

ELŻBIETA KORZENIOWSKA-REJMER\*, AGNIESZKA GENEROWICZ\*\*

## WPLYW WARUNKÓW METEROLOGICZNYCH I TERENOWYCH NA ROZPRZESTRZENIANIE ZANIECZYSZCZEŃ ZE SKŁADOWISK KOMUNALNYCH W POWIETRZU ATMOSFERYCZNYM

### IMPACT OF METEOROLOGICAL AND FIELD CONDITIONS ON AIR POLLUTANTS SPREADING FROM MUNICIPAL WASTE LANDFILLS

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ warunków meteorologicznych i lokalnych warunków terenowych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym z powierzchniowego źródła zanieczyszczeń, jakim są składowiska odpadów. Rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym w postaci tzw. obłoku zanieczyszczeń może sięgać kilkuset metrów od składowiska. Wieloletnie obserwacje i badania autorka na terenach objętych składowaniem odpadów wskazują, że zasadniczymi elementami wpływającymi na zachowanie się obłoku zanieczyszczeń w rejonie składowiska są: stopień pionowej stateczności powietrza, kierunek i prędkość wiatru oraz charakter turbulencji powietrza, opady atmosferyczne oraz ukształtowanie i rodzaj pokrycia terenu. Wszystkie te uwarunkowania powinny być brane pod uwagę przy ocenie terenu pod względem jego perspektywicznej przydatności do lokalizacji składowiska, jak również na etapie projektowania odpowiednich zabezpieczeń antimigracyjnych.

*Słowa kluczowe: składowiska odpadów, zanieczyszczenia, emisja do atmosfery*

#### Abstract

The paper presents the influence of meteorological and local terrain conditions for the possibility of the spread of pollutants in ambient air from the surface sources of pollution e.g. landfills. The spread of pollutants in ambient air, in the form of so-called "cloud of pollution" can reach a few hundred meters from the landfill. Many years of observation and research in the areas covered by the authors waste disposal indicates that the essential elements affect the behavior of a cloud of pollutants over the area of the landfill are: degree of vertical air stability, wind direction and speed and nature of air turbulence, precipitation, and shape and type of land cover. All these factors should be taken into account when assessing the site in terms of its suitability for the prospective location of the landfill as well as adequate security at the design stage anti-migration.

*Keywords: landfills of waste, pollution, emissions to the atmosphere*

\* Dr Elżbieta Korzeniowska-Rejmer, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

\*\* Dr inż. Agnieszka Generowicz, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Składowiska odpadów komunalnych stanowią potencjalne źródła zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego bezpośrednio nad składowiskiem (wysypiskiem) oraz obszarami przyległymi do składowiska. W powietrzu atmosferycznym zanieczyszczenia mogą się rozprzestrzeniać na znaczne odległości i skażać środowisko zupełnie w nieoczekiwanych miejscach [1, 16], dlatego też przy wyborze lokalizacji ważne jest rozpoznanie lokalnych (dominujących) warunków meteorologicznych w przyziemnej warstwie atmosfery (takich jak: stany pionowej stateczności powietrza, prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza, opady atmosferyczne) oraz warunków terenowych (ukształtowanie terenu i jego pokrycie).

Składowisko odpadów jest obiektem budowlanym, przeznaczonym do składowania odpadów, stanowiącym ostatnie ogniwo systemu gospodarki odpadami, którego zadaniem jest zabezpieczenie środowiska przed negatywnym wpływem składowanych odpadów [5, 6, 12].

Budowa i eksploatacja całego systemu zabezpieczeń jest trudnym zadaniem inżynierskim, zależnym od warunków terenowych, budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i gruntowo-wodnych w podłożu. Dlatego też kluczowym problemem będzie tu znalezienie prawidłowej lokalizacji, uwzględniającej oprócz warunków terenowych również warunki meteorologiczne w przyziemnej warstwie atmosfery [8, 15, 22].

Na podstawie wieloletnich obserwacji i badań autorek niniejszego artykułu na terenach składowania odpadów – starych wysypisk i nowo budowanych – można stwierdzić, że decydujące znaczenie w rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń w atmosferze mają następujące czynniki:

- właściwa lokalizacja składowiska uwzględniająca lokalne warunki terenowe,
- uwarunkowania meteorologiczne w przyziemnej warstwie atmosfery (prędkość i kierunki wiatru, warunki pogodowe o małej wymianie powietrza),
- warunki topograficzne, mikroklimat,
- obecność i jakość barier antymigracyjnych.

Czynniki te mogą znacząco wpływać na stan środowiska, osłabiać lub potęgować zagrożenie wywołane funkcjonowaniem składowiska [14]. Do podstawowych potencjalnych zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego w wyniku funkcjonowania składowisk należą: gaz wysypiskowy, zanieczyszczenia mikrobiologiczne, pyły, odory, dym.

W niniejszym artykule pod uwagę wzięto emisję do powietrza, czyli wprowadzane, bezpośrednio lub pośrednio do środowiska substancje, w wyniku składowania odpadów. Tworzą one w powietrzu atmosferycznym nad czaszą składowiska obłok zanieczyszczonego powietrza, tzw. obłok zanieczyszczeń. W przypadku emisji gazu wysypiskowego, bioaerozoli i odorów obłok nie ma wyraźnych kształtów ani granic, jest optycznie przezroczysty w przeciwieństwie do obłoku dymów i pyłów towarzyszących w trakcie jego eksploatacji [11, 19]. Obłok taki może utrzymać się w obszarze składowiska, migrować w kierunku górnych warstw atmosfery lub w inne obszary atmosfery. Może również ulegać zniekształceniu, rozrzedzeniu lub innym przemianom fizykochemicznym [16].

Znajomość tych zagadnień może być pomocna nie tylko podczas poszukiwania lokalizacji składowisk, ale również na etapie projektowania barier uszczelniających składowiska wraz z projektem pasa zieleni izolującej, co jest niejednokrotnie pomijane.

## 2. Składowiska odpadów komunalnych jako powierzchnie źródła zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego

Na terenie starych składowisk, nieprawidłowo lub wcale nieuszczelnionych, może wystąpić możliwość wydostania się gazu wysypiskowego lub powietrza glebowego do atmosfery. Brak wiatru lub warunki pogodowe niesprzyjające wymianie powietrza mogą stworzyć sytuacje, w których możliwe jest powstawanie wysokich stężeń zanieczyszczeń w powietrzu. Szczególny problem przedstawiają substancje o bardzo silnym zapachu, jak np. tioalkohole, siarkowodór, fosforowodór, związki fosforu i siarki i inne [3, 5, 11]. Ich obecność wyczuwa się powonieniem, wymykają się jednak często spod analitycznego potwierdzenia i kwantyfikacji [3, 14, 21].

W stosunku do otaczającej przestrzeni powietrza atmosferycznego obiekty, które wydzielają szkodliwe gazy, do których należy zaliczyć miejsca deponowania odpadów, należy traktować jako powierzchniowe źródła zanieczyszczeń powietrza. W zależności od warunków lokalnych, szkodliwe substancje w formie gazów lub aerozoli przemieszczają się na otaczający obszar emisji. Przez to przestrzeń powietrzna bezpośrednio ponad składowiskiem oraz powietrze glebowe w podłożu otaczającym ognisko zagrożenia, ulegają zanieczyszczeniu [3, 14].

Składowiska odpadów komunalnych są źródłem emisji znaczących ilości metanu ( $\text{CH}_4$ ) oraz dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ) i dla tych związków najbardziej prawdopodobne jest przekroczenie wartości progowych zawartych w Rozporządzeniu (WE) Nr 166/2006 Parlamentu Europejskiego i Rady Europy z dnia 18 stycznia 2006 r. w sprawie ustanowienia Europejskiego Rejestru Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń [6, 7, 10]. Ponadto w mniejszych ilościach uwalniane są również niemetanowolne związki organiczne (NMVOC), podtlenek azotu ( $\text{N}_2\text{O}$ ), tlenek węgla ( $\text{CO}$ ), amoniak ( $\text{NH}_3$ ), tlenki siarki ( $\text{SO}_x$ ) i tlenki azotu ( $\text{NO}_x$ ), związki siarki (siarkowodór i merkaptany), węglowodory aromatyczne (benzen, toluen, ksylen), chlorowcopochodne węglowodorów (chlorek metylenu, nadchloran etylenu, chlorek winylu), lotne kwasy tłuszczowe, aminy [3, 11, 23].

Rodzaj i ilość zanieczyszczeń gazowych emitowanych z wysypiska/składowiska określa się na podstawie analizy składu gazu wysypiskowego i/lub bezpośrednich pomiarów stężeń tych substancji w powietrzu atmosferycznym.

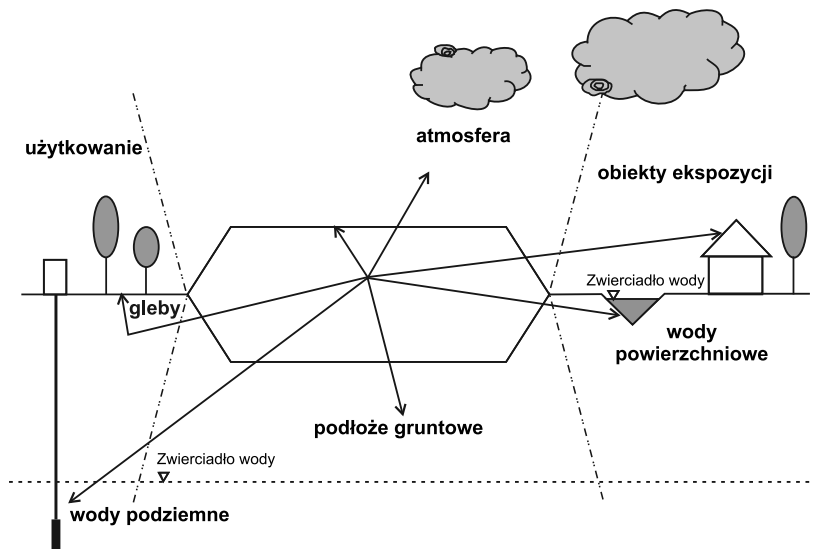
Wydostający się gaz może, zwłaszcza jeśli powstaje w dużych ilościach, oddziaływać jako gaz nośny dla innych gazów, które bez niego nigdy nie opuściłyby najbliższego otoczenia ogniska zagrożenia, np. substancje śladowe w gazie składowiskowym, jak węglowodory chlorowane, fosforowodory, nisko-cząsteczkowe kwasy organiczne [2, 3, 9].

Rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym może sięgać kilkuset metrów od źródła zanieczyszczeń [3, 11]. Znane są liczne przypadki migracji gazu wysypiskowego w podłożu gruntowym w odległości 200 m od składowiska, gdzie stężenie metanu wynosiło ponad 10% składu gazu. W przypadku składowisk zlokalizowanych w skałach spękanych i w skałach uwarstwionych gaz wysypiskowy może migrować na odległości ponad 1000 m przez rysy, szczeliny i spękania [16].

Zasięg migracji gazu wysypiskowego i związane z tym zagrożenia mogą ulegać zmianom, które zależą m.in. od produktywności składowiska, ciśnienia gazu w złożu odpadów, zwięzłości podłoża wokół składowiska i szczelności warstwy przykrywającej odpady oraz czynników atmosferycznych.

Ocena zagrożeń wynikających z migracji gazu powinna się opierać na:

- szacunku ilości gazów cieplarnianych (metanu i dwutlenku węgla) emitowanych z gazem wysypiskowym do atmosfery,
- określeniu rodzaju i ilości lotnych szkodliwych substancji zanieczyszczających atmosferę na składowisku i wokół niego, wraz z określeniem sposobu i zasięgu rozchodzenia się tych zanieczyszczeń,
- wyznaczeniu zasięgu migracji gazu wokół składowiska,
- ocenie uciążliwości zapachowej składowiska.



Rys. 1. Drogi emisji substancji z niezabezpieczonych składowisk odpadów

Fig. 1. Ways emissions from unprotected landfill

Protokół z Kioto [17] wyznacza wiążące cele redukcji gazów cieplarnianych (metan, dwutlenek węgla, podtlenek azotu, fluorowęglowodory, sześćiofluorek siarki, perfluorowęglowodory), wskazując na silne oddziaływanie metanu na środowisko naturalne. Wskaźnik efektu cieplarnianego metanu jest 21 razy większy niż w przypadku dwutlenku węgla, pochłanianie promieniowanie podczerwone 60 razy bardziej niż  $\text{CO}_2$ , przyczyniając się do zatrzymania energii cieplnej w otoczeniu Ziemi [9, 11]. Na wielkość migracji metanu i dwutlenku węgla poza składowisko ma wpływ również sposób wykonania uszczelnienia powierzchni i rekultywacji oraz okresowe warunki atmosferyczne [12, 22].

W tabeli 1 przedstawiono wykaz zanieczyszczeń uwalnianych do powietrza wg Europejskiego Rejestru Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń E-PRTR.

Znaczne emisje zanieczyszczeń do atmosfery z eksploatowanych dużych powierzchni lub z niezabezpieczonych powodują unoszone pyły (cząstki o średnicach frakcji pyłowych i ilowych) w wyniku prowadzonych prac ziemnych, związanych z transportem, wykopami czy nasypami na powierzchniach skażonych, przenoszone na znaczne odległości (tabela 2). Mogą one być nośnikiem metali, substancji toksycznych czy materiałów radioaktywnych

Tabela 1

**Wykaz zanieczyszczeń uwalnianych do powietrza wg Europejski Rejestru Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń [11]**

Nr zanieczyszczenia wg załącznika nr II do Rozporządzenia E-PRTR	Nr CAS <sup>*)</sup>	Grupa zanieczyszczeń	Rodzaj zanieczyszczenia	Próg uwolnienia w [kg/rok]
<b>UWOLNIENIA DO POWIETRZA</b>				
1	74-82-8	Gazy cieplarniane	Metan (CH <sub>4</sub> )	100 000
2	630-08-0	Gazy inne	Tlenek węgla (CO)	500 000
3	124-38-9	Gazy cieplarniane	Dwutlenek węgla CO <sub>2</sub>	100 000 000
5	10024-97-2	Gazy cieplarniane	Podtlenek azotu (N <sub>2</sub> O)	10 000
6	7664-41-7	Gazy inne	Amoniak (NH <sub>3</sub> )	10 000
8	Gazy inne	Tlenki azotu (NO <sub>x</sub> )	100 000	8
11	Gazy inne	Tlenki siarki (SO <sub>x</sub> )	150 000	11
17	Metale ciężkie	Arsen i jego związki (jako As)	20	17
18	Metale ciężkie	Kadm i jego związki (jako Cd)	10	18
19	Metale ciężkie	Chrom i jego związki (jako Cr)	100	19
20	Metale ciężkie	Miedź i jej związki (jako Cu)	100	20
21	Metale ciężkie	Rtęć i jej związki (jako Hg)	10	21
22	Metale ciężkie	Nikiel i jego związki jako (Ni)	50	22
24	Metale ciężkie	Cynk i jego związki jako (Zn)	200	24
42	Chlorowane substancje organiczne	Sześciochlorobenzen (HCB)	10	42
47	Chlorowane substancje organiczne	Dioksyny i furany (jako Teq)	0,0001	47
86	Substancje nieorganiczne	Pył zawieszony (PM10)	50 000	86

<sup>\*)</sup> CAS – oznaczenie numeryczne przypisane substancji chemicznej przez amerykańską organizację Chemical Abstracts Service (CAS), pozwalające na identyfikację substancji [11].

[13, 14]. Czasami na powierzchni składowiska lub w jego wnętrzu może pojawić się pożar. Dym powstający podczas takiego zjawiska często zawiera wiele niebezpiecznych związków chemicznych. Szczególnie istotne znaczenie w przypadku pożarów składowisk ma emisja dioksyn i furanów. Są to trucizny o powolnym, ale skutecznym działaniu, a ich wpływ na powstawanie zwyrodnień w organizmach żywych i obniżanie odporności na choroby może objawić się dopiero w następnych pokoleniach. Dioksyny należą do grupy czynników rakotwórczych [20].

Tabela 2

**Parametry wpływające na emisję pyłów z powierzchni skażonych**

Własności materiałowe oraz własności powierzchni	Wpływy meteorologiczne	Wpływy mechaniczne na powierzchniach skażonych
Rodzaj gruntu Zawartość frakcji drobnej Wielkość cząstek Wilgotność gruntu Struktura powierzchni Roślinność	Prędkość wiatru Kierunek wiatru Opady	Ruch pojazdów, transport materiałów Roboty ziemne z użyciem sprzętu (koparki, ładowarki, spychacze, kompaktory i inne)

### 3. Stan atmosfery a zachowanie się obłoku zanieczyszczeń

Pogoda lub stan pogody to stan rzeczywisty czynników meteorologicznych obserwowanych w danej chwili w pewnym określonym miejscu lub na pewnym określonym obszarze (stan fizyczny atmosfery zmienny w czasie i przestrzeni). Zasadniczymi elementami wpływającymi na zachowanie się obłoku zanieczyszczeń nad obszarem składowiska są:

- stopień pionowej stateczności powietrza,
- kierunek i prędkość wiatru oraz charakter turbulencji powietrza,
- opady atmosferyczne.

Należy również brać pod uwagę temperaturę, obecność i możliwość opadów, zachmurzenie i ciśnienie atmosferyczne.

#### 3.1. Pionowa stateczność powietrza

Rozróżnia się trzy stopnie pionowej stateczności powietrza: inwersję, konwekcję i izotermię (tabela 3) [10].

Przy inwersji temperatura przyziemnych warstw powietrza stopniowo wzrasta, gęstość zaś przy oddalaniu się od powierzchni maleje. Inwersję obserwuje się latem po zachodzie słońca lub w mroźne dni. Powstaje ona wskutek szybkiego ochładzania się powierzchni ziemi w porównaniu z powietrzem, jako złym przewodnikiem ciepła. Chłodna powierzchnia ziemi ochładza przylegające do niej warstwy powietrza, które stają się zimniejsze i gęstsze od warstw wyższych. Największy spadek temperatury przy inwersji ma miejsce nie przy samej powierzchni, lecz na pewnej wysokości od niej. Cząstki zanieczyszczeń w obłoku stosunkowo łatwo rozprzestrzeniają się w warstwach sąsiadujących z powierzchnią ziemi, gdzie inwersja nie jest znaczna. Natomiast przejście chłodnych mas powietrza zawierających zanieczyszczenia do warstw o wyraźnej inwersji jest bardzo utrudnione [19]. Wytworzony

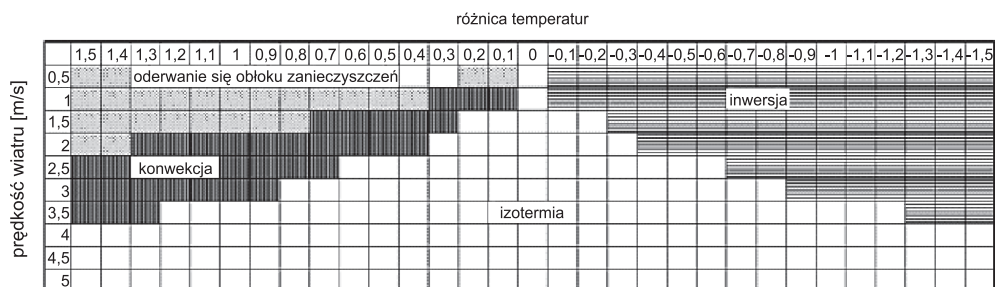
podczas inwersji obłok zanieczyszczeń będzie przesuwiał się pod wpływem wiatrów bezpośrednio nad powierzchnią składowiska.

Przy konwekcji niższe, przylegające do powierzchni ziemi warstwy powietrza mają mniejszą gęstość i wyższą temperaturę niż warstwy górne. Konwekcję obserwuje się w letnie dni przy braku zachmurzenia. Powstaje ona wskutek silniejszego nagrzewania powierzchni ziemi w porównaniu z powietrzem. Ogrzana powierzchnia ziemi oddaje swoje ciepło przylegającym do niej warstwom powietrza. Warstwy te rozszerzają się, stają się lżejsze i pod wpływem chłodniejszych i gęstszych warstw powietrza unoszą się do góry. Ogrzewanie przylegających do ziemi warstw powietrza odbywa się bardzo nierównomiernie [17, 19]. W wyniku tego przy konwekcji tworzą się liczne prądy miejscowe oraz zachodzi pionowe mieszanie się powietrza. Przy konwekcji obłok zanieczyszczeń szybko ulega rozrzedzeniu, unosząc się ku górnym warstwom powietrza.

Izotermia charakteryzuje się tym, że temperatura i gęstość powietrza na wysokości około 20-30 m nad powierzchnią ziemi są na ogół stałe. Izotermia występuje przy pochmurnej pogodzie. Gęste, nisko uformowane obłoki przeszkadzają intensywnemu nagrzananiu w ciągu dnia dolnych warstw powietrza i powierzchni ziemi oraz ochładzaniu ich podczas nocy. Izotermia wytwarza się także zimą, kiedy przy bezchmurnym niebie ogrzewanie niższych warstw powietrza zachodzi bardzo nieznacznie. Wówczas temperatura w przyziemnych i wyższych warstwach jest prawie stała. Latem w godzinach rannych i wieczornych temperatura powietrza w pionie także może być jednakowa. W tym przypadku nocna inwersja ustępuje na skutek rozpoczynającego się ogrzewania powierzchni ziemi, a konwekcja jeszcze nie występuje [10, 19]. Przy izotermii obłok zanieczyszczeń będzie miał tendencje do utrzymywania się w obszarze składowiska.

Stopień pionowej stateczności przyziemnej warstwy atmosfery określa się gradientem temperatur. Gradient temperatur jest to różnica między temperaturą powietrza przy powierzchni ziemi a temperaturą na pewnej wysokości (około 2 m). Ujemny gradient wskazuje obecność inwersji. Przy dodatnim gradiencie występuje konwekcja.

W przypadku kiedy pionowy gradient temperatur ma wartość ujemną (inwersja) lub bliską zeru (izotermia), rozpraszanie i rozprzestrzenianie się obłoku zanieczyszczeń zachodzi



Rys. 2. Wykres do określania pionowej stateczności przyziemnej warstwy powietrza na podstawie wyników obserwacji meteorologicznych [18]

Fig. 2. Graph for determining the vertical stability of ground-level air layer on the basis of meteorological observations [18]

w przyziemnej warstwie atmosfery. Natomiast przy dodatnich wartościach pionowego gradientu temperatury istnieją warunki do całkowitego przemieszczania się obłoku zanieczyszczeń w górne warstwy atmosfery. Taka sytuacja może zaistnieć wraz ze spadkiem prędkości wiatru lub przy wietrze słabym. Wówczas obłok zanieczyszczeń może całkowicie oderwać się od ziemi.

Stan pionowej stateczności przyziemnej warstwy atmosfery w decydujący sposób wpływa na czasowo-przestrzenne warunki zagrożenia obłokiem zanieczyszczeń środowiska naturalnego.

Rodzaj stanu pionowej stateczności powietrza można określić na podstawie danych z obserwacji meteorologicznych lub danych o prognozie pogody (rys. 2 i 3, tabela 3).

prędkość wiatru [m/s]	NOC			DZIEŃ		
	pogodnie	średnie zachmurzenie	pochmurno	pogodnie	średnie zachmurzenie	pochmurno
0,5	inwersja			kowersja		
0,6-2,0						
2,1-0,4	izotermia			izotermia		
ponad 4,0	izotermia			izotermia		

Uwaga: pogodnie: 0-2 stopni, zachmurzenie średnie: 3-7 stopni, pochmurno: 8-10 stopni

Rys. 3. Wykres do określania pionowej stateczności przyziemnej warstwy powietrza na podstawie prognozy pogody [18]

Fig. 3. Graph for determining the vertical stability of ground-level air layer on the basis of weather forecast [18]

Tabela 3

Warunki występowania stopni pionowej stateczności powietrza [18]

Stopnie pionowej stateczności powietrza	Warunki występowania
konwekcja	$\frac{\Delta t}{u_1^2} \geq +0,1$
inwersja	$\frac{\Delta t}{u_1^2} \leq -0,1$
izotermia	$+0,1 > \frac{\Delta t}{u_1^2} > -0,1$

Uwaga:  $\Delta t = t_{50} - t$  – gradient temperatury, gdzie  $t_{50}$  – temperatura powietrza na wysokości 50 cm,  $t_{200}$  – temperatura powietrza na wysokości 200 cm od powierzchni ziemi,  $u_1$  – prędkość wiatru na wysokości 1 m.

### 3.2. Wiatr i turbulencja

Powstanie wiatru jest spowodowane nierównomiernym ogrzewaniem dużych powierzchni ziemi i przylegających do niej warstw powietrza. Powietrze unosi się nad ciepłym rejonem i opada nad chłodnym. Równocześnie następuje przesunięcie mas powietrza według poziomu; powietrze przesuwa się z miejsc o wyższym ciśnieniu do miejsc o niższym ciśnieniu. Kierunek wiatru ulega okresowym zmianom.



Dla każdej lokalizacji składowiska mogą być ustalone dobowe zmiany wiatru oraz zależność kierunku wiatru od pory roku [16]. Zasadniczy wpływ na kierunek wiatru wywiera ukształtowanie terenu.

Kierunek wiatru zmienia się też wraz z wysokością, a prędkość zmienia się okresowo w ciągu doby. Jest ona największa w ciągu dnia, a mniejsza w nocy. Takie zmiany prędkości wiatru występują szczególnie silnie latem, przy ustabilizowanej dobrej pogodzie (podczas pochmurnej pogody) oraz zimą, choć wówczas zmiany takie są mniej wyraźne. Przy zmianie charakteru pogody obserwuje się zmiany prędkości wiatru nieodpowiadające normalnym zmianom dobowym.

W wyniku tarcia mas powietrznych o powierzchnię ziemi prędkość wiatru przy ziemi jest minimalna i stopniowo zwiększa się w miarę posuwania się ku górnym warstwom atmosfery. Na pewnej wysokości od ziemi, gdzie ustaje oddziaływanie tarcia, szybkość wiatru jest stała. Największe zmiany prędkości wiatru zależne od wysokości obserwuje się nad powierzchnią ziemi o znacznych nierównościach terenowych, natomiast najniższe nad powierzchnią wody. Jednocześnie z wiatrem zachodzi w atmosferze ciągle, nieuporządkowane pod względem szybkości i kierunku przesuwanie i mieszanie się dużych i małych mas powietrza [10]. To nieuporządkowane mieszanie nazywamy ruchem turbulentnym (turbulencją).

Turbulencja powstaje w wyniku tarcia zachodzącego między przesuwanym się powietrzem a powierzchnią terenu i jej nierównościami oraz w wyniku wzajemnego tarcia między poszczególnymi warstwami powietrza. Stopień turbulencji nie jest jednakowy dla poziomego i pionowego ruchu mas powietrza [10, 19]. Prędkość wiatru ma więc istotny wpływ na rozprzestrzenianie się obłoku zanieczyszczeń.

Wzrost prędkości wiatru powoduje obniżenie stężenia składników obłoku zanieczyszczeń. Prędkość wiatru jest zatem parametrem wpływającym korzystnie na spadek stężenia substancji szkodliwych w obłoku zanieczyszczeń. Największe stężenia składników zanieczyszczeń występują w najniższej, przyziemnej warstwie powietrza. Wraz ze wzrostem odległości od źródła emisji zanieczyszczeń zaobserwować można charakterystyczne zjawisko wzrostu stężenia w wyższych warstwach atmosfery i spadku w warstwach niższych.

Z drugiej zaś strony, wzrost prędkości wiatru zmniejsza możliwość oderwania się obłoku zanieczyszczeń od powierzchni ziemi, co prowadzi do zwiększenia zasięgu i powierzchni strefy rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń [18].

Obłok zanieczyszczeń przesuwa się w atmosferze razem z otaczającymi go masami powietrza, przybierając prędkość stosownie do prędkości powietrza. Przy braku wiatru obłok zalega i utrzymuje się w miejscu emisji zanieczyszczeń, stopniowo ulegając emisji w środowisku.

Podczas zmian kierunku wiatru zmienia się również kierunek przesuwania się obłoku zanieczyszczeń. W wyniku turbulencji atmosfery i nieustannego mieszania się obłoku zanieczyszczeń z otaczającym go powietrzem, objętość obłoku stopniowo rośnie, podczas gdy stężenie jego składników, w miarę oddalania się od miejsca emisji, maleje. Obłok ma wówczas kształt półstożka z wierzchołkiem w punkcie emisji [18].

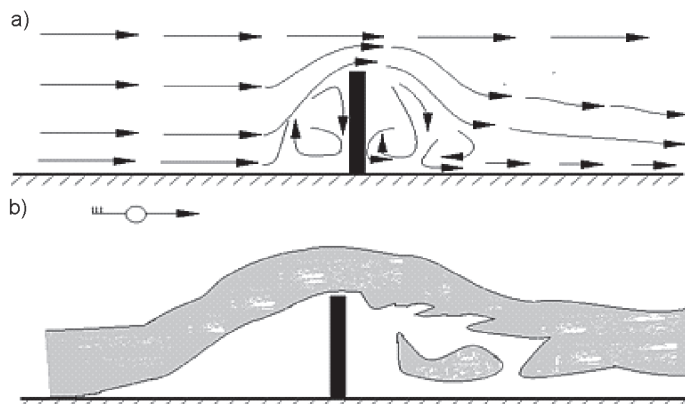
### 3.3. Opady atmosferyczne

Opady atmosferyczne i wilgotność powietrza stanowią dodatkowy element znacznie wpływający na odległość (zasięg) przesuwania się obłoku zanieczyszczeń, nie ulegając przy tym „rozrzedzeniu”. Deszcze powodują zmniejszenie stężenia zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego w wyniku rozpuszczania ich w wodzie, zjawiska absorpcji zanieczyszczeń zachodzących na powierzchni kropel i mechanicznego działania opadów.

Ulewy i zamiecie śnieżne wywołują zjawiska turbulencji, co prowadzi do obniżenia stężenia zanieczyszczeń w obłoku. Oprócz tego krople deszczu porywają cząstki zanieczyszczeń, przytłaczając je do powierzchni ziemi. Wzrost wilgotności powietrza na skutek opadów atmosferycznych wpływa jednocześnie na wzrost liczebności grzybów, których zarodniki są przystosowane do przenoszenia się wraz z powietrzem atmosferycznym [19, 20].

## 4. Wpływ warunków terenowych na zachowanie się obłoku zanieczyszczeń

Ukształtowanie terenu ma zasadniczy wpływ na przesuwanie się i trwałość obłoku zanieczyszczeń. Wirowe potoki i strumienie powietrza, tworzące się wokół nierówności terenowych, zabudowań i pasa zieleni o dużej zwartości, prowadzą do silniejszego rozplywania się obłoku zanieczyszczeń. Rysunek 4 przedstawia schemat powstawania strumieni wirowych przy przeszkodach.



Rys. 4. Wpływ pionowej przeszkody na strumień powietrza: a) prądy powietrza koło przeszkody, b) deformacja obłoku zanieczyszczeń powietrza [19]

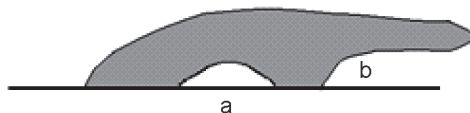
Fig. 4. Effect of obstacles on the vertical airflow: a) air currents around an obstacle, b) deformation of the cloud of air pollution [19]

Ruch powietrza nad przeszkodą odbywa się ze zwiększoną prędkością, natomiast za przeszkodą prędkość wiatru znacznie się zmniejsza. Strefa o małej prędkości wiatru, znajdująca się za przeszkodą, nazywa się cieniem aerodynamicznym [19]. Długość cienia aerodynamicznego zależy od szerokości i wysokości przegrody i prędkości wiatru. Średnio długość cienia aerodynamicznego równa się sześciokrotnej wysokości przeszkody. Za cieniem

aerodynamicznym prędkość i kierunek wiatru stopniowo wyrównuje się i przybiera poprzednią wartość. Tworzenie się cienia aerodynamicznego jest jedną z przyczyn powstawania tzw. łuków (rys. 5). Łuk występuje wtedy, gdy część obłoku zanieczyszczeń odrywa się od powierzchni ziemi i po przejściu pewnej odległości znowu opuszcza się na ziemię.

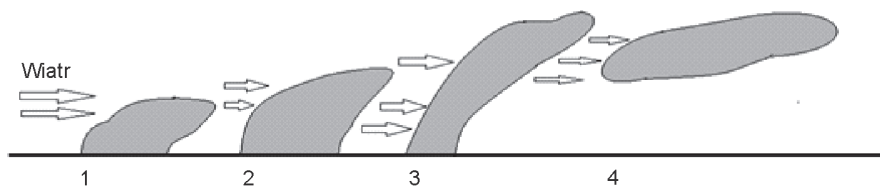
Cień aerodynamiczny może spowodować pełne oderwanie się obłoku zanieczyszczeń. Szczególnie łatwo odrywa się on od powierzchni ziemi przy izotermii oraz przy dużej różnicy szybkości wiatru nad przeszkodą i w strefie cienia aerodynamicznego. Taką przeszkodą może tworzyć np. pas zieleni wokół składowiska.

Drugą przyczyną oderwania się obłoku zanieczyszczeń od powierzchni ziemi jest wzrost prędkości wiatru wraz ze zwiększeniem wysokości. Schemat oderwania się obłoku zanieczyszczeń od powierzchni ziemi przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. „Łuk” i „okręt” w obłoku zanieczyszczeń powietrza: a) „Łuk”, b) „Okręt” [19]

Fig. 5. “Arc” and “ship” in a cloud of air pollution: a) “Arc”, b) “ship” [19]



Rys. 6. Schemat odrywania się obłoku zanieczyszczeń powietrza od powierzchni ziemi [19]

Fig. 6. Diagram of the separation of the cloud of air pollution from the surface of the earth [19]

Najpierw górne części obłoku przesuwają się do przodu, tworząc tzw. okręt. Stopniowo staje się on coraz bardziej wyraźny, a z czasem cały obłok zanieczyszczeń odrywa się od ziemi.

Dodatkowo na zachowanie się obłoku zanieczyszczeń znaczny wpływ ma ukształtowanie naturalne terenu. Na przykład w dolinie skierowanej pod kątem prostym do wiatru jego prędkość znacznie się zmniejsza. Dlatego przy małych prędkościach, zwłaszcza wieczorem, obłok zanieczyszczeń stopniowo wypełnia dolinę i pozostaje w niej przez dłuższy czas [19]. Przy większych prędkościach wiatru obłok zanieczyszczeń przechodzi nad doliną. Jeśli wiatr wieje pod kątem do doliny, jego prędkość zmniejsza się, a kierunek ulega zmianie. W tym przypadku część obłoku zanieczyszczeń kieruje się wzdłuż doliny. W okolicach lasu masa obłoku podnosi się nad wierzchołki drzew. Nierówna powierzchnia wytworzona przez wierzchołki drzew powoduje powstanie w powietrzu wirów i przyczynia się do częściowego przenikania zanieczyszczeń do wnętrza lasu. Las powoduje rozpraszanie się obłoku zanieczyszczeń.

Dodatkowo stosowanie ekranów zieleni izolującej powinno być podyktowane nie tylko estetyką, ale również możliwością rozplywania się i zmniejszania szkodliwego charakteru obłoku (tabela 4 i 5). Jest to możliwe dzięki sadzeniu w pasie zieleni izolacyjnej roślin

wydzielających fitocyndy. Są to naturalne substancje wydzielane przez rośliny wyższe, wykazujące działanie bakteriobójcze, grzybobójcze lub pierwotniakobójcze (m.in. siarczki, di-siarczki, sulfotlenki, glikozydyzosiarkocyjanowe, olejki czosnkowe), lub hamujące procesy życiowe drobnoustrojów [20]. Las liściasty o powierzchni 1 ha wydziela w ciągu 24 godzin do 30 kg fitocynów, zaś las iglasty – około 2 kg.

Tabela 4

**Orientacyjny czas dojścia obłoku w terenie zalesionym [18]**

Odległość w kierunku wiatru [km]	Inwersja			Izotermia				Konwekcja		
	Prędkość wiatru [m/s]									
	1	2	3	1	2	3	5	1	2	3
1	6 [min]	3 [min]	2 [min]	7 [min]	4 [min]	3 [min]	1,5 [min]	8 [min]	4 [min]	3 [min]
2	10	5	4	13	7	5	3	14	7	5
3	14	7	5	18	9	6	4	20	10	7
4	17	9	6	22	11	8	5	25	13	9
5	20	10	7	26	13	9	6	30	15	10
6	24	12	8	30	15	10	7	35	18	12
8	30	15	10	33	19	13	9	44	22	15
10	35	18	12	45	23	15	10	52	26	18
12	40	20	14	52	26	18	11	1 [godz.]	30	20
15	53	27	18	1,03 [godz.]	31	21	13	1,2	36	24
20	1,1 [godz.]	33	22	1,3	39	26	16	1,5	45	30
25	1,3	39	26	1,6	46	31	19	1,8	54	35

Uwaga: Skrócenie czasu dojścia obłoku w porównaniu z terenem otwartym równinnym jest spowodowane większą prędkością nad lasem.

Tabela 5

**Orientacyjny czas dojścia obłoku w terenie niezalesionym [18]**

Odległość w kierunku wiatru [km]	Inwersja			Izotermia				Konwekcja		
	Prędkość wiatru [m/s]									
	1	2	3	1	2	3	5	1	2	3
1	8 [min]	4 [min]	3 [min]	11 [min]	6 [min]	4 [min]	2 [min]	12 [min]	6 [min]	4 [min]
2	16	8	5	22	11	8	4	23	12	3
3	24	12	7	32	16	11	6	33	17	12
4	32	16	10	41	21	14	8	44	22	15
6	48	24	14	58	29	20	12	1 [godz.]	32	22
8	1,1 [godz.]	32	22	1,3 [godz.]	37	25	15	1,4	41	28
10	1,4	40	25	1,5	45	30	18	1,7	50	34
15	2,0	47	36	2,1	1,1 [godz.]	43	26	2,4	1,2 [godz.]	48
20	2,5	1,2 [godz.]	48	2,8	1,4	55	33	3,1	1,5	1 [godz.]
25	3,1	1,5	1 [godz.]	3,4	1,7	1,2 [godz.]	40	3,8	1,9	1,3
30	3,6	1,8	1,2	3,9	2	1,4	47	4,5	2,2	1,5
40	4,6	2,3	1,5	5	2,5	1,7	1 [godz.]	5,8	3	2
50	5,5	2,8	1,8	6	3	2	1,2	7	3,6	2,4

## 5. Wnioski

Ocenę terenu pod względem jego perspektywicznej przydatności dla lokalizacji składowiska w odniesieniu do warunków meteorologicznych można przeprowadzić przy zastosowaniu zespołu kryteriów wykluczających, takich jak: systematycznie powtarzające się ekstremalne zjawiska klimatyczne, intensywne opady, mogące powodować uszkodzenia obiektów technologicznych składowiska lub ich powierzchniowych zabezpieczeń, procesy zamrażania, rozmrażania oraz zawilgocenia i osuszenia czy warunki będące stymulatorem rozwoju intensywnych procesów geologicznych.

Uwzględnienie lokalnych warunków terenowo-meteorologicznych pozwoli na określenie, czy pomiary emisji zanieczyszczeń środowiskowych są w ogóle możliwe przy istniejących warunkach meteorologicznych oraz jaki przyjąć program i harmonogram pomiarów. Pomiary te będą stanowiły podstawę do wyciągania wniosków dotyczących łącznej szkodliwości substancji zanieczyszczających powietrze atmosferyczne, glebę i wody powierzchniowe.

Do oceny możliwości stanu zanieczyszczenia środowiska należy prowadzić pomiary czynników meteorologicznych na składowisku lub uzyskać dane z najbliższej stacji meteorologicznej w okresie przedekspluatacyjnym, w trakcie eksploatacji i po zamknięciu.

W strategii zrównoważonego rozwoju wskaźnikiem zagrożenia środowiskowego jest nie tylko poziom (stężenie) substancji szkodliwej, lecz jej dostępność biologiczna, forma i ocena stopnia pogorszenia zdrowotności przy określonym z nią kontakcie. Dlatego też aktualne tendencje w lokalizowaniu i projektowaniu rozwiązań konstrukcyjnych składowiska muszą stanowić kompleksowe podejście uwzględniające również aspekty ekologiczne, a przede wszystkim wpływ na wszystkie komponenty środowiska. Ocena uciążliwości powinna więc zawierać ocenę warunków meteorologiczno-terenowych, które pozwolą przynajmniej szacunkowo określić wpływ rozwiązań konstrukcyjnych składowiska na środowisko naturalne w dłuższym przedziale czasowym.

## Literatura

- [1] Barbaro S., Bonanno A., Boscia M.L., Rizzo G., Aronica S., *The impact of landfills on the air quality of towns: a simple heuristic model for the city of Palermo*, International Journal of Environment and Pollution (IJEP), Dec. 9, 2008.
- [2] Chang N., Shoemaker A., Schuler R.E., *Solid Waste Management System Analysis With Air Pollution and Leachate Impact Limitations – Waste Manag Res*, September 1996, vol. 14, no. 5, 463-481.
- [3] Dudek J., Rachwałski J., *Migracja gazu wysypiskowego ze składowisk odpadów komunalnych na tereny przyległe – metody ograniczające zagrożenia*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 1997.
- [4] El-Fadel M., Findikakis A.N., Leckie J.O., *Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling*, Journal of Environmental Management, vol. 50, Issue 1, May 1997.
- [5] Gaj K., Cybulska H., Knop F., Mech J., Mendyka B., Robaszkiewicz J., *Municipal Landfills as Air Pollution Sources*, Chemia i Inżynieria Ekologiczna, 1999, vol. 6, nr 4, 337-344.

- [6] Generowicz A., *Gospodarka odpadami komunalnymi*, Monografia – Zarządzanie Środowiskowe ISO 14000, III tom, Gospodarka odpadami i ochrona gruntów, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- [7] Generowicz A., *Możliwości realizacji zobowiązań określonych przez wybrane dyrektywy UE w zakresie gospodarki odpadami*, Przemysł Chemiczny 10/2007.
- [8] Generowicz A., Kulczycka J., Kowalski Z., Makara A., *Application of multi-criteria analysis in management of municipal waste in chosen region in Poland*, Proceedings of the International Conference on Solid Waste 2011, Moving Towards Sustainable Resource Management, J.W.C. Wong, K. Fricke, R.Y. Surampalli and A. Selvam (Editors), Hong Kong Baptist University, Hong Kong SAR, P.R. China, ISBN 978-988-19988-2-8, s. 78-82.
- [9] Guidance on monitoring landfill gas surface emissions, LFTGN07 Landfill directive, Environment Agency UK ([www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/lftgn07\\_surface\\_936575.pdf](http://www.environment-agency.gov.uk/static/documents/Business/lftgn07_surface_936575.pdf)).
- [10] Juda J., Chróścieleś S., *Ochrona powietrza atmosferycznego*, PWN, Warszawa 1980.
- [11] Klimek A., Wysokiński L. i in., *Poradnik metodyczny PRTR dla składowisk odpadów komunalnych*, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2010.
- [12] Korzeniowska-Rejmer E., *Ochrona środowiska gruntowo-wodnego przed zanieczyszczeniami antropogenicznymi*, Monografia – Zarządzanie Środowiskowe ISO 14000, III tom, Gospodarka odpadami i ochrona gruntów, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
- [13] Korzeniowska-Rejmer E., *Zanieczyszczenia promieniotwórcze w środowisku – Zagrożenia, unieszkodliwianie, bariery ochronne*, Monografia – Zarządzanie Środowiskowe ISO 14000, Tom IV – Jakość wody, oczyszczanie ścieków, zanieczyszczenia promieniotwórcze, Wyd. Centrum Szkolenia i Organizacji Systemów Jakości Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, 89-244.
- [14] Korzeniowska-Rejmer E., *Badania własne z wykorzystaniem danych do prognozowania skali skażenia chemicznego przyziemnej warstwy powietrza w rejonie lokalizacji wysypisk odpadów komunalnych województwa nowosądeckiego, lata 1993–2000*, praca niepublikowana PK.
- [15] Korzeniowska-Rejmer E., *Geotechniczne warunki bezpiecznego składowania odpadów komunalnych*, IV Międzynarodowe Forum Gospodarki Odpadami – „Systemy gospodarki odpadami”, Piła–Poznań, maj 2001.
- [16] Kowalski i in., *Stare składowiska*, tom 1, Rozpoznanie i ocena, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 1997.
- [17] *Krajowa inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych za rok 2008*, Raport wykonany na potrzeby Ramowej Konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu oraz protokołu z Kioto, Projekt, Warszawa 2010.
- [18] *Metodyka oceny sytuacji chemicznej po skażeniach toksycznymi środkami*, Instrukcja, Wydawnictwo MON, Warszawa 1993.
- [19] *Stosowanie środków dymnych. Wpływ warunków atmosferycznych i terenowych na stosowanie przesłon dymnych*, Instrukcja, Wydawnictwo MON, Warszawa 1980.
- [20] Rejmer P., *Podstawy ekotoksykologii*, Wydawnictwo Ekoinżynieria, Lublin 1997.
- [21] Sanderson J. et al., *Methane balance of a bioreactor landfill in Latin America*, J Air Waste Manag Assoc, 2008, 58 (5), 620-628.
- [22] Wysokiński L., *Zasady budowy składowisk odpadów*, ITB, Warszawa, 2009.
- [23] *Wytyczne dotyczące wdrażania Europejskiego Rejestru Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń*, Komisja Europejska Dyrekcja Generalna ds. Środowiska, 31 maja 2006.

## Akty prawne

- [24] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- [25] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 grudnia 2002 r. w sprawie zakresu, czasu sposobu oraz warunków prowadzenia monitoringu składowisk odpadów (Dz.U. 02.220. 1858).
- [26] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów (Dz.U. 03.61.549).