac{\Delta p 2g}{\gamma R s},$$

czyli ilość powietrza w m^3/sek $Q = Fv = LBv =$

$$= LB \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R s}} = \sqrt{\frac{\Delta p}{a s}} \dots \quad 16)$$

Zagadnienie II. Gdy warstwa węgla nie jest pozioma, lecz dwustopniowa, według rys. 16, wówczas powietrze będzie przepływało porami obu stopni warstwy z nierówną średnią prędkością, v_I oraz v_{II} , a to podług równania

$$\Delta p = \frac{\gamma R_o v_I^2 s_1}{2g} = \frac{\gamma R_o v_{II}^2 s_2}{2g}.$$

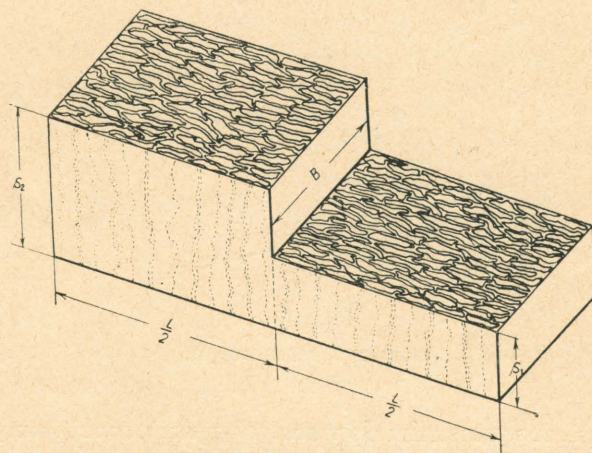


Rys 15. Płaska warstwa węgla, jako płyta porowata.

Prędkości te są określone równaniami:

$$v_I = \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R_o s_1}} = \frac{1}{m f} \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R_o s_1}},$$

$$v_{II} = \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R_o s_2}} = \frac{1}{m f} \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R_o s_2}}.$$



Rys. 16. Dwustopniowa warstwa węgla, jako płyta porowata.

Przepływająca ilość powietrza

$$Q = F v = \frac{F m f}{2} v_I + \frac{F m f}{2} v_{II},$$

czyli

$$Q = \frac{F}{2} \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R s_1}} + \frac{F}{2} \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R s_2}} = \frac{L B}{2} \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R}} \left(\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} \right) \dots \quad 1(L$$

Dla warstwy nie dwustopniowej, lecz składającej się z n równych stopni, otrzymujemy równanie ogólne:

$$Q = \frac{LB}{n} \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma R}} \left(\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_n}} \right) = \frac{F}{n} \sqrt{\frac{\Delta p}{a}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{s_i}} \quad (18)$$

Zagadnienie III. Najczęściej, mianowicie przy rusztach ruchomych, spotykamy równomiernie pochyłą warstwę, którą w granicach od s_1 do s_n możemy uważać za warstwę złożoną z nieskończenie licznej ilości stopni o wysokościach $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ (rys. 17).

Tu zachodzą dwie skrajne możliwości, mianowicie albo stopnie leżą ponad linią pochyłą w granicach od s_2 oraz s_{n+1} albo też pod linią — w granicach od s_1 do s_n .

Dla obu wypadków zatrzymujemy wspólne oznaczenie wysokości stopni, a to:

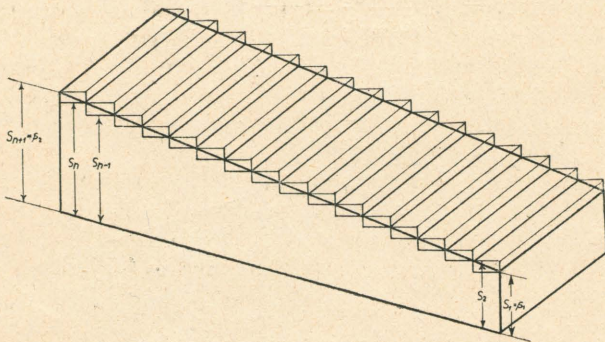
$$s_1 = s_1, s_2 = s_1 + \frac{s_2 - s_1}{n}, s_3 = s_1 + 2 \frac{s_2 - s_1}{n} \dots$$

$$\dots s_n = s_1 + (n-1) \frac{s_2 - s_1}{n},$$

$$s_{n+1} = s_1 + \frac{n}{n} (s_2 - s_1) = s_2.$$

Ilość powietrza, którą chcemy wyliczyć dla warstwy pochyłej, będzie mniejsza aniżeli dla warstwy ograniczonej dolnym szeregiem stopni, czyli według równania 18):

$$Q < \frac{F}{n} \sqrt{\frac{\Delta p}{a}} \left(\frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_n}} \right), \quad (19)$$



Rys. 17

Pochyła warstwa węgla.

natomiast w stosunku do warstwy ograniczonej górnym szeregiem stopni — będzie ilość powietrza dla warstwy pochyłej większa, t. j.

$$Q > \frac{F}{n} \sqrt{\frac{\Delta p}{a}} \left(\frac{1}{\sqrt{s_2}} + \frac{1}{\sqrt{s_3}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_{n+1}}} \right) \quad (20)$$

Ta nierówność między 19) a 20) będzie zachodzić przy każdym naturalnym n , a więc także dla granicy $n = \infty$, z tą różnicą, że w ostatnim wypadku znak $<$ $>$ przejdzie na $\leq$ $\geq$.

Gdy zestawimy sumy wyrazów wziętych w nawiasy w równaniach 19 i 20, a więc:

$$\sigma_n = \frac{1}{n} \left\{ \frac{1}{\sqrt{s_1 + \frac{1}{n}(s_2 - s_1)}} + \frac{1}{\sqrt{s_1 + \frac{2}{n}(s_2 - s_1)}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_1 + \frac{n}{n}(s_2 - s_1)}} \right\}$$

$$\Sigma_n = \frac{1}{n} \left\{ \frac{1}{\sqrt{s_1}} + \frac{1}{\sqrt{s_1 + \frac{1}{n}(s_2 - s_1)}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_1 - \frac{2}{n}(s_2 - s_1)}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{s_1 + \frac{n-1}{n}(s_2 - s_1)}} \right\},$$

to otrzymamy:

$$a F \sigma_n < Q < a F \Sigma_n \quad (21)$$

Obie sumy dążą do wspólnej granicy, równej całce

$$\int_0^1 \frac{d\alpha}{\sqrt{s_1 + \alpha(s_2 - s_1)}} = \left\{ \frac{2}{s_2 - s_1} \sqrt{s_1 + \alpha(s_2 - s_1)} \right\}_0^1 = \frac{2}{s_2 - s_1} (\sqrt{s_2} - \sqrt{s_1}) = \frac{2}{\sqrt{s_2} - \sqrt{s_1}} \quad (22)$$

Więc w granicy $n = \infty$, otrzymamy:

$$\sqrt{\frac{\Delta p}{a}} F \frac{2}{\sqrt{s_2} + \sqrt{s_1}} \leq Q \leq \sqrt{\frac{\Delta p}{a}} F \frac{2}{\sqrt{s_2} + \sqrt{s_1}},$$

czyli:

$$Q = \sqrt{\frac{\Delta p}{a}} F \frac{2}{\sqrt{s_1} + \sqrt{s_2}} = \frac{2 F}{\sqrt{s_1} + \sqrt{s_2}} \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma R}} \quad (23)$$

Ilość powietrza będzie zatem przepływała przez pochyłą warstwę bardzo nierównomiernie, i to w kierunku spadku warstwy węgla, t. j. ku s_1 będzie się ilość powietrza zwiększać, z powodu mniejszego oporu.

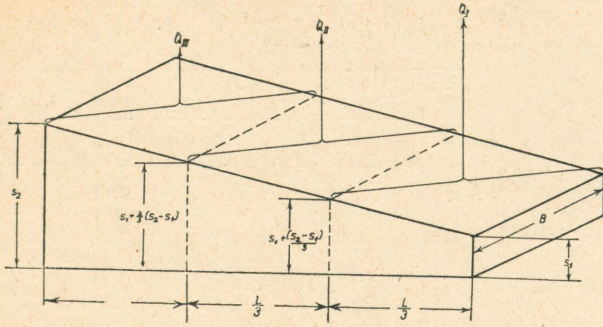
Zagadnienie IV. dotyczy wyliczenia ilości powietrza, jaka przepływać będzie w poszczególnych częściach rusztu w razie pochyłej warstwy węgla.

W tym celu dzielimy długość rusztu podług rys. 18 na 3 równe części i obliczamy ilość powietrza dla każdej z nich osobno, zapomocą równania 23. W ten sposób otrzymujemy dla ostatniego działu F_1 warstwy węgla, w granicach s_1 oraz $s_1 + \frac{1}{3}(s_2 - s_1)$, wyniki następujące:

$$Q_1 = \frac{2 F}{\sqrt{s_1} + \sqrt{\frac{2}{3}s_1 + \frac{1}{3}s_2}} \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma R}} = \frac{2 LB}{3} \left(-\sqrt{s_1} + \sqrt{\frac{2}{3}s_1 + \frac{1}{3}s_2} \right) \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma R}} = \frac{2 LB}{s_2 - s_1} \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma R}} \left[\sqrt{\frac{2}{3}s_1 + \frac{1}{3}s_2} - \sqrt{s_1} \right] \quad (24)$$

Dla drugiej części F_2 rusztu, w granicach wysokości warstw $s_1 + \frac{1}{3}(s_2 - s_1)$ i $s_1 + \frac{2}{3}(s_2 - s_1)$, otrzymujemy ilość powietrza:

5) Rysunki wykonane zostały bez zachowania proporcji, w celu uwypuklenia cech szczególnych.



Rys. 18. Szkic do obliczenia nierównomiernego dopływu powietrza w warstwie pochylej.

$$Q_{II} = \frac{2 F_2}{\sqrt[1/3]{s_1 + 2/3 s_2} - \sqrt[2/3]{s_1 + 1/3 s_2}} \sqrt{\frac{\Delta p \, 2g}{\gamma R}} =$$

$$= \frac{2LB}{3} \left[\sqrt[1/3]{s_1 + 2/3 s_2} + \sqrt[2/3]{s_1 + 1/3 s_2} \right] \sqrt{\frac{\Delta p \, 2g}{\gamma R}} =$$

$$= \frac{2LB}{s_2 - s_1} \sqrt{\frac{\Delta p \, 2g}{\gamma R}} \left[\sqrt[1/3]{s_1 + 2/3 s_2} + \sqrt[2/3]{s_1 + 1/3 s_2} \right] \quad 25)$$

Wreszcie dla trzeciej części, t. j. dla początku rusztu, analogicznie mamy:

$$Q_{III} = \frac{2LB}{s_2 - s_1} \sqrt{\frac{\Delta p \, 2g}{\gamma R}} \left[\sqrt{s_2} + \sqrt[1/3]{s_1 + 2/3 s_2} \right] \quad 26)$$

Suma poszczególnych ilości powietrza $Q_I + Q_{II} + Q_{III}$ musi się zgadzać z ilością powietrza Q , wyliczoną zapomocą równania 23.

Z a g a d n i e n i e V. Następne zagadnienie dotyczy wspomnianego już w objaśnieniu rys. 2 i 3 wypadku, który jest najczęściej spotykany w praktyce, a mianowicie, że tak przy użyciu samego ciągu kominowego, jak też i przy zastosowaniu podwiewu, dopływ powietrza ustosunkowuje się zmiennie, w zależności od chwilowego oporu rusztu, czyli Δp nie jest stały, lecz zmienny, stosownie do chwilowego przeciwcisnienia.

Tu wchodzi w rachubę dwie funkcje, z których pierwsza jest zawarta w równaniu 16 dla warstwy pochylej, mianowicie:

$$Q = f(\Delta p), \quad \dots \dots \dots 27)$$

zaś druga funkcja:

$$Q = f'(\Delta p) \quad \dots \dots \dots 28)$$

jest nam znana z objaśnień do rys. 2 i 3 i jest zależna od cech urządzenia, służącego do wytwarzania ciągu powietrza.

Gdy wybierzemy dla przykładu wentylator użyty do doświadczeń i naszkicowany na rys. 10, to funkcję wyrażoną we wzorze 28 przedstawia nam wykres z rys. 3.

Przy wyliczaniu samej wysokości warstwy s dla pewnej oznaczonej ilości powietrza, wystarczy odmierzyć z rys. 3 spadek ciśnienia dla danej ilości powietrza i wstawić go w równanie 16. Jeśli jednak mamy dla danej warstwy o wysokości s oznaczyć ilość przepuszczanego powietrza a zarazem odnośny spadek ciśnienia, to dla ściśle matematycznego rozwiązania

Zwięźle wyprowadzenie wzorów 19 do 26 zawdzięcza autor Dr. A. Hoborskiemu prof. matem. Akad. gór.

tego zagadnienia jest nieodzowna znajomość równania charakterystyki ciśnienia wentylatora.

Dla odnalezienia tego równania zestawiał autor sposób wykreślny, który szybciej prowadzi do celu, aniżeli obliczenia czysto matematyczne.

W danym wypadku, jak wogóle w przeważnej ilości badanych przez autora wentylatorów odśrodkowych, tworzy charakterystyka ciśnienia w przybliżeniu część obwodu elipsy, której osie jednak nie są identyczne z osiami współrzędnych charakterystyki ciśnienia. Dla odnalezienia osi głównych elipsy, wyszukuje się według rys. 19 cyrklem oba promienie krzywizny ρ' oraz ρ'' , a że z jednej strony środki M oraz N tych promieni muszą się znajdować na przedłużonych osiach a i b elipsy, z drugiej zaś prosta łącząca M z N zawsze musi być prostopadłą do prostej łączącej obydwie sąsiednie wierzchołki A i B , więc też zestawienie trójkąta oraz liniału podług rys. 19 umożliwia szybkie odnalezienie obu głównych osi elipsy, gdyż przechodzą one wzdłuż krawędzi zestawionych na rys. liniału i trójkąta.

Gdy nie odnajdziemy odrazu właściwego położenia punktów M oraz N , przy którym łącząca je prosta jest prostopadłą względem prostej AB , to wystarczy zazwyczaj kilkakrotnie przesunąć te punkty w lewo lub wprawo, ażeby natrafić na ich właściwe położenie. Gdyby i te próby zawiodły, wówczas mamy jeszcze inny sposób ułatwienia zadania, mianowicie możemy wybrać inną podziałkę ilości powietrza na osi odciętych wykresu, wskutek czego krzywa ciśnienia zbliży się więcej do elipsy.

Ognisko F elipsy znajdziemy łatwo według odległości $B'F = a$.

Stosunkowo proste równanie elipsy:

$$\frac{X^2}{b^2} + \frac{Y^2}{a^2} = 1 \quad \dots \dots \dots (29)$$

musimy teraz przekształcić tak, by wyrażało współzależność pomiędzy czynnikami charakterystyki wentylatora. Znając już z rysunku wielkość osi a i b , przeprowadzamy przekształcenie współrzędnych. Przede wszystkim więc przesuwamy równoległe osie elipsy do wspólnego początku współrzędnych $(\Delta p, Q)$ a następnie obracamy osie elipsy o kąt α . W naszym przykładzie (rys. 19) wypada, że środek elipsy powinien być przesunięty poziomo o 25,5 jednostek wlewo oraz o 7,5 jednostek — pionowo do góry, zaś kąt obrotu wyznacza:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2,55}{10}$$

Według znanego sposobu podwójnego przekształcania współrzędnych, otrzymujemy zatem dla rozważanego przykładu:

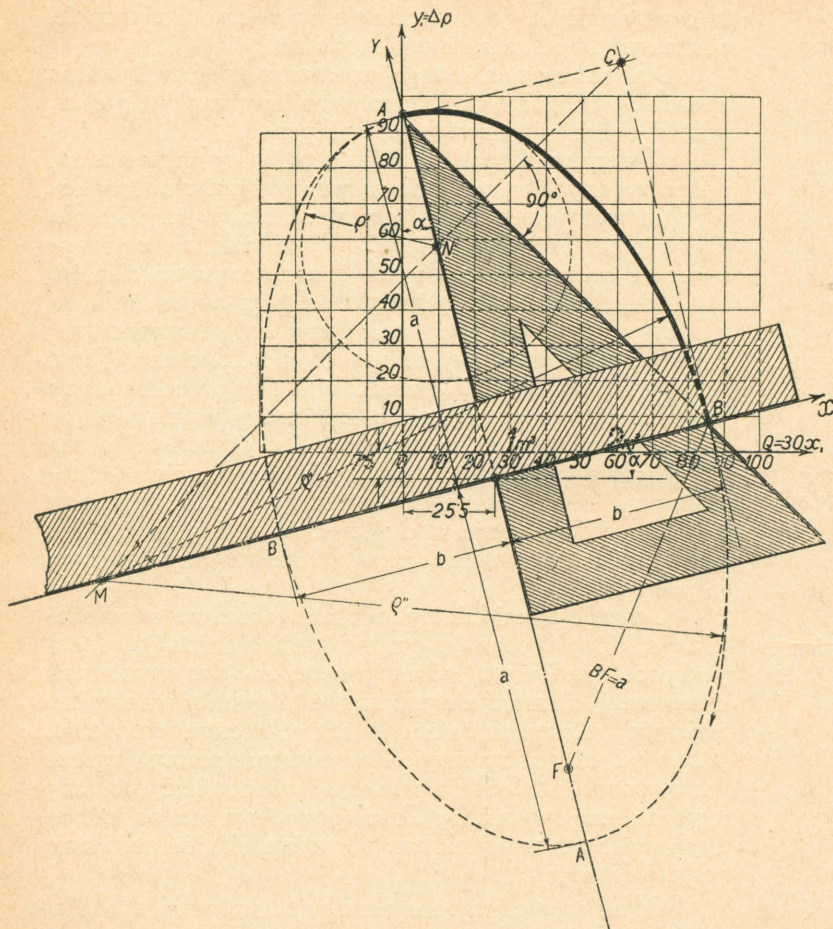
$$X = \frac{(\Delta p + 7,5) \operatorname{tg} \alpha + 30 Q - 25,5}{\cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha},$$

$$Y = \frac{\Delta p + 7,5 - (30 Q - 25,5) \operatorname{tg} \alpha}{\cos \alpha + \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha} \quad \dots \dots \dots (30)$$

Po wstawieniu powyższych wartości za X oraz Y w równanie elipsy (29), otrzymujemy dokładne równanie krzywej charakterystyki wentylatora:

$$y = \Delta p = \sqrt{8500,098 - 2,2991 \cdot 900 \cdot Q + 117,224 \cdot 30 Q + 2,62007 - 0,3984 \cdot 30 Q} \quad \dots \dots \dots (31)$$

Ilość powietrza przepływającego przez daną warstwę oraz spadek ciśnienia w tejże warstwie, może być



Rys. 19. Wyznaczanie wykresne obwodu elipsy, której łuk odpowiada równaniu krzywej ciśnienia.

obliczony z równań 16 i 23, przy zastosowaniu równania 31. Poszukiwana niewiadoma musi bowiem czynić zadość zarówno równaniu 16, względnie 23, jak też równaniu 31. Wobec tego, przyrównując równania 16 względnie 23 z równaniem 31, otrzymujemy:

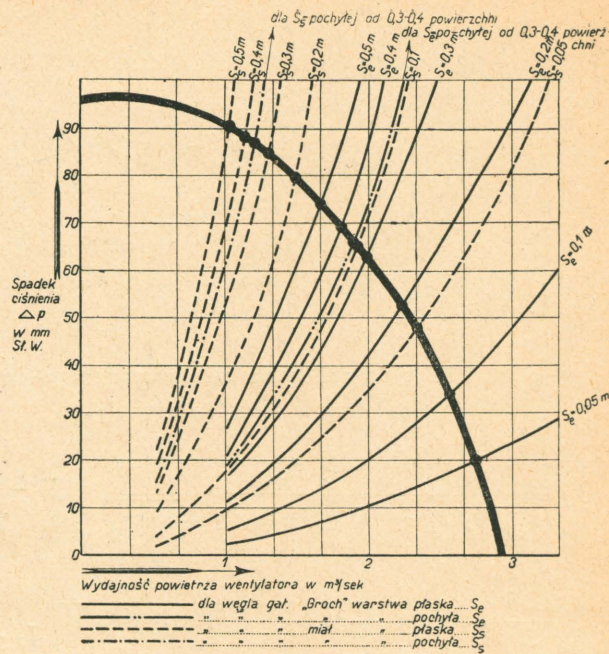
a) dla obliczenia ilości powietrza lub wysokości warstwy:

$$\frac{Q^2 \gamma R_s}{L^2 B 2g} = \sqrt{8500,098 - 2,2991 \cdot 900Q + 117,224 \cdot 30Q + 2,62007 - 0,3984 \cdot 30Q; \dots (32)}$$

b) dla obliczenia wysokości warstwy lub spadku ciśnienia:

$$\Delta p = \sqrt{8500,098 - 2,2991 \cdot 900 \cdot \frac{L^2 B^2 \Delta p 2g}{\gamma R_s} + 117,224 \cdot 30 LB \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{\gamma R_s} + 2,62007 - 0,3984 \cdot 30 LB \sqrt{\frac{\Delta p 2g}{R_s}}}$$

W obu równaniach powyższych rozmyślnie nie oddzielono niewiadomych, ażeby tem wyraźniej podkreślić związek między równaniami 16 a 31.



Rys. 20.

Przecięcia charakterystyki wentylatora z krzywymi spadku ciśnienia w warstwach węgla różnej wysokości.

Podany przez autora sposób rozwiązania zapomocą przekształcenia elipsy jest wprawdzie prosty, jednak dalsze liczenie zapomocą równania elipsy wymaga niedogodnego bądź co bądź rozwiązania równań drugiego stopnia. Dla uniknięcia tej niedogodności, można też zagadnienie rozwiązać w inny sposób. Mianowicie, zapomocą równań 16, względnie 23, wykreślić sieć krzywych (rys. 20), posługując się wartościami tabeli 4 dla różnych gatunków węgla i różnych wysokości warstw, i krzywe te wrysować w wykres charakterystyki ciśnienia wentylatora. Punkty przecięcia poszczególnych krzywych z charakterystyką wentylatora są równocześnie rozwiązaniem powyżej podanych alternatyw zagadnienia V.

Streszczenie.

W artykule powyższym wykazano ważność rozdziału powietrza w warstwie węgla w czasie spalania, a zarazem zwrócono uwagę na zależność rozdziału powietrza od gatunku węgla oraz od wysokości warstwy węgla.

Ze względu na ścisłą łączność rozdziału powietrza i oporu warstwy, opisano także przebieg przeprowadzonych przez autora doświadczeń, które wykazały, że wzrost oporu przepływu powietrza w warstwie węgla jest także funkcją drugiej potęgi prędkości powietrza i że ta funkcja, wraz z oznaczonymi przez autora współczynnikami, zależnymi od gatunku węgla, nadaje się do ścisłych obliczeń oporu rusztowego.



23278

Nie
wypożycza się
NZB 6598