

## ODDZIAŁYWANIE ZABUDOWY NA LOKALNE RUCHY POWIETRZA I ICH WPŁYW NA STĘŻENIE DWUTLENKU SIARKI W AGLOMERACJI WARSZAWSKIEJ

Bonifacy Łykowski, Małgorzata Kleniewska  
Szkola Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono ocenę wpływu luźnej, średniej zabudowy na zakłócenie prędkości wiatru w wyniku oddziaływania obiektów miasteczka akademickiego SGGW w Warszawie Ursynowie i przylegających osiedli mieszkaniowych. Stwierdzono znaczne zwiększenie częstości występowania prędkości wiatru w przedziale  $0,1-2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na wysokości 4 m n.p.g. (63,5%) niż na wysokości 24 m (37,2%), ale także zwiększenie wiatru o dużej prędkości (powyżej  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) na wysokości 4 m w następstwie oddziaływania zjawiska konwergencji strumieni powietrza między budynkami. Zaznacza się także wyraźnie wpływ osiedli mieszkaniowych Ursynowa na zakłócenie pola wiatru na stacji Ursynów SGGW. Zjawiska te mają wpływ na kształtowanie się stężenia zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem siarki. W osiedlach o zwartej, zamkniętej zabudowie (stacja Wokalna i Krucza) występuje stagnacja zanieczyszczeń w warstwie przygruntowej, pewne podwyższenie wartości stężenia zanieczyszczeń i brak zależności stężenia od kierunku napływu powietrza. Na stacjach położonych w terenie częściowo otwartym (Ursynów i Targówek) oraz otwartym (Granica, Legionowo) stężenie  $\text{SO}_2$  w znacznym stopniu jest zależne od kierunku napływu powietrza.

**Słowa kluczowe:** wiatr, zanieczyszczenia powietrza, aglomeracja warszawska

### WSTĘP

Warunki klimatyczne były uwzględniane przy lokalizacji i budowie ludzkich osiedli już od najdawniejszych czasów. Świadomie dostosowywano kierunki ulic do kierunku wiatru już w starożytnym Babilonie w celu łagodzenia upałów.

Witruwiusz, rzymski architekt z I wieku p.n.e., wielokrotnie porusza problem klimatu w swoich publikacjach, pisząc między innymi: *Należy przy planowaniu budowli*

---

Adres do korespondencji – Corresponding author: Bonifacy Łykowski, Małgorzata Kleniewska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: bonifacy\_lykowski@sggw.pl

*uwzględnić warunki lokalne i różnice klimatyczne* (za Różańskim 1959). Główne dzieło Witruwiusza „O architekturze ksiąg dziewięć” zostało ponownie odkryte w XV wieku, a w Polsce zdobyło popularność w XVI wieku. Myśl Witruwiusza należy nieco uściślić, a mianowicie, że przy planowaniu budowli trzeba uwzględnić zarówno strefę klimatyczną na kuli ziemskiej (makroklimat), jak i klimat lokalny (miejscowy) oraz inne czynniki miejscowe (fizjograficzne). Przy ocenie klimatu miejscowego do celów urbanistycznych przyjmuje się dwa etapy opracowań:

- badania klimatu istniejącego przed rozpoczęciem budowy,
- określenie wpływu przyszłej zabudowy na zmianę klimatu lokalnego ze szczególnym uwzględnieniem możliwości ograniczenia oddziaływania cech ujemnych, a wzmożeniem oddziaływania cech dodatnich.

Znane są jednak liczne przypadki lokalizacji osad ludzkich, uzdrowisk i zakładów przemysłowych na najgorszych klimatycznie terenach. O powstaniu osad i uzdrowisk decydowały dawniej często warunki obronne lub korzystne oddziaływanie tylko jednego elementu klimatu, co w przypadku braku uciążliwych zakładów przemysłowych było powodem wystarczającym. Przykładem może być Zakopane, które powstało w zacisznej dolinie o bardzo dobrych warunkach solarnych. Przy obecnej liczbie mieszkańców oraz masowym napływie turystów klimat znacznej części Zakopanego jest bardzo niekorzystny ze względu na gromadzenie się zanieczyszczeń przy zwiększonej częstotliwości inwersji temperatury w centralnej części miasta. Okresowo występuje też bardzo uciążliwy, nawet dla w pełni sprawnych organizmów, wiatr halny.

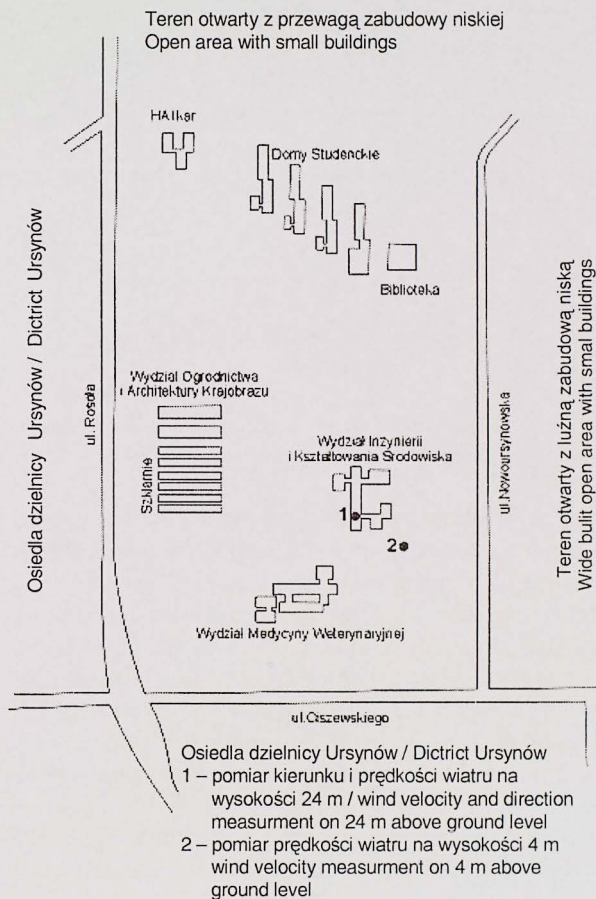
Warunki obronne zadecydowały o lokalizacji siedziby dawnych władców na wzgórzu wawelskim. Rozwój przemysłu i powstanie dużej aglomeracji Krakowa ujawniły, że klimat tej aglomeracji nie jest korzystny ze względu na słabe przewietrzanie, co stwarza warunki do koncentracji zanieczyszczeń powietrza.

Na obszarach zurbanizowanych i przemysłowych znacznej modyfikacji ulegają przede wszystkim warunki wentylacyjne oraz skład chemiczny powietrza, a w mniejszym stopniu temperatura powietrza i opady atmosferyczne. Szczególnie dużemu zakłóceniu ulegają ruchy powietrza. W zależności od usytuowania budowli względem kierunku wiatru zmniejszeniu lub zwiększeniu prędkości ulegają poziome ruchy powietrza (wiatr), wzmagają się także ruchy turbulencyjne, które charakteryzują się wyjątkowo dużą złożonością (Ferencowicz 1964, Podstawy klimatologii... 1999). Lorenc (1981) na podstawie analizy danych z obszaru aglomeracji warszawskiej stwierdza, że pole wiatru nad miastem ulega istotnej deformacji w wyniku oddziaływania układów urbanistycznych oraz wzrostu współczynnika szorstkości. Niniejsza praca poświęcona jest oddziaływaniu miejscowych elementów zabudowy na warunki wentylacyjne i kształtowanie się stężenia zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem siarki na przykładzie wybranych osiedli w aglomeracji warszawskiej.

## MATERIAŁ I METODA

W opracowaniu wykorzystano dane pomiarowe prędkości i kierunku wiatru ze stacji Ursynów SGGW, położonej w południowej, peryferyjnej dzielnicy Warszawy, w odległości 9 km od centrum miasta. Pomiaru te wykonywane są na wysokości 24 m n.p.g. Są to rejestracje ciągle za pomocą rejestratora RC-10. Odczyt prędkości wiatru odbywa

się automatycznie co 1 sekundę. Na tej podstawie obliczana jest wartość średnia z 10 sekund i 10 minut oraz wybierana maksymalna prędkość wiatru. Pomiar kierunku wiatru odbywa się co 10 sekund, a notowany jest kierunek występujący najczęściej w okresie 10 minut. Na wysokości 4 m n.p.g. rejestrowana jest tylko prędkość wiatru (rys. 1). Materiał pomiarowy użyty do analizy obejmował okres od kwietnia 1994 roku do kwietnia 1997 roku.



Rys. 1. Fragment miasteczka akademickiego SGGW (stan w latach 1994–1997)  
Fig. 1. Part of Warsaw Agriculture University campus (1994–1997)

Wartości stężenia dwutlenku siarki pochodzą ze stacji Ursynów SGGW, należącej do Zakładu Meteorologii i Klimatologii, oraz ze stacji Granica, Krucza, Legionowo, Targówek i Wokalna, pracujących w ramach Systemu Oceny Jakości Powietrza, koordynowanego przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie. Rozmieszczenie stacji przedstawiono na rysunku 2. Pomiar stężenia dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym wykonywany jest w sposób ciągły, referencyjną metodą fluorescencji UV. Metoda fluorescencyjna polega na pomiarze natężenia promieniowania



Rys. 2. Rozmieszczenie stacji pomiaru imisji  $\text{SO}_2$  w rejonie aglomeracji warszawskiej  
 Fig. 2. Situation of measuring  $\text{SO}_2$  concentration stations in the air in Warsaw urban area

UV emitowanego przez wzbudzone cząsteczki dwutlenku siarki. Badana próbka powietrza w pierwszej kolejności oczyszczana jest z węglowodorów, następnie przesyłana jest do komory fluorescencyjnej, gdzie promieniowanie UV pobudza cząsteczki dwutlenku siarki. Pobudzone cząsteczki opadając do niższych stanów, emitują promieniowanie UV o natężeniu proporcjonalnym do stężenia dwutlenku siarki. Dokładność pomiaru wynosi 0,4–0,5 ppb. Na stacji Ursynów SGGW czerpnia powietrza jest umieszczona na poziomie drugiego piętra budynku Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska, od strony południowej, na wysokości 10 m n.p.g. Czerpnia jest odsunięta od ściany mniej więcej o 2 m, dzięki czemu zapewniony jest niezakłócony przepływ powietrza w obrębie  $270^\circ$ .

Ze stacji Ursynów SGGW wykorzystano wartości chwilowe (średnie 10-minutowe) stężenia dwutlenku siarki, natomiast z pozostałych stacji wartości 1-godzinne z 2004 roku.

## WYNIKI

W tabelach 1 i 2 przedstawiono rozkład częstości prędkości wiatru w zależności od kierunku na stacji Ursynów SGGW, na wysokości 24 m i 4 m. Łączna częstość kierunków wiatru w poszczególnych przedziałach pokazuje, że na wysokości 4 m jest największy udział wiatru o prędkości  $0,1\text{--}2,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (63,5%), a na wysokości 24 m w przedziale  $2,1\text{--}5,0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (46,5%). Natomiast prędkość wiatru powyżej  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  występuje

Tabela 1. Rozkład częstości prędkości wiatru w zależności od kierunku na wysokości 24 m, Ursynów SGGW, 1994–1997

Table 1. Frequency of wind velocity vs wind direction on the level 24 m, Ursynów WAU, 1994–1997

Przedział prędkości wiatru [m·s <sup>-1</sup> ] Wind velocity	Kierunek / Wind direction																Częstość [%] Frequency
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0,1–2,0	347	409	638	785	1443	727	465	362	533	300	461	672	688	329	211	144	37,2
2,1–5,0	273	99	122	401	1500	770	299	316	472	595	1049	1732	1791	825	263	115	46,5
5,1–10,0	9	1	1	10	301	174	10	11	30	81	443	1374	934	235	19	1	15,9
10,1–15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	47	28	3	0	0	0,4
>15,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,004
Suma / Total	629	509	761	1196	3244	1671	774	689	1035	976	1960	3826	3442	1392	493	260	–

Liczba dni z ciszą / Number of days with calm: 79

Tabela 2. Rozkład częstości prędkości wiatru w zależności od kierunku na wysokości 4 m, Ursynów SGGW, 1994–1997

Table 2. Frequency of wind velocity vs wind direction on the level 4 m, Ursynów WAU, 1994–1997

Przedział prędkości wiatru [m·s <sup>-1</sup> ] Wind velocity	Kierunek / Wind direction																Częstość [%] Frequency
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0,1–2,0	469	436	487	956	2090	886	521	462	735	667	902	2098	1692	634	326	197	63,5
2,1–5,0	125	67	61	156	948	554	176	175	259	252	890	1578	1407	640	133	48	35,0
5,1–10,0	0	0	0	0	26	21	0	0	1	0	64	19	80	24	3	0	1,1
10,1–15,0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	1	5	11	8	4	0	0,2
>15,1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	7	3	20	2	0	0	0,2
Suma / Total	594	503	548	1112	3064	1461	697	637	1001	925	1864	3703	3210	1308	466	245	–

Liczba dni z ciszą / Number of days with calm: 14

znacznie częściej na wysokości 4 m (0,2%) aniżeli na wysokości 24 m (0,004% – tylko 1 przypadek). Już to ogólne porównanie wskazuje, jak znaczny wpływ wywiera zabudowa występująca w sąsiedztwie stacji na strukturę wiatru. Wyższa częstość dużych prędkości wiatru przy powierzchni ziemi (4 m) jest wynikiem sterowania strumieniami powietrza przez budynki, co zwiększa jego prędkość w wyniku zjawiska konwergencji. W przedziale prędkości wiatru  $2,1-5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  zróżnicowanie ogólnej częstości występowania wiatru na rozważanych wysokościach jest najmniejsze (na wysokości 24 m – 46,5%, na wysokości 4 m – 35,0%). Jednak także w tym przedziale prędkości zaznacza się duże zróżnicowanie częstości występowania wiatru przy niektórych jego kierunkach. Dotyczy to zwłaszcza kierunku ENE (od strony osiedla Wolica), a w mniejszym stopniu sektorów od S do W, wyłączając WSW (budynek Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska). Uwzględniając wszystkie przedziały prędkości wiatru, trzeba stwierdzić, że zabudowa mieszkaniowa osiedli Ursynowa w istotnym stopniu zakłóca pole wiatru w rejonie stacji meteorologicznej Ursynów SGGW, położonej na terenie miasteczka akademickiego SGGW.

Można to zjawisko prześledzić na podstawie liczb zawartych w tabelach 1 i 2. Wiatr wiejący od strony osiedli Ursynowa, tj. z sektorów ENE, E, S, W, WNW, ulega znacznemu zakłóceniu prędkości (występuje zróżnicowanie częstości na wysokościach 24 m i 4 m w przedziałach  $0,1-2,0$  i  $2,1-5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), a wiatr wiejący z pozostałych sektorów (NNW-NE) nie wykazuje takiego charakterystycznego rozkładu zróżnicowania.

Przedstawiony wyżej rozkład prędkości wiatru w zależności od kierunku pokazuje, że nawet niewysoka zabudowa (przeważnie 5-kondygnacyjna) w istotnym stopniu wpływa na prędkość wiatru w warstwie przygruntowej (do ok. 15 m n.p.g.). Zwiększa się znacznie częstość występowania wiatru o małej prędkości ( $0,1-2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), co zmniejsza możliwości samooczyszczania się powietrza na drodze turbulencji i wymiany poziomej. Konwergencyjne zwiększenie prędkości wiatru między budynkami ma zasięg lokalny (kilkudziesięciu metrów).

Na obszarze miast i osiedli mieszkaniowych występują tereny o zabudowie zwartej, gdzie dochodzi do silnego zakłócenia pola wiatru niezależnie od jego kierunku, oraz ciągi arterii komunikacyjnych o lepszych warunkach wentylacyjnych, silnie zależnych od kierunku wiatru. Wyraźnie zaznacza się to w kształtowaniu stężenia zanieczyszczenia powietrza, gdyż na obszarach o zabudowie zwartej, słabiej wentylowanych dochodzi do większej koncentracji zanieczyszczeń. W celu bliższego zilustrowania tego zjawiska w tabeli 3 przedstawiono wartości stężenia dwutlenku siarki w zależności od kierunku wiatru na stacjach położonych w miejscach częściowo otwartych (Ursynów, Targówek) oraz obszarach o zwartej zabudowie (Krucza, Wokalna) położonych w granicach miasta i dla porównania na stacjach położonych w terenie otwartym (Granica, Legionowo). W miejscach częściowo odsłoniętych (Targówek, Ursynów) zaznacza się wyraźne zróżnicowanie stężenia dwutlenku siarki w zależności od kierunku napływu powietrza. Takie zjawisko występuje także na stacjach położonych w terenie otwartym, poza granicami miasta. Na stacjach położonych w osiedlach o zwartej zabudowie (Wokalna, Krucza) stężenie dwutlenku siarki nie wykazuje dużego zróżnicowania w zależności od kierunku wiatru. Wynosi ono na stacji Wokalna  $12,6-15,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , a na Kruczej  $11,7-17,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Podczas gdy na stacjach położonych w terenie częściowo lub

Tabela 3. Średnie stężenie  $\text{SO}_2$  ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) na poszczególnych kierunkach róży wiatrów w półroczu chłodnym, Ursynów SGGW, 2004 rokTable 3. Mean of  $\text{SO}_2$  concentration vs wind direction in the winter half of the year, Ursynów WAU, 2004

Kierunek Wind direction	Stacja / Station					
	Granica	Krucza	Legionowo	Targówek	Ursynów SGGW	Wokalna
N	6,1	12,0	8,1	10,0	4,8	13,8
NE	8,2	11,5	14,8	11,5	10,1	14,9
E	12,3	14,3	22,6	13,0	6,7	15,2
SE	14,2	17,0	33,9	18,0	9,3	15,5
S	14,8	15,6	39,3	17,7	9,3	13,7
SW	13,4	14,3	20,5	13,6	7,1	12,6
W	9,4	14,1	12,2	24,4	5,6	12,8
NW	7,1	11,7	12,2	11,6	4,3	13,3

całkowicie otwartym zróżnicowanie to wynosi: Ursynów 4,3–10,1  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , Targówek 10,0–24,4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , Granica 6,1–14,8  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , Legionowo 8,1–39,3  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Przytoczone liczby potwierdzają przyjętą wcześniej tezę, że na obszarze o zwartej zabudowie występują zakłócenia pola wiatru, a zmniejszenie jego prędkości sprzyja koncentracji zanieczyszczeń powietrza i wartości stężenia dwutlenku siarki są wypadkową napływu zanieczyszczeń z różnych kierunków.

## WNIOSKI

1. Na podstawie charakteru zakłócenia pola wiatru, występującego na terenie miasteczka akademickiego SGGW w Ursynowie, można stwierdzić, że nawet luźna, średnia zabudowa wywołuje zmiany w strukturze wiatru, zwłaszcza w przedziale prędkości 0,1–2,0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , oraz w ilości okresów ciszy. Mniejszemu zakłóceniu ulega wiatr o prędkości 2,1–5,0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Występuje jednak zjawisko konwergencji strumieni powietrza między budynkami, co prowadzi do wzrostu częstości występowania wiatru o prędkości powyżej 15  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

2. Zmniejszenie prędkości wiatru na obszarze osiedli o zwartej zabudowie prowadzi do zwiększenia stężenia dwutlenku siarki na stacjach (Krucza i Ursynów), a jego wartości są podobne, niezależnie od kierunku wiatru. W miejscach częściowo odsłoniętych (Targówek, Ursynów) zaznacza się wyraźne zróżnicowanie stężenia dwutlenku w zależności od kierunku napływu powietrza. Takie zjawisko występuje także poza granicami miasta.

3. Omówione zjawiska prowadzą do sytuacji, iż na obszarach graniczących ze sobą osiedli dochodzi do istotnego zróżnicowania stężenia dwutlenku wynikającego z lokalnego charakteru zabudowy.

## PIŚMIENNICTWO

Ferencowicz J., 1964. Wentylacja i klimatyzacja. Arkady, Warszawa.

Lorenc H., 1981. Przestrzenny rozkład opadów atmosferycznych na terenie Wielkiej Warszawy. *Wiadomości IMGW* 1–2.

Podstawy klimatologii stosowanej, 1999 (red.) B. Łykowski. Wydaw. SGGW, Warszawa.

Różański S., 1959. Budowa miasta a jego klimat. Arkady, Warszawa.

## EFFECT OF BUILT AREA ON LOCAL AIRFLOW AND ITS INFLUENCE ON SULPHUR DIOXIDE CONCENTRATION IN WARSAW URBAN AREA

**Abstract.** The paper presents valuation of wide and moderately narrow buildings on wind velocity disturbances in the Warsaw Agricultural University campus in Ursynów and proximity areas. The greater increase of wind velocity frequency in the range  $0,1-2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (63,5%) on the level 4 than frequency in the same range on the level 24 m (37,7%) was stated. Because of convergence of airflow between the buildings the increase of wind velocity frequency (over  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) is stated. The influence of Ursynów housing estate airflow field in station Ursynów Warsaw Agricultural University. These conditions effect on the level of sulphur dioxide concentration. Inside narrow buildings (Wokalna and Krucza stations) stagnation of pollution in ground level increase of pollutants concentration occur. In this case air pollutants concentration does not depend on airflow direction. Unlike station situated in open field (Granica) or partially open (Ursynów and Targówek) air pollution concentrating depends on airflow direction.

**Key words:** wind, air pollution, Warsaw urban area

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.11.2005