



## Rozkład Maxwella

### Wstęp

Cząsteczki gazu poruszają się z różnymi przypadkowymi prędkościami. Pojedyncza, przypadkowo wybrana cząsteczka może mieć dowolną przypadkową prędkość, choć „wylosowanie” takiej czy innej prędkości nie jest jednakowo prawdopodobne. Tak więc jeżeli będziemy badać prędkości dużej liczby cząsteczek, to zauważymy pewną prawidłowość statystyczną. Stosunkowo niewiele z nich będzie miało skrajne wartości prędkości, tzn. prędkości bliskie zera jak i prędkości bardzo duże. Najwięcej cząsteczek będzie miało prędkości zbliżone do tzw. prędkości najbardziej prawdopodobnej  $v_p$  (jest ona zbliżona do średniej wartości prędkości). Krzywa przedstawiająca rozkład statystyczny prędkości cząsteczek nazywa się krzywą rozkładu Maxwella. Problematyka ta omówiona jest w §6.7 drugiego tomu e-podręcznika; warto też przypomnieć sobie zagadnienia związane z temperaturą i średnią energią kinetyczną, omówione w §6.8, poświęconym kinetycznej teorii gazu doskonałego.

**Rozkład Maxwella** jest to wzór określający jak często można w gazie doskonałym spotkać cząstkę o określonej prędkości. Przypomnijmy, że cząstki w gazie doskonałym poruszają się swobodnie i nie oddziałują ze sobą, z wyjątkiem bardzo krótkich zderzeń sprężystych, w których mogą wymieniać pęd i energię kinetyczną, ale nie zmieniają swoich stanów wewnętrznych. Cząstka w tym kontekście oznacza zarówno atomy, jak i cząsteczki. W uproszczony sposób rozkład Maxwella można interpretować jako prawdopodobieństwo znalezienia cząstki o zadanej prędkości  $v$ . Dokładniej rzecz ujmując, rozkład ten jest gęstością prawdopodobieństwa. Rozróżnienie to wynika z faktu, że wartości prędkości mogą być liczbami rzeczywistymi. Oznacza to, że operowanie prawdopodobieństwem wylosowania prędkości jest uzasadnione tylko wtedy, gdy oprócz samej prędkości podamy rozmiar przedziału (najczęściej niewielkiego), wewnątrz którego znajduje się interesująca nas prędkość. Zwróć uwagę, że w opisie wykresów 1. i 2. określono szerokość takiego przedziału na  $\pm 0,5$  m/s.

Rozkład Maxwella ma postać funkcji:

$$f(v) = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp\left( -\frac{\frac{1}{2}mv^2}{k_B T} \right) \quad (1)$$

gdzie:

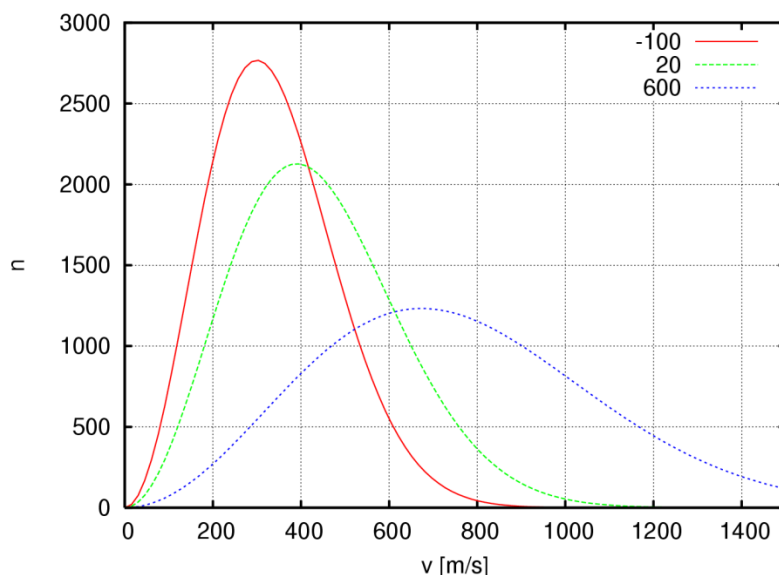
$v$  – prędkość cząstki,

$m$  – masa cząstki ( $m = M/N_A$ , gdzie  $M$  – masa molowa gazu,  $N_A$  – stała Avogadra),

$k_B$  – stała Boltzmanna ( $k_B = R/N_A$ , gdzie  $R$  – stała gazowa),

$T$  – temperatura bezwzględna,

Z funkcji podanej przez Jamesa Clerka Maxwella wynika, że większość cząsteczek będzie poruszać się z prędkością zbliżoną do pewnej wartości średniej. Ze względu na występujące we wzorze wyrażenie wykładnicze  $\exp(-x)$  z  $x$  proporcjonalnym do  $v^2$ , udział cząsteczek o bardzo dużych prędkościach jest bardzo mały, gdyż  $\exp(-x)$  jest bardzo małe, gdy  $x$  jest duże. Z drugiej strony, ze względu na to, że czynnik  $v^2$  dąży do zera, gdy  $v$  maleje, udział cząsteczek o bardzo małych prędkościach jest także znikomy. Ilustruje to wykres na rys. 1.



Rysunek 1. Rozkład Maxwella dla tlenu dla trzech temperatur ( $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$  (temperatura pokojowa) i  $600^{\circ}\text{C}$ ). Wartość funkcji odpowiada liczbie cząstek spośród 1 miliona cząstek, jaka będzie poruszać się z prędkością  $v \pm 0,5$  m/s (źródło: Wikipedia)

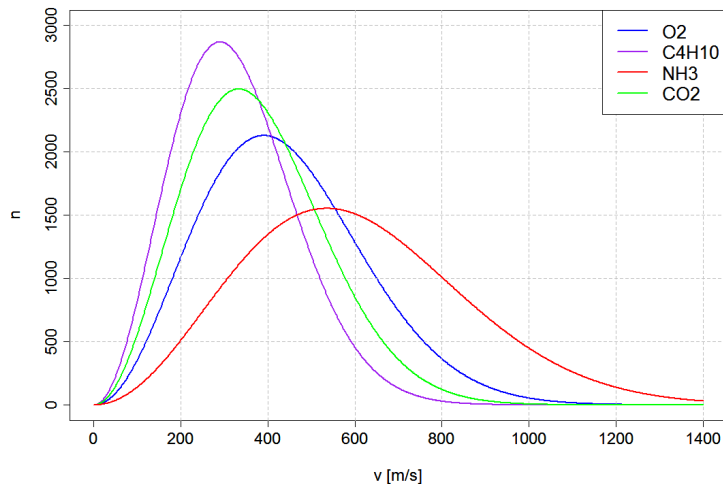
Z wykresu możemy odczytać prawdopodobieństwo znalezienia cząstki o zadanej prędkości. Przykładowo, cząstek o prędkości  $200 \pm 0,5$  m/s jest około 2200 (jest to rzędna wykresu dla temperatury  $-100^{\circ}\text{C}$ ). Skoro wszystkich cząstek jest milion, to prawdopodobieństwo znalezienia cząstki o prędkości wewnątrz takiego przedziału wynosi dwa tysiące dwieście na milion, czyli 0,22%. Dla temperatury  $20^{\circ}\text{C}$  prawdopodobieństwo to spada do ok. 0,12%, a dla  $600^{\circ}\text{C}$  wynosi już tylko ok. 0,025%.

Maksimum krzywej rozkładu Maxwella przypada dla prędkości najbardziej prawdopodobnej  $v_p$ . Wraz ze wzrostem temperatury gazu cząstki uzyskują średnio większe prędkości, maksimum krzywej przesuwa się w kierunku większych prędkości i krzywa obejmuje coraz większy zakres prędkości dużych.

Widzimy więc, że temperatura i średnia prędkość cząstek są ze sobą powiązane. Im wyższa temperatura gazu, tym jego cząstki szybciej się poruszają. Ściśle: średnia energia kinetyczna ruchu postępowego cząstek jest proporcjonalna do temperatury  $T$  gazu (w skali Kelvina). Jednak przy ustalonej temperaturze kształt rozkładu prędkości gazu zależy od masy jego cząstek. Wynika to z faktu, że energia kinetyczna zależy nie tylko od prędkości, ale także od masy. W rozkładzie Maxwella uwzględnia się energię kinetyczną cząstek – przekonuje nas o tym analiza wspomnianej wcześniej wielkości  $x$ , występującej w wykładniku wyrażenia  $\exp(-x)$ :

$$x = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{k_B T}$$

Wielkość ta jest (z dokładnością do stałego współczynnika) ilorazem energii kinetycznej cząstki do średniej energii kinetycznej termicznego ruchu wszystkich cząstek w gazie, równej  $3/2k_B \cdot T$ . Zależność kształtu rozkładu Maxwella od masy cząstki ilustrują wykresy na rys. 2.



Rysunek 2. Rozkład Maxwella dla tlenu ( $O_2$ ), butanu ( $C_4H_{10}$ ), amoniaku ( $NH_3$ ) i dwutlenku węgla ( $CO_2$ ) w temperaturze pokojowej (20 °C). Wartość funkcji odpowiada liczbie cząsteczek spośród 1 miliona cząsteczek, jaka będzie poruszać się z prędkością  $v \pm 0,5$  m/s (źródło: Wikipedia)

Z wykresu możemy odczytać stosunek prawdopodobieństw znalezienia cząstki o zadanej prędkości dla różnych gazów w tej samej temperaturze. Przykładowo, dla prędkości 200 m/s, wartość rzędnej dla tlenu wynosi ok. 2300. Dla dwutlenku węgla rzędna ma wartość ok. 1700. Oznacza to, że w temperaturze 20°C znalezienie cząsteczki tlenu o tej prędkości jest ok. 1,35 razy bardziej prawdopodobne niż cząsteczki dwutlenku węgla.

## Jak działa model rozkładu Maxwella w Excelu?

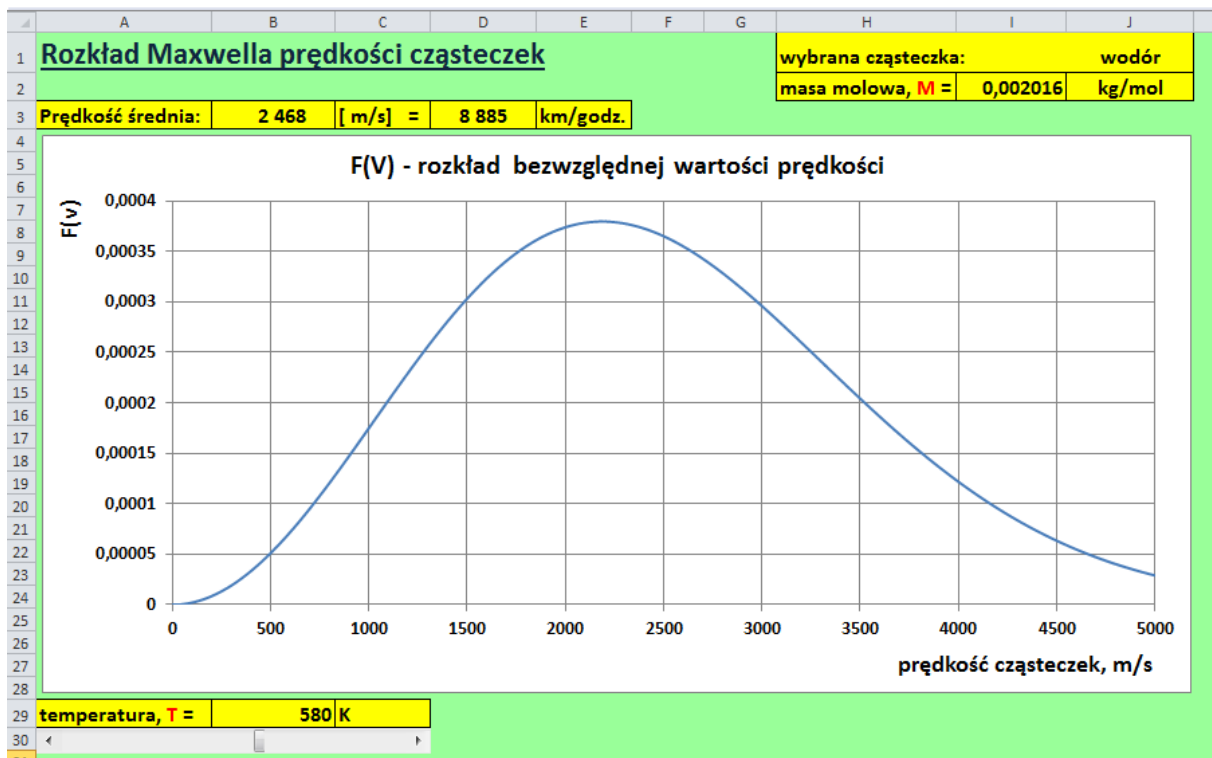
W arkuszu wykres umieszczony został wykres przedstawiający rozkład Maxwella, czyli rozkład wartości bezwzględnej prędkości cząsteczek gazu (rys. 3) oraz kilka parametrów do sterowania tym, co widzisz na wykresie.

W komórce J1 możesz wybrać z listy gaz, w komórce I2 wyświetlana jest  $M$  – masa molowa wybranego gazu wyrażona w kg/mol.

Poniżej wykresu, w wierszu 30., możesz za pomocą paska przewijania zmieniać wartość temperatury gazu. Bieżąca wartość temperatury wyświetla się w komórce B29.

W komórce B3 – wyświetla się średnia prędkość cząsteczek, wyrażona w m/s.

W komórce D3 wartość prędkości przeliczana jest na bardziej przemawiające do naszej wyobraźni km/h.



Rysunek 3. Rozkład Maxwella – model w Excelu

Zmieniaj rodzaj gazu w komórce J1 oraz temperaturę paskiem przewijania znajdującym się poniżej wykresu i obserwuj, jak zmienia się obraz na wykresie.

#### Zadanie 1.

Wybierz dowolny gaz i nastaw wybraną przez siebie temperaturę tego gazu. Odczytaj z wykresu przybliżoną wartość prędkości najbardziej prawdopodobnej  $v_m$ . Następnie odczytaj dwie prędkości  $v_1$  i  $v_2$ , dla których prawdopodobieństwo znalezienia cząstki jest dwa razy mniejsze niż dla  $v_m$ . Rozstrzygnij, czy  $v_m$  jest średnią arytmetyczną  $v_1$  i  $v_2$ . Jaka cecha wykresu pozwala przewidzieć odpowiedź na to pytanie?

#### Zadanie 2.

Wiadomo, że prędkość ucieczki ciała z powierzchni Ziemi wynosi ok. 11 km/s. Czy w atmosferze ziemskiej obecne są cząstki o takich prędkościach? Wykorzystaj rozkład Maxwella i oszacuj prawdopodobieństwo, że w powietrzu atmosferycznym trafi się pojedyncza cząstka, która będzie mogła ulecieć w kosmos.

a) Zaczynaj od dokonania niezbędnych modyfikacji w przygotowanym pliku (zapoznaj się najpierw z częścią „Wykonanie” niniejszej instrukcji):

- w arkuszu *obliczenia* poszerz zakres prędkości, dla których obliczana jest wartość funkcji  $F(v)$ , tak by kończył się on w okolicach 11 km/s;

- w arkuszu *wykres* dostosuj zakres danych wykresu oraz jego skalę.

b) Przeprowadź swoje oszacowanie dla warunków typowo panujących na poziomie morza oraz na wysokości 100 km n.p.m. Porównaj rzędną  $F(v)$  dla prędkości rzędu 11 km/s z rzędną dla prędkości najbardziej prawdopodobnej. Może tak być, że będziesz musiał tę pierwszą wartość odczytać z arkusza *obliczenia*.

c) Rozstrzygnij, czy spośród mola cząsteczek powietrza (przypomnij sobie liczebność jednego mola) choć jedna ma szansę mieć prędkość rzędu 11 km/s.

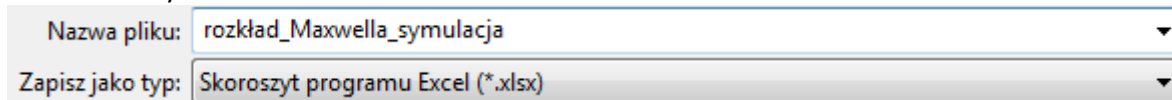
d) Przeprowadź podobne oszacowanie dla Marsa (wyszukaj w tablicach astronomicznych niezbędne dane dla oszacowania prędkości ucieczki z jego powierzchni oraz informacje o panujących tam temperaturach).

e) Rozstrzygnij, czy te dwa oszacowania uzasadniają fakt, iż atmosfera na Marsie jest znacznie bardziej rozrzedzona niż na Ziemi.

f) Jeśli zagadnienie to Cię zainteresuje, to przeprowadź podobne oszacowania dla Merkurego, Wenus i Księżyca. Poszukaj także informacji na temat innych czynników, determinujących wraz z grawitacją i temperaturą gęstość atmosfery planety typu ziemskiego.

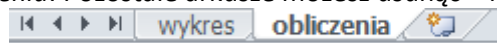
## Wykonanie

Do wykonania wykresu przedstawiającego rozkład Maxwella potrzebny będzie pusty plik Excela. Zapisz go na dysku swojego komputera pod nazwą *Rozkład\_Maxwella\_symulacja.xlsx* ze standardowym rozszerzeniem .xlsx.



Rysunek 4. W polu *Zapisz jako typ* wybierz „Skoroszyt programu Excel”

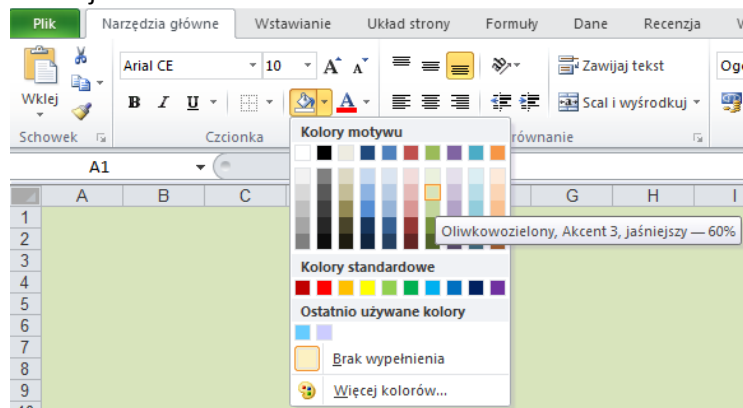
W pliku *Rozkład\_Maxwella\_symulacja.xlsx* zmień nazwę pierwszego arkusza na *wykres*, drugiemu nadaj nazwę *obliczenia*. Pozostałe arkusze możesz usunąć – nie będą nam potrzebne.



Rysunek 5. Nazwy arkuszy w pliku *Rozkład\_Maxwella\_symulacja*

Tworzenie symulacji ruchu cząstki rozpoczniemy od przygotowania danych w arkuszu *wykres*. Wykonaj w nim następujące czynności:

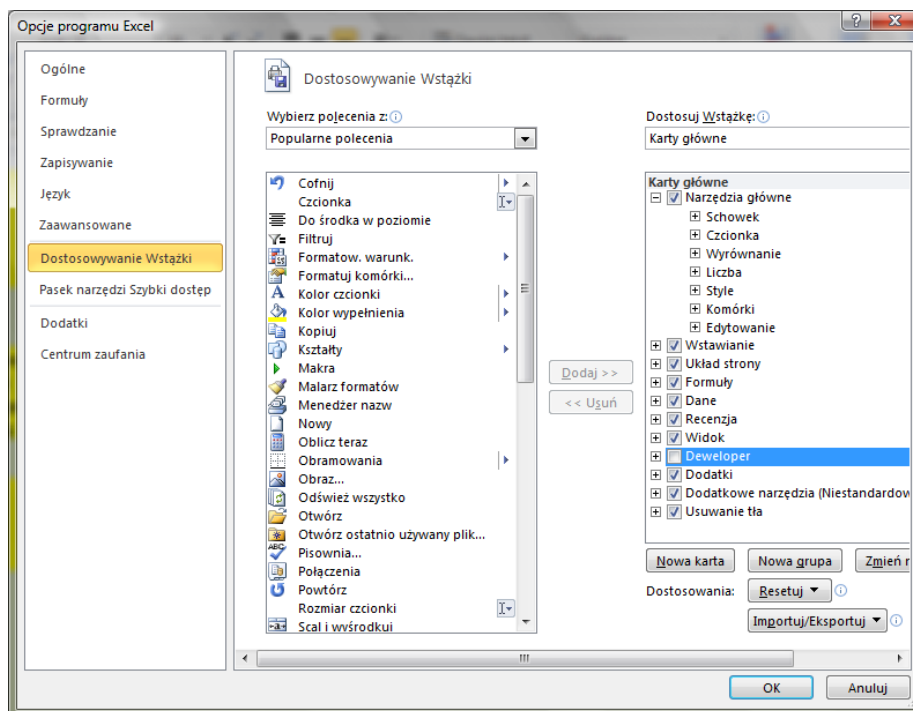
1. Zaznacz cały arkusz (na przykład używając kombinacji klawiszy Ctrl+A) i za pomocą ikony *Kolor wypełnienia* znajdującego się na wstążce na karcie *Narzędzia główne*, w grupie *Czcionka*, zmień kolor tła komórek na dowolny, ale jasny!, odcień koloru niebieskiego, fioletowego lub zielonego (rys. 6) – wybierz ten, który lubisz najbardziej.



Rysunek 6. Zmiana tła komórek w arkuszu *wykres*

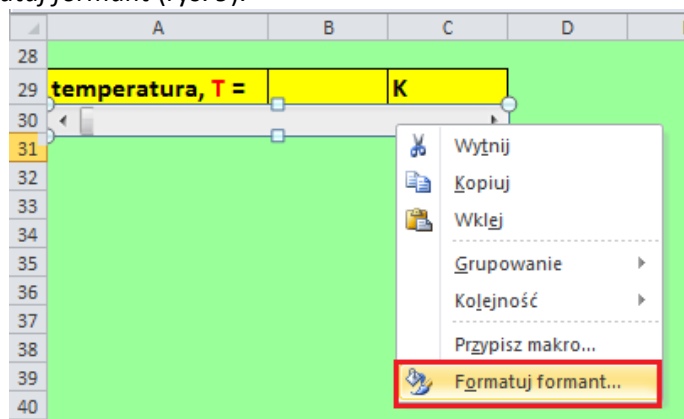
2. Do komórki A1 w arkuszu *wykres* wpisz tekst „Rozkład Maxwella prędkości cząsteczek”. Za pomocą narzędzi dostępnych na wstążce na karcie *Narzędzia główne* w grupie *Czcionka* zmień wielkość czcionki na 20 pkt, kolor na granatowy, włącz pogrubienie i podkreślenie.
3. Spójrz na rysunek 3 zaprezentowany powyżej. Chcemy przygotować identycznie wyglądający arkusz. Na początek zajmiemy się wprowadzeniem etykiet (opisów, jednostek). Do komórki A3 wpisz tekst „Prędkość średnia:”, do komórki C3 „[m/s]”, E3 „km/h”, H1 „Wybrana cząsteczka:”, H2 „masa molowa, M=”, J2 „kg/mol”, A29 „temperatura, T=”, C29 „K”. W etykiecie wpisanej do komórki H2 zaznacz (w pasku formuły) literkę „M” i zmień jej kolor na czerwony. To samo zrób z literką „T” w komórce A29. W komórkach z zakresu A3:E3, H1:J2, A29:C29 zmień wielkość





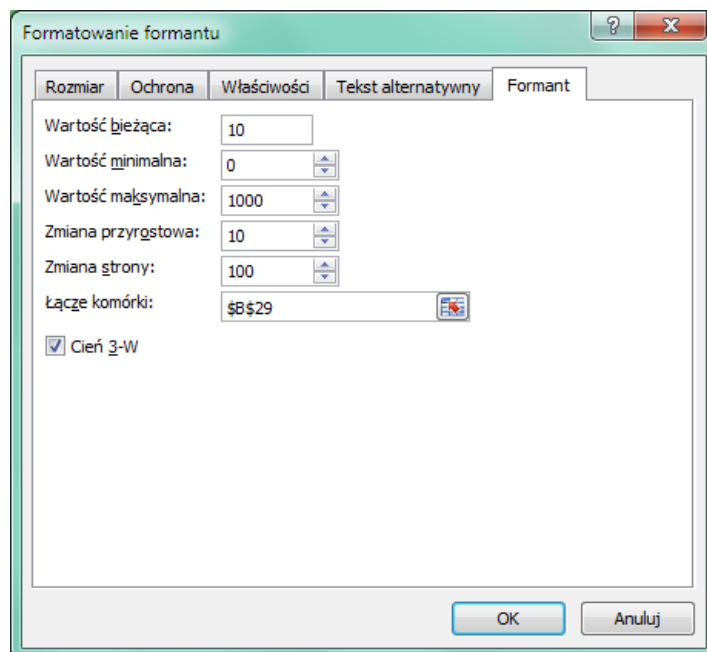
Rysunek 9. Włączanie karty Deweloper

6. Kliknij prawym klawiszem myszki na pasku przewijania i z menu podręcznego wybierz *Formatuj formant* (rys. 9).



Rysunek 10. Wybór właściwości paska przewijania z komórek D23:G23

7. W oknie *Formatowanie formantu* na karcie *Formant* wprowadź wartości w polach: *Wartość maksymalna* (wartość maksymalna, jaką można będzie wybrać), *Wartość minimalna* (wartość minimalna), *Zmiana przyrostowa* (zmiana wartości po kliknięciu na strzałkę), *Zmiana strony* (zmiana wartości po kliknięciu w polu paska), *Łącze komórki* (tzn. komórka połączona, czyli taka, w której będzie się wyświetlała wartość wybrana na pasku – u nas będzie to komórka B29) – jak na rys. 11.



Rysunek 11. Ustawienia kluczowych wartości w oknie właściwości paska przewijania z komórek A30:C30

8. Odkliknij zaznaczenie paska (kliknij w dowolnym miejscu arkusza) i sprawdź, czy działa (powinny zmieniać się wartości w komórce B29).
9. Przygotujemy teraz do pracy arkusz *obliczenia*. Do komórki B1 arkusza *obliczenia* wpisz tekst „Obliczenia do rozkładu Maxwella”. Zmień wielkość czcionki na 14 pkt, kolor tekstu na ciemny granat, włącz podkreślenie.
10. Do komórki B3 wpisz „v [m/s]”, do komórki B4 „F”. Do komórki E3 wpisz „F= rozkład wartości bezwzględnej predkości cząsteczek”, E5 „R =”, E6 „pi =”, F5 „8,31447”, F6 „3,1415927”, G5 „J/(mol\*K)”. Zaznacz zakresy B3:C3 oraz E5:G6 włącz pogrubienie, zmień kolor tła na szary, włącz obramowanie.
11. Do komórki B4 wpisz liczbę „0”, do B5 „5”, a następnie zaznacz obie komórki, najedź na mały kwadracik w prawym dolnym rogu zaznaczonego obszaru, żeby uzyskać mały czarny krzyżyk (jak na rys. 12) i przeciągnij w dół, wypełniając liczbami komórki aż do B1004 (ostatnią uzyskaną wartością będzie 5000).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		<b><u>Obliczenia do rozkładu Maxwella</u></b>							
2									
3		v [m/s]	F			F= rozkład wartości bezwzględnej predkości cząsteczek			
4		0							
5		5			R=	8,31447	J/(mol*K)		
6					pi=	3,1415927			
7									
8									

Rysunek 12. Wypełnienie liczbami komórek w kolumnie B

12. Do komórek F8:G13 oraz F15:G19 wprowadź dane przedstawione na rys. 13. Sformatuj tabelki.



	E	F	G	H
7				
8		gaz	M, kg/mol	
9		wodór	0,002016	
10		hel	0,004003	
11		azot	0,028014	
12		tlen	0,031999	
13		powietrze	0,028964	
14				
15		Temperatura bezwzgl.	T, K	
16		wrzenie helu	4,22	
17		topnienie lodu	273,15	
18		wrzenie wody	373,15	
19		topnienie Pb	600,65	
20				

Rysunek 13. Dane do przepisania w arkuszu *obliczenia*

13. Po wykonaniu w arkuszu *obliczenia* wszystkich czynności opisanych powyżej, powinien on wyglądać jak na rys. 14.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		Obliczenia do rozkładu Maxwella						
2								
3		v [m/s]	F			F= rozkład wartości bezwzględnej predkości cząsteczek		
4		0						
5		5			R=	8,31447	J/(mol*K)	
6		10			pi=	3,1415927		
7		15						
8		20				gaz	M, kg/mol	
9		25				wodór	0,002016	
10		30				hel	0,004003	
11		35				azot	0,028014	
12		40				tlen	0,031999	
13		45				powietrze	0,028964	
14		50						
15		55				Temperatura bezwzgl.	T, K	
16		60				wrzenie helu	4,22	
17		65				topnienie lodu	273,15	
18		70				wrzenie wody	373,15	
19		75				topnienie Pb	600,65	
20		80						
21		85						

Rysunek 14. Wygląd arkusza *obliczenia*

14. Kolejnym krokiem tworzenia symulacji powinno być wprowadzenie formuł do arkusza. Najpierw jednak, dla wygody, niektórym komórkom nadamy *nazwy*.

**Uwaga:** Odwołanie do komórki za pomocą nadanej jej własnoręcznie *nazwy* jest alternatywą do odwołania się do niej za pomocą adresu. Będziesz mieć wybór – możesz w formułach odwoływać się do komórki za pomocą jej adresu lub za pomocą *nazwy*.

15. Na początek, w arkuszu *obliczenia* komórce F5 nadamy nazwę „\_R”.

Uaktywnij komórkę F5 (kliknij na niej). Zwróć uwagę, że adres aktywnej komórki pojawił się w tzw. *Polu nazwy* (pole otoczone czerwoną obwódką na rysunku 15). Kliknij w *Polu nazwy* i wpisz nazwę, którą chcesz nadać komórce, na przykład „\_R”. Na koniec naciśnij **Enter**. Teraz, po uaktywnieniu komórki F5 w *Polu nazwy* będzie wyświetlać się jej nazwa, a nie adres.

BIBLIOTEKA FUNKCJI					nazwy zdefiniowane			
_R		fx		8,31447				
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>Obliczenia do rozkładu Maxwella</b>							
2								
3		<b>v [m/s]</b>	<b>F</b>			F= rozkład wartości bezwzględnej predkości cząsteczek		
4		0						
5		5			R=	8,31447	J/(mol*K)	
6		10			pi=	3,1415927		
7		15						
8		20				gaz	M, kg/mol	
9		25				wodór	0,002016	

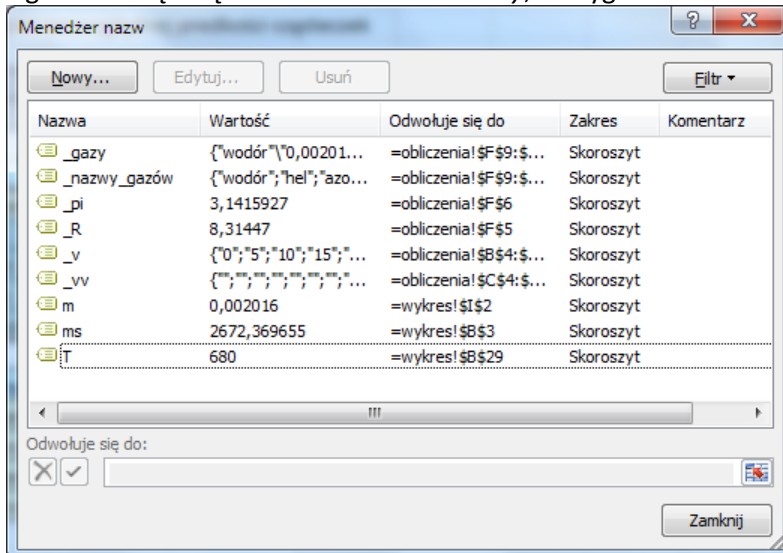
Rysunek 15. Lokalizacja Pola nazwy, za pomocą którego nadajemy nazwy komórkom

16. Zaznacz komórkę F6 i postępując w sposób opisany w poprzednim punkcie, nadaj jej nazwę „\_pi”.

**Uwaga:** Jeśli w przyszłości zechcesz nadać komórce nazwę wieloczną, nie używaj spacji! Zamiast niej możesz użyć znaku podkreślenia, np. *kąt\_alfa*, lub wpisać nazwę w taki sposób: *KątAlfa* – bez odstępów, ale zachowując czytelność nazwy.

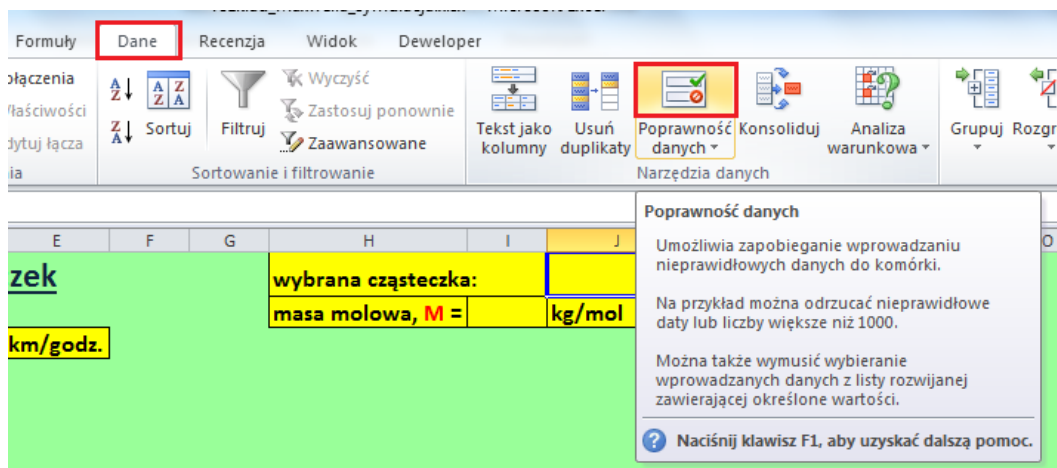
17. W podobny sposób nadaj nazwy pozostałym komórkom; i tak: zaznacz zakres F9:F13 i nazwij go „\_nazwy\_gazów”, F9:G13 „\_gazy”, B4:B1004 „\_v”, C4:C1004 (zakres jest na razie pusty) „\_vv”. Dodatkowo nadamy nazwy komórkom w arkuszu wykres B3 nazwij „ms”, I2 „m”, B29 „T”.

**Uwaga:** Jeśli pomylił się, definiując nazwy, na wstążce na karcie *Formuły* w grupie *Nazwy zdefiniowane* znajdziesz ikonę *Menedżer nazw*. Otwiera ona okno z listą wszystkich nazw zdefiniowanych w bieżącym skoroszytku. Możesz w nim – „w razie czego” – usunąć błędnie zdefiniowane nazwy, skorygować ich odwołanie itp.



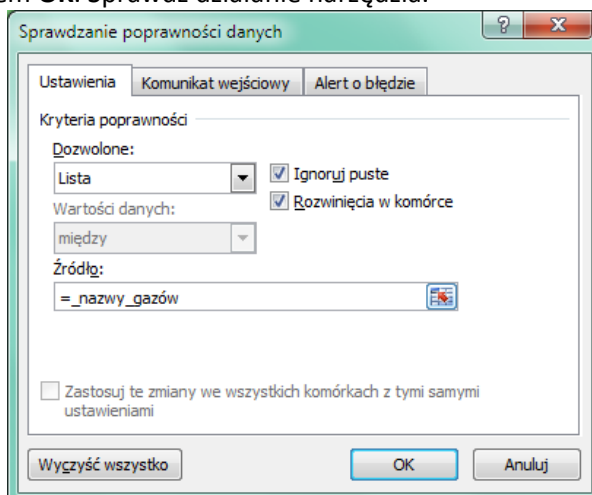
Rysunek 16. Okno Menedżera nazw z listą zdefiniowanych nazw, ich bieżące wartości, odwołania do komórek itp.

18. W komórce J1 arkusza wykres utworzymy teraz możliwość wybrania z listy nazwy gazu. Przejdź na arkusz wykres. Zaznacz komórkę J1. Przejdź na kartę Dane, tam, w grupie *Narzędzia danych* kliknij na ikonkę *Sprawdzanie poprawności* (rys. 17).



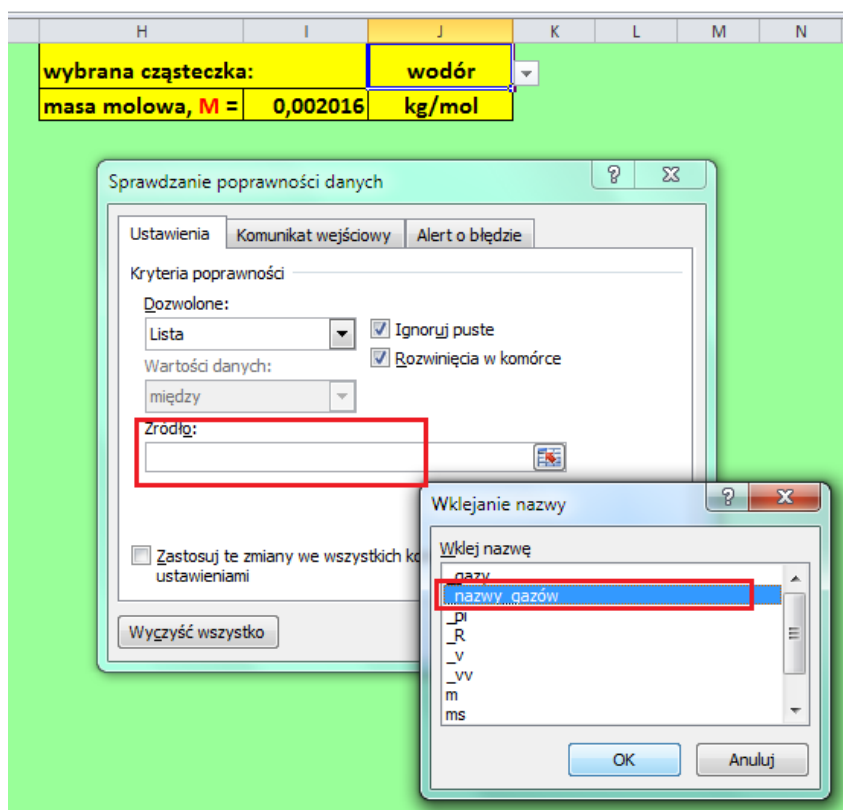
Rysunek 17. Lokalizacja ikony *Sprawdzanie poprawności*

19. W oknie *Sprawdzanie poprawności danych* wprowadź parametry jak na rys. 18: *Dozwolone* – wybierz *Lista*, *Źródło* – wpisz „=\_nazwy\_gazów” lub użyj klawisza F3 (szczegóły użycia tego klawisza przedstawiamy w następnym punkcie), aby za jego pomocą wstawić odwołanie do obszaru komórek z arkusza *obliczenia* zawierającego nazwy gazów. Reszta parametrów nie jest dla nas istotna. Zatwierdź ustawienia przyciskiem **OK**. Sprawdź działanie narzędzia.




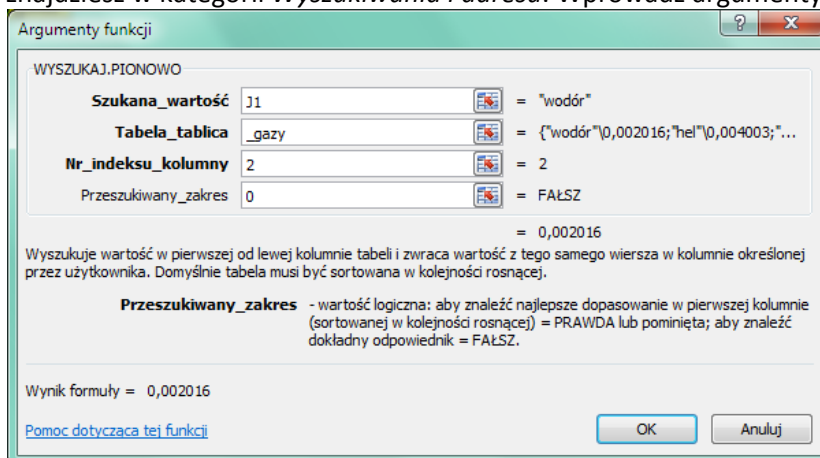
Rysunek 18. Parametry w oknie *Sprawdzanie poprawności danych*

20. **Uwaga:** Tworząc formułę, możesz adresy komórek (lub *nazwy*) wpisywać ręcznie lub klikać na odpowiednich komórkach – wówczas ich adresy (*nazwy*) w formule pojawią się automatycznie. W przypadku *nazw* możesz alternatywnie skorzystać z okna *Wklejanie nazwy*, które zawiera spis wszystkich *nazw* występujących w skoroszycie. Okno *Wklejanie nazwy* wywołasz, naciskając klawisz funkcyjny **F3**.




Rysunek 19. Tworzenie formuły z użyciem okna *Wklejanie nazwy*

21. Najwyższa pora zająć się obliczeniami! Na początek wprowadź do komórki I2 formułę, której zadaniem będzie przypisywanie odpowiedniej masy do wybranego gazu. Zastosujemy do tego celu funkcję WYSZUKAJ.PIONOWO(). Kliknij na przycisku  (znajduje się po lewej stronie *Paska Formuły*). Funkcję WYSZUKAJ.PIONOWO() znajdziesz w kategorii *Wyszukiwania i adresu*. Wprowadź argumenty jak na rys. 20.



Rysunek 20. Formuła w komórce I2 (okno funkcji WYSZUKAJ.PIONOWO)

22. Spójrz na swój *Pasek formuły* i sprawdź, czy formuła, którą wpisałeś, jest prawidłowa (rys. 21). Jeśli tak, zatwierdź formułę. Wybieraj gazy z listy i zobacz, czy prawidłowo przypisują się wartości mas.

 =WYSZUKAJ.PIONOWO(J1;\_gazy;2;0)

Rysunek 21. Formuła w komórce I2 w *Pasku formuły*

23. Do komórki B3 wpisz formułę, która obliczy prędkość średnią cząsteczek wybranego gazu przy zadanej temperaturze (rys. 22). PIERWIASTEK() jest nazwą funkcji

z kategorii *Matematyczne*, obliczając pierwiastek kwadratowy z danego argumentu:

$$f_x = \text{=PIERWIASTEK}(8*_R*T/(_pi*m))$$

Rysunek 22. Formuła w komórce B3

24. Do komórki D3 wpisz formułę, która przeliczy prędkość wyrażoną w m/s na km/h:

$$f_x = \text{=m}*3,6$$

Rysunek 23. Formuła w komórce D3

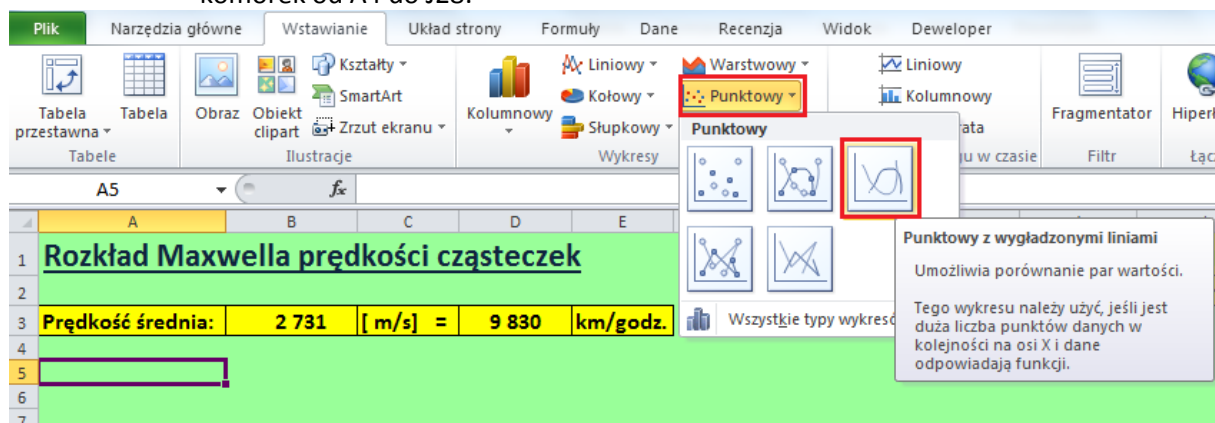
25. Przejdź na arkusz obliczenia, do komórki C4 wprowadź formułę, która będzie obliczała wartości rozkładu wartości bezwzględnej prędkości cząsteczek (rys. 24). ^ oznacza podnoszenie do potęgi, EXP() – funkcję eksponencjalną. Formułę z komórki C4 skopiuj w dół, aż do komórki C1004.

$$f_x = \text{=(m/(2*_pi*_R*T))}^{(3/2)}*\text{EXP}(-m*_v^2/(2*_R*T))*4*_pi*_v^2$$

Rysunek 24. Formuła w komórce C4 w arkuszu obliczenia

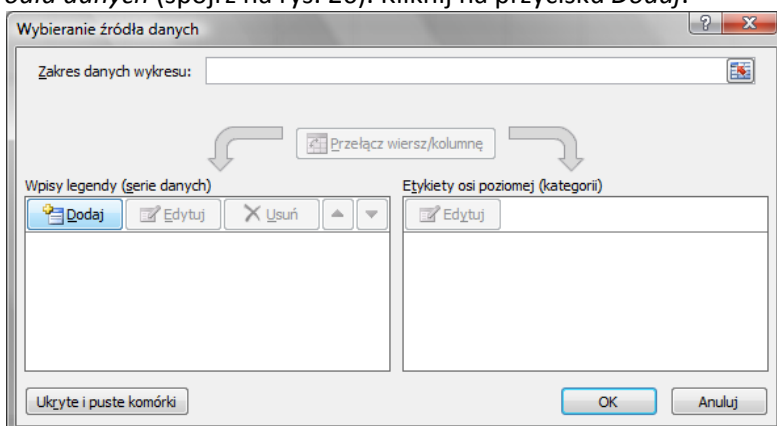
26. Mając wykonane wszystkie obliczenia, zajmijmy się przygotowaniem wykresu. Zaznacz dowolną pustą komórkę A1 arkusza wykres.

27. Przejdź na kartę *Wstawianie*. W grupie *Wykresy* wybierz typ *Punktowy*, a następnie podtyp *Punktowy z wygładzonymi liniami* (rys. 25). W arkuszu powinien pojawić się obszar wykresu, na razie pusty. Przesuń go i powiększ tak, aby zajmował zakres komórek od A4 do J28.



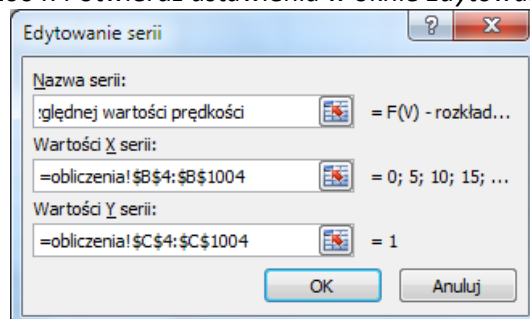
Rysunek 25. Wybór wykresu, typ *Punktowy*

28. Zwróć uwagę, czy obszar wykresu jest aktywny. Jeśli tak, przejdź na kartę *Projektowanie* (znajdującą się na końcu wstążki, w grupie *Narzędzia wykresów*) i z grupy poleceń *Dane* wybierz *Zaznacz dane*. Na ekranie pojawi się okno *Wybieranie źródła danych* (spójrz na rys. 26). Kliknij na przycisku *Dodaj*.



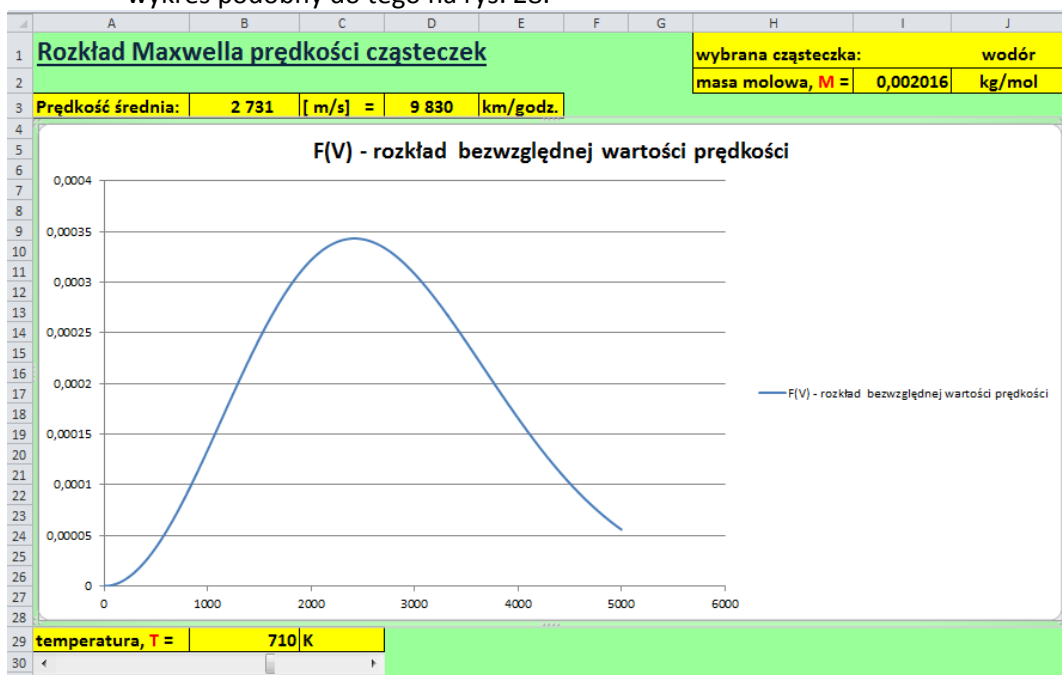
Rysunek 26. Dodawanie serii danych do wykresu

29. W oknie *Edytowanie serii* (rys. 27) w pole *Nazwa serii* wpisz „F(V) – rozkład bezwzględnej wartości prędkości”. Ustaw kursor w polu *Wartości X serii*, przejdź na arkusz *obliczenia* i zaznacz zakres komórek od B4 do B1004. Następnie przestaw kursor do pola *Wartości Y serii*, przejdź na arkusz *obliczenia* i zaznacz zakres komórek od C4 do C1004. Potwierdź ustawienia w oknie *Edytowanie serii*, naciskając **OK**.



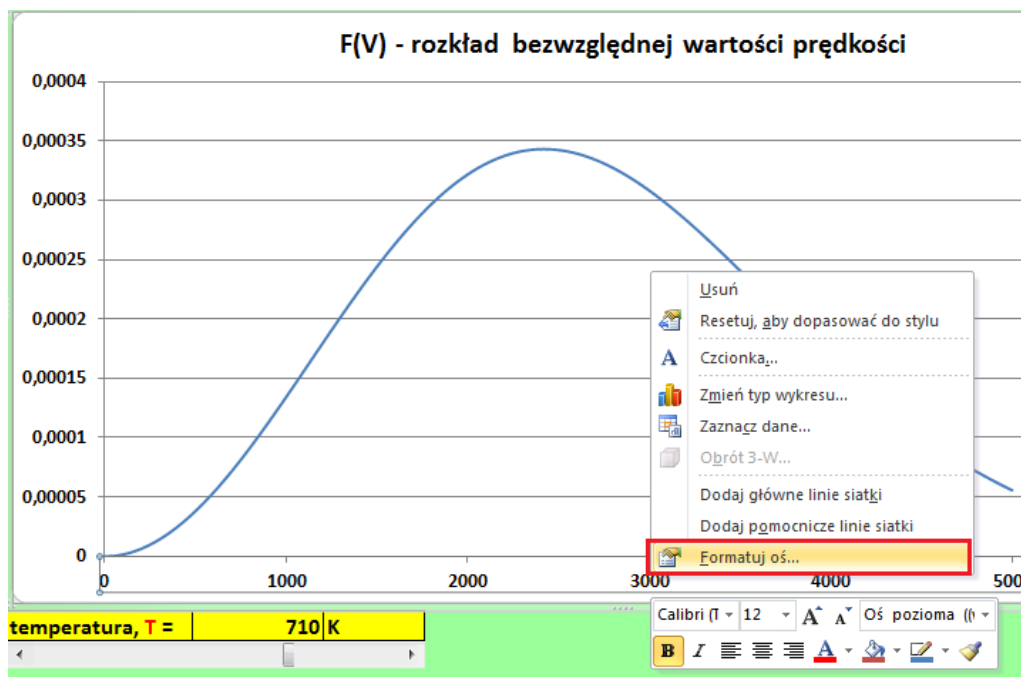
Rysunek 27. Definiowanie serii danych

30. Po zatwierdzeniu wpisów w oknie *Wybieranie serii danych* powinien pojawić się wykres podobny do tego na rys. 28.



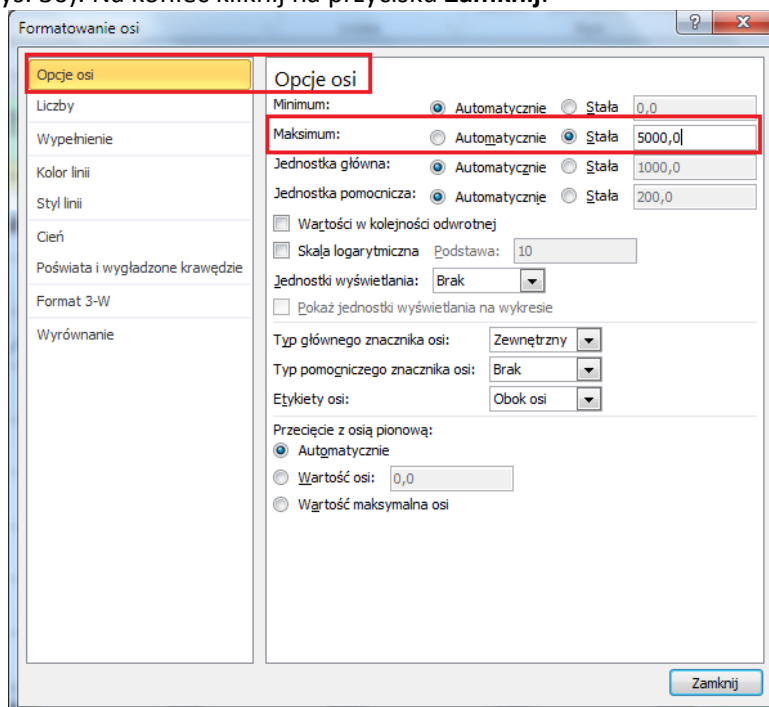
Rysunek 28. Wygląd arkusza wykres z wykresem

31. Przejdź na kartę *Układ* (znajdującą się w grupie *Narzędzia wykresów* na końcu wstążki; grupa narzędzi wykresów będzie widoczna pod warunkiem, że będzie aktywny wykres) i w sekcji *Etykiety* wybierz ikonę *Legenda*, a następnie, z wewnętrznej listy, *Brak*. W ten sposób wyłączymy wyświetlanie legendy na wykresie. Nie jest nam ona potrzebna, bowiem nie niesie żadnej istotnej informacji.
32. Kliknij na jednej z wartości osi pionowej (powinna zaznaczyć się cała oś). Przejdź na kartę *Narzędzia główne* i w grupie *Czcionka* włącz pogrubienie (ikona z literą **B**). Możesz również zmienić rozmiar czcionki na większy (np. 12), żeby opisy osi były bardziej czytelne. Takie same czynności wykonaj dla wartości na osi poziomej.
33. Kliknij jeszcze raz na jednej z wartości osi poziomej, ale tym razem prawym klawiszem myszki, i z menu podręcznego wybierz *Formatuj oś* (rys. 29).



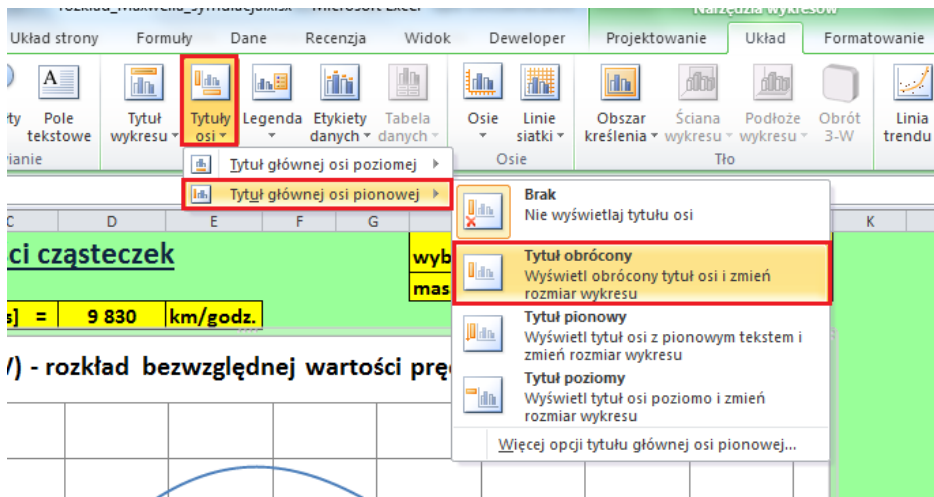
Rysunek 29. Menu podręczne osi poziomej

34. Po lewej stronie okna *Formatowanie osi* wybierz kartę *Opcje osi*. Na karcie *Opcje osi*, w prawej części okna, ustaw kategorię *Maksimum*, nadając jej stałą wartość 5000 (rys. 30). Na koniec kliknij na przycisku **Zamknij**.



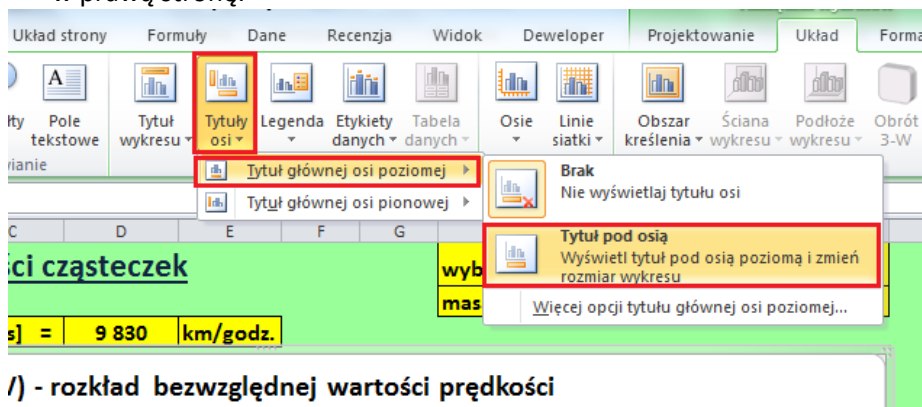
Rysunek 30. Opcje wyświetlania liczb na osi poziomej

35. Kliknij prawym klawiszem myszki na jednej z wartości osi poziomej i z menu podręcznego wybierz *Dodaj główne linie siatki*.
36. Przejdź na kartę *Układ* i w sekcji *Etykiety* wybierz *Tytuły osi*, a następnie *Tytuł głównej osi pionowej* i z wewnętrznej listy *Tytuł obrócony* (rys. 31). Wpisz tekst „F(v)” i naciśnij **Enter**. Powiększ czcionkę do rozmiaru 16 pt. Włącz pogrubienie. Przeciągnij pole z tytułem do górnej części osi.



Rysunek 31. Dodanie tytułu osi pionowej

37. Ponownie wybierz polecenie *Tytuły osi*, a następnie *Tytuł głównej osi poziomej* i – z wewnętrznej listy – *Tytuł pod osią* (rys. 32). Wpisz tekst „prędkość cząsteczek, m/s” i naciśnij **Enter**. Sformatuj tak samo, jak tytuł osi pionowej. Przeciągnij tytuł w prawą stronę.



Rysunek 32. Dodanie tytułu osi poziomej

----- KONIEC -----