

WPLYW WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH NA ZAWARTOŚĆ AEROSOLI W OBSZARZE ZURBANIZOWANYM

Lesław TARCZYŃSKI*

* Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa
ul. Katowicka 48, 45-061 Opole, e-mail: katkbi@po.opole.pl

Streszczenie: W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań zawartości aerosoli w atmosferze obszaru zurbanizowanego. Zawartość aerosoli wyznaczano metodą pośrednią, na podstawie pomiarów natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego w całym zakresie spektrum. Stopień zawartości aerosoli w atmosferze obliczano poprzez eliminację wpływu pozostałych czynników pochłaniających i rozpraszających, wykorzystując wybrany model transmisji promieniowania słonecznego bezpośredniego. Użyto współczynnika Ångströma jako liczbowej miary zawartości aerosoli w atmosferze. Dokonano analizy wpływu kierunku i prędkości wiatru na zawartość aerosoli w rejonie miasta Opola. Wykorzystano wyniki pomiarów własnych z okresu ostatnich 14 lat.

Słowa kluczowe: atmosfera ziemską, aerosole, współczynnik Ångströma.

1. WSTĘP

Składniki atmosfery ziemskiej takie jak aerosole (pyły i kropelki cieczy o średnicy $10^{-3} \mu\text{m} \leq 0 \leq 10^2 \mu\text{m}$), para wodna oraz cząsteczki gazów, pochłaniają i rozpraszają znaczną część energii promieniowania słonecznego.

Najczęściej stosowane modele teoretyczne opisujące transmisję promieniowania słonecznego w atmosferze ziemskiej uwzględniają indywidualny wpływ poszczególnych składników dla określonych przedziałów spektrum promieniowania lub dla całego przedziału spektrum.

Dla n składników atmosfery odbierających energię bezpośredniego promieniowania słonecznego wartość spektralnego natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego docierającego do powierzchni terenu wyniesie [6]:

$$I_{\lambda} = I_{o\lambda} \prod_{i=1}^n \tau_{i\lambda} \quad (1)$$

gdzie:

$I_{o\lambda}$ - spektralne natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego poza atmosferą ziemską,

$\tau_{i\lambda} = e^{(-m_i \delta_{i\lambda})}$, gdzie $\delta_{i\lambda}$ - optyczna grubość atmosfery dla i - tego czynnika osłabiającego dla długości fali λ ,

m_i - względna optyczna grubość atmosfery.

Stąd natężenie promieniowania słonecznego w całym zakresie spektrum na powierzchni terenu będzie równe:

$$I = \int_0^{\infty} I_{o\lambda} \prod_{i=1}^n \tau_{i\lambda} d\lambda. \quad (2)$$

Analiza i zastosowanie w praktyce tego modelu wymaga złożonej i kosztownej aparatury pomiarowej (pomiarów spektralne), złożonych obliczeń numerycznych oraz obszernych baz danych.

Natomiast modele oparte na parametrach reprezentujących cały przedział spektrum [3] mają ogólną postać:

$$I = I_o \prod_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

gdzie:

I - natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego w całym zakresie spektrum na powierzchni terenu (po przejściu przez warstwę atmosfery),

I_o - natężenie promieniowania słonecznego poza atmosferą ziemską w całym zakresie spektrum,

$$T_i = \int_0^{\infty} I_{o\lambda} \tau_{i\lambda} d\lambda / \int_0^{\infty} I_{o\lambda} d\lambda \quad (4)$$

gdzie:

T_i - liczbowy miarę osłabienia natężenia promieniowania słonecznego dla i - tego składnika atmosfery, przy założeniu niezależności wpływu poszczególnych składników.

Modele operujące równocześnie na całym zakresie spektrum są prostsze w zastosowaniach, a do ich doświadczalnej analizy i weryfikacji wystarczają znacznie mniej kosztowne przyrządy do pomiaru składowych promieniowania słonecznego.

Wymienione wyżej ogólne modele transmisji promieniowania słonecznego znajdują zastosowanie również do oznaczania stopnia zawartości aerosoli w atmosferze drogą pomiarów składowych natężenia promieniowania słonecznego, zarówno w ujęciu spektralnym [1], jak i w całym zakresie widma promieniowania słonecznego [4]. Metody oznaczania stopnia zawartości aerosoli oparte na pomiarach natężenia składowych promieniowania słonecznego można określić jako metody bierne. Duże możliwości w zakresie identyfikacji stopnia i rodzaju zanieczyszczeń atmosfery stwarzają metody oparte na wykorzystaniu sztucznych źródeł promieniowania, które można określić jako metody czynne. Przykładem zastosowania takich metod mogą być pomiary własności aerosoli przy użyciu lidar, przeprowadzone w rejonie Wybrzeża przez naukowców z Instytutu Oceanologii PAN [8].

W wielu przypadkach wpływ zawartości aerosoli w atmosferze może być sprowadzony do pojedynczego parametru reprezentującego liczbową miarę wpływu ich koncentracji i własności optycznych na pochłanianie i rozpraszanie energii promieniowania słonecznego bezpośredniego. Przykładem takich parametrów może być współczynnik Linke'go (Linke turbidity factor) [5] oraz współczynnik Ångströma β (Ångström's turbidity coefficient) [4].

W niniejszej pracy wybrano do tego celu współczynnik β , występujący w tzw. formule Ångströma [4]:

$$k_{a\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (5)$$

gdzie:

$k_{a\lambda}$ - monochromatyczny współczynnik osłabienia promieniowania słonecznego przez aerosole,

λ - długość fali promieniowania słonecznego.

Dla najczęściej występujących typów aerosoli w środkowo – europejskiej strefie geograficznej można przyjąć stałą wartość $\alpha = 1,3$ [4]. Wtedy poszukiwaną bezwymiarową wartość β można wyznaczyć eliminując wpływ pozostałych składników atmosfery (para wodna, cząsteczki gazów), z wykorzystaniem wybranego modelu transmisji promieniowania słonecznego.

2. MODEL OBLICZENIOWY

W niniejszej pracy zastosowano wieloparametrowy model opisany w pracy [3] i oznaczony symbolem „C”, reprezentujący cały zakres spektrum promieniowania, gdzie przyjmuje się wartość natężenia promieniowania słonecz-

nego bezpośredniego na poziomie terenu wg. zależności (por. zależność (3)):

$$I_{dir} = 0,975 I_o T_A T_w T_r T_g T_o \quad (6)$$

gdzie:

I_o – stała słoneczna,

T_A – współczynnik uwzględniający pochłanianie i rozpraszanie przez aerosole,

T_w – współczynnik uwzględniający wpływ zawartości pary wodnej,

T_r – współczynnik uwzględniający rozpraszanie wg. modelu Rayleigh'a,

T_g – współczynnik uwzględniający wpływ jednorodnej mieszaniny gazów (głównie CO₂, O₃, N₂O, CO, O₂, CH₄ i N₂),

T_o – współczynnik uwzględniający wpływ warstwy ozonu.

Wartości I , T_w , T_r , T_g , T_o można wyznaczyć bądź bezpośrednio z pomiarów lub też korzystając ze wzorów empirycznych, częściowo też na podstawie pomierzonych wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza atmosferycznego oraz ciśnienia atmosferycznego.

Wtedy

$$T_A = I_{dir} / (0,975 T_w T_r T_g T_o). \quad (7)$$

Wykorzystując empiryczne zależności podane w pracach [3] i [4] otrzymamy ostatecznie:

$$\beta = \frac{1}{m_a (0,5123 + 1,089\alpha)} \ln p \quad (8)$$

gdzie:

$$p = \left(\frac{1,003 - 0,125\alpha}{\frac{I_{dir}}{0,975 I_o T_r T_o T_g T_w} + 0,0162 - 0,12445\alpha} \right)$$

Szczegółowe zależności dla współczynników T_w , T_r , T_g , T_o zaczerpnięto z prac [3, 4] i zestawiono w pracy [7]. W ten sposób wyznaczany współczynnik Ångströma β zastosowano jako liczbową miarę koncentracji aerosoli w atmosferze w analizach opisanych w dalszej części pracy.

3. APARATURA POMIAROWA

Pomiary natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego prowadzono za pomocą aktynometru NIP firmy Eppley Laboratories, o dokładności $\pm 0,5\%$.



Fot. 1. Aktynometr (Eppley Laboratories) na stanowisku badawczym.

Fig. 1. Normal Incidence Pyrheliometer (Eppley Laboratories) at the measurement site.

Temperaturę i wilgotność względną powietrza atmosferycznego mierzono za pomocą zintegrowanego czujnika RAH2 firmy Delta -T (dokładność pomiaru temperatury $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, dokładność pomiaru wilgotności względnej $\pm 2\%$). Ciśnienie atmosferyczne mierzono za pomocą barometru typu BS3 firmy Delta -T o dokładności pomiaru $\pm 0,8$ hPa.



Fot. 2. Zespolony czujnik temperatury powietrza atmosferycznego i wilgotności względnej, czujnik ciśnienia atmosferycznego oraz czujniki kierunku i prędkości wiatru.

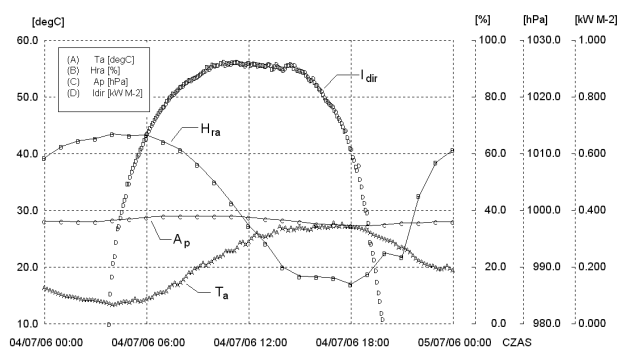
Fig. 2. Integrated sensor of ambient air temperature and air relative humidity, atmospheric pressure sensor, potentiometer windvane and switching anemometer.

Kierunek wiatru rejestrowano za pomocą czujnika potencjometrycznego typu W200P o dokładności wskazań ± 2 deg360, dla stałej prędkości wiatru większej od 5 m/s. Prędkość wiatru (średnią 10-minutową) mierzono za pomocą czujnika typu A100R o dokładności $1\% \pm 0,1$ m/s.

4. WYNIKI POMIARÓW

Zastosowana metoda wyznaczania stopnia zawartości aerosoli w atmosferze może być użyta tylko dla przedziałów czasu, w czasie których bezpośrednie promieniowanie słoneczne nie jest zakłócone przez warstwę chmur. Idealnym wyborem są całkowicie bezchmurne dni, ale liczba takich dni w przeciągu przeciętnego roku w naszym klimacie jest stosunkowo niewielka. W związku z tym do analizy wybrano doby, w czasie których zaobserwowano względnie stabilne wartości natężenia słonecznego bezpośredniego (I_{dir}) w przedziale czasu 11:30÷12:30. Kryterium stabilności była granica 5% względnego odchylenia wartości I_{dir} od średniej w przedziale czasu 11:30÷12:30, przy gęstości próbkowania co 5 minut.

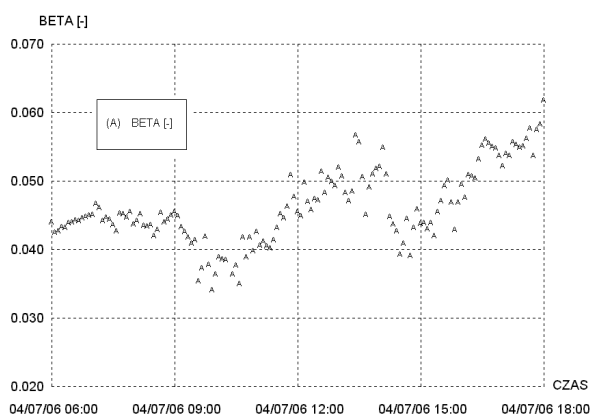
Na rys. 1 pokazano przebiegi wartości natężenia promieniowania słonecznego (I_{dir}), temperatury powietrza atmosferycznego (T_a), wilgotności względnej powietrza (H_{ra}) oraz ciśnienia atmosferycznego (A_p) dla jednej z dób upalnego lata 2006 roku, spełniającej założone kryterium stabilności natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego (I_{dir}).



Rys. 1. Natężenie promieniowania słonecznego bezpośredniego (I_{dir} [kW/m^2] (D)), temperatura powietrza atmosferycznego (T_a [$^{\circ}\text{C}$] (A)), wilgotność względna powietrza (H_{ra} [%] (B)) oraz ciśnienie atmosferyczne (A_p [hPa] (C)) w czasie jednej z dób upalnego lata 2006 roku, spełniającej założone kryterium stabilności I_{dir} (04/07/2006).

Fig. 1. Intensity of the direct solar radiation (I_{dir} [kW/m^2] (D)), ambient air temperature (T_a [$^{\circ}\text{C}$] (A)), relative air humidity (H_{ra} [%] (B)) and atmospheric pressure (A_p [hPa] (C)) during one of the hot days of 2006 summer, satisfying the assumed stability level of I_{dir} (04/07/2006)

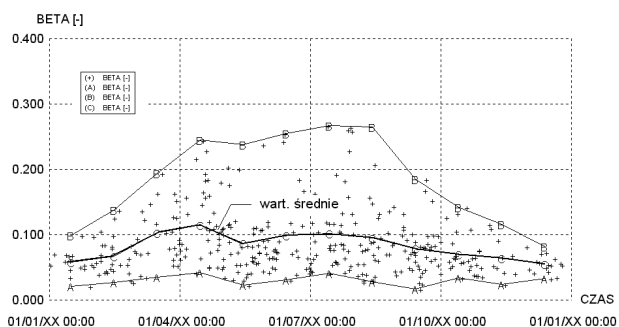
Natomiast na rys. 2 pokazano obliczone dla tej doby (przedział czasu 06:00–18:00), zgodnie z opisanym w p. 3 algorytmem, wartości współczynnika β , reprezentujące stopień zawartości aerosoli w atmosferze.



Rys. 2. Obliczone wartości współczynnika Ångströma β dla doby o parametrach pokazanych na rys. 1 (04/07/2006, 06:00–18:00, interwały czasu: 5 minut).

Fig. 2. Calculated values of of the Ångström turbidity coefficient β equivalent to meteorological parameters plotted in fig. 1. (04/07/2006, 06:00–18:00, time intervals: 5 minutes).

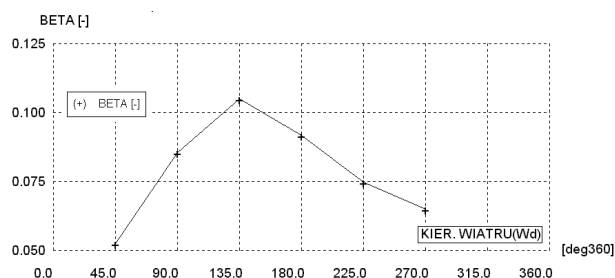
Dla wyselekcjonowanych dób (zgodnie z przyjętym kryterium stabilności natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego) obliczono wartości współczynnika β formuły Ångströma dla przedziału czasu 11:30÷12:30 przyjmując jako dane wejściowe pomierzone uśrednione wartości T_a , H_{ra} i A_p dla tego samego interwału czasowego. Na tej podstawie wyznaczono wartości ekstremalne oraz wartości średnie współczynnika β dla poszczególnych miesięcy, z okresu 14 lat obserwacji. Wartości te pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Obliczone na podstawie pomiarów własnych wartości współczynnika β w rejonie miasta Opola z okresu 14 lat („+”), reprezentowane za pośrednictwem średnich miesięcznych (C) oraz ekstremalne wartości miesięczne (wartości minimalne: (A), wartości maksymalne: (B)). (Rejon Opola, okres obserwacji 14 lat).

Fig. 3. Calculated values of the Ångström turbidity coefficient in the Opole location (+), represented also by monthly averages (C), on the bases of 14 years of author’s measurements. The extreme monthly values: min: (A), max: (C)). (The Opole location, 14 years of measurements).

Największe stężenie aerosoli reprezentowane przez wartości współczynnika β występuje w kwartałach II i III. Również w tych okresach roku można zaobserwować największe wahania stężenia aerosoli w badanym rejonie. W następnej kolejności korzystając z tak przygotowanych danych zbadano, w jakim stopniu wpływ na zawartość aerosoli w atmosferze mogą wywierać takie czynniki jak kierunek i prędkość wiatru. Może to mieć związek z transportem zawieszin pochodzenia naturalnego z różnych obszarów geograficznych oraz ze zróżnicowanych źródeł zanieczyszczeń pochodzenia miejskiego i przemysłowego. W tym celu w bazie danych pomiarowych wyszukano daty dób, w których średnie dobowe azymuty kierunku wiatru w zadanych odstępach co 45° występowały równocześnie z okresami, kiedy wartości promieniowania słonecznego spełniały przyjęte kryterium stabilności. Wyniki tej analizy pokazano na rys. 4.

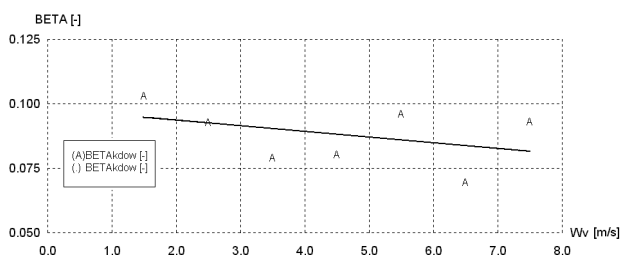


Rys. 4. Średnia wartość współczynnika Ångströma β dla wybranych średnich dobowych kierunków wiatru (azymut kierunku wiatru w przedziałach co 45° , rejon Opola, okres obserwacji 14 lat).

Fig. 4. Average values of Ångström’s turbidity coefficient for selected average diurnal wind directions (45° intervals of wind direction azimuth, Opole location, 14 years of measurements).

Widoczny jest związek pomiędzy kierunkiem wiatru (średnia wartość dobowa) a średnią wartością współczynnika β . Największy stopień zawartości aerosoli występuje w masach powietrza napływających z kierunku południowego i południowo – wschodniego. Przyczyną tego mogą być zarówno źródła lokalne występujące na tych trasach przepływu mas powietrza, jak i źródła naturalne w odległych rejonach geograficznych (np. pyły z obszarów pustynnych).

Sprawdzono również wpływ prędkości wiatru na stężenie aerosoli w masach powietrza przepływających w badanym obszarze. W tym celu z bazy danych pomiarowych wybrano daty dób, spełniających równocześnie zarówno przyjęte kryterium stabilności natężenia promieniowania słonecznego bezpośredniego, jak i wykazujące zgodność z wybranymi przedziałami średnich dobowych prędkości wiatru oraz zakresów wartości azymutu kierunku wiatru.

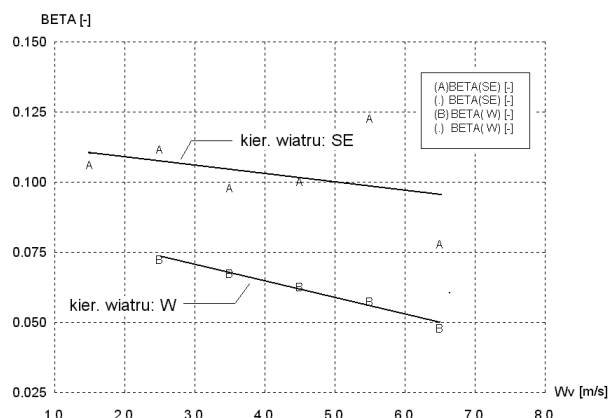


Rys. 5. Średnie wartości współczynnika Ångströma β dla wybranych średnich dobowych prędkości wiatru niezależnie od kierunku napływu mas powietrza (aproxymacja liniowa, przedziały prędkości wiatru co 1 m/s, rejon Opola, okres obserwacji 14 lat).

Fig. 5. Average values of Ångström's turbidity coefficient for selected average diurnal wind velocities, independent of wind direction (1 m/s wind speed intervals, the Opole location, 14 years of measurements).

Na rys. 5 pokazano średnie wartości współczynnika β w funkcji średniej dobowej prędkości wiatru, w przedziałach co 1 m/s, niezależnie od kierunku wiatru. Aproksymacja liniowa otrzymanego zbioru argumentów i wartości wykazała, że wraz ze wzrostem średniej dobowej prędkości wiatru zawartość aerozoli oznaczana za pośrednictwem współczynnika β ma tendencję malejącą. Można to uzasadnić zakładając występowanie na kierunkach mas przepływu powietrza również sztucznych źródeł zanieczyszczeń w przybliżeniu o niezmiennej wydajności.

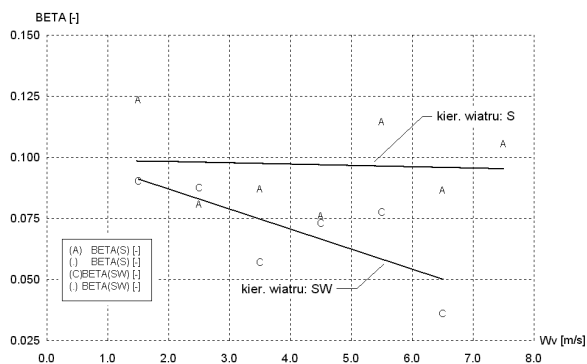
Z kolei na rys. 6 pokazano związek pomiędzy średnią zawartością aerozoli a prędkością wiatru (wartości w przedziałach co 1 m/s), dla dwóch różnych kierunków wiatru (SE i W) (wartości z przedziałów obejmujących zakresy 45°), aproksymowane funkcjami liniowymi metodą najmniejszych kwadratów. W każdym z rozpatrywanych kierunków zaobserwowano mniejsze stężenie aerozoli wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Można to uzasadnić zakładając stałą wydajność źródeł zanieczyszczeń pochodzenia miejskiego i przemysłowego. Można też zauważyć znacznie większe fluktuacje stężenia aerozoli w masach powietrza napływających z kierunku południowo – wschodniego. Może to być związane z lokalizacją na tym kierunku wielu zakładów przemysłowych emitujących pyły do atmosfery. Należy również podkreślić stosunkowo duży rozrzut otrzymanych wartości współczynnika β wokół pokazanych na wykresach wartości średnich, ponieważ wartości średniego odchylenia standardowego osiągają w wielu przypadkach poziom 40-50% wykreślonych wartości.



Rys. 6. Średnie wartości współczynnika Ångströma β dla wybranych średnich dobowych prędkości wiatru dla dwóch kierunków napływu mas powietrza (z południowego wschodu(SE) i zachodu(W)) (aproxymacja liniowa, przedziały prędkości wiatru co 1 m/s, rejon Opola, okres obserwacji 14 lat).

Fig. 6. Average values of Ångström's turbidity coefficient for selected average diurnal wind velocities and for two wind directions (south-east (SE) and west (W)), least-squares linear fit. (1 m/s wind speed intervals, Opole location, 14 years of measurements).

Natomiast na rys. 7 pokazano, jak zmieniały się średnie wartości współczynnika β w zależności od prędkości wiatru z kierunków południowego (S) i południowo-zachodniego (SW).



Rys. 7. Średnie wartości współczynnika Ångströma β dla wybranych średnich dobowych prędkości wiatru dla dwóch kierunków napływu mas powietrza (z południa (S) i południowego zachodu (SW)) (aproxymacja liniowa, przedziały prędkości wiatru co 1 m/s, rejon Opola, okres obserwacji 14 lat).

Fig. 7. Average values of Ångström's turbidity coefficient for selected average diurnal wind velocities and for two wind directions (south (S) and south-west (SW)), least-squares linear fit (1 m/s wind speed intervals, Opole location, 14 years of measurements).

Z czterech analizowanych tu kierunków napływu mas powietrza kierunek zachodni (W) charakteryzuje się najmniejszymi fluktuacjami wartości współczynnika β dla przyjętego liniowego związku pomiędzy prędkością wiatru a liczbową miarą zawartości aerosoli. Z kolei najmniejszy wpływ prędkości wiatru na wyznaczone wartości współczynnika β widoczny jest na kierunku południowym. Można zaryzykować przypuszczenie, że z kierunku tego napływają głównie zanieczyszczenia z bardziej odległych źródeł pochodzenia naturalnego i sztucznego. W takim przypadku wpływ prędkości wiatru w badanej lokalizacji na stopień zawartości aerosoli może być stosunkowo mniejszy.

5. PODSUMOWANIE

Metoda pośrednia oznaczania stopnia zawartości aerosoli w atmosferze, polegająca na wykorzystaniu wyników pomiarów natężenia promieniowania słonecznego bezpośrednio umożliwia przeprowadzenie niezbędnych analiz bez konieczności stosowania specjalistycznej, kosztownej aparatury pomiarowej. Obserwacje i obliczenia z zastosowaniem tej metody wykonane w okresie ostatnich kilkunastu lat w rejonie miasta Opola wykazały, że maksymalne średnie wartości miesięczne współczynnika Ångströma β reprezentującego liczbową miarę zawartości aerosoli w atmosferze wystąpiły w kwartałach II i III, natomiast wartości minimalne w kwartale IV i na początku kwartału I. Bardziej szczegółowe analizy przeprowadzone z wykorzystaniem zgromadzonej bazy danych pomiarowych wykazały istotny związek stopnia zawartości aerosoli w rejonie miasta Opola z kierunkiem napływu mas powietrza. Największą zawartość aerosoli wykazują masy powietrza napływające z kierunków południowo – wschodniego i południowego, które pokrywają się z lokalizacją największych ośrodków przemysłowych w tym rejonie. Natomiast analiza wpływu prędkości mas powietrza (identyfikowanych średnią dobową prędkością wiatru) wykazała w każdym przypadku tendencję do spadku liczbowych wartości współczynnika β wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Trzeba również zwrócić uwagę na fakt, że kilkunastoletni okres obserwacji wartości parametrów meteorologicznych w naszej strefie klimatycznej w zakresie potrzeb stawianych przez użytą pośrednią metodę oznaczania stopnia zawartości aerosoli w atmosferze może nie być w pełni wystarczający dla przeprowadzenia kompletnych analiz wpływu takich parametrów, jak kierunek i prędkość wiatru. Wiąże się to ze stosunkowo niewielkim prawdopodobieństwem równoczesnego wystąpienia bezchmurnego okresu czasu oraz reprezentatywnej liczby dób o określonym przedziale kierunku i zakresu prędkości wiatru.

INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS ON THE AEROSOL CONTENT IN THE URBAN LOCATION

Summary: The results of investigation of the aerosol content in the atmosphere of urban region are presented. The aerosol content was determined using indirect method based on measurements of broadband direct solar radiation intensity. The aerosol content index was calculated by elimination of influence of all other attenuating factors, using selected model of broadband transmission of direct solar beam in the atmosphere. Ångström's turbidity coefficient was used as aerosol content index. An analysis of influence of such meteorological parameters as wind direction and wind velocity on the aerosol content was performed in the Opole location. The presented results have been obtained on the bases of fourteen years of measurements.

Literatura

- [1] Cachorro V.E., Vergaz R., Frutos A.M. *A quantitative comparison of α -Å turbidity parameter retrieved in different spectral ranges based on spectroradiometer solar radiation measurements*. Atmospheric Environment 35 (2001) 5117-5124
- [2] Elminir H.K., Hamid R.A., El-Hussaing F., Chitas A.E., Beheary M.M., Abdel-Moneim K.M. *The relative influence of the anthropogenic air pollutants on the atmospheric turbidity factors measured at an urban monitoring station*. Science of the Total Environment 368 (2006) 732-743
- [3] Iqbal M. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press 1983
- [4] Louche A., Maurel M., Simmont G., Peri G., Iqbal M. *Determination of Ångström's turbidity coefficient from direct solar irradiance measurements*. Solar Energy 38, No 2 (1987) 89-96
- [5] Louche A., Peri G., Iqbal M. *An analysis of the Linke turbidity factor*. Solar Energy 37, No 6 (1986) 393-396
- [6] Molineaux B., Ineichen P. *On the broadband transmittance of direct irradiance in a cloudless sky and its application to the parametrization of atmospheric turbidity*. Solar Energy 56, No 6 (1996) 553-563
- [7] Tarczyński L. *Sezonowe zmiany stopnia zapylenia atmosfery w rejonie uprzemysłowionym na podstawie obserwacji wieloletnich*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. Czasopismo Naukowe. Sekcja Fizyki Budowli Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN. Łódź Tom I (2005) 323-330
- [8] Zieliński T., Zieliński A. *Aerosol extinction and aerosol optical thickness in the atmosphere over the Baltic Sea determined with lidar*. Journal of Aerosol Science 33 (2002) 907-921