

Monika WIERZBIŃSKA¹, Robert SZCZEPANIAK²

¹ University of Bielsko-Biala, Department of Environmental Protection and Engineering, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

² Graduate of the Univeristy of Bielsko-Biala, Poland

ORCID / e-mail:

¹ 0000-0001-8205-4392 / mwierzbinska@ath.bielsko.pl

² robert.szczepaniak@opoczta.pl

Wpływ warunków meteorologicznych na imisję pyłu zawieszzonego oraz kształt smug kominowych w sezonie grzewczym

Słowa kluczowe:

smuga kominowa, imisja, równowaga atmosfery, jakość powietrza

Influence of meteorological conditions on the particulate matter immission and the shape of wastegases streaks in the heating season

Keywords:

streak of wastegases, imission, atmosphere balance, air quality

Abstract

The aim of the study was to analyze exhaust gas streaks emitted from emitters during the heating season in the city of Żywiec. The relationships between the shape of the streaks and the weather conditions (wind speed and direction, air temperature and humidity, atmospheric pressure, precipitation, dust concentration) were analyzed. The shape of the chimney streaks (streaks: looping, coning, fanning, lofting, fumigation) has a decisive influence on the quality of the atmospheric air in the vicinity of the emitters.

The observations of the emitters were carried out for 92 days – at 6 a.m. and 6 p.m., to separate the conditions existing before the satisfaction of social and living needs (morning hours) and at the time of satisfying them (evening hours). At the same time, data of the state of the atmosphere obtained from the Żywiec-Zabłocie air quality station and from two weather stations: ŻAR BSP Międzybrodzie Żywieckie and IMWM-PIB Radziechowy were recorded.

The article presents the results of measurements of the state of the atmosphere and the observation of streaks. Data analysis showed a direct influence of weather conditions on the shape of the streaks and thus on the air quality. Analysis of the results showed that during periods of thermal inversion, there was an increase in the immission of particulate matter in the ground layer of the atmosphere. These conditions were often accompanied by pollutant or loop-shaped chimney streaks. Moreover, the increase in wind speed resulted in a decrease in the concentration of dust pollutants in a given area and contributed to the formation of ventilation streaks. During the observation of pollutant and loop-type chimney streaks, the immission of suspended dust increased significantly, which resulted in deterioration of air quality in Żywiec.

1. WSTĘP

Wraz z nadejściem drugiej połowy XIX wieku, w trakcie prężnego rozwoju przemysłu, zaczęto obserwować znaczący wzrost chorób oraz zgonów, który związano bezpośrednio z występującą lokalnie bardzo złą jakością powietrza. Zanieczyszczenia pochodzenia naturalnego w połączeniu z szybko wzrastającym udziałem zanieczyszczeń emitowanych ze spalania złej jakości paliw w piecach domowych oraz w przemyśle (wmieszanych w mgłę) w roku 1905 w Wielkiej Brytanii zyskały miano smogu (smog londyński). Lata 30. XX wieku były okresem, gdy w USA określono smog fotochemiczny. Ten typ smogu to mieszanina spalin w wyższym stężeniu, która w reakcji z promieniowaniem słonecznym jest przekształcana w silne utleniające, jak np. ozon czy formaldehyd (smog typu Los Angeles).

Od lat 60. XX wieku zaczęto prężnie pracować nad modelami jakości powietrza, zarówno w dwóch, jak i trzech płaszczyznach. Zaczęto poznawać, jak szeroką problematyką jest zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego – lokalnie, regionalnie oraz globalnie. Badano parametry przestrzeni, jak budowa terenu i jego zagospodarowanie, w połączeniu z parametrami meteorologicznymi z późniejszym ujęciem chemii atmosferycznej oraz meteorologią dynamiczną. W efekcie doprowadziło to do analizy wyników pomiarów w czasie rzeczywistym. Badanie zanieczyszczeń atmosferycznych pochodzenia antropogenicznego ma swój początek przed ujściem z emitora, a poza jego krawędzią warunki atmosferyczne wpływają na wszystkie kolejne procesy – od sposobu dyspersji do rozkładu zanieczyszczeń i ich zaleganiu.

Największe zmiany elementów meteorologicznych zachodzą w warstwie przyziemnej. Warstwa ta z jednej strony charakteryzuje się stałością strumieni turbulencyjnych, a z drugiej strony jej cechą są bardzo duże pionowe gradienty elementów meteorologicznych (temperatury, wiatru, wilgotności) [Juda-Rezler i Toczko 2016].

Temat wpływu warunków atmosferycznych na kształt smug kominowych w sezonie grzewczym bezpośrednio odnosi się do badania korelacji pomiędzy obserwowaną smugą w czasie rzeczywistym, a równoległe panującymi warunkami atmosferycznymi, rejestrowanymi przez lokalne stacje meteo oraz monitoring jakości powietrza. Dogłębna analiza, obejmująca szerszy obszar oraz wspomagana odczytami stacji meteo i jakości powietrza, jest w stanie pomóc w określeniu pochodzenia zanieczyszczeń, ich czasu i przestrzeni opadania w odniesieniu do warunków atmosferycznych [Alert smogowy, Kiepas 2001].

2. RÓWNOWAGA ATMOSFERY A KSZTAŁT SMUGI KOMINOWEJ

W literaturze wyróżnia się trzy główne stany równowagi atmosfery [Kožuchowski 2005, Karamouz i in. 2012, Pałasz 2016]:

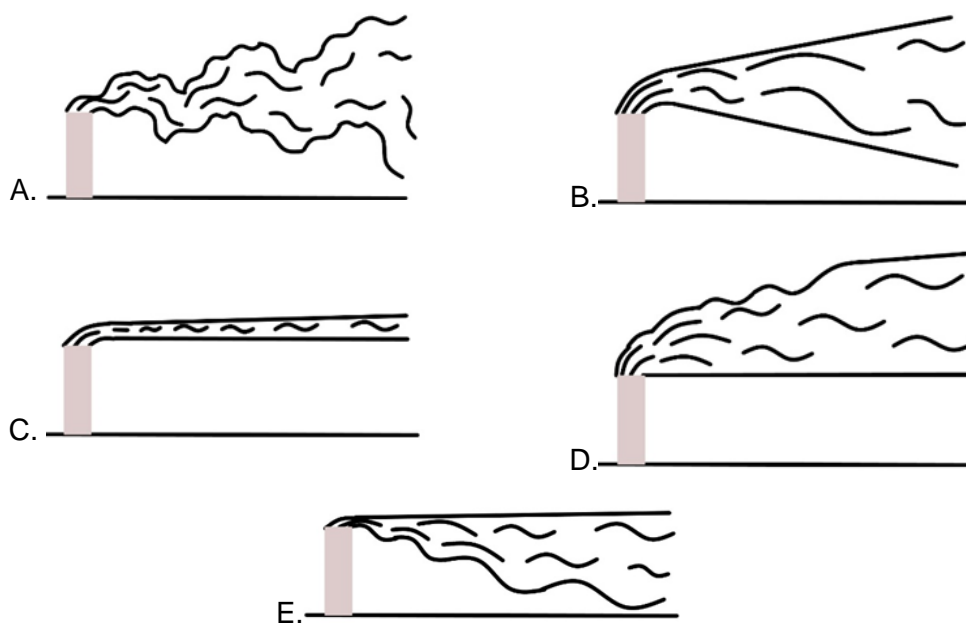
- **Stan równowagi stałej** – występuje w warunkach gradientu termicznego, który jest mniejszy od gradientu wilgotnoadiabatyicznego, co oznacza, że spadek temperatury wynosi poniżej $0,6^{\circ}\text{C}$ na 100 metrów wzniesienia. W takich warunkach każdy z „rodzajów” powietrza (suchego i wilgotnego) staną się ostatecznie chłodniejsze od otoczenia, w związku z czym zaczną opadać. Do równowagi stałej doprowadzają m.in. wypromieniowanie ciepła z dolnych warstw atmosfery, chłodna adwekcja przy gruncie lub ciepła adwekcja w górnych warstwach atmosfery. Przy stałej równowadze atmosfery działają siły powstrzymujące pionowe ruchy powietrza, co utrudnia rozpraszanie zanieczyszczeń.
- **Stan równowagi obojętnej** – występuje w sytuacji gradientu termicznego, który jest pomiędzy suchoadiabatycznym a wilgotnoadiabatycznym, co oznacza, że spadek temperatury wynosi od $0,6^{\circ}\text{C}$ do 1°C na 100 metrów wzniesienia. Taki stan atmosfery występuje najczęściej. Wznoszenie suchego powietrza w takim stanie powoduje front atmosferyczny lub topografia terenu. Jeśli powietrze jest dostatecznie wilgotne, to na pewnym poziomie

przechodzi w stan nasycony, co doprowadza do kondensacji (powstają chmury, a następnie opady). Taki mechanizm jest często obecny przy tworzeniu się letnich burz.

- **Stan równowagi chwiejnej** – występuje w warunkach gradientu termicznego, który jest większy od suchoadiabatycznego, a to oznacza, że spadek temperatury wynosi ponad 1°C na 100 metrów wzniesienia. W tym stanie każdy rodzaj powietrza będzie się stale unosić, gdyż jest zawsze cieplejszy od otoczenia. Taki stan towarzyszy dniom słonecznym i upalnym.

Duże nagromadzenie ciepła w spalinach powoduje odmienne zachowanie się tych gazów (smug zanieczyszczeń) w stosunku do otaczających je mas powietrza. Ze względu na procesy inwersji temperatury powietrza, które stanowią trzon mechanizmów równowagi, wyróżnić można pięć typów smug zanieczyszczeń [Szargut 2000, Pałasz 2016] (Rys. 1):

- **Typ pętlowy** – smuga kominowa na zmianę unosi się i opada. Dyspersja zanieczyszczeń na powierzchni gleby występuje w miejscu, w którym smuga styka się „pętlą” po raz pierwszy. Miejsce to wynika z zależności siły i kierunku wiatru oraz wysokości emitora. Zanieczyszczenia ulegają szybkiemu rozproszeniu, a chwilami kłęby zanieczyszczeń mogą nawet omiatać powierzchnię terenu. Taka sytuacja ma miejsce, gdy nad terenem występują opadające prądy powietrza. Ten typ smugi jest charakterystyczny dla równowagi chwiejnej atmosfery oraz dla pory dziennej, zwłaszcza przy niezupełnym zachmurzeniu.
- **Typ stożkowy** – smuga rozchodzi się wraz z kierunkiem wiatru, tworząc stożek. Słaba turbulencja powietrza sprawia, że smuga zanieczyszczeń styka się z terenem w dużej odległości od emitora. Ten typ smugi jest charakterystyczny dla pionowej równowagi obojętnej. Taka sytuacja może występować zarówno w ciągu dnia, jak i w nocy, przy całkowitym zachmurzeniu i silnym wietrze.
- **Typ wentylacyjny** – smuga rozchodzi się płasko i, nie mając tendencji do zbliżania się do terenu, nie powoduje dużych stężeń zanieczyszczeń przy powierzchni nawet w znacznej odległości od wysokiego emitora. W przypadku niskich emitatorów, emitowane gazy powodują zanieczyszczenie przyziemnych warstw atmosfery. Ten typ smugi występuje głównie w nocy i nad ranem, kiedy utrzymują się mgły. Sytuacja jest konsekwencją inwersji termicznej, która sięga dużo powyżej wysokości emitora.
- **Typ trasujący** – smuga unosi się powyżej granicy warstwy inwersyjnej. Sytuacja taka ma miejsce, gdy inwersja temperatury sięga poniżej wylotu emitora, natomiast powyżej istnieje stan zbliżony do równowagi nieustalonej. Stężenie zanieczyszczeń przy takich mechanizmach jest praktycznie równe zeru w okolicy emitora, a dyspersja zanieczyszczeń jest wysoce daleka względem miejsca emisji. Ze względu na duże wyniesienie zanieczyszczeń, ich rozprzestrzenianie jest bardzo korzystne dla lokalnej jakości powietrza. Sytuacja taka występuje najczęściej po zachodzie słońca oraz w godzinach porannych.
- **Typ zanieczyszczający** – smuga kominowa jest blokowana na wysokości niewiele powyżej wylotu z emitora przez warstwę inwersyjną i tym samym zanieczyszczenia są powstrzymane przed wyniesieniem na wyższe wysokości. Blisko poziomu terenu istnieją warunki zbliżone do równowagi chwiejnej, a powyżej wylotu z emitora zalega termiczna warstwa hamująca. Taki typ smugi jest charakterystyczny dla wczesnych godzin porannych, kiedy pod wpływem wschodzącego słońca zanikają termiczne warstwy hamujące oraz zanikają mgły poranne. Efektem jest gromadzenie się zanieczyszczeń w warstwie przyziemnej, co w sezonie zimowym jest szczególnie groźne dla zdrowia człowieka.



Rys. 1. Rodzaje smug kominowych: A – pętlowa, B – stożkowa, C – wentylacyjna, D – trasująca, E – zanieczyszczająca.

Fig. 1. Types of contamination streaks: A – looping, B – coning, C – fanning, D – lofting, E – fumigation.

Smugi kominowe ze względu na swój kształt oraz wysokość emitora są swoistym indykatorem aktualnych mechanizmów w obrębie lokalnych mas powietrza. Oczywiście topografia terenu, jak i jego zagospodarowanie, mogą utrudniać obserwacje przebiegu formowania się smug, ale nawet sporadycznie obserwowane emitory mogą pomóc w oszacowaniu zmian w atmosferze [Kaczorowska 1977].

3. METODY BADAŃ

Obserwacje smug kominowych prowadzono w mieście Żywiec położonym w Kotlinie Żywieckiej w okresie od listopada 2018 r. do stycznia 2019 r., czyli przez 92 dni okresu grzewczego. Dane meteorologiczne do analizy wpływu stanu atmosfery na imisję pyłu zawieszzonego oraz kształt smug kominowych pozyskano z trzech punktów pomiarowych: stacji meteorologicznej Beskidzkiego Stowarzyszenia Paralotniowego na górze Żar, czujnika jakości powietrza firmy Beskid Instruments zainstalowanego w dzielnicy Żywiec-Zabłocie oraz stacji meteorologicznej IMGW-PIB Radziechowy.

Stacja na górze Żar została wytypowana ze względu na wzniesienie szczytu ponad kotliną (761 m n.p.m.), co pozwoliło na zidentyfikowanie inwersji temperaturowej między dnem kotliny a otaczającymi szczytami górskimi. Miejsce pomiaru jakości powietrza w dzielnicy Żywiec-Zabłocie (na ul. Dworcowej) zostało wytypowane ze względu na bliskość z miejscem obserwacji smug kominowych, a stacja meteorologiczna w Radziechowach ze względu na lokalizację poza centrum miasta, co pozwala na wykluczenie wahań jakie mogą wynikać z gęstszej zabudowy (turbulencja wiatrów pomiędzy budynkami, czy wyspa ciepła). Ze wszystkich trzech punktów odczytywano dane pomiarowe o godzinie 6 rano i 18 wieczorem (92 dni x 2 pomiary, tj. 184 pomiary). Ze stacji na górze Żar odczytywano: temperaturę, prędkość wiatru, kierunek wiatru, wilgotność powietrza i ciśnienie atmosferyczne. Z punktu Żywiec-Zabłocie odczytywano: stężenia pyłu zawieszzonego PM₁₀, PM_{2,5} i PM_{1,0}, temperaturę powietrza oraz wilgotność powietrza. Ze stacji w Radziechowach odczytywano: temperaturę powietrza, kierunek

wiatru, opad godzinowy, prędkość wiatru. Odczytów dokonywano on-line w czasie rzeczywistym.

Równoległe z odczytami wartości emisji pyłu zawieszonego oraz parametrów meteorologicznych, o godzinie 6 rano oraz o godzinie 18 wieczorem wykonywano zdjęcia emitatorów w celu uchwycenia kształtu smugi kominowej. Zdjęcia wykonywano z długim czasem naświetlania – w zakresie 10 do 40 sekund, w zależności od prędkości wiatru. Długi czas naświetlania miał służyć uchwyceniu ruchu dymu oraz przypisaniu mu kształtu. Ze względu na oświetlenie naturalne i sztuczne, występujące w trakcie obserwacji, fotografie były wykonane w zakresie 100–6000 ISO dla umożliwienia odróżnienia barwy smugi na tle nieba i budynków. Zdjęcia wykonano w formacie RAW, a następnie dokonano wyostżenia oraz nasycenia dla ukazania przebiegu drogi smugi. Po korekcie zostały dodane linie, które mają pomóc w odczytaniu z fotografii konturów zarejestrowanych smug.

4. WYNIKI I DYSKUSJA

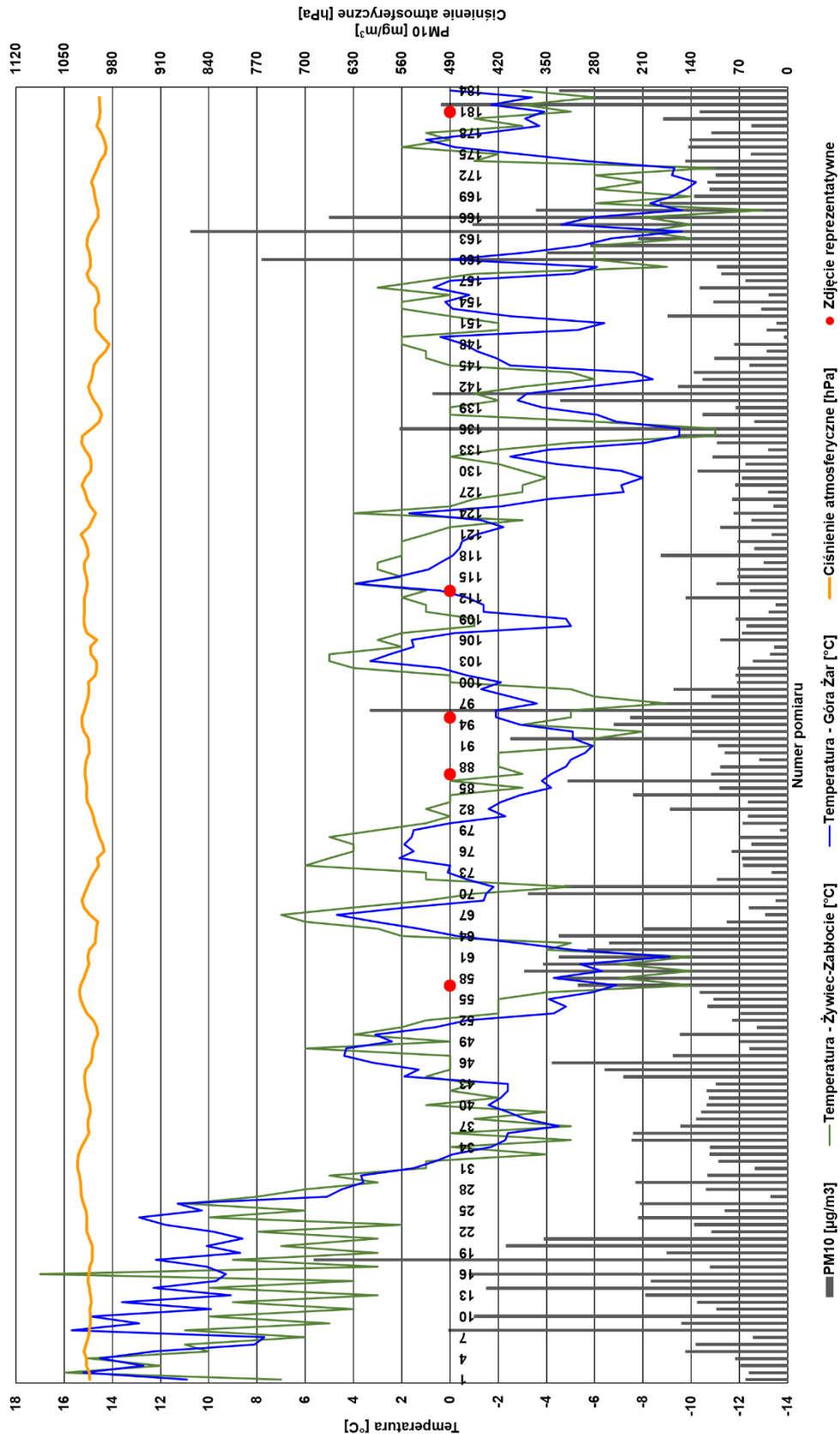
4.1. Wpływ warunków atmosferycznych na emisję pyłu

Analiza zależności temperatur powietrza i stężeń pyłu zawieszonego ujawniły prawdopodobieństwo dobrej lub złej jakości powietrza. Okresy występowania niższych temperatur w kotlinie (np. 8,3°C) i jednocześnie wyższych ponad kotliną (np. 12,2°C) sugerowały istnienie inwersji, a tym samym złej jakości powietrza (w tym dniu 687 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10). Okresy takie trwały w następujących dniach obserwacji: 4–12 listopada, od 29 listopada do 3 grudnia, 19–23 stycznia oraz 30–31 stycznia. W dniach 7–16 grudnia panowały warunki sprzyjające poprawie i dobrej jakości powietrza (przykładowe stężenie 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10), gdyż w dniu kotliny notowano wyższą temperaturę (3°C) niż na górze Żar (1,5°C). Analogicznie było w okresie od 20 grudnia do 6 stycznia, kiedy to średnia temperatura w Żywcu wynosiła 0,14°C, a na górze Żar minus 1,64°C, natomiast średnia emisja pyłu zawieszonego PM10 wynosiła 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Z analizy danych wynika, że wszystkie frakcje pyłu zawieszonego – PM10, PM2,5 i PM1,0 – współdzieliły okresy wzrostu i spadku swych wartości, a okresy inwersji termicznej pokrywały się ze wzrostami zapylenia (Rys. 2–4). Dodatkowo widoczna była fluktuacja pomiędzy odczytanymi wartościami porannymi i wieczornymi – wskazuje to na zmiany do jakich dochodzi w ciągu doby, gdy zarówno miasto, jak i gospodarstwa domowe są wieczorem w szczyście rytmu dobowego, tj. konsumpcji paliw, tranzytu, bytowych funkcji domostw.

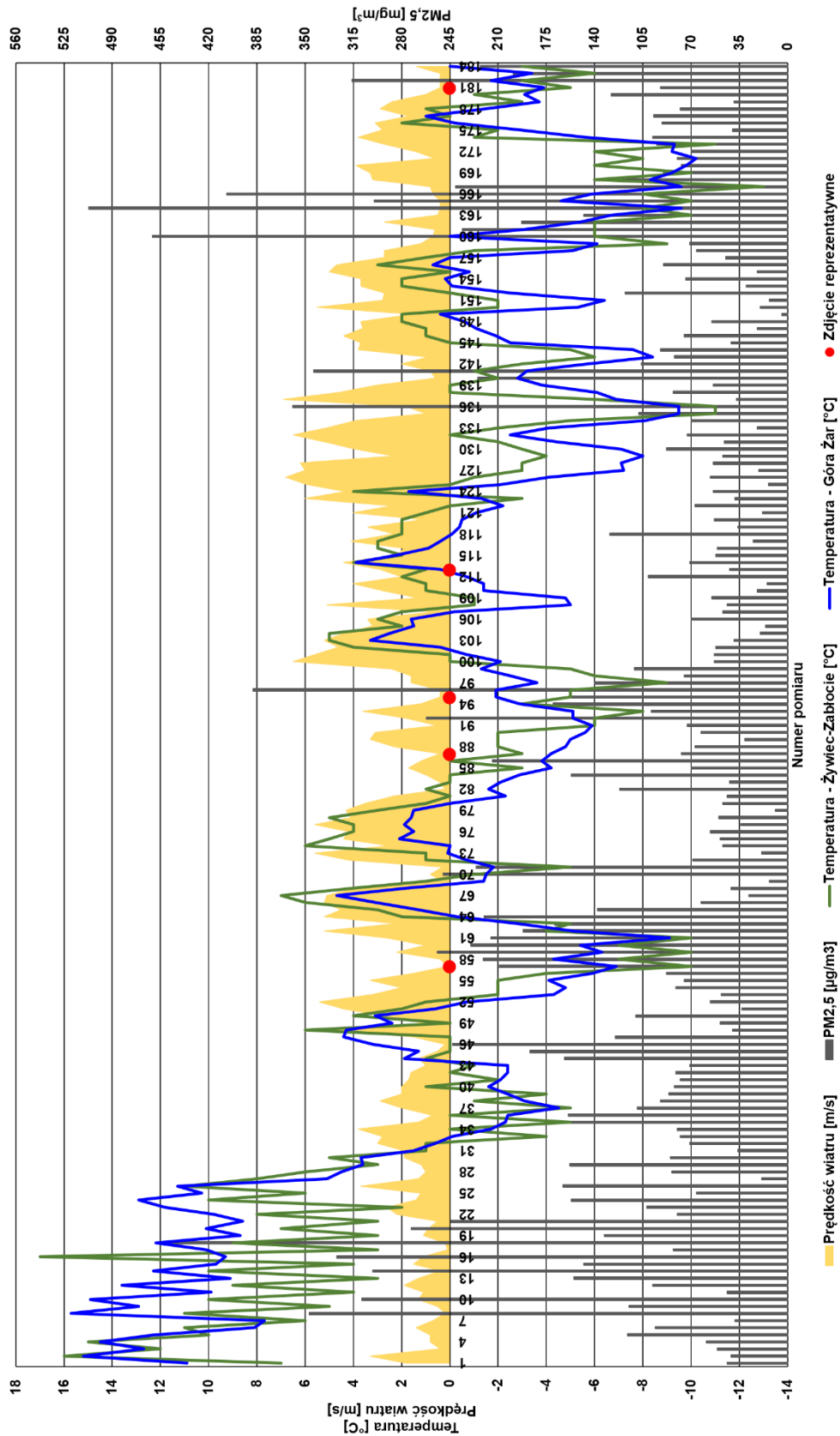
Analiza danych wskazuje, że większe zapylenie powietrza występowało w warunkach wzrastającego ciśnienia (Rys. 2), aczkolwiek korelacja była nieistotna – współczynniki korelacji między stężeniami pyłu PM10, PM2,5 i PM1,0 oraz ciśnieniem atmosferycznym (pomiar na górze Żar) wynosiły odpowiednio: 0,13, 0,15, 0,15.

Jednym z głównych czynników, wpływających na jakość powietrza, zwłaszcza w warunkach terenowych kotliny, jest wiatr, który może znacznie wpłynąć na poprawę ogólnych warunków atmosferycznych oraz jakości powietrza. Jest to bezpośrednio zależne od kierunku i siły wiatru. Z danych wynika, że małe prędkości wiatru korespondowały ze wzrostami emisji pyłu zawieszonego (Rys. 3) – w takich okresach panują lepsze warunki do łączenia się koloidów, które nie są wywiewane poza kotlinę. Współczynniki korelacji między stężeniami pyłu PM10, PM2,5 i PM1,0 oraz prędkością wiatru w dniu kotliny (stacja Radziechowy) wynosiły odpowiednio: -0,49, -0,51, -0,56.



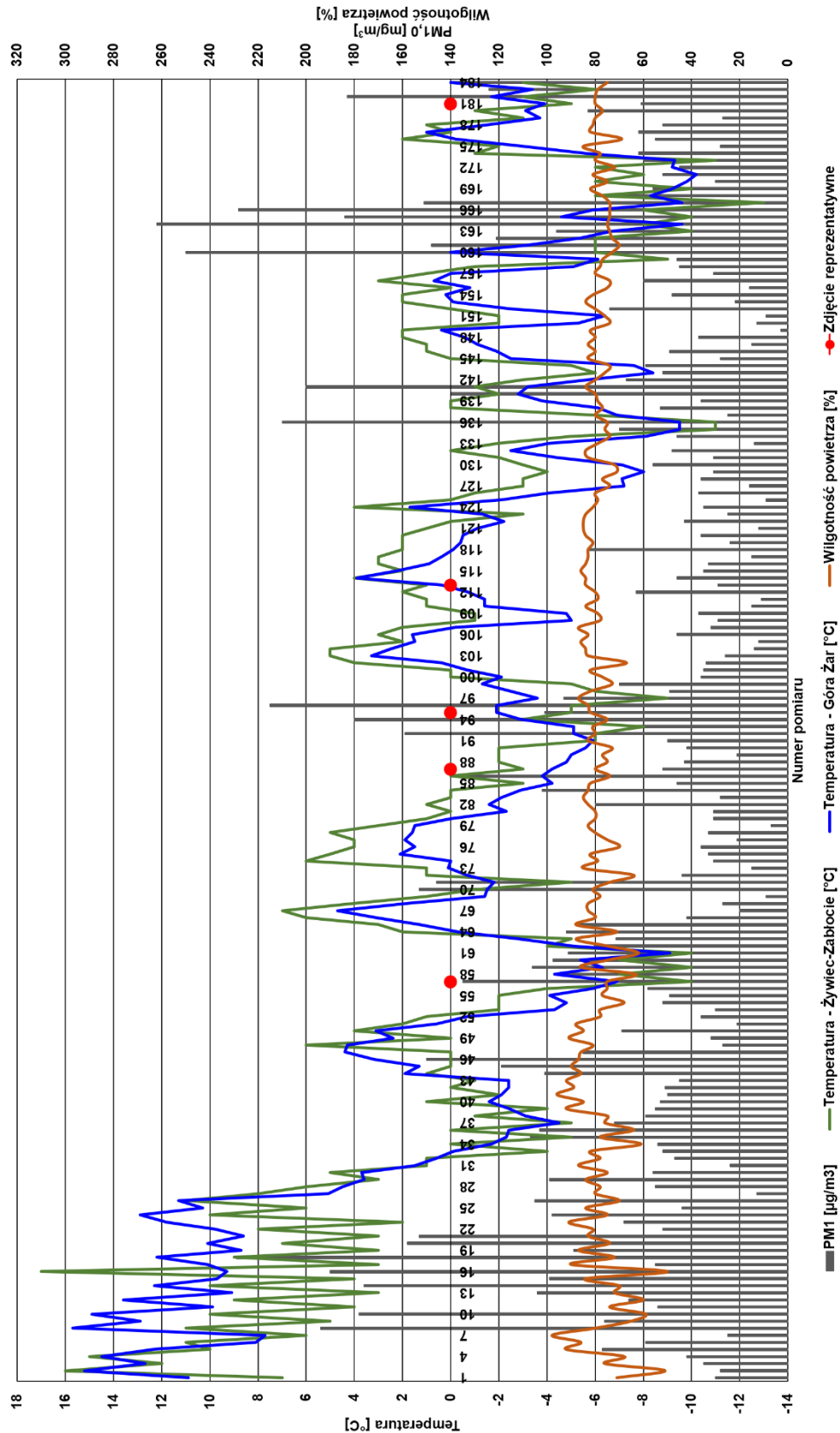
Rys. 2. Zmiany temperatur powietrza na górze Żar oraz w dnie kotliny oraz stężeń pyłu PM10 i ciśnienia atmosferycznego.

Fig. 2. Air temperature changes at the top of Żar and at the bottom of the valley and concentrations of PM10 and atmospheric pressure.



Rys. 3. Zmiany temperatur powietrza na górze Żar oraz w dnie kotliny oraz stężenie pyłu PM2,5 i prędkość wiatru.

Fig. 3. Air temperature changes at the top of Żar and at the bottom of the valley and concentrations of PM2.5 and wind speed.



Rys. 4. Zmiany temperatur powietrza na górze Żar oraz w dnie kotliny oraz stężenia pyłu PM1,0 i wilgotności powietrza.

Fig. 4. Air temperature changes at the top of Żar and at the bottom of the valley and concentrations of PM1.0 dust and air humidity.

Wilgotność powietrza to kolejny parametr, który może wpływać na jego jakość, bowiem wilgoć pozwala na agregację pyłów, co skutkuje zwiększeniem masy i opadaniem aerozoli [McNaught i Wilkinson 1997, Majewski i in. 2011]. Podczas analizy danych stwierdzano sytuacje wzrostu zanieczyszczenia pyłowego przy spadku wilgotności, jednak zmiany wartości były małe (Rys. 4). Współczynniki korelacji między stężeniami pyłu PM₁₀, PM_{2,5} i PM_{1,0} oraz wilgotnością powietrza rejestrowaną w tym samym punkcie wynosiły odpowiednio: -0,24, -0,25, -0,24.

4.2. Wpływ stanu atmosfery na kształt smug kominowych

Nagromadzenie ciepła w spalinach stanowi o odmienności zachowania się gazów odlotowych (smug zanieczyszczeń) w stosunku do otaczającego powietrza. Na kształt smug kominowych i tym samym rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń wpływają różne czynniki, w tym zwłaszcza prędkość wiatru, ale także pionowy gradient temperatury, który decyduje o pionowej dyspersji zanieczyszczeń. Obserwacje smug pozwoliły na zobrazowanie różnych stanów atmosferycznych, wpływających na sposób zachowania się zanieczyszczonych gazów. Wybrane przypadki przedstawiono na fotografiach (Rys. 5–9).

Fotografie smug zostały wykonane w czasie oznaczonym na rysunkach 2–4 (kropki na osi X). Każde zdjęcie, przedstawiające konkretny typ smugi kominowej, zostało opisane warunkami atmosferycznymi w danym dniu. Fotografie zostały wybrane spośród 200 wykonanych zdjęć zachowania się gazów odlotowych emitowanych z kominów domów jednorodzinnych.

Przykład pierwszy (Rys. 5) to smuga przyjmująca kształt stożkowy. Wystąpiła ona w następujących warunkach meteorologicznych: brak zachmurzenia, prędkość wiatru w dnie kotliny 0,4 m/s, natomiast ponad kotliną (góra Żar) 4,92 m/s, przeważający kierunek wiatru – północny, wilgotność powietrza rzędu 63%, inwersja termiczna. Były to warunki sprzyjające opadaniu zimnego powietrza ku powierzchni terenu. Przełożyły się one na wynoszenie zanieczyszczeń na małą wysokość i nieznaczną odległość oraz niską jakość powietrza. Wartość imisji pyłu PM₁₀ odczytana w czasie rejestrowania smugi wynosiła 334 µg/m³.



Rys. 5. Smuga kominowa zaobserwowana 29 listopada o godzinie 18:00 – typ stożkowy (fot. R. Szczepaniak).

Fig. 5. The wastegases streak (coning type) observed on 29th of November at 6:00 pm (photo by R. Szczepaniak).

Przykład drugi to również smuga stożkowa (Rys. 6), charakterystyczna dla stanu równowagi obojętnej. Smuga została zarejestrowana 14 grudnia w następujących warunkach atmosferycznych: prędkość wiatru 2,3 m/s, wiatr z kierunku północnego, pochmurne niebo, cieplejsze dno kotliny (o ok. 2,8°C) od otaczających szczytów, wilgotność powietrza na poziomie 75%. Warunki takie pozwalały na przewietrzenie kotliny. Dyspersja zanieczyszczeń obejmowała większy obszar, a jakość powietrza była dobra – imisja PM10 równa 97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys. 6. Smuga kominowa zaobserwowana 14 grudnia o godzinie 18:00 – typ stożkowy (fot. R. Szczepaniak).

Fig. 6. The wastegases streak (coning type) observed on 14th of December at 6:00 pm (photo by R. Szczepaniak).

Przykład trzeci to smuga zarejestrowana 18 grudnia o godzinie 18:00, sklasyfikowana jako smuga typu zanieczyszczającego. Warunki atmosferyczne, jakie panowały w momencie obserwacji, to przede wszystkim mała prędkość wiatru z kierunku SW (wynosząca 0,4 m/s), pochmurne niebo, ochłodzenie w dnie kotliny (temperatura niższa o 3,1°C w porównaniu do szczytów), wilgotność powietrza 83%. Takie warunki skutkowały dyspersją zanieczyszczeń na bardzo małym terenie w okolicy emitora oraz złą jakością powietrza. Stężenie pyłu PM10 w powietrzu wynosiło 606 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Rys. 7. Smuga kominowa zaobserwowana w dniu 18 grudnia o godzinie 18:00 – typ zanieczyszczający (fot. R. Szczepaniak).

Fig. 7. The wastegases streak (fumigation type) observed on 18th of December at 6:00 pm (photo by R. Szczepaniak).

Przykład czwarty to smuga zaklasyfikowana jako wentylacyjna, zarejestrowana 27 grudnia (Rys. 8). W momencie rejestracji panowały następujące warunki atmosferyczne: wiatr w dnie kotliny z kierunku S o prędkości 4,4 m/s, małe zachmurzenie, zbliżona temperatura powietrza w kotlinie i na górze Żar, wilgotność powietrza na poziomie 84%. Obserwowano szybkie załamanie smugi kominowej i dyspersję zanieczyszczeń na małym obszarze spowodowaną wiatrem. Stężenie PM10 wynosiło 103 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

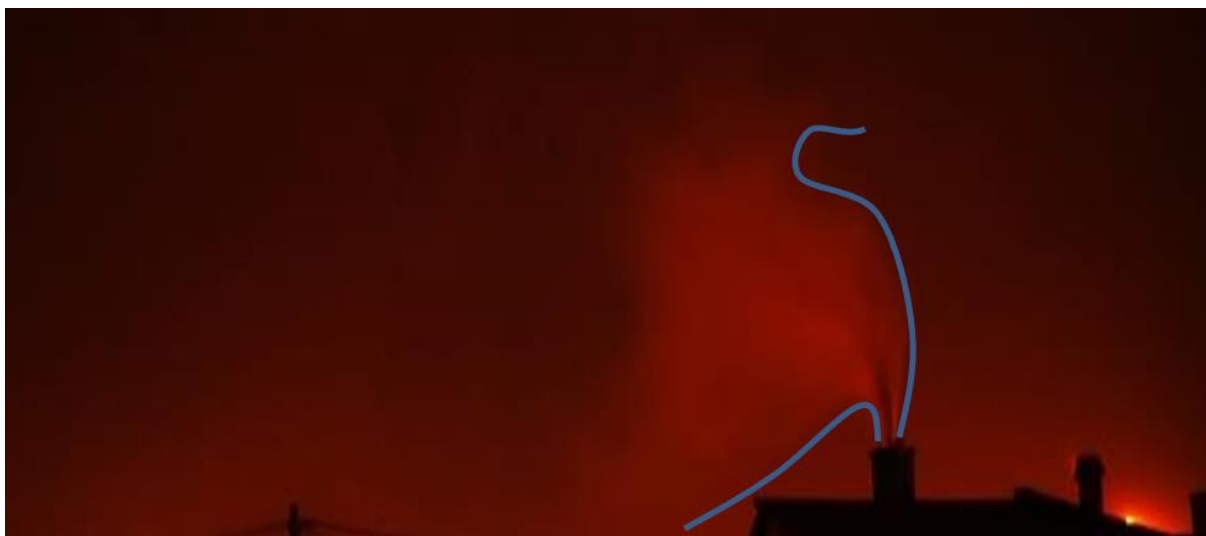


Rys. 8. Smuga kominowa zaobserwowana w dniu 27 grudnia o godzinie 18:00 – typ wentylacyjny (fot. R. Szczepaniak).

Fig. 8. The wastegases streak (fanning type) observed on 27th of December at 6:00 pm (photo by R. Szczepaniak).

Przykład piąty to smuga pętlowa, zakwalifikowana na podstawie wyglądu – ze względu na zawirowania i turbulencje towarzyszące rozprzestrzenianiu spalin (Rys. 9). Została sfotografowana 30 stycznia. W momencie obserwacji występowały: zawirowania wiatru, mała

prędkość wiatru (0,4 m/s) z kierunku SW, duże zachmurzenie, ochłodzenie dna kotliny (o 1,3°C) w stosunku do szczytów, wilgotność powietrza na poziomie 80%. Wiatr był zbyt słaby, aby wymienić powietrze w kotlinie, co wywołało znaczne pogorszenie jakości powietrza (emisja PM10 wynosiła 503 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



Rys. 9. Smuga kominowa zaobserwowana w dniu 30 stycznia o godzinie 18:00 – typ pętlowy (fot. R. Szczepaniak).

Fig. 9. The wastegases streak (looping type) observed on 30th of January at 6:00 pm (photo by R. Szczepaniak).

5. WNIOSKI

1. W okresach występowania inwersji termicznej dochodziło do wzrostu emisji pyłu zawieszonego w przyziemnej warstwie atmosfery.
2. Wszystkie frakcje pyłu zawieszonego współdziałały wzrosty i spadki stężeń, a okresom pogorszenia jakości powietrza towarzyszyły smugi kominowe typu zanieczyszczającego lub, przy zawirowaniach wiatru, pętlowego.
3. Wzrost prędkości wiatru skutkowało spadkiem stężeń zanieczyszczeń pyłowych na danym terenie i przyczyniało się do tworzenia smug wentylacyjnych.

LITERATURA

- Alert smogowy – witryna internetowa alertsogowy.pl (dostęp 17 V 2019 r.).
- Juda-Rezler K., Toczko B. (red.) 2016. Pyły drobne w atmosferze. Kompendium wiedzy o zanieczyszczeniu powietrza pyłem zawieszonym w Polsce. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Kaczorowska Z. 1977. Pogoda i klimat. Wydanie 2 poprawione. Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.
- Karamouz M., Nazif S., Falahi M. 2012. Hydrology and Hydroclimatology: Principles and Applications. CRC Press, Boca Raton – London – New York.
- Kiepas A. 2001. Etyczne i socjologiczne aspekty ochrony środowiska: Zarządzanie środowiskiem Cz. 1. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Kożuchowski K. (red.) 2005. Meteorologia i klimatologia. PWN, Warszawa.
- Pałasz J.W. 2016. Niska emisja ze spalania węgla i metody jej oczyszczenia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Szargut J. 2000. Termodynamika techniczna. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.