

## Pomiar prędkości i natężenia przepływu termoanemometrem

# 1 Oznaczenia

- $e$  - proste sondowania, równoległe do krótszego boku kanału o przekroju prostokątnym, -
- $f$  - proste sondowania, równoległe do dłuższego boku kanału o przekroju prostokątnym, -
- $d$  - średnica, m
- $I$  - natężenie prądu elektrycznego, A
- $r$  - promień, na którym znajduje się punkt pomiarowy, m
- $R$  - promień kanału wentylacyjnego, m
- Re - liczba Reynoldsa, -
- $\Delta t$  - różnica temperatury pomiędzy czujnikiem termoanemometru, a omijającym go płynem, °C
- $U$  - napięcie elektryczne, V
- $w_{\text{śr}}$  - średnia prędkość,  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $w_{\text{max}}$  - prędkość maksymalna (w osi kanału),  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $\nu$  - współczynnik lepkości kinematycznej,  $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą pomiaru prędkości oraz strumienia przepływu powietrza przy pomocy termoanemometru. Określenie rozkładu prędkości w kanale okrągłym.

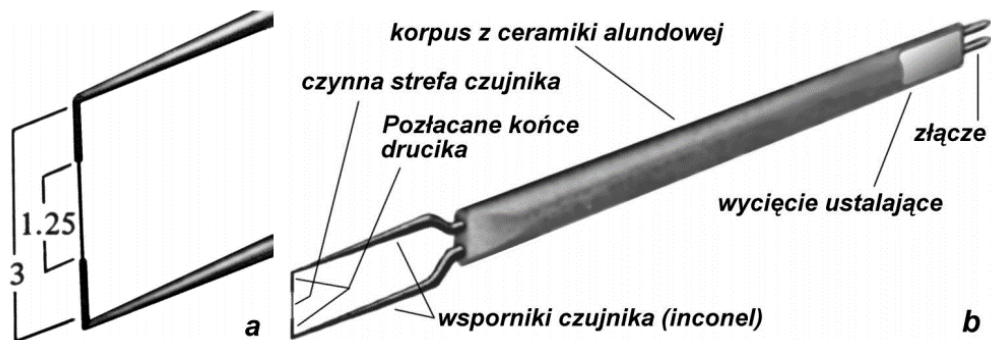
## 2. Wprowadzenie teoretyczne

### 2.1. Termoanemometry

**Termoanemometr** jest przyrządem pomiarowym, służącym do pomiaru prędkości przepływu powietrza. Zasada działania termoanemometru oparta jest na konwekcyjnej wymianie ciepła pomiędzy sondą nagrzewaną energią elektryczną, a omywającym ją gazem. Przepływ strumienia ciepła uzależniony jest od szeregu czynników: prędkości przepływającego medium, różnicy temperatury pomiędzy ośrodkami, konstrukcji czujnika oraz właściwości fizycznych i składu chemicznego gazu [1].

Podstawnym elementem termoanemometru jest czujnik wykonany z drutu oporowego. Materiał na czujnik termoanemometru powinien charakteryzować się przede wszystkim dużą zmiennością oporu elektrycznego wraz ze zmianą temperatury (np.: wolfram, platyna, nikiel). Średnica włókna wynosi  $1 \div 100 \mu\text{m}$ , a jego długość waha się w zakresie  $0,2 \div 20 \text{ mm}$ . Drut osadzony jest na dwóch wspornikach. Wymiary czujnika mają duże znaczenie przy wykonywaniu pomiarów, ponieważ zmniejszenie średnicy drucika zmniejsza pojemność cieplną elementu, a to prowadzi do zwiększenia szybkości działania miernika. Dynamika zmian wskazań przyrządu uzależniona jest także od stopnia rozgrzania włókna. Im większa różnica temperatury pomiędzy medium a czujnikiem tym krótszy czas odpowiedzi układu na zmianę mierzonej prędkości. Zwiększanie różnicy temperatury  $\Delta t$  nie może być jednak prowadzone bezkrytycznie, ponieważ ubocznym następstwem takiego działania jest uformowanie się strugi konwekcyjnej własnej nad czujnikiem. Zjawisko to szczególnie negatywnie uwidacznia się podczas pomiarów małych prędkości, co prowadzi do znacznego zafałszowania uzyskanych wyników pomiarów [1].

Na rys. 1 pokazano czujnik drucikowej sondy termoanemometrycznej. Całkowita długość drucika wynosi 3 mm, a jego czynny odcinek ma długość 1,25 mm. Średnica czynnej części czujnika jest równa  $5 \mu\text{m}$ .

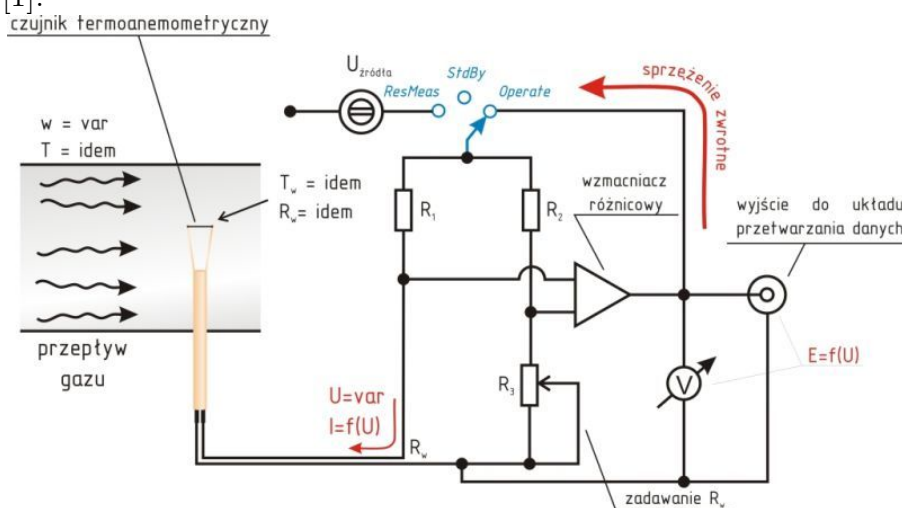


Rys. 1 a) Czujnik drucikowej sondy termooanemometrycznej w powiększeniu.. b) Ogólny widok sondy typu 55P01 firmy DANTEC [2]

Wyróżniamy dwa podstawowe rodzaje termooanemometrów:

- termooanometry stałotemperaturowe ( $\Delta t = \text{idem.}$ ),
- termooanometry stałoprądowe ( $I = \text{idem.}$ )[1].

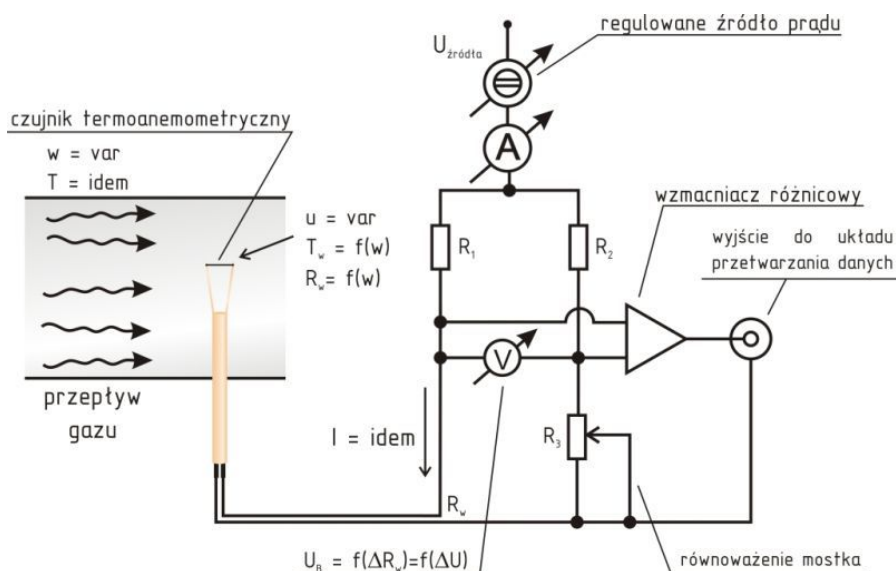
**Termooanometr stałotemperaturowy** charakteryzuje się utrzymywaniem stałej różnicy temperatury  $\Delta t$  pomiędzy czujnikiem, a przepływającym płynem, którego prędkość jest mierzona przez termooanometr. W tego typu konstrukcji termooanometru wartość zmierzonej prędkości medium wyrażona jest ilością energii niezbędnej do utrzymania odpowiedniej  $\Delta t$ . Kontrola strumienia dostarczanej energii do układu termooanometru realizowana może być poprzez pomiar natężenia prądu  $I$  lub napięcia elektrycznego  $U$ . Na rys. 2 pokazano schemat termooanometru stałotemperaturowego [1].



Rys. 2 Schemat termooanometru stałotemperaturowego

**Termooanometr stałoprądowy** charakteryzuje się utrzymywaniem stałej wartości natężenia prądu  $I$ . W tym przypadku strumień dostarczanej

energii do czujnika jest stały, a wzmożona konwekcja powoduje obniżenie temperatury sensora, co jest jednoznaczne ze zmianą rezystancji czujnika termooanemometru (włókna). Odzwierciedleniem prędkości jest napięcie. Na rys. 3 przedstawiono schemat termooanemometru stałoprądowego [1].



Rys. 3 Schemat termooanemometru stałoprądowego

Uzyskany sygnał elektryczny zmierzonej prędkości w postaci zarówno prądowej jak i napięciowej jest silnie nieliniowy. Własność ta powoduje, że producenci termooanemometrów zmuszeni są wyposażać je w dedykowane układy linearyzujące.

## 2.2. Rodzaje przepływu i rozkład prędkości dla przepływu w kanale okrągłym

Przepływ przez kanały może mieć charakter laminarny, przejściowy lub turbulentny. Przepływ jest **laminarny (uwarstwiony)**, gdy cząstki płynu poruszają się po torach równoległych natomiast, gdy cząstki płynu poruszają się po torach wzajemnie przecinających się, występują pulsujące zmiany wielkości i kierunków prędkości oraz parametrów płynu mamy do czynienia z przepływem **turbulentnym (burzliwym)**. Charakter przepływu określa się na podstawie wartości liczby Reynoldsa. Liczba  $Re$  wyraża stosunek sił bezwładności do sił lepkości podczas ruchu płynu [3].

$$Re = \frac{w_{sr} \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

Gdzie  $d$  jest tzw. wymiarem charakterystycznym. W przypadku przepływu płynu przez rurę wymiarem charakterystycznym jest jej średnica wewnętrzna.

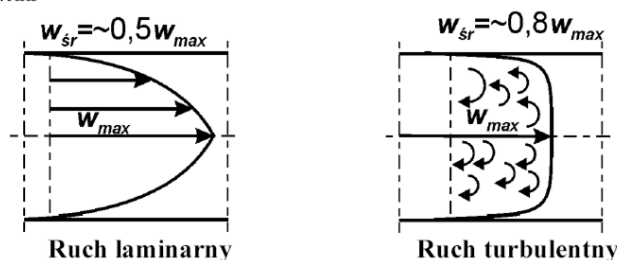
Dla okrągłych rur prostych przepływ jest:

laminarny gdy  $Re \leq 2000$ ,

przejściowy gdy  $2000 < Re < 10000$ ,

burzliwy gdy  $Re \geq 10000$ .

Na rys. 4 pokazano rozkład prędkości dla przepływu laminarnego i burzliwego wraz z orientacyjnymi stosunkami wartości prędkości średniej do maksymalnej  $w_{\text{sr}}/w_{\text{max}}$ .



Rys. 4 Schematyczne porównanie przepływu laminarnego i turbulentnego [4]

Do najbardziej znanych zależności opisujących rozkład prędkości dla przepływu w kanale okrągłym należy wzór Prandtla:

$$w = w_{\text{max}} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

gdzie wykładnik  $n$  jest zależny od wartości liczby Reynoldsa. Jego wartość można wyznaczyć z zależności poniżej:

$$n = 1,66 \log Re \quad (3)$$

### 2.3. Pomiar prędkości met. „Log-Czebyszewa”

W celu wyznaczenia prędkości przepływu mogą być stosowane różne metody pomiarowe. Jedną z nich jest metoda „Log-Czebyszewa”. Punktem wyjścia do wyznaczenia prędkości przepływu tą metodą jest hipoteza, że matematyczną formą prawa rozkładu prędkości w zależności od odległości od ścianki w elementach na obwodzie przekroju, jest funkcja logarytmiczna, zaś w innych elementach - funkcja wielomianowa.

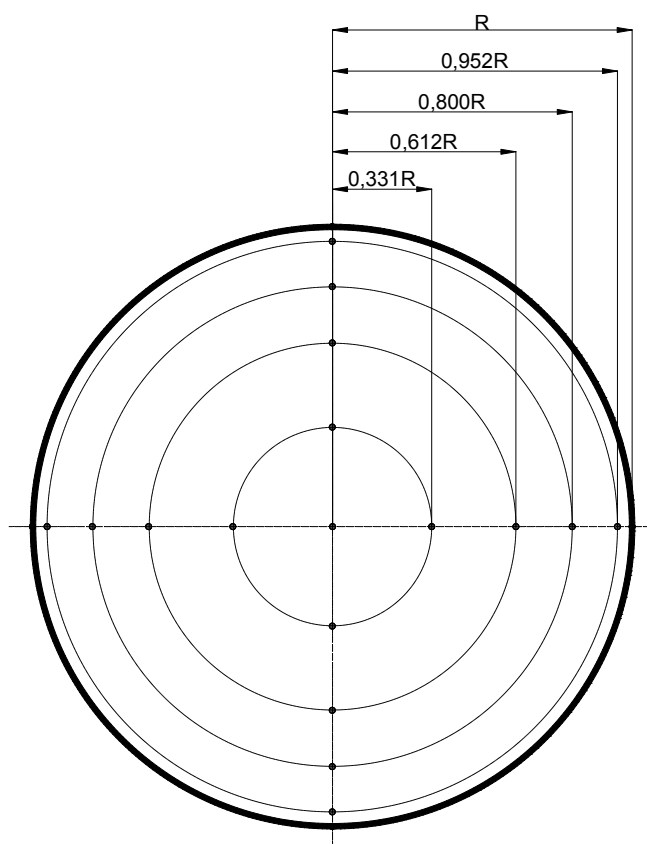
W metodzie tej przyjęto współczynniki ważenia, jako równe sobie, więc prędkość przepływu jest równa średniej arytmetycznej zmierzonych prędkości lokalnych w wyznaczonych punktach [5].

Dla przekroju kołowego położenie punktów pomiarowych odpowiada wartościom promienia względnego  $r/R$  przedstawionego w tab. 1.

Tab. 1 Położenie punktów pomiarowych dla przekroju kołowego [5]

Liczba punktów pomiarowych na promieniu	$r/R$
3	0,375
	0,925
	0,936
4	0,331
	0,612
	0,800
	0,952
5	0,287
	0,570
	0,689
	0,847
	0,962

Na rys. 5 pokazano położenie punktów pomiarowych w przewodzie o przekroju okrągłym dla met. „Log-Czebyszewa”.



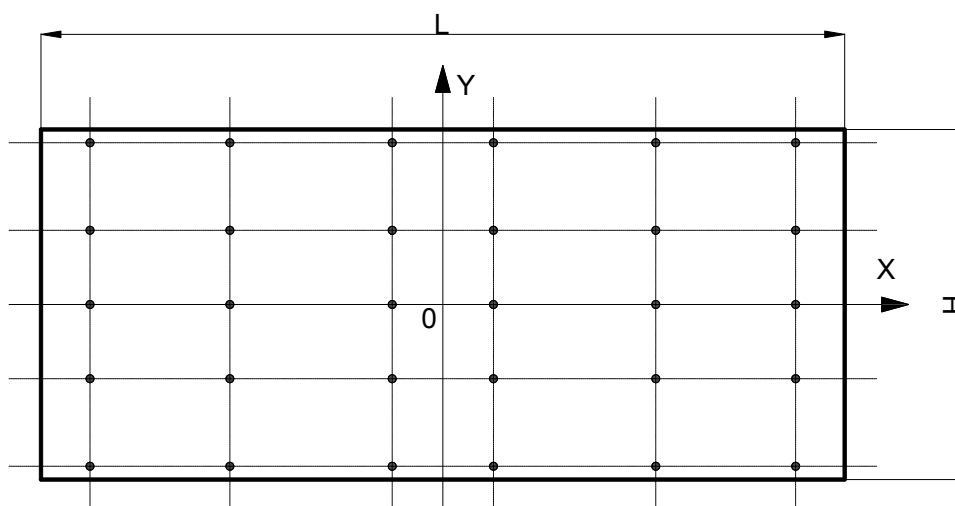
Rys. 5 Położenie punktów pomiarowych w przewodzie o przekroju okrągłym w metodzie „Log-Czebyszewa”

Dla przekroju prostokątnego przyjmuje się określoną liczbę  $e$  prostych sondowania, równoległych do krótszego boku prostokąta, wynoszącą, co najmniej 5. Na każdej z nich położona jest określona liczba  $f$  punktów pomiarowych, wynosząca, co najmniej 5. W tab. 2 poniżej przedstawiono położenie punktów pomiarowych  $e$  i  $f$  dla kanału o przekroju prostokątnym.

Tab. 2 Położenie punktów pomiarowych dla przekroju prostokątnego [5]

$e$ lub $f$	Wartości $\frac{X_i}{L}$ lub $\frac{Y_i}{H}$
5	$0, \pm 0,212, \pm 0,462$
6	$\pm 0,063, \pm 0,265, \pm 0,439$
7	$0, \pm 0,134, \pm 0,297, \pm 0,447$

Na rys. 6 pokazano położenie punktów pomiarowych w przewodzie prostokątnym w przypadku met. „Log-Czebyszewa” dla  $f = 6$  oraz  $e = 5$ .



Rys. 6 Położenie punktów pomiarowych w przewodzie o przekroju prostokątnym w metodzie „Log-Czebyszewa”



### 3. Pomiar prędkości i natężenia przepływu termooanemometrem.

#### 3.1. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko pomiarowe stanowi instalacja wentylacyjna składająca się z rurociągów o różnych średnicach oraz z wentylatora kanałowego. Wydajność wentylatora zmienia się za pomocą tyrystorowego regulatora REB-1 umożliwiającego płynną zmianę prędkości obrotowej wentylatora. Pomiar prędkości powietrza wykonywany jest termooanemometrem TA-5 lub TA140 firmy Airflow na promieniu rurociągu.

#### 3.2. Wykonanie pomiarów

Przed wykonaniem pomiarów należy wyznaczyć punkty pomiarowe na średnicy rurociągu zgodnie z metodą Log-Czebyszewa dla 3 punktów pomiarowych na promieniu rurociągu i wpisać je do tab. 3.

Tab. 3 Pomiary - metoda Log-Czebyszewa

Lp.	$r$ , mm	Odległość punktu pom. od ścianki, mm	$w$ , m/s
3G			
2G			
1G			
1D			
2D			
3D			

Następnie w celu wyznaczenia prędkości średniej w rurociągu należy wykonać pomiary w wyznaczonych punktach pomiarowych, a uzyskane wyniki wpisać do tab. 3.

Kolejnym krokiem jest wykonanie pomiarów prędkości powietrza w punktach pomiarowych oddalonych od siebie o 10 mm na średnicy rurociągu zaczynając od punktu pomiarowego znajdującego się w osi rurociągu. Uzyskane wyniki wprowadzić do tab. 4.

Tab. 4 Pomiary - rozkład prędkości

Lp.	$r$ , mm	Odległość punktu pom. od ścianki, mm	$w$ , m/s
7G	70		
6G	60		
5G	50		
4G	40		
3G	30		
2G	20		
1G	10		
Oś	0		
1D	-10		
2D	-20		
3D	-30		
4D	-40		
5D	-50		
6D	-60		
7D	-70		

### 3.3. Opracowanie wyników pomiarów

W celu wyznaczenia prędkości średniej w rurociągu met. „Log-Czebyszewa” wystarczy obliczyć średnią arytmetyczną prędkość z wyznaczonych punktów pomiarowych tab. 3. Ponieważ termoanemometr wyposażony jest w pomiar temperatury to korzysta on już z rzeczywistej gęstości powietrza, a więc odczytana wartość prędkości jest prędkością rzeczywistą (tj. w warunkach rzeczywistych).

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie prędkości średniej w rurociągu z wykorzystaniem współczynnika korekcyjnego przedstawionego na rys. 4 (tj. dla przepływu laminarnego  $w_{\dot{s}r} \cong 0,5w_{max}$ , a dla przepływu turbulentnego  $w_{\dot{s}r} \cong 0,8w_{max}$ ). rys. 4 schematyczne porównanie przepływu laminarnego i turbulentnego [4]

W celu wyznaczenia natężenia przepływu powietrza przez rurociąg należy pomnożyć uzyskaną prędkość średnią przez pole powierzchni przekroju rurociągu.

## 4. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- Cel ćwiczenia;
- Zestawienie wyników pomiarów;
- Zestawienie wyników obliczeń prędkości średniej wyznaczonej met. Log-Czebyszewa i z użyciem współczynnika korekcyjnego przedstawionego na rys. 4;
- Zestawienie strumieni objętości powietrza przepływającego przez rurociąg wyznaczone na podstawie uzyskanych prędkości średnich powietrza w rurociągu;
- Wykres pokazujący rozkład prędkości w rurociągu wyznaczony za pomocą zależności (2) (prędkości policzyć w punktach oddalonych od siebie o 5 mm). Na tym samym wykresie umieścić punkty pomiarowe z tab. 4 (nie łączyć ich linią);
- Uwagi i wnioski.

## 5. Literatura

- [1] <http://www.imteam.pl/pomiary-menu/przyrzady-w-teorii/47-termoanemometry>
- [2] Domagała. P.. „Pomiar pola prędkości za pomocą termoanemometru” instrukcja do ćw. laboratoryjnych
- [3] Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R. „Mechanika płynów w inżynierii środowiska” Warszawa, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001
- [4] Słupek S., Nocoń J., Buczek A. „Technika Ciepłna - Ćwiczenia obliczeniowe” Skrypt AGH nr 1646, Kraków : AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2002
- [5] Norma PN-ISO 5221:1994 „Rozprowadzanie i rozdział powietrza -- Metody pomiaru przepływu strumienia powietrza w przewodzie”

## Załącznik 1 - Właściwości powietrza suchego przy ciśnieniu atmosferycznym

Tab. 5 Właściwości powietrza suchego przy ciśnieniu atmosferycznym [2, 3]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_p, \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	$\lambda, \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	$\mu, \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$	$\nu, \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
-50	1,534	1013,2	0,02030	0,000014612	0,00000923
-20	1,365	1009,0	0,02250	0,000016279	0,00001161
0	1,252	1009,0	0,02366	0,000017168	0,00001328
10	1,206	1009,0	0,02448	0,000017751	0,00001416
20	1,164	1013,2	0,02517	0,000018224	0,00001506
30	1,127	1013,2	0,02575	0,000018668	0,00001600
40	1,092	1013,2	0,02645	0,000019224	0,00001696
50	1,056	1017,4	0,02714	0,000019613	0,00001795
60	1,025	1017,4	0,02796	0,000020113	0,00001897
70	0,996	1017,4	0,02854	0,000020390	0,00002002
80	0,968	1021,6	0,02923	0,000020974	0,00002109
90	0,942	1021,6	0,02993	0,000021585	0,00002210
100	0,916	1021,6	0,03062	0,000021779	0,00002313
120	0,870	1025,8	0,03190	0,000022751	0,00002545
140	0,827	1025,8	0,03318	0,000023530	0,00002780
160	0,789	1029,9	0,03434	0,000024113	0,00003009
180	0,755	1034,1	0,03561	0,000025002	0,00003249
200	0,723	1034,1	0,03689	0,000025891	0,00003485