



Metoda oznaczania skłonności węgla do samozapalenia w warunkach temperatury pierwotnej skał

Method for determining the propensity of coal to spontaneous combustion in the conditions of primary rock temperature

Mgr inż. Stanisław Słowik^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono metodę oznaczania skłonności węgla do samozapalenia, gdzie temperatura rozpoczęcia procesu samozagrzewania odpowiada temperaturze otoczenia (skał). Problemem w tym przypadku, na który szczególnie zwrócono uwagę, jest to, że w warunkach zalegania pokładu węgla temperatura otoczenia jest zmienna. W pierwszej części artykułu przeanalizowano jak wpływa na proces samozagrzewania temperatura rozpoczęcia tego procesu i jego zakończenia. W oparciu o to ustalono, dla jakiego przedziału temperatury będzie sformułowany wskaźnik samozapalności. Następnie wyprowadzono metodę oznaczania skłonności węgla do samozapalenia, która jest zależnością funkcyjną $f: T \rightarrow SMP$ przyporządkowującą dwa zbiory, temperaturę rozpoczęcia procesu samozagrzewania T i wskaźnik samozapalności SMP. Istotą uzyskanej funkcji jest całka oznaczona wyprowadzona z równania różniczkowego opartego o równanie Arrheniusa, która określa czas, po jakim w warunkach adiabaticznych następuje przejście układu od temperatury rozpoczęcia procesu samozagrzewania T_0 do temperatury zapłonu T_z . Wskaźnik samozapalności dla zmiennej temperatury początkowej $SMP(T = T_0)$ został wyprowadzony w zakresie temperatury $T_0 = 295$ do 325 °K (22 do 52°C). W końcowej części artykułu omówiono sposób podziału grupowego, który uwzględni zmienną skłonność węgla do samozapalenia w zakresie temperatury $T_0 = 295$ do 325 °K (22 do 52°C). Przedstawiono w jaki sposób ustalono 5-grupowy podział skłonności węgla do samozapalenia. Pokazano również, na przykładzie 953-elementowej próby węgla jak zmienia się skłonność do samozapalenia wraz ze zmianą temperatury początkowej samozagrzewania.

Abstract: The article presents a method for determining the propensity of coal to spontaneous combustion, in which the start temperature of the self-heating process correspond to the ambient temperature (rocks). The problem in this case, which is particularly noteworthy, is that in the conditions of depositing the coal seam, the ambient temperature is variable. In the first part of the article it was analyzed how the temperature of the start of this process and its ending affects the self-heating process. On the basis of this, it was determined for which temperature range the self-ignition index will be formulated. Next, a method for determining the propensity of coal for spontaneous ignition was derived, which is a functional relationship $f: T \rightarrow SMP$ assigning two sets, the start temperature of the self-heating process T and the SMP self-ignition index. The essence of the obtained function is the definite integral derived from the differential equation based on the Arrhenius equation, which determines the time after which, in adiabatic conditions, the system passes from the start temperature of the self-heating process T_0 to the ignition temperature T_z . The spontaneous combustion index for variable initial temperature $SMP(T = T_0)$ was derived in the temperature range $T_0 = 295$ to 325 °K (22 to 52°C). In the final part of the article it was discussed the group division method, which takes into account the variable propensity of coal to self-ignition in the temperature range $T_0 = 295$ to 325 °K (22 to 52°C). It was presented how the 5-group of coal propensity distribution for self-ignition was established. It was also shown, on the example of 953 elements of coal samples, how the propensity to spontaneous combustion changes with the change of the initial temperature of self-heating.

Słowa kluczowe:

węgiel, samozapalność, skłonność do samozapalenia, wskaźnik samozapalności SMP, temperatura pierwotna skał, podział grupowy skłonności węgla do samozapalenia

Keywords:

coal, spontaneous combustion, propensity to spontaneous combustion, SMP spontaneous combustion index, primary temperature of rocks, group classification of coal susceptibility to spontaneous combustion

1. Wprowadzenie

Węgiel zalegający w pokładach kopalń podziemnych, jak też składowany na powierzchni, może ulegać samozapaleniu. W polskich kopalniach węgla kamiennego prawie co roku dochodzi do kilku pożarów w wyniku procesu samozagrzewania. Najczęściej pożary endogeniczne pojawiają się w zrobach ścian eksploatowanych. Drugim co do częstotliwości miejscem wystąpienia pożaru są napowietrzane zroby ścian, w których zakończono eksploatację (Krause, Dziurzyński 2015).

Źródłem pożarów jest węgiel pozostawiany w zrobach jak i w „płatach”. Pożary w „płatach” węgla (pożary szczelinowe) są nagminne. Stwarza to poważne problemy dla bezpieczeństwa ludzi, ciągłości pracy zakładu górniczego, jak i ekonomiczne, dlatego w kopalniach prowadzi się rozpoznanie zagrożenia pożarowego i odpowiednią profilaktykę. Jedną z podstawowych czynności związanych z rozpoznanie zagrożenia pożarowego jest oznaczenie skłonności węgla do samozapalenia (Strumiński 1987).

Metody oznaczenia skłonności węgla do samozapalenia uwzględniają wpływ wielu czynników zewnętrznych i wewnętrznych, których zależności były analizowane przez

^{*)} Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

różnych pracowników naukowych (Kuchta, Rowe, Burgess 1980, Banerjee 2008, Clemens, Matheson, Rogers 1991, Humphreys 1979, Muzyczuk, Kołodziejczyk 1985). Jeden z najważniejszych czynników nieuwzględniany w większości metod, to wpływ zmiany temperatury rozpoczęcia procesu samozagrzewania. Jest on bardzo ważny, ponieważ węgiel w kopalniach podziemnych zalega w warunkach zmiennej temperatury pierwotnej (górotworu). Można przyjąć, że temperatura w miejscu zalegania węgla odpowiada temperaturze rozpoczęcia procesu samozagrzewania.

Niniejsza praca jest próbą pokazania, jak na skłonność węgla do samozapalenia wpływa zmiana temperatury początkowej (rozpoczęcia) procesu samozagrzewania.

Z samozapaleniem mamy do czynienia, kiedy w wyniku reakcji utleniania następuje kumulacja ciepła i temperatura materiału ulegającego samozagrzewaniu osiąga temperaturę zapłonu. Ilość ciepła dodana do ciała ΔQ odpowiada przyrostowi jego temperatury ΔT . Natomiast przyrost temperatury ΔT w czasie Δt powoduje zwiększenie szybkości reakcji, co przekłada się na wzrost stałych szybkości (k).

Zależność pomiędzy stałą szybkości reakcji i temperaturą opisuje równanie Arrheniusa, które jest zależnością wykładniczą:

$$k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

gdzie:

- k – szybkość reakcji (K/s),
- k_0 – współczynnik przedeksponencjalny (K/s),
- E – energia aktywacji (J/mol),
- R – stała gazowa, równa 8,315 (J/mol K),
- T – temperatura (K).

Ze względu na to, że proces samozagrzewania przebiega nieliniowo, należy przyjąć, że sklasyfikowanie węgla pod kątem skłonności do samozapalenia w temperaturze początkowej $T_0 = T_1$ nie będzie odpowiadać klasyfikacji ustalonej dla innej, czyli $T_0 = T_2$. Dlatego przy wyprowadzaniu metody oznaczania skłonności węgla do samozapalenia w warunkach zmiennej temperatury początkowej $T_0 = \text{var}$. spotykamy się ze złożonym problemem, węgle nie tylko różnią się skłonnością do samozapalenia w tej samej temperaturze początkowej, ale dany węgiel w warunkach zmienionej temperatury początkowej będzie wykazywał inną skłonność do samozapalenia. Problem ten postanowiono rozwiązać w oparciu o ideę wskaźnika SMP (Słowik, 2006, 2008), który opisuje czas w jakim węgiel osiągnie temperaturę zapłonu w warunkach adiabatycznych. Schemat postępowania przy wyprowadzaniu metody oznaczania skłonności węgla do samozapalenia w warunkach zmiennej temperatury początkowej był następujący:

- przyjęto, że miarą skłonności do samozapalenia jest czas w jakim, w warunkach adiabatycznych, węgiel osiągnie temperaturę zapłonu;
- ustalono temperaturę początkową, od której rozpoczyna się proces samozagrzewania;
- ustalono temperaturę zapłonu, czyli zakończenia procesu samozagrzewania;
- wyznaczono wskaźniki samozapalności SMP elementów badanej próby węgla, dla różnej temperatury początkowej;
- wyprowadzono zależność funkcyjną opisującą skłonność węgla do samozapalenia w warunkach zmiennej temperatury początkowej (temperatury skał) i ustalono 5-grupową klasyfikację skłonności węgla do samozapalenia.

2. Podstawy zastosowanej metody badań

Przy opracowywaniu sposobu oznaczania skłonności do samozapalenia w warunkach zmiennej temperatury

początkowej wykorzystano 953-elementową próbę węgla, pobranych i przebadanych zgodnie z normą PN-90/G-04502 i PN-93/G-04558.

Badaniu poddawano próbki węgla pobrane z pokładów w wyrobiskach podziemnych kopalń. Próbki po wysuszeniu mielono dla wydzielenia odpowiedniej klasy ziarnowej i sporządzano pastylki węgla, które były spalane w komorze pomiarowej. Pomiary polegały na wyznaczeniu szybkości wzrostu temperatury w warunkach adiabatycznych dla dwóch punktów temperatury: 463°K (190°C) i 510°K (237°C). Rejestrowano równocześnie temperaturę próbki węgla i czas. Z otrzymanych wyników wyznaczano wzrost temperatury pastylki węgla w czasie $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)$:

- dla punktu temperatury 463°K (190°C) w przedziale ΔT : 438 do 488°K (165 do 215°C),
- dla punktu temperatury 510°K (237°C) w przedziale ΔT : 473 do 533°K (200 do 260°C)

i wyznaczono, dla elementów próby, równania szybkości reakcji Arrheniusa (1).

Przy założeniu, że w warunkach adiabatycznych szybkość wzrostu temperatury w punkcie temperaturowym T odpowiada szybkości reakcji w tym punkcie, możemy napisać

$$k(T) \cong \frac{\Delta T}{\Delta \tau} \quad (2)$$

Następnie zastępując w równaniu (2) przyrosty różniczkami i przekształcając (1) do równania różniczkowego, otrzymujemy równanie

$$d\tau = \frac{dT}{k(T)} = \frac{dT}{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)} \quad (3)$$

które po scałkowaniu reprezentuje czas w jakim nastąpi, w warunkach adiabatycznych, przejście węgla z temperatury T_1 do T_2

$$\tau = \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)} dT \quad (4)$$

Jeżeli skłonność węgla do samozapalenia definiujemy jako czas, po którym nastąpi samozapłon na skutek kumulacji ciepła i wzrostu temperatury, to rozwiązaniem całki oznaczonej (4), w przedziale od temperatury początkowej (T_0) do temperatury zapłonu (T_z), będzie parametr charakteryzujący tę skłonność

$$\tau_{T_0 T_z} = \int_{T_0}^{T_z} \frac{1}{k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)} dT = \int_{T_0}^{T_z} \frac{1}{k_0} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT \quad (5)$$

Należy tu zaznaczyć, że wskaźnik samozapalności SMP stanowi wartość logarytmowaną całki oznaczonej (5) liczonej w stałym przedziale temperatury od $T_0 = 293$ do $T_z = 573^\circ\text{K}$ (20 do 300°C) (Słowik 2008)

$$\text{SMP} = \ln(\tau_{T_0 T_z}) = \ln\left(\int_{T_0=293}^{T_z=573} \frac{1}{k_0} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT\right) \quad (6)$$

Opierając się na zależności (5) możemy pokazać wpływ temperatury początkowej na przebieg procesu samozagrzewania. Ponieważ dla tego samego elementu (węgla) i różnej temperatury początkowej T_0 : $T_0 = T_1$ i $T_0 = T_2$, gdzie $T_1 < T_2$, otrzymujemy inne wartości całek przedstawiające czas w jakim nastąpi samozapłon

$$\int_{T_1}^{T_z} \frac{1}{k_o} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT = \int_{T_1}^{T_z} \frac{1}{k_o} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT + \int_{T_2}^{T_z} \frac{1}{k_o} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT > \\ > \int_{T_2}^{T_z} \frac{1}{k_o} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT$$

2.1. Przedział temperatury całkowania

Przeprowadzono analizę, aby wykazać jak zmiana wartości temperatury całkowania wpływa na wskaźnik SMP. Analizie poddano próbę złożoną z 953 elementów (węgli różniących się skłonnością do samozapalenia), dla których wyznaczono wskaźniki SMP, zmieniając temperaturę początkową lub końcową całkowania. Następnie wykonano testy, aby dowiedzieć w jakim stopniu wartości wskaźnika samozapalności SMP przed i po zmianie temperatury są ze sobą zgodne. Wykorzystano do tego program STATISTICA i testy t na występowanie różnic między średnimi dla dwóch prób z uwzględnieniem jednorodności wariancji (zmienności w grupach). Założono poziom istotności dla testu t równy 0,05. Czyli z prawdopodobieństwem na poziomie co najmniej 95 % popełniamy błąd odrzucając hipotezę zerową o braku różnicy między średnimi z uwzględnieniem zmienności w grupach (Luszniewicz, Słaby 2008).

Przy ustalaniu górnej granicy całkowania oparto się na tym, że temperatura zapłonu węgla kamiennego wynosi od około 543 do 623°K (270 do 350°C). Jako przeciętną temperaturę zapłonu przyjmuje się $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C) (Trenczek 2008).

Przyjęto też, że dolna granica całkowania, czyli temperatura początkowa, od której rozpoczyna się proces samozagrzewania węgla w kopalniach podziemnych, związana jest z temperaturą otaczającego węgiel górotworu (Trenczek 2007).

Średnie wartości temperatury pierwotnej skał dla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, dla poziomów: -450 m, -550 m, -650 m, -750 m i -850 m wynoszą od około 297,5 do 315°K (24,5 do 47°C) (Knechtel, Gapiński 2005). Natomiast dla większości poziomów średnie zawierają się w granicach 305 do 315°K (32 do 42°C), wartość środkowa tego przedziału to 310°K (37°C). Określono, że dolna granica całkowania dla

wskaźnika SMP(T) będzie się zmieniać w przedziale temperatury skał od 295 do 325°K (22 do 52°C).

2.1.1. Górna granica całkowania

Sprawdzono jak zmiana górnej granicy całkowania, tj. temperatury zapłonu, wpływa na wyniki wskaźnika SMP. W tym celu dla elementów próby (węgli) wyznaczono wskaźniki SMP obliczone wg zależności (6) w następującym przedziale temperatury początkowej (T_0) i końcowej (T_z):

- $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 543^\circ\text{K}$ (270°C);
- $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C);
- $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 623^\circ\text{K}$ (350°C);
- $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 543^\circ\text{K}$ (270°C);
- $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C);
- $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 623^\circ\text{K}$ (350°C).

Następnie sprawdzono, czy występują istotne różnice pomiędzy otrzymanymi wynikami. Zastosowano do tego testy t na występowanie różnic między średnimi dla dwóch prób z uwzględnieniem zmienności w grupach. Wyniki przeprowadzonych testów przedstawiono w tablicy 1.

Wyniki przeprowadzonych testów wykazały, że nie ma istotnej różnicy między wskaźnikami SMP obliczonymi dla zmienionej górnej temperatury całkowania niezależnie, czy dolną granicę przyjmujemy równą $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C) czy $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C). Udowadniają to przeprowadzone testy t (tablica 1):

- $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C) vs. $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 543^\circ\text{K}$ (270°C);
- $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C) vs. $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 623^\circ\text{K}$ (350°C);
- $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 543^\circ\text{K}$ (270°C) vs. $T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C), $T_z = 623^\circ\text{K}$ (350°C);
- $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C) vs. $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 543^\circ\text{K}$ (270°C);
- $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C) vs. $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 623^\circ\text{K}$ (350°C);
- $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 543^\circ\text{K}$ (270°C) vs. $T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C), $T_z = 623^\circ\text{K}$ (350°C).

W oparciu o przeprowadzoną analizę przyjęto, że górna granica całkowania będzie stała i równa przeciętnej temperaturze zapalenia $T_z = 573^\circ\text{K}$ (300°C).

Tablica 1. Test t na występowanie różnic wskaźnika SMP przy zmianie górnej granicy całkowania (T_z)

Table 1. T-test for the occurrence of SMP differences when the upper limit of integration (T_z) changes

Testy dla prób niezależnych.											
Grupa 1 vs. Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Odchylenie standardowe Grupa 1	Odchylenie standardowe Grupa 2	iloraz F Wariancje	p Wariancje
$T_0 = 295^\circ\text{K}$ (22°C)											
$T_{z1} = 573^\circ\text{K}$ vs. $T_{z2} = 543^\circ\text{K}$	12,88238	12,88233	0,000574	1904	0,9995	953	953	1,611324	1,611371	1,000059	0,9993
$T_{z1} = 573^\circ\text{K}$ vs. $T_{z2} = 623^\circ\text{K}$	12,88238	12,88241	-0,000464	1904	0,9996	953	953	1,611324	1,611283	1,000050	0,9994
$T_{z1} = 543^\circ\text{K}$ vs. $T_{z2} = 623^\circ\text{K}$	12,88233	12,88241	-0,001038	1904	0,9992	953	953	1,611371	1,611283	1,000109	0,9987
$T_0 = 325^\circ\text{K}$ (52°C)											
$T_{z1} = 573^\circ\text{K}$ vs. $T_{z2} = 543^\circ\text{K}$	10,75374	10,75349	0,004222	1904	0,9966	953	953	1,292661	1,292892	1,000357	0,9956
$T_{z1} = 573^\circ\text{K}$ vs. $T_{z2} = 623^\circ\text{K}$	10,75374	10,75394	-0,003338	1904	0,9973	953	953	1,292661	1,292466	1,000303	0,9963
$T_{z1} = 543^\circ\text{K}$ vs. $T_{z2} = 623^\circ\text{K}$	10,75349	10,75394	-0,007561	1904	0,9940	953	953	1,292892	1,292466	1,000660	0,9919

Uwaga: Zmienne traktowane są jako niezależne próby.

2.1.2. Dolna granica całkowania

Dolna granica całkowania wskaźnika SMP(T) przeanalizowana została dla przedziału temperatury 295 do 325°K (22 do 52°C). Z przeprowadzonych testów t na występowanie różnic między średnimi dla dwóch prób z uwzględnieniem zmienności w grupach wynika, że przy zmianie temperatury początkowej o 1 stopień nie zauważa się istotnych różnic (p = 0,28), jednak zmiana o 2 stopnie powoduje pojawienie się istotnej różnicy w wynikach wskaźnika samozapalności SMP (p = 0,03 < 0,05) (tablica 2).

Wykonane obliczenia i testy dowiodły, że widoczne zróżnicowanie wskaźnika SMP pojawia się po zmianie dolnej temperatury całkowania o ΔT = 2 stopnie. Uznano więc, że analiza wskaźnika SMP w przedziale temperatury 295 do 325°K (22 do 52°C) zostanie przeprowadzona dla grupy elementów, których temperatura początkowa wynosi T₀: 295, 300, 305, 310, 315, 320, 325°K (22, 27, 32, 37, 42, 47 i 52°C).

3. Analiza wyników badań

Wskaźnik samozapalności SMP(T) jest to funkcja przyporządkowująca dwa zbiory, wskaźnik SMP i temperaturę T, której dziedzinę stanowi temperatura początkowa samozagrzewania w przedziale 295, 325°K (22, 52°C). Wskaźnik ten jest wynikiem linearyzacji całki oznaczonej t_{T₀,Tz} (5), gdzie jakość linearyzacji wpływa na wynik, dlatego wyprowadzając wskaźnik SMP(T) uwzględniono sposób wyrównywania rozkładu całki t_{T₀,Tz}.

Całkę oznaczoną t_{T₀,Tz} obliczono dla wybranych wartości temperatury początkowej: 295, 300, 305, 310, 315, 320, 325°K (22, 27, 32, 37, 42, 47 i 52°C). Statystyki opisowe wyników całkowania przedstawiono w tablicy 3. Charakteryzują się one dużą skośnością świadcząca o ich nieliniowości. Nieliniowość rozkładu potwierdzają przeprowadzone testy (tablica 4).

Tablica 2. Test t na występowanie różnic wskaźnika SMP przy zmianie dolnej granicy całkowania (T₀)
Table 2. T-test for the occurrence of SMP differences when the lower limit of integration (T₀) is changed

Testy dla prób niezależnych.											
Grupa 1 vs. Grupa 2	Średnia Grupa 1	Średnia Grupa 2	t	df	p	N ważnych Grupa 1	N ważnych Grupa 2	Odchylenie standardowe Grupa 1	Odchylenie standardowe Grupa 2	iloraz F Wariancje	p Wariancje
T _z = 573 °K (300°C)											
T ₀₁ = 295°K vs. T ₀₂ = 296°K	12,88238	12,80412	1,064030	1904	0,2875	953	953	1,611324	1,599590	1,014725	0,8216
T ₀₁ = 295°K vs. T ₀₂ = 297°K	12,88238	12,72641	2,128234	1904	0,0334	953	953	1,611324	1,587939	1,029669	0,6520
T ₀₁ = 325°K vs. T ₀₂ = 326°K	10,75374	10,68986	1,082719	1904	0,2791	953	953	1,292661	1,283131	1,014910	0,8194
T ₀₁ = 325°K vs. T ₀₂ = 327°K	10,75374	10,62639	2,166393	1904	0,0304	953	953	1,292661	1,273665	1,030052	0,6479

Uwaga: Zmienne traktowane są jako niezależne próby.

Tablica 3. Podstawowe parametry statystyczne całki τ_{T₀,Tz} (5) wyznaczonej dla elementów próby

Table 3. Basic statistical parameters of the τ_{T₀,Tz} (5) integral determined for the elements of the sample

Temperatura Początkowa °K/°C	N	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe	Skośność
295 /22	953	1385961	12703,9	2630000	2850603	4,31
300 /27	953	867620	9847,7	1540000	1706139	4,14
305 /32	953	552986	7702,1	9150000	1039088	3,98
310 /37	953	358672	6075,3	5540000	644291	3,82
315 /42	953	236459	4830,8	3420000	405985	3,66
320 /47	953	158334	3870,7	2150000	259842	3,52
325 /52	953	107603	3124,0	1370000	168769	3,37

Tablica 4. Testy normalności całki τ_{T₀,Tz} (5) wyznaczonej dla elementów próby

Table 4. The normality tests of the integral τ_{T₀,Tz} (5) determined for the sample elements

Temperatura początkowa °K/°C	N	maks D	Kolmogorowa-Smirnowa (K-S) p	Lillieforsa p	Shapiro-Wilka (W)	
						p
295 /22	953	0,314994	p < ,01	p < ,01	0,493352	0,000000
300 /27	953	0,307568	p < ,01	p < ,01	0,511168	0,000000
305 /32	953	0,299871	p < ,01	p < ,01	0,529384	0,000000
310 /37	953	0,292099	p < ,01	p < ,01	0,547341	0,000000
315 /42	953	0,284158	p < ,01	p < ,01	0,565381	0,000000
320 /47	953	0,276105	p < ,01	p < ,01	0,583335	0,000000
325 /52	953	0,267937	p < ,01	p < ,01	0,601263	0,000000

W celu wyrównania rozkładu zmiennych τ_{T_0, T_z} obliczono współczynnik lambda przekształcenia Boxa-Coxa. Współczynnik ten wynosi od $\lambda = -0,059$ do $\lambda = -0,080$ i jest bliski zera, co wskazuje na możliwość zastosowania logarytmowania. Jednak porównując jakość liniowości przekształcenia Boxa-Coxa i logarytmowania widać, że znacznie lepsze wyrównanie uzyska się stosując metodę Boxa-Coxa (tabl. 5).

W oparciu o przeprowadzoną analizę przyjęto, że podstawą wyznaczenia wskaźnika samozapalenia SMP(T) dla zmiennej temperatury początkowej w przedziale 295 do 325°K (22 do 52°C) będzie całka (5) przekształcona wg Boxa-Coxa, którego współczynnik lambda uzależniono od temperatury i opisano wzorem

$$\lambda = -(0,00212T)^2 + 0,00208T - 0,2823 \quad (7)$$

gdzie:

T – temperatura początkowa całkowania (temperatura skał) zmieniająca się w przedziale od 295 do 325°K (22 do 52°C).

Wskaźnik samozapalności, który uwzględnia zmieniającą się temperaturę początkową samozagrzewania w przedziale od 295 do 325°K (22 do 52°C), to całka (5) wyprowadzona z równania Arrheniusa i przekształcona do postaci liniowej, którą oznaczono jako SMP(T) i wyrażono zależnością

$$SMP(T) = \frac{\left(\int_T^{573} \frac{1}{k_0} \exp\left(\frac{E}{RT}\right) dT \right)^{-(0,00212T)^2 + 0,00208T - 0,2823} - 1}{-(0,00212T)^2 + 0,00208T - 0,2823} \quad (8)$$

gdzie:

T – temperatura początkowa samozagrzewania z przedziału 295 do 325 °K (22 do 52°C), dla której wyznaczany jest wskaźnik (K),

k_0 – współczynnik przedeksponentjalny równania Arrheniusa (K/s),

E – energia aktywacji (J/mol),

R – stała gazowa, równa 8,315 (J/mol K).

Temperaturę początkową samozagrzewania w opisie wskaźnika SMP(T) proponuje się podawać jako wartość z zaznaczeniem skali w jakiej jest wyrażona, np. dla stopni w Kelwinach SMP(295°K) lub to samo, ale z zapisem temperatury dla skali Celsjusza: SMP(22°C). Przy czym, do obliczeń należy stosować wartości wyrażone w Kelwinach, np. dla temperatury początkowej 295°K (22°C)

$$SMP(295 K) = SMP(22^\circ C) = \frac{\left(\int_{295}^{573} \frac{1}{k_0} \exp\left(\frac{E}{R \cdot 295}\right) dT \right)^{-(0,00212 \cdot 295)^2 + 0,00208 \cdot 295 - 0,2823} - 1}{-(0,00212 \cdot 295)^2 + 0,00208 \cdot 295 - 0,2823}$$

Wyprowadzony wzór na wskaźnik samozapalności SMP(T) sprawdza się w zakresie temperatury początkowej samozagrzewania 295 do 325°K (22 do 52°C). Jednak opierając się na wynikach testów t wpływu zmiany temperatury początkowej na wskaźnik SMP można rozszerzyć przedział temperatury początkowej o 1 stopień, czyli od 294 do 326°K (21 do 53°C).

Wskaźnik samozapalności SMP(T) należy obliczać z dokładnością co najmniej do drugiego miejsca po przecinku.

3.1. Ustalenie klasyfikacji grupowej

Najprostszy sposób postępowania przy ustalaniu jakiejś klasyfikacji, to podział na trzy grupy. Zostaje wydzielony przedział środkowy jako II grupa, natomiast wszystkie elementy poniżej lub powyżej tego przedziału stanowią I i III grupę w klasyfikacji. Taki sposób podziału grupowego jest wygodny w przypadku, kiedy pomija się problem liniowości rozkładu. Jednak często otrzymuje się bardzo nieprecyzyjną klasyfikację, szczególnie przy wyraźnym nieliniowym rozkładzie.

Dlatego przy ustalaniu klasyfikacji grupowej skłonności węgla do samozapalenia oparto na kategoryzacji rozkładu normalnego. Poszukiwano takiego przedziału, w którym zmienna

Tablica 5. Porównanie wyrównania rozkładu uzyskane dla całki τ_{T_0, T_z} (5) wg Boxa-Coxa i logarytmowania
Table 5. Comparison of the distribution equalization obtained for the integral τ_{T_0, T_z} (5) according to Box-Cox and logarithm

Testy normalności rozkładu dla przekształcenia Boxa-Coxa						
Temperatura początkowa °K/ °C	N	maks D	Kolmogorowa-Smirnowa (K-S) p	Lillieforsa p	Shapiro-Wilka (W)	
						p
295 /22	953	0,029260	p > ,20	p < ,05	0,991073	0,000016
300 /27	953	0,029333	p > ,20	p < ,05	0,990887	0,000013
305 /32	953	0,029364	p > ,20	p < ,05	0,990681	0,000010
310 /37	953	0,030336	p > ,20	p < ,05	0,990468	0,000008
315 /42	953	0,030110	p > ,20	p < ,05	0,990241	0,000006
320 /47	953	0,030496	p > ,20	p < ,05	0,990005	0,000004
325 /52	953	0,029816	p > ,20	p < ,05	0,989753	0,000003
Testy normalności rozkładu dla logarytmowanych wartości						
Temperatura początkowa °K/°C	N	maks D	Kolmogorowa-Smirnowa (K-S) p	Lillieforsa p	Shapiro-Wilka (W)	
						p
295 /22	953	0,042165	p < ,10	p < ,01	0,988199	0,000001
300 /27	953	0,042650	p < ,10	p < ,01	0,987959	0,000000
305 /32	953	0,042761	p < ,10	p < ,01	0,987697	0,000000
310 /37	953	0,043600	p < ,10	p < ,01	0,987419	0,000000
315 /42	953	0,045089	p < ,05	p < ,01	0,987126	0,000000
320 /47	953	0,044800	p < ,05	p < ,01	0,986819	0,000000
325 /52	953	0,046546	p < ,05	p < ,01	0,986491	0,000000

SMP(T) będzie spełniać warunek rozkładu normalnego przy liczności klas będącej wielokrotnością 5-grupowego podziału dla wszystkich przypadków temperatury początkowej samozagrzewania węgla z przedziału (295, 325 °K). Przyjęto bowiem, że optymalna ilość grup klasyfikujących, to pięć.

Wskaźnik SMP(T) obliczono dla temperatury początkowej samozagrzewania węgla: 295°K (22°C), 300°K (27°C), 305°K (32°C), 310°K (37°C), 315°K (42°C), 320°K (47°C) i 325°K (52°C). Otrzymano w ten sposób próbę złożoną z 7 zmiennych o łącznej liczności 6671 elementów. Jest to reprezentatywna próba dla wszystkich zmiennych SMP(T) z przedziału temperatury $T \in (295, 325^\circ\text{K})$, jej statystyki opisowe przedstawiono w tabelicy 6.

Otrzymaną próbę poddano analizie, zauważyć można, że ze wzrostem temperatury początkowej samozagrzewania węgla zmniejsza się średnia wartość wskaźnika SMP(T) oraz skraca się rozstęp wyników (tablica 6). Np. dla temperatury początkowej równej 305°K (32°C) wskaźnik SMP(32°C) zmienia się od 6,76 do 9,89. Natomiast dla temperatury równej

315°K (42°C) wskaźnik SMP(42°C) wynosi od 6,32 do 9,13. Widać wyraźnie, że w wyższej temperaturze początkowej węgle potrzebują krótszego czasu do osiągnięcia temperatury zapłonu, cechują się więc większą skłonnością do samozapalenia niż w niższej temperaturze.

Charakter liniowy zmiennych SMP(22°C), SMP(27°C), SMP(32°C), SMP(37°C), SMP(42°C), SMP(47°C) i SMP(52°C) oraz całej próby wykazano przez dopasowanie rozkładu normalnego z przeprowadzeniem testu chi-kwadrat. Wyniki testów przedstawiono w tabelicy 7.

Potwierdzona liniowość rozkładu zmiennych wskaźnika SMP(T) w przedziale temperatury 295 do 325°K (22 do 52°C) stanowi podstawę do poszukiwania odpowiedniego podziału grupowego. Po przeprowadzeniu szeregu obliczeń i analiz ustalono, że założone warunki podziału grupowego spełnia przedział od 6,85 do 9,15. W tabelicy 8 przedstawiono wyniki testu chi-kwadrat, które potwierdzają normalność rozkładu analizowanych zmiennych SMP(T) w przedziale od 6,85 do 9,15.

Tablica 6. Statystyki opisowe wskaźnika SMP(T) dla temperatury początkowej samozagrzewania: 295 °K (22°C), 300 °K (27°C), 305 °K (32°C), 310 °K (37°C), 315 °K (42°C), 320 °K (47°C) i 325 °K (52°C)

Table 6. Descriptive statistics of the SMP(T) for the initial temperature: 295 °K (22°C), 300 °K (27°C), 305 °K (32°C), 310 °K (37°C), 315 °K (42°C), 320 °K (47°C) and 325 °K (52°C)

Zmienna	N ważnych	Średnia	Minimum	Maksimum	Rozstęp	Odchylenie standardowe	Skośność
SMP(22°C)	953	8,95	7,22	10,70	3,48	0,74	0,017
SMP(27°C)	953	8,62	6,99	10,29	3,31	0,71	0,018
SMP(32°C)	953	8,31	6,76	9,89	3,13	0,67	0,018
SMP(37°C)	953	8,01	6,54	9,50	2,97	0,63	0,019
SMP(42°C)	953	7,71	6,32	9,13	2,81	0,60	0,020
SMP(47°C)	953	7,43	6,11	8,77	2,65	0,57	0,020
SMP(52°C)	953	7,15	5,91	8,41	2,50	0,54	0,021
próba SMP(22 do 52°C)	6671	8,03	5,91	10,70	4,79	0,88	0,261

Tablica 7. Wyniki testu chi-kwadrat dla zmiennych SMP(22°C), SMP(27°C), SMP(32°C), SMP(37°C), SMP(42°C), SMP(47°C), SMP(52°C)

Table 7. Results of the chi-square test for variables SMP(22°C), SMP(27°C), SMP(32°C), SMP(37°C), SMP(42°C), SMP(47°C), SMP(52°C)

Zmienna	Liczba klas	Dolna granica	Górna granica	Średnia	Wariancja	Test chi-kwadrat
SMP(22°C)	30	7,50	10,00	8,95	0,58	26,51005, df = 27, p = 0,490
SMP(27°C)	30	7,20	9,90	8,62	0,53	36,81607, df = 27, p = 0,099
SMP(32°C)	30	6,80	9,45	8,31	0,48	38,14756, df = 27, p = 0,076
SMP(37°C)	30	6,65	9,35	8,01	0,43	37,48259, df = 27, p = 0,086
SMP(42°C)	30	6,47	8,93	7,71	0,39	39,21136, df = 27, p = 0,061
SMP(47°C)	30	6,32	8,58	7,42	0,35	39,25735, df = 27, p = 0,060
SMP(52°C)	30	6,11	8,16	7,15	0,31	39,45015, df = 27, p = 0,058
próba SMP(22 do 52°C)	35	7,05	9,05	8,01	0,84	44,78634, df = 32, p = 0,066

Tablica 8. Wyniki testu chi-kwadrat potwierdzające normalność rozkładu próby i każdej ze zmiennych w przedziale od 6,85 do 9,15

Table 8. Chi-square test results confirming the normality of the sample distribution and each of the variables in the range from 6,85 to 9,15

Zmienna	Wyniki testu chi-kwadrat dla SMP(T)					
	Liczba klas	Minimum	Max.	Średnia	Wariancja	Test chi-kwadrat
SMP(22°C)	30	6,85	9,15	8,94	0,59	31,474, df = 23 (dop.), p = 0,112
SMP(27°C)	30	6,85	9,15	8,62	0,57	37,341, df = 26 (dop.), p = 0,070
SMP(32°C)	30	6,85	9,15	8,31	0,49	31,326, df = 27, p = 0,258
SMP(37°C)	30	6,85	9,15	8,01	0,44	38,298, df = 27, p = 0,073
SMP(42°C)	30	6,85	9,15	7,72	0,40	33,465, df = 27, p = 0,182
SMP(47°C)	30	6,85	9,15	7,43	0,36	34,442, df = 23 (dop.), p = 0,059
SMP(52°C)	30	6,85	9,15	7,15	0,33	28,178, df = 19 (dop.), p = 0,080

Tablica 9. Podział węgla na kategorie skłonności do samozapalenia w przedziale temperatury początkowej od 295°K (22°C) do 325°K (52°C) wg wskaźnika SMP(T)

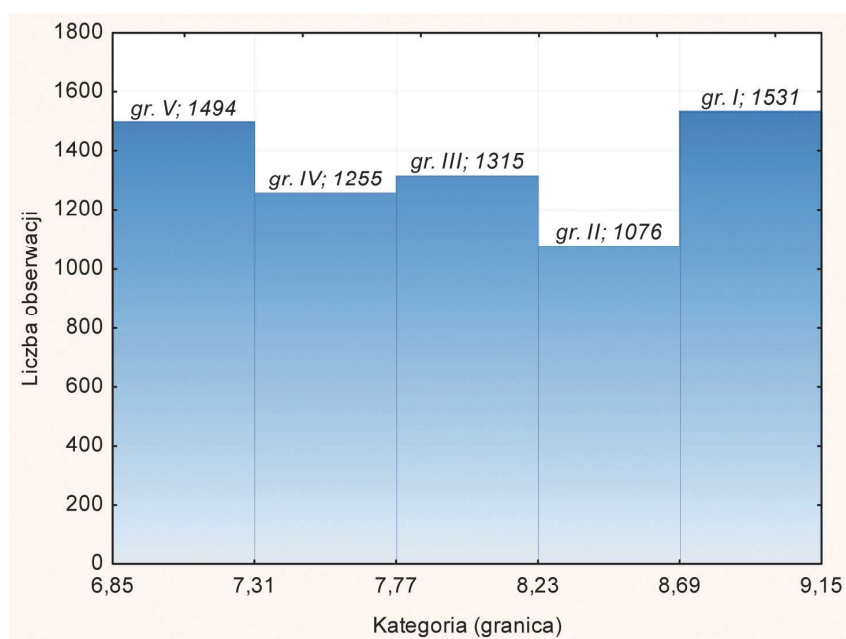
Table 9. Division of coal into categories of propensity to spontaneous combustion in the range of initial temperature from 295°K (22°C) to 325°K (52°C) according to the SMP(T) index

Sklonność węgla do samozapalenia w przedziale temperatury początkowej od 293°K (20°C) do 323°K (50°C)	Grupa	Wartość wskaźnika
bardzo mała	I	$8,69 \leq \text{SMP}(T)$
mała	II	$8,23 \leq \text{SMP}(T) < 8,69$
średnia	III	$7,77 \leq \text{SMP}(T) < 8,23$
duża	IV	$7,31 \leq \text{SMP}(T) < 7,77$
bardzo duża	V	$\text{SMP}(T) < 7,31$

Wynikiem przeprowadzonej analizy wskaźnika SMP(T) jest podział grupowy skłonności węgla do samozapalenia, który przedstawia się następująco (Tablica 9):

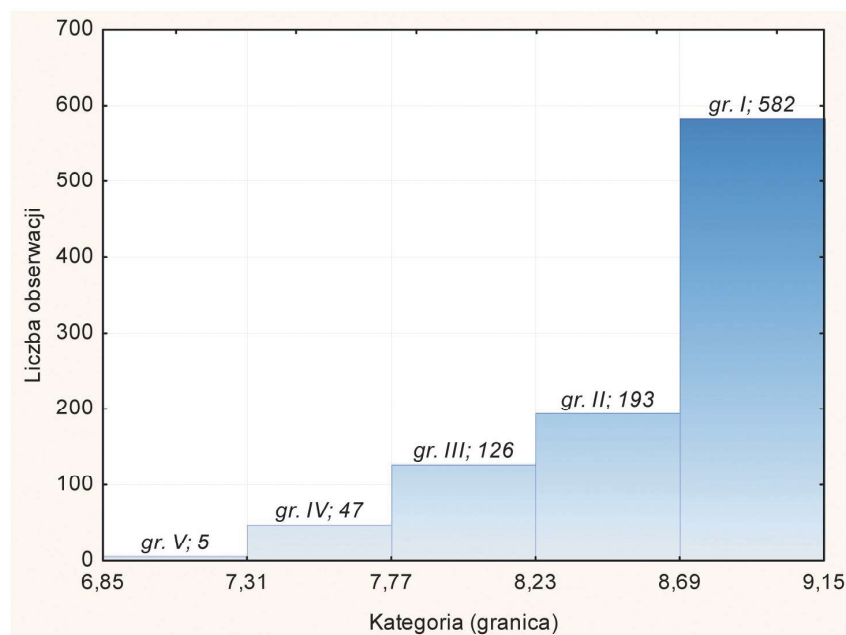
Poniżej, dla wybranej temperatury początkowej samozapalenia węgla, przedstawiono rozkład licznosci wskaźnika

SMP(T) dla analizowanej 953-elementowej próby węgla z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (rys. 1 do 8). W opisie na rysunkach podano licznosci elementów występujących w danej grupie.



Rys. 1. Rozkład licznosci wskaźnika SMP (22 do 52°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 22°C, 27°C, 32°C, 37°C, 42°C, 47°C, 52°C)

Fig. 1. Distribution of the SMP index (22 to 52°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 22°C, 27°C, 32°C, 37°C, 42°C, 47°C, 52°C)

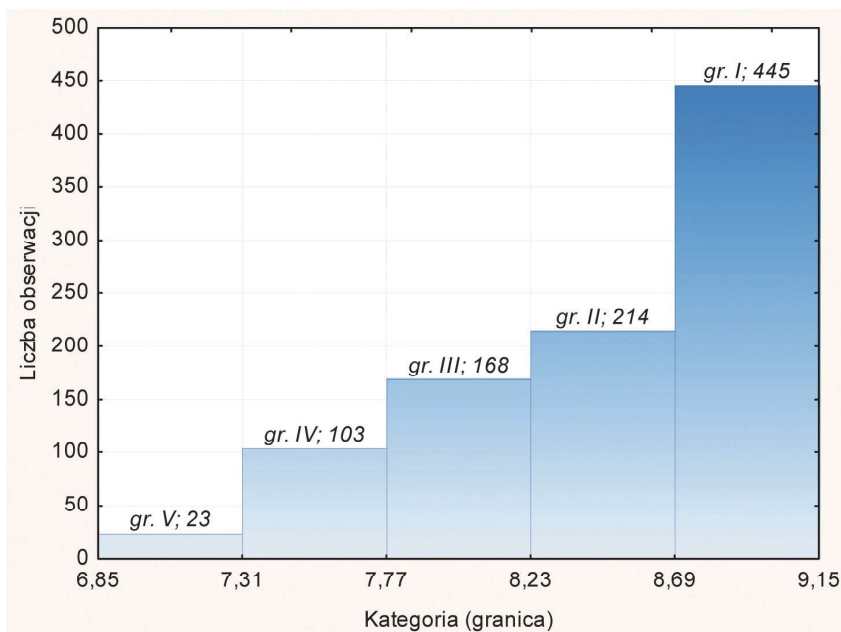


Rys. 2. Rozkład licznosci wskaźnika SMP (22°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 22°C)

Fig. 2. Distribution of the SMP index (22°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 22°C)

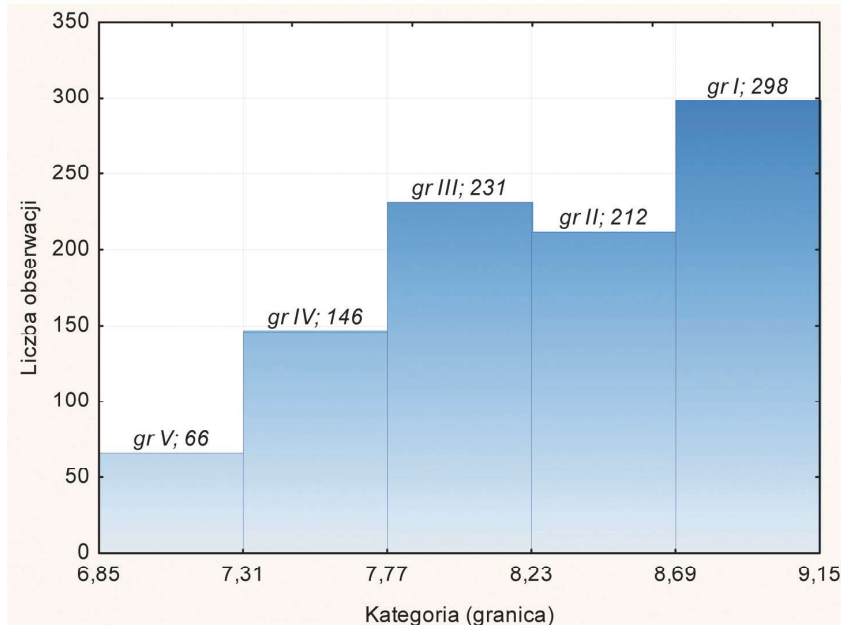
Rys. 3. Rozkład liczości wskaźnika SMP (27°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 27°C)

Fig. 3. Distribution of the SMP index (27°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 27°C)



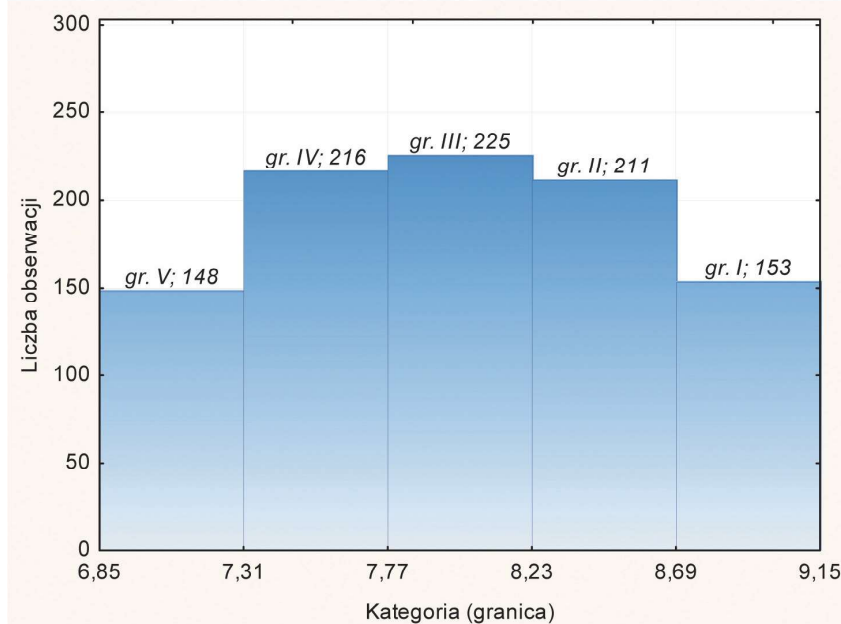
Rys. 4. Rozkład liczości wskaźnika SMP (32°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 32°C)

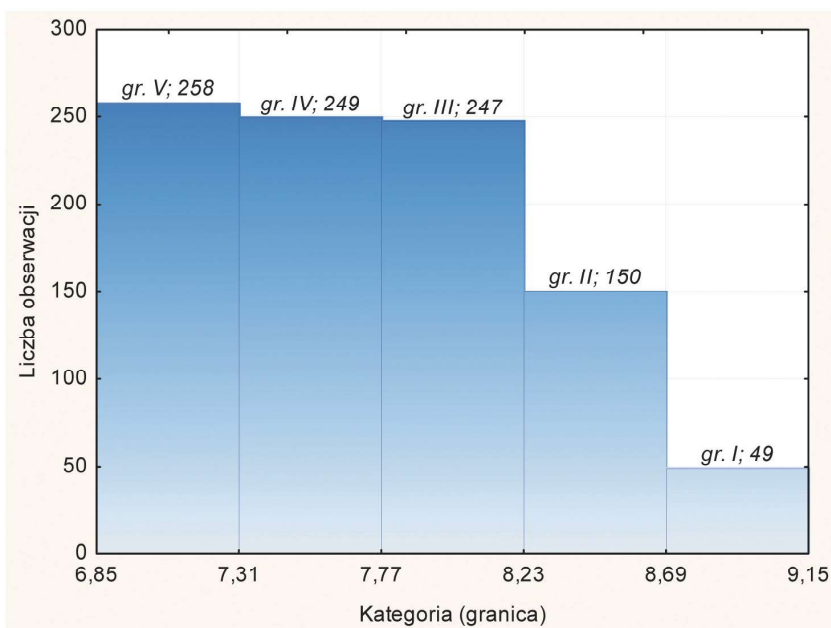
Fig. 4. Distribution of the SMP index (32°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 32°C)



Rys. 5. Rozkład liczości wskaźnika SMP(37°C) z uwzględnieniem 5-cio grupowego podziału (temperatura początkowa: 37°C)

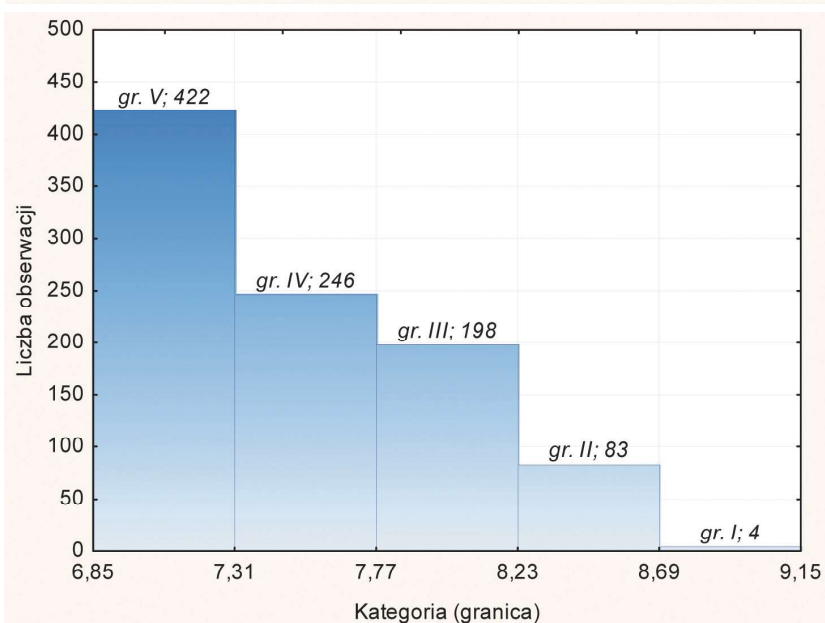
Fig. 5. Distribution of the SMP index (37°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 37°C)





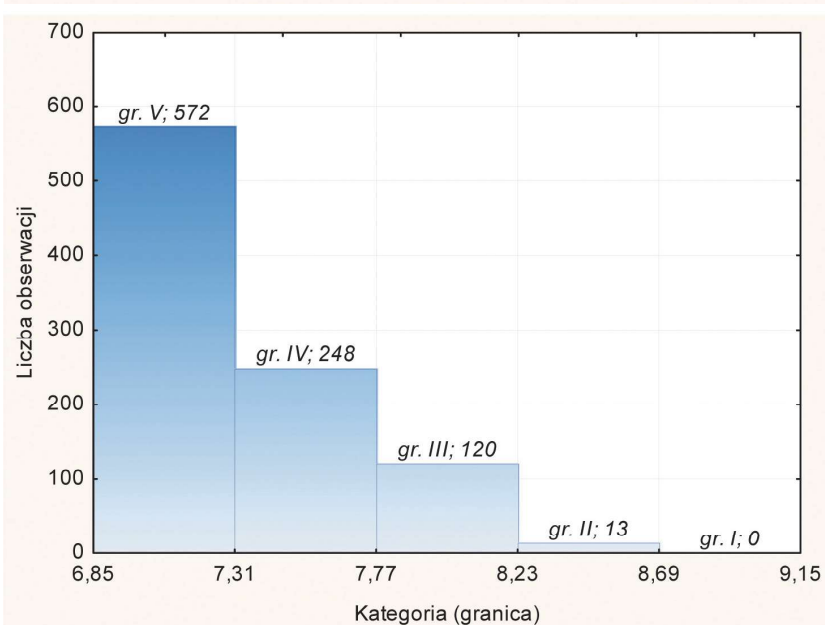
Rys. 6. Rozkład licznosci wskaźnika SMP (42°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 42°C)

Fig. 6. Distribution of the SMP index (42°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 42°C)



Rys. 7. Rozkład licznosci wskaźnika SMP (47°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 47°C)

Fig. 7. Distribution of the SMP index (47°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 47°C)



Rys. 8. Rozkład licznosci wskaźnika SMP (52°C) z uwzględnieniem 5-grupowego podziału (temperatura początkowa: 52°C)

Fig. 8. Distribution of the SMP index (52°C) taking into account 5-group division (initial temperature: 52°C)

4. Podsumowanie

Temperatura rozpoczęcia procesu samozagrzewania jest jednym z najważniejszych czynników, które decydują po jakim czasie nastąpi zapłon węgla. Najczęściej stosowane metody badania skłonności węgla do samozapalenia uwzględniają charakterystykę różnych etapów procesu samozagrzewania. Jednak nie biorą pod uwagę jak zmiana temperatury rozpoczęcia procesu samozagrzewania różnicuje skłonność węgla do samozapalenia. Dlatego wyprowadzono metodę, która obok właściwości węgla uwzględnia wpływ temperatury początkowej (rozpoczęcia procesu samozagrzewania). Wykazano przy tym, że wpływ temperatury zakończenia procesu samozagrzewania, samozapaleniem węgla, nie wpływa w istotny sposób na zróżnicowanie skłonności do samozapalenia.

Metoda oznaczania skłonności węgla do samozapalenia w warunkach zmiennej temperatury początkowej oparta została o zależność funkcyjną przyporządkowującą dwa zbiory, wskaźnik samozapalności SMP i temperaturę początkową z przedziału $T_0 = 295$ do 325°K (22 do 52°C). Jej istotnym elementem jest cała oznaczona wyprowadzona w oparciu o równanie szybkości reakcji wg Arrheniusa i określająca czas, po jakim węgiel dla danej temperatury początkowej osiągnie temperaturę zapłonu w warunkach adiabatycznych.

Wskaźnik samozapalności, który uwzględnia temperaturę początkową samozagrzewania w przedziale 295 do 325°K (22 do 52°C) oznaczono jako SMP(T) i wyrażono zależnością (8).

Wartość wskaźnika samozapalności SMP(T) zmienia się z temperaturą początkową procesu samozagrzewania, co uwzględniono przy ustalaniu klasyfikacji grupowej skłonności węgla do samozapalenia. Klasyfikację wyprowadzono w oparciu o kategoryzację rozkładu normalnego przy założeniu 5-grupowego podziału.

Podział na kategorię dla wskaźnika SMP(T) i temperatury początkowej 295 do 325°K (22 do 52°C) przedstawia się następująco:

- I grupa – bardzo mała skłonność do samozapalenia – $8,69 \leq \text{SMP}(T)$;
- II grupa – mała skłonność do samozapalenia – $8,23 \leq \text{SMP}(T) < 8,69$;
- III grupa – średnia skłonność do samozapalenia – $7,77 \leq \text{SMP}(T) < 8,23$;
- IV grupa – duża skłonność do samozapalenia – $7,81 \leq \text{SMP}(T) < 7,77$;
- V grupa – bardzo duża skłonność do samozapalenia – $\text{SMP}(T) < 7,31$.

Wykorzystując wyprowadzoną metodę klasyfikacji wg wskaźnika SMP(T) przeprowadzono analizę jak temperatura początkowa (rozpoczęcia procesu samozagrzewania) wpływa na skłonność węgla do samozapalenia badanej 953-elementowej próby węgla. Stwierdzono, że:

- przyrost temperatury początkowej o $5,6$ stopnia powoduje wzrost wartości wskaźnika klasyfikującego SMP(T) o $0,46$ dla co najmniej 1 elementu badanej próby – wartość $0,46$ odpowiada rozstępowi grupy w klasyfikacji;
- przyrost temperatury początkowej o $7,8$ stopnia powoduje wzrost wartości średniej wskaźnika SMP(T) dla wszystkich elementów próby o $0,46$ (co odpowiada rozstępowi grupy);
- natomiast przyrost temperatury początkowej konieczny do tego, aby wskaźnik SMP(T) dla każdego elementu próby podniósł się o wartość co najmniej $0,46$, wynosi $11,7$ stopnia.

Przeprowadzona analiza pokazuje, jak ważnym czynnikiem wpływającym na skłonność węgla do samozapalenia jest

temperatura początkowa (rozpoczęcia procesu samozagrzewania), która zazwyczaj jest pomijana. Istotną informacją przy ustalaniu profilaktyki pożarowej w przypadku węgla eksploatowanego w kopalniach oraz składowanego na powierzchni jest, że wzrost temperatury o $7,8$ stopnia powoduje średnio wzrost skłonności węgla do samozapalenia o jedną grupę (wg klasyfikacji wskaźnika SMP(T)). Wykazano też, że widoczne zróżnicowanie wskaźnika SMP pojawia się przy zmianie temperatury początkowej (rozpoczęcia procesu samozapalenia) o $\Delta T = 2$ stopnie. Natomiast zmiana temperatury końcowej, czyli zapłonu węgla w granicach od 543°K do 623°K (270 do 350°C) nie wpływa w sposób istotny na wynik wskaźnika SMP elementów badanej próby.

Literatura

- BANERJEE S.C. 2008 - Spontaneous Combustion of Coal and Mine Fires. Taylor and Francis.
- BEAMISH B.B., BARAKAT M.A., ST. GEORGE J.D. 2001 - Spontaneous combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions. International Journal of Coal Geology Volume 45, Issues 2–3, January 2001, Pages 217-224.
- CLEMENS A.H., MATHESON T.W., ROGERS D.E. 1991 - Low temperature oxidation studies of dried New Zealand coals. Fuel Volume 70, Issue 2, February 1991, Pages 215-221.
- HUMPHREYS D.R. 1979 - A study of the propensity of Queensland coals to spontaneous combustion. The University of Queensland.
- KNECHTEL J., GAPIŃSKI D. 2005 - Zaktualizowane mapy izolinii temperatury pierwotnej skał kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- KRAUSE E., DZIURZYŃSKI W. 2015 - Projektowanie eksploatacji pokładów węgla kamiennego w warunkach skojarzonego zagrożenia metanowo-pożarowego. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- KUCHTA J.M., ROWE V.R., BURGESS D.S. 1980 - Spontaneous combustion susceptibility of U.S. coals. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines.
- LUSZNIWICZ A., SŁABY T. 2008 - Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL. Teoria i zastosowania. Wydawnictwo C.H. Beck.
- MUZYZCZUK J., KOŁODZIEJCZYK B. 1985 - Geneza i prewencja pożarów endogenicznych w kopalniach węgla. SITG. Katowice.
- PN-90/G- 04502 Węgiel kamienny i brunatny. Metody pobierania i przygotowywania próbek do badań laboratoryjnych.
- PN-93/G- 04558 Węgiel kamienny. Oznaczenie wskaźników samozapalności.
- REN T.X., EDWARDS J.S., CLARKE D. 1999 - Adiabatic oxidation study on the propensity of pulverised coals to spontaneous combustion. Fuel Volume 78, Issue 14, November 1999, Pages 1611-1620.
- SŁOWIK S. 2006 - Nowy sposób klasyfikacji i interpretacji wyników badań skłonności węgla do samozapalenia. WUG „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 5.
- SŁOWIK S. 2008 - Klasyfikacja węgla pod kątem skłonności do samozapalenia. Prace Naukowe GIG – Górnictwo i Środowisko, nr 1.
- STRUMIŃSKI A. 1987 - Zwalczanie pożarów podziemnych w kopalniach. Wydawnictwa PAN, Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wrocław.
- TRENCZEK S. 2007 - Głębokość prowadzenia robót górniczych a zagrożenia aerologiczne. „Przeгляд Górnictwa” nr 6.
- TRENCZEK S. 2008 - Poziom potencjalnego samozagrzewania węgla w świetle badań. Archiwum górnictwa 53/2.
- WAĆLAWIK J., CYGANKIEWICZ J., BRANNY M. 2000 - Niektóre zagadnienia pożarów endogenicznych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2019

Artykuł akceptowano do druku – 7.07. 2019