

Znaczenie niepewności pomiaru stężenia zapachowego dla procesu odbioru instalacji dezodoryzującej

The significance of odour concentration measurement uncertainty in the acceptance process of a odour removal installation

MAŁGORZATA LATZKE

DOI 10.36119/15.2025.12.23

Rzetelna ocena skuteczności instalacji dezodoryzujących ma kluczowe znaczenie dla ochrony zapachowej jakości powietrza i ograniczania uciążliwości odorowych. W pracy przeanalizowano wpływ niepewności pomiarowej na wynik odbioru instalacji, uwzględniając liczbę pomiarów kontrolnych oraz wybór wartości reprezentatywnej emisji. Wykazano, że stosowanie średniej emisji może prowadzić do niedoszacowania oddziaływania, natomiast użycie górnej granicy 95% przedziału ufności zwiększa prognozowane zasięgi uciążliwości nawet o 80–160 m. Wskazano również sytuacje, w których wybór wartości reprezentatywnej nie wpływa na ocenę. Wyniki podkreślają znaczenie uwzględniania niepewności pomiarowej w procesie odbioru instalacji dezodoryzującej.

Słowa kluczowe: niepewność pomiaru, stężenie zapachowe, skuteczność dezodoryzacji, modelowanie dyspersji zanieczyszczeń, uciążliwość zapachowa

A reliable assessment of the effectiveness of odour removal installations is crucial for protecting air quality and reducing odour nuisance. This article analyses the impact of measurement uncertainty on the assessment of the acceptance of installations, taking into account the number of control measurements and the selection of a representative emission value. It was shown that the use of average emission values can lead to an underestimation of the impact, while the use of the upper limit of the 95% confidence interval increases the predicted nuisance range by 80-160 m. It was also pointed out, that there are situations in which the choice of representative value does not affect the assessment. The results emphasize the importance of taking measurement uncertainty into account in the acceptance process of a odour removal installation.

Keywords: measurement uncertainty, odour concentration, odour abatement efficiency, pollutant dispersion modelling, odour nuisance

Wprowadzenie

W dobie dynamicznego rozwoju cywilizacyjnego i intensyfikacji procesów przemysłowych problem jakości powietrza staje się jednym z kluczowych wyzwań współczesności [1]. Ochrona jego jakości obejmuje nie tylko ograniczanie emisji klasycznych zanieczyszczeń gazowych i pyłowych, lecz również dbałość o utrzymanie właściwej zapachowej jakości powietrza. Zapachowa jakość powietrza istotnie wpływa zarówno na komfort życia mieszkańców, jak i relacje społeczne oraz akceptację działalności przemysłowej w otoczeniu, a jej znaczne obniżenie może prowadzić do różnych problemów zdrowotnych [2-5].

Najbardziej pożądanym sposobem ochrony zapachowej jakości powietrza jest stosowanie metod prewencyjnych, polegających na zapobieganiu powstawaniu odorów u źródła [6]. Minimalizacja emisji odorów w miejscu ich powstawania jest możliwa m.in. poprzez stosowanie odpowiednich parametrów procesowych (zapobiegających niekontrolowanemu rozkładowi materii organicznej i powstawaniu odorantów) czy stosowanie niskoemisyjnych surowców, a także utrzymanie właściwych warunków eksploatacji (np. unikanie zalegania odpadów, odpowiednie przechowywanie surowców/odpadów, brak zaniedbań) [7, 8]. Jeżeli działania ograniczające powstawanie emisji zapachowej nie są wystarczające, wówczas

stosuje się tzw. metody końca rury, polegające na hermetyzacji procesu i oczyszczeniu powietrza wentylacyjnego przed odprowadzeniem go do atmosfery [9-11].

Do dezodoryzacji powietrza odlotowego najczęściej stosowane są metody biologiczne (m.in. biofiltry, bioskrubery, filtry biotrickling) lub metody fizykochemiczne (m.in. adsorpcja na węglu aktywnym, płuczki wodne lub chemiczne, spalanie termiczne lub katalityczne, ozonowanie, promieniowanie UV, plazma nietermiczna) [12-14]. Technologie te mogą być stosowane pojedynczo lub hybrydowo [15, 16]. Wybór odpowiedniej metody zależy m.in. od typu źródła zapachu, rodzaju i stężenia zanieczyszczeń, natężenia przepływu, a także od możliwości

dr inż. Małgorzata Latzke <https://orcid.org/0000-0002-6457-253X> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Laboratorium Zapachowej Jakości Powietrza.

Adres do korespondencji/ Corresponding address: malgorzata.latzke@zut.edu.pl

ekonomicznych oraz oczekiwanej skuteczności dezodoryzacji, pozwalającej na dotrzymanie odpowiednich standardów zapachowej jakości powietrza [17 – 21].

Wymagany poziom ograniczenia emisji zapachowej ustala się na podstawie modelowania dyspersji zanieczyszczeń w atmosferze [14, 22 – 25]. Analiza polega na iteracyjnym doborze wartości emisji zapachowej i określeniu największej z nich, dla której prognozowany zasięg nadmiernej uciążliwości nie obejmuje żadnych obiektów wrażliwych. Uzyskana w ten sposób wartość definiuje graniczny poziom emisji zapachowej, dopuszczalny w warunkach eksploatacyjnych instalacji, po przekroczeniu którego zapachowe oddziaływanie instalacji staje się nadmiernie uciążliwe dla otoczenia.

Dlatego też, aby zapewnić skuteczną ochronę zapachowej jakości powietrza w przypadku stosowania dezodoryzacji, podstawą odbioru instalacji dezodoryzującej powinny być wyniki pomiarów, potwierdzające osiągnięcie redukcji emisji zapachowej do poziomu nieprzekraczającego ustalonej wartości granicznej. Pomiaru te powinny zostać przeprowadzone zgodnie z PN-EN 13725:2022-07 [26] w ustabilizowanych warunkach eksploatacyjnych instalacji. Odbiór uznaje się za pozytywny, jeśli zmierzona wartość emisji zapachowej nie przekracza ustalonego poziomu granicznego.

W procedurze odbioru instalacji dezodoryzującej konieczne jest określenie wartości, na podstawie której dokonuje się stwierdzenia, czy emisja nie przekracza ustalonej wartości granicznej. W literaturze przedmiotu brakuje jednoznacznych wskazań, czy w tym celu należy posługiwać się wartością średnią emisji zapachowej, czy też wartością górnej granicy przedziału ufności, wyznaczonego z określonym poziomem istotności statystycznej (najczęściej 95 %), którego szerokość zależy m.in. od liczby pomiarów kontrolnych.

W niniejszej pracy oceniono znaczenie niepewności pomiaru stężenia zapachowego w procesie odbioru instalacji dezodoryzujących, a tym samym jej rolę w ochronie zapachowej jakości powietrza. Sprawdzono w jakim stopniu liczba pomiarów kontrolnych oraz wybór wartości reprezentatywnej, która ma stanowić podstawę odbioru instalacji dezodoryzującej (wybór pomiędzy wartością średnią a górną granicą 95 % przedziału ufności wyników pomiarów kontrolnych) może wpływać na poprawność decyzji dotyczącej odbioru instalacji, a także, czy w konsekwencji może być przyczyną pro-

blemu nadmiernej uciążliwości zapachowej instalacji.

Metodyka analizy

Podstawę oceny stanowiło porównanie prognozowanego zasięgu nadmiernej uciążliwości, otrzymanego przy użyciu średniej wartości hipotetycznych wyników pomiarów stężenia zapachowego w oczyszczonym strumieniu gazu odlotowego ($R_{i,śr}$) z zasięgiem otrzymanym przy użyciu górnej granicy 95% przedziału ufności, obliczonej przy założeniu, że seria pomiarów kontrolnych była złożona z 9 ($R_{i,n=9}$), 6 ($R_{i,n=6}$) lub 3 ($R_{i,n=3}$) obserwacji.

Prognozowany zasięg nadmiernej uciążliwości zapachowej (R) obliczono przy pomocy oprogramowania firmy PRO-EKO Ryszard Samoć – „Operat-FB” dla Windows v.8.3.1, wykorzystującego gausowski model smugi zanieczyszczeń, kształtowanej przez wiatr i procesy dyfuzji, bazujący na różniczkowym równaniu Pasquille’a [27, 28] (model uznany w Polsce za referencyjny [29]).

Aby zachować przejrzystość analizy i jednoznaczność interpretacji wyników przyjęto uproszczone założenia dotyczące źródła oraz warunków emisji. W obliczeniach uwzględniono jeden emitor punktowy, pionowy, niezadaszony, pracujący w sposób ciągły 24h/dobę przez 365 dni w roku i charakteryzujący się stałymi w czasie parametrami emisji. Analizę przeprowadzono dla trzynastu zestawów parametrów emitora, przedstawionych w tabeli 1, obejmujących różne natężenie przepływu gazu (V) i prędkość emitowanego gazu (u), a także średnicę (ϕ) i wysokość emitora (H). Parametry te tak dobrano, aby odwzorowywały warunki typowe dla rzeczywistych źródeł emisji zapachowej, od niskich emitatorów o niewielkim strumieniu, po wysokie emitatory o dużych wydajnościach.

Tabela 1. Zestawienie parametrów emitora i emitowanego strumienia uwzględnionych w analizie
Table 1. Summary of the emitter and emitted stream parameters included in the analysis

V [m ³ /h]	u [m/s]	ϕ [m]	H [m]	$c_{od,śr}$ [ou _E /m ³]			
				100	500	1 000	2 000
500	4,4	0,2	1	100	500	1 000	2 000
			3				
5 000	7,1	0,5	2	100	500	1 000	2 000
			5				
10 000	8,9	0,63	4	100	500	1 000	2 000
			8				
30 000	10,6	1	5	100	500	1 000	2 000
			10				
50 000	12,3	1,2	5	100	500	1 000	2 000
			10				
			15				
100 000	15,7	1,5	10	100	500	1 000	2 000
			20				

Dla każdego zestawu parametrów emitora rozpatrzono cztery warianty skuteczności dezodoryzacji, obejmujące redukcję stężenia zapachowego ($c_{od,śr}$) do poziomu 100 ou_E/m³, 500 ou_E/m³, 1000 ou_E/m³ lub 2000 ou_E/m³. We wszystkich wariantach obliczenia wykonywano czterokrotnie, za każdym razem stosując inną wartość emisji zapachowej (q_{od} [ou_E/s]): wartość średnią ($q_{od,śr}$), górną granicę 95 % przedziału ufności, wyznaczonego przy założeniu 3 pomiarów kontrolnych ($q_{od,n=3}$), 6 pomiarów kontrolnych ($q_{od,n=6}$) lub 9 pomiarów kontrolnych ($q_{od,n=9}$). Wartość q_{od} wyznaczano jako iloczyn natężenia przepływu (V [m³/s]), przyjętego dla danego zestawu parametrów emitora oraz odpowiedniej wartości stężenia zapachowego (c_{od} [ou_E/m³]), tj. średniej wartości ($c_{od,śr}$) lub górnej granicy 95 % przedziału ufności, obliczonej dla 3 ($c_{od,n=3}$), 6 ($c_{od,n=6}$) lub 9 ($c_{od,n=9}$) pomiarów kontrolnych. Zastosowane wartości stężenia zapachowego przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości stężenia zapachowego uwzględnione w obliczeniach
Table 2. Odour concentration values used in the calculations

STĘŻENIE ZAPACHOWE c_{od} [ou _E /m ³]			
wartość średnia	górna granica 95 % przedziału ufności dla n obserwacji		
	$c_{od,n=3}$	$c_{od,n=6}$	$c_{od,n=9}$
100	158	138	130
500	790	691	651
1000	1580	1382	1302
2000	3160	2764	2605

Górną granicę 95 % przedziału ufności stężenia zapachowego wyznaczano z zależności [26]:

$$\bar{y}_D - t \cdot \frac{s_r}{\sqrt{n}} \leq m_D \leq \bar{y}_D + t \cdot \frac{s_r}{\sqrt{n}}$$

gdzie

t – współczynnik t Studenta dla $n = \infty$ ($t \approx 2$ dla 95 % przedziału ufności)

- n – liczba obserwacji ($n = 3, n = 6$ lub $n = 9$)
- s_r – odchylenie standardowe dla granicy precyzji pośredniej określonej w PN-EN 13725:2022-07 [26], wynoszącej 0,477 ($s_r = 0,1721$).

Zastosowane w obliczeniach wartości emisji zapachowej zestawiono w tabeli 3.

Do modelowania dyspersji zanieczyszczeń wykorzystano różę wiatrów ze stacji meteorologicznej IMGW Szczecin – Dąbie (dostępna w programie Operat FB), pokazaną na rysunku 1, opisującą rozkład częstości występowania poszczególnych prędkości wiatru i stanów równowagi atmosfery w poszczególnych kierunkach geograficznych w skali roku. Dla całego obszaru modelowania przyjęto brak tła zapachowego oraz stałą wartość współczynnika aerodynamicznego szorstkości terenu, równą 0,5 m, charakterystyczną dla terenów o umiarkowanym stopniu zabudowy i pokryciu roślinnym [29]. Ob-

liczenia przeprowadzono na wysokości receptorów równej 1,5 m, odpowiadającej typowemu położeniu ludzkiego nosa.

Wyniki modelowania dyspersji zanieczyszczeń dla każdego wariantu obliczeń przedstawiono w formie izolinii kryterialnych, wyznaczających obszar nadmiernej uciążliwości zapachowej (obszar wewnątrz izolinii). Jako izolinię kryterialną przyjęto izolinię 97. percentyla jednogodzinnego stężenia zapachowego równego $1 \text{ ou}/\text{m}^3$. Izolinia ta wyznacza obszar, na którym stężenie zapachowe $1 \text{ ou}/\text{m}^3$ (uśrednione do godziny) jest przekraczane w ciągu roku przez co najmniej 3 % czasu. Przyjęte kryterium oceny zostało oparte na wartości odniesienia rozważanej w jednym z krajowych opracowań legislacyjnych [30, 31].

Zasięg nadmiernej uciążliwości (R) odczytywano oddzielnie dla każdego z 12 kierunków geograficznych, jako mierzoną w linii prostej odległość od emitora do punktu receptorowego, położonego na izolinii kryterialnej w miejscu przecięcia z prostą wyznaczającą i -ty kierunek geograficzny. Przykład wyznaczania punktów receptorowych pokazano na rysunku 2, gdzie punkt E (punkt o współrzędnych 0, 0) oznacza emitora, a punkty oznaczone symbolami „A”, „B”, „C” i „D” to punkty receptorowe, przy czym „A” odnosi się do

zasięgu $R_{i,sr}$ „B” – do $R_{i,n=9}$ „C” – do $R_{i,n=6}$ „D” – do $R_{i,n=3}$.

Przedstawienie i omówienie wyników

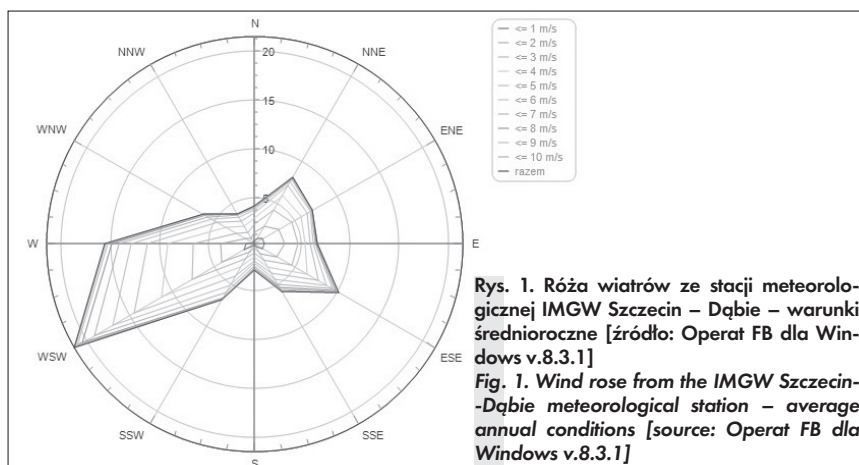
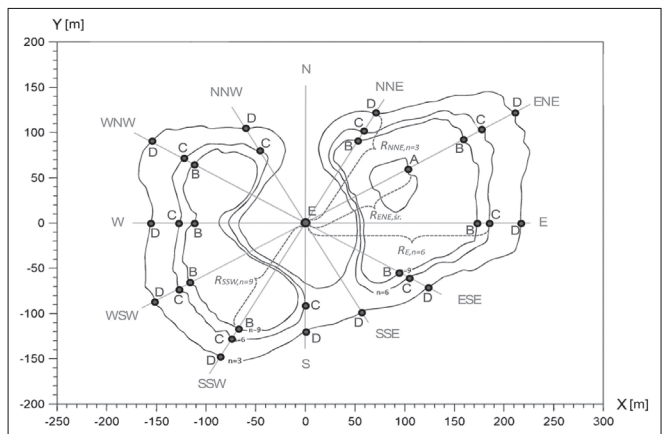
Łącznie przeprowadzono 208 symulacji komputerowych rozprzestrzeniania się odorów w atmosferze, obejmujących 52 zestawy danych wejściowych po 4 warianty wartości reprezentatywnej ($q_{od,sr}$, $q_{od,n=9}$, $q_{od,n=6}$ oraz $q_{od,n=3}$).

W przypadku 19 zestawów danych wejściowych, przedstawionych w tabeli 4, wyniki obliczeń wykazały całkowity brak nadmiernego oddziaływania emitora, bez względu na kierunek geograficzny oraz przyjętą w obliczeniach wartość reprezentatywną q_{od} . Brak nadmiernej uciążliwości uzyskano dla wszystkich objętych analizą zestawów parametrów emitora i emisji, dla których przyjęto założenie, że w wyniku dezodoryzacji stężenie zapachowe jest redukowane do poziomu $100 \text{ ou}_E/\text{m}^3$. Wynika z tego, że dla bardzo wysokiej skuteczności dezodoryzacji (zmniejszającej stężenie zapachowe do poziomu około $100 \text{ ou}_E/\text{m}^3$), niezależnie od parametrów emitora i wielkości emitowanego strumienia, wybór wartości reprezentatywnej jest nieistotny, gdyż dla obu wielkości nie występuje nadmierna uciążliwość. Z tabeli 4

Tabela 3. Wartości emisji zapachowej uwzględnione w analizie
Table 3. Odour emission values used in the analysis

EMISJA ZAPACHOWA q_{od} [ou_E/s]			
wartość średnia $q_{od,sr}$	górną granicę 95% przedziału ufności dla n obserwacji		
	$q_{od,n=3}$	$q_{od,n=6}$	$q_{od,n=9}$
14	22	19	18
69	110	96	90
139	219	192	181
278	439	384	362
694	1 097	960	904
833	1 317	1 152	1 085
1 389	2 195	1 919	1 809
2 778	4 390	3 839	3 618
4 167	6 584	5 758	5 427
5 556	8 779	7 678	7 235
6 944	10 974	9 597	9 044
8 333	13 169	11 517	10 853
13 889	21 948	19 195	18 088
16 667	26 337	23 034	21 706
27 778	43 896	38 390	36 177

Rys. 2. Graficzne przedstawienie sposobu określania zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej na podstawie izolinii kryterialnych
Fig 2. Graphical representation of method used to determine the range of excessive odour nuisance based on criterion isolines



Rys. 1. Róża wiatrów ze stacji meteorologicznej IMGW Szczecin – Dąbie – warunki średnioroczne [źródło: Operat FB dla Windows v.8.3.1]
Fig. 1. Wind rose from the IMGW Szczecin-Dąbie meteorological station – average annual conditions [source: Operat FB dla Windows v.8.3.1]

wynika także, że wybór wartości reprezentatywnej nie ma znaczenia również w przypadku dużych strumieni gazu odłotowego, odprowadzanych do atmosfery wysokimi emitarami, w których stężenia zapachowe zostały zredukowane (w wyniku dezodoryzacji) do poziomu co najmniej $800 \text{ ou}_E/\text{m}^3$, a w sytuacji, gdy emitator ma co najmniej 20 m wysokości – nawet do poziomu około $1 600 \text{ ou}_E/\text{m}^3$.

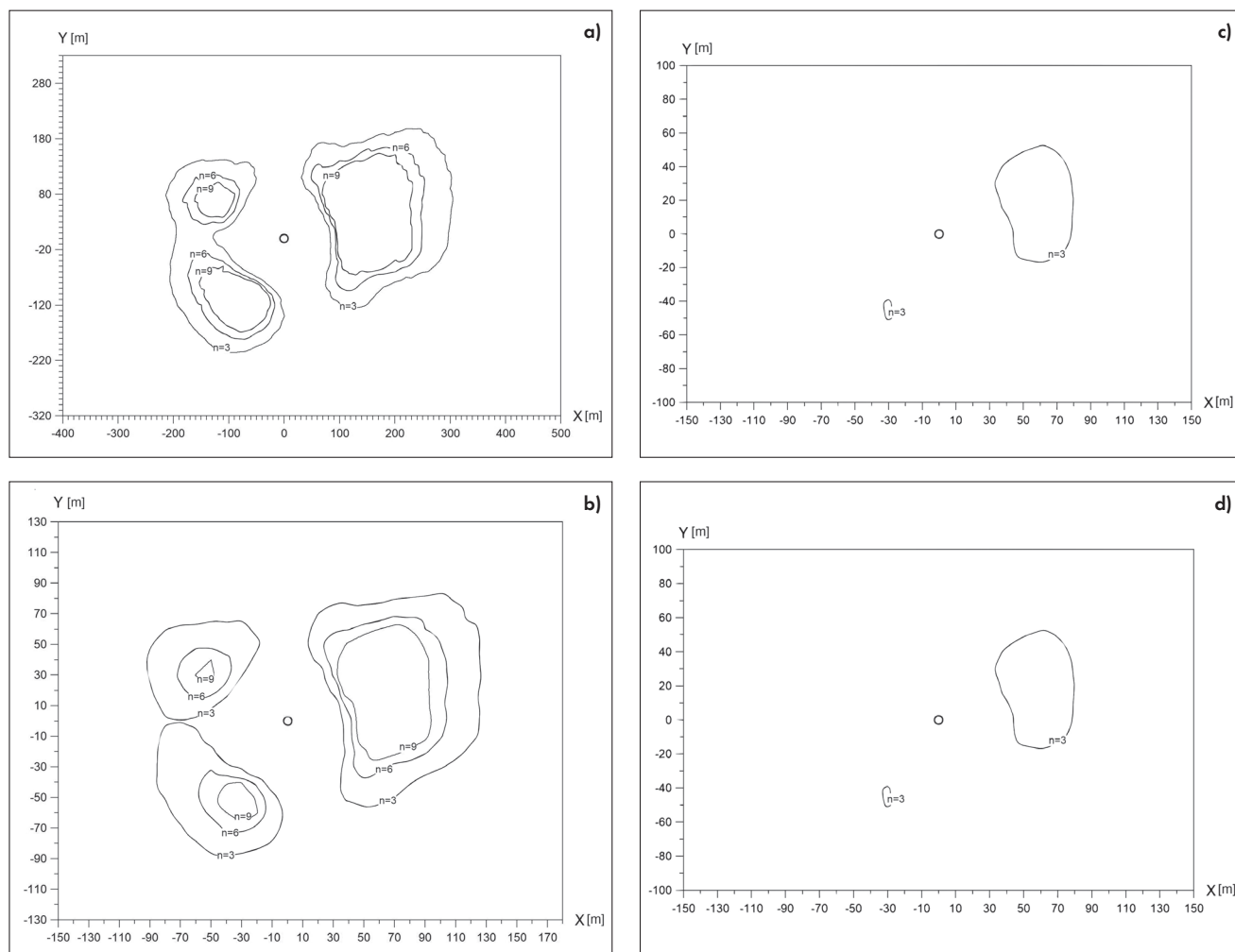
Dla każdego z pozostałych (tj. nieujętych w tabeli 4) zestawów danych wejściowych utworzono oddzielny wykres, przedstawiający obszary nadmiernej uciążliwości zapachowej, uzyskane dla

Tabela 4. Zestawienie wariantów obliczeń, dla których uzyskano brak nadmiernej uciążliwości
 Table 4. Summary of calculation variants for which no excessive impact was found

LP.	ZESTAW DANYCH WEJŚCIOWYCH			WARTOŚCI REPREZENTATYWNE				
	\dot{V} [m ³ /h]	H [m]	c_{od} [ou _E /m ³]	$q_{od, \dot{V}}$ [ou _E /s]	$q_{od, n=9}$ [ou _E /s]	$q_{od, n=6}$ [ou _E /s]	$q_{od, n=3}$ [ou _E /s]	
1	500	1	100	14	22	19	18	
2		3						
3		2						
4	5 000	5		139	219	192	181	
5		4						
6	10 000	8		278	439	384	362	
7		5						
8	30 000	10		833	1 317	1 152	1 085	
9		5						
10	50 000	10		1 389	2 195	1 919	1 809	
11		15						
12	100 000	10		2 778	4 390	3 839	3 618	
13		20						
14	500	3		500	69	110	96	90
15	10 000	8			1 389	2 195	1 919	1 809
16	50 000	15			6 944	10 974	9 597	9 044
17	100 000	10			13 889	21 948	19 195	18 088
18		20						
19	100 000	20			1000	27 778	43 896	38 390

poszczególnych wariantów wartości reprezentatywnej. Łącznie otrzymano 33 wykresy, umożliwiające porównanie prognozowanego zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej w zależności od przyjętej wartości reprezentatywnej.

W czterech przypadkach uwzględnienie górnej granicy 95% przedziału ufności zamiast wartości średniej emisji zapachowej skutkowało pojawieniem się prognozowanego obszaru nadmiernej uciążliwości zapachowej. Przypadki te pokazano na rysunku 3. Rysunki 3a, 3b i 3c potwierdzają znaczący wpływ uwzględnienia niepewności pomiaru emisji zapachowej podczas odbioru instalacji. Gdyby wartością reprezentatywną w tych przypadkach była wartość średnia z serii pomiarów kontrolnych to wyniki prognozy zapachowego oddziaływania potwierdziłyby osiągnięcie wystarczającej skuteczności dezodoryzacji (brak uciążliwości zapachowej). Z kolei wyniki modelowania przeprowadzonego



Rys. 3.

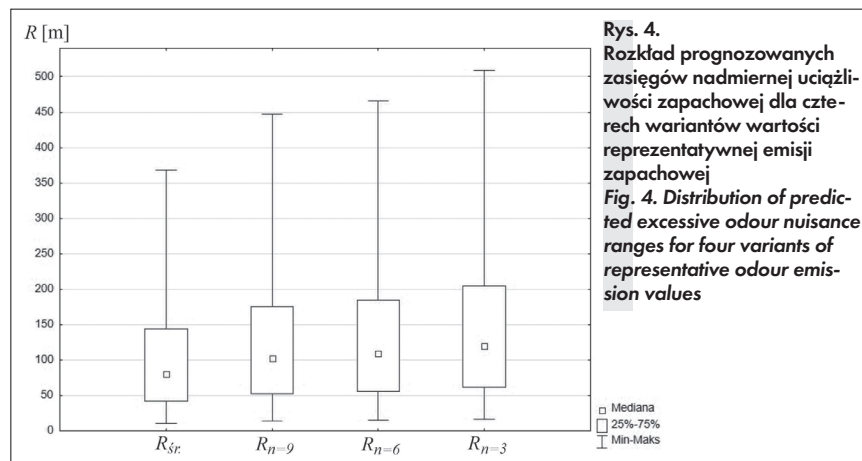
Przypadki wystąpienia prognozowanego obszaru nadmiernej uciążliwości zapachowej po uwzględnieniu niepewności pomiarowej w obliczeniach modelowych: a) dane wejściowe: $V = 100\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 2\,000\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 20\text{ m}$; b) dane wejściowe: $V = 50\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 500\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 10\text{ m}$; c) dane wejściowe: $V = 5\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 500\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 5\text{ m}$; d) dane wejściowe: $V = 30\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 500\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 10\text{ m}$
 Fig. 3. Cases of predicted excessive odour nuisance after taking measurement uncertainty into the account in model calculations: a) input data: $V = 100\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 2\,000\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 20\text{ m}$; b) input data: $V = 50\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 500\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 10\text{ m}$; c) input data: $V = 5\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 500\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 5\text{ m}$; d) input data: $V = 30\,000\text{ m}^3/\text{h}$, $c_{od} = 500\text{ ou}_E/\text{m}^3$, $H = 10\text{ m}$

z uwzględnieniem niepewności pomiaru stężenia zapachowego wskazują, że jest równie prawdopodobne, że rzeczywiste oddziaływanie zapachowe emitora może stanowić nadmierną uciążliwość na obszarze ograniczonym izoliniami widocznymi na tych rysunkach. Ponadto, wyraźnie zauważalny jest fakt, że im więcej zostanie przeprowadzonych pomiarów kontrolnych, tym bardziej precyzyjnie można wskazać obszar przekroczeń lub – tak jak w przypadku pokazanym na rysunku 3d – jednoznacznie potwierdzić brak nadmiernego oddziaływania. Rysunek 3d pokazuje sytuację, w której przy zbyt małej liczbie pomiarów kontrolnych (w tym przypadku 3) niepewność oszacowania emisji zapachowej prowadzi do przeszacowania prognozowanego zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej. Zwiększenie liczby pomiarów (np. do 6) pozwala na zawężenie przedziału ufności i uzyskanie wyników prognozy potwierdzających brak uciążliwości.

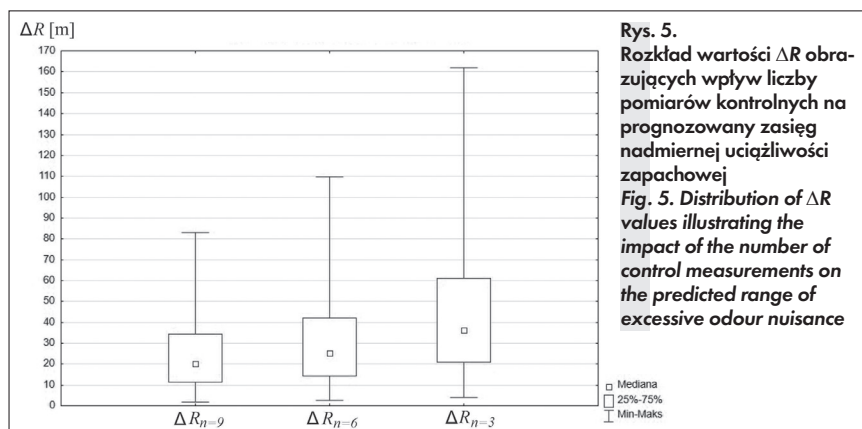
Podobne wnioski uzyskano na podstawie analizy wszystkich 33 wykresów, uwzględniającej zasięg nadmiernego oddziaływania w poszczególnych kierunkach geograficznych i obejmującej łącznie 396 obserwacji (tj. 33 wykresy x 12 kierunków). W około 10 % przypadków odnotowano ryzyko niedoszacowania nadmiernej uciążliwości zapachowej przy zastosowaniu wartości średniej emisji zapachowej z pomiarów kontrolnych (analogicznie jak na rysunkach 3a, 3b i 3c). Z kolei w około 8 % przypadków stwierdzono ryzyko przeszacowania (analogicznie jak na rys. 3d), przy czym 3 % to przypadki, w których przeszacowanie wystąpiło nawet przy 6 pomiarach kontrolnych.

W pozostałych około 8 % przypadków stwierdzono brak występowania nadmiernej uciążliwości na danym kierunku geograficznym, a w około 74 % przypadków – nadmierną uciążliwość niezależnie od przyjętej wartości reprezentatywnej emisji zapachowej. Dla tej grupy przypadków (292 przypadki) dokonano porównania prognozowanego zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej, oceniając, w jaki sposób jego wielkość zmienia się po uwzględnieniu niepewności pomiaru emisji. Rozkład otrzymanych prognozowanych wartości zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej dla czterech wariantów wartości reprezentatywnej emisji zapachowej przedstawiono na rysunku 4.

Aby określić, w jakim stopniu uwzględnienie niepewności pomiarowej wpływa na wyniki modelowego oszacowania zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej,



Rys. 4. Rozkład prognozowanych zasięgów nadmiernej uciążliwości zapachowej dla czterech wariantów wartości reprezentatywnej emisji zapachowej
Fig. 4. Distribution of predicted excessive odour nuisance ranges for four variants of representative odour emission values



Rys. 5. Rozkład wartości ΔR obrazujących wpływ liczby pomiarów kontrolnych na prognozowany zasięg nadmiernej uciążliwości zapachowej
Fig. 5. Distribution of ΔR values illustrating the impact of the number of control measurements on the predicted range of excessive odour nuisance

wey, obliczono różnice ΔR pomiędzy zasięgami prognozowanymi z wykorzystaniem emisji zapachowej uwzględniającej niepewność pomiarową (tj. górnej granicy 95% przedziału ufności określonej dla serii pomiarów kontrolnych, złożonej odpowiednio z 9, 6 lub 3 obserwacji) a zasięgiem określonym z użyciem wartości średniej (bez uwzględnienia niepewności pomiarów kontrolnych). Uzyskane wyniki dla 3, 6 i 9 pomiarów kontrolnych pokazano na rysunku 5.

Wartości ΔR przyjmują wartości dodatnie, co oznacza wzrost prognozowanego zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej po uwzględnieniu niepewności pomiarowej, a więc prognozy sporządzone z zastosowaniem wartości średniej mogą być niedoszacowane i prowadzić do wystąpienia problemu uciążliwości zapachowej. Wraz ze zmniejszaniem liczby pomiarów kontrolnych (z $n = 9$ do $n = 3$) obserwuje się wyraźne zwiększenie rozrzutu wyników oraz wzrost wartości mediany ΔR , co oznacza zdecydowanie większe prawdopodobieństwo niedoszacowania zasięgu przy wyższej niepewności pomiaru. Przy standardowo wykonywanych trzech pomiarach kontrolnych różnice mogą być rzędu nawet ponad 150 m, a zwiększenie liczby pomiarów kontrolnych zmniejsza tę różnicę dwukrotnie.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza wykazała, że wybór wartości reprezentatywnej oraz liczby pomiarów kontrolnych może istotnie wpływać na ocenę skuteczności instalacji dezodoryzujących. W wielu przypadkach różnica między prognozowanymi zasięgami nadmiernej uciążliwości zapachowej, wyznaczonymi na podstawie średniej wartości emisji oraz górnej granicy 95% przedziału ufności, była na tyle duża, że mogła zmienić ocenę oddziaływania instalacji.

Uwzględnienie niepewności pomiarowej, wyrażonej poprzez górną granicę 95% przedziału ufności, prowadziło do zwiększenia prognozowanego zasięgu nadmiernej uciążliwości zapachowej w stosunku do wartości uzyskanych dla średniej emisji nawet o 80 m ÷ 160 m, zależnie od liczby kontrolnych pomiarów.

Zastosowanie średniej wartości emisji może prowadzić do niedoszacowania rzeczywistego oddziaływania zapachowego, natomiast przyjęcie wartości górnej granicy przedziału ufności zapewnia bardziej rzetelne podejście, zwiększające prawdopodobieństwo, że instalacja faktycznie spełnia oczekiwania co do skuteczności działania.

W przypadku bardzo wysokiej skuteczności dezodoryzacji, redukującej

stężenie zapachowe do poziomu około $100 \text{ ou}_E/\text{m}^3$, wybór wartości reprezentatywnej nie ma znaczenia przy stwierdzeniu zgodności rzeczywistej skuteczności dezodoryzacji z wartością graniczną. Nie ma on znaczenia również w przypadku dużych strumieni gazu odlotowego, odprowadzanych do atmosfery wysokimi emitorami, w których w wyniku dezodoryzacji stężenie zapachowe zostało zredukowane do poziomu co najmniej $800 \text{ ou}_E/\text{m}^3$, a w sytuacji gdy emitor ma co najmniej 20 m wysokości – nawet do poziomu około $1600 \text{ ou}_E/\text{m}^3$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] European Environment Agency (EEA); Air Quality in Europe 2022. EEA Report No 15/2022; Copenhagen; 2022; ISBN: 978-92-9480-486-1
- [2] Wroniszewska A., Zwoździak J.; Odor Annoyance Assessment by Using Logistic Regression on an Example of the Municipal Sector; Sustainability; 2020; 12(15); artykuł 6102; DOI: 10.3390/su12156102
- [3] Bokowa A., Díaz C., Guillot J.-M., Izquierdo C., Naddeo V., Monteiro L., Capelli L.; Industrial Odour Pollution and Human Health: A Systematic Review and Meta-Analysis; Environmental Health; 2021; 20(1); artykuł 93; DOI: 10.1186/s12940-021-00774-3
- [4] Marto A.S., Varandas S., Pacheco F.A.L.; Determinants of Odor-Related Perception: Analysis of Community Response; Atmosphere; 2023; 16(10); artykuł 1176; DOI: 10.3390/atmos16101176
- [5] Wojnarowska M., Stobiecka J., Matuszewska D., Plichta J., Plichta G.; The Impact of Objects with a Potential Odour Nuisance on the Life Comfort of the Urban Agglomeration Inhabitants; Applied Sciences; 2024; 14(22); artykuł 10708; DOI: 10.3390/app142210708
- [6] Environment Agency; H4 Odour Management; Environment Agency Guidance; Bristol; 2011; ISBN: 978-1-84911-456-6
- [7] Toledo M.; Odour prevention strategies in wastewater treatment and composting plants: A review; Journal of Environmental Management; 2025; 375; str. 124402; DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124402
- [8] Pawnuł M., Grzelka A., Miller U., Sówka I.; Prevention and Reduction of Odour Nuisance in Waste Management in the Context of the Current Legal and Technological Solutions; Journal of Ecological Engineering; 2020; 21(7); 34–41; DOI: 10.12911/22998993/125455
- [9] Senatore V., Zarra T., Galang M.G., Oliva G., Buonerba A., Li C.-W., Belgiorno V., Naddeo V.; Full-Scale Odor Abatement Technologies in Wastewater Treatment Plants (WWTPs): A Review; Water; 2021; 13(24); artykuł 3503; DOI: 10.3390/w13243503
- [10] Wysocka I., Gębicki J., Namieśnik J.; Technologies for Deodorization of Malodorous Gases; Environmental Science and Pollution Research; 2019; 26(10); 9409–9434; DOI: 10.1007/s11356-019-04195-1
- [11] Talaiekhazani, A., Bagheri, M., Goli, A., & Talei Khoozani, M. R. (2016). An overview of principles of odor production, emission, and control methods in wastewater collection and treatment systems. Journal of Environmental Management, 170, 186–206. DOI:10.1016/j.jenvman.2016.01.021
- [12] Estrada J. M., Lebrero R., Kraakman N. J. R., Muñoz R.; Odour abatement technologies in WWTPs: energy and economic efficiency; Sewage Treatment Plants; 2015; s. 164–187; ISBN e-book: 978-1-7804-0502-5
- [13] Vitko T. G., Cowden S., Suffet I. H.; Evaluation of bioscrubber and biofilter technologies treating wastewater foul air by a new approach of using odor character, odor intensity, and chemical analyses; Water Research; 2022; 220; artykuł 118691; DOI: 10.1016/j.watres.2022.118691
- [14] Capelli L., Bax C., Diaz C., Izquierdo C., Arias R., Salas Seoane N. (2019) Review on odour pollution, odour measurement, abatement techniques, D-NOSES, H2020-SwafS-23-2017-789315
- [15] Dobsław D., Schulz A., Helbich S., Dobsław C., Engesser K.-H.; VOC removal and odor abatement by a low-cost plasma enhanced biotrickling filter process; Journal of Environmental Chemical Engineering; 2017; 5(6); 5501–5511; DOI: 10.1016/j.jece.2017.10.015
- [16] Ren B., Zhao Y., Lyczko N., Nzihou A.; Current Status and Outlook of Odor Removal Technologies in Wastewater Treatment Plant; Waste and Biomass Valorization; 2018; 9(3); 365–380; DOI: 10.1007/s12649-018-0384-9
- [17] Márquez P., Benítez A., Caballero Á., Siles J. A., Marfín M. A.; Integral evaluation of granular activated carbon at four stages of a full-scale WWTP deodorization system; Science of the Total Environment; 2021; 754; artykuł 142237; DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142237
- [18] Shammay A., Evanson I. E. J., Stuetz R. M.; Selection framework for the treatment of sewer network emissions; Journal of Environmental Management; 2019; 249; artykuł 109305; DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109305
- [19] Qamaruz-Zaman N., Yaacof N., Kamarzaman F. F.; Control of odors in the food industry; The Interaction of Food Industry and Environment; 2021; s. 281–313; DOI: 10.1016/B978-0-12-816449-5.00009-6
- [20] Shammay A., Evanson I., Stuetz R. M.; A comparison of removal performance of volatile organic and sulfurous compounds between odour abatement systems; Water Science & Technology; 2018; 77(11); 2657–2667; DOI: 10.2166/wst.2018.223
- [21] Estrada J. M., Kraakman N. J. R., Lebrero R., Muñoz R.; A sensitivity analysis of process design parameters, commodity prices and robustness on the economics of odour abatement technologies; Biotechnology Advances; 2012; 30(6); 1354–1363; DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.02.010
- [22] Environment Agency; Review of Dispersion Modelling for Odour Predictions. Science Report SC030170/SR3; Bristol; 2007; ISBN: 978-1-84432-718-8
- [23] AMIGO & Olores.org; International Handbook on the Assessment of Odour Exposure using Dispersion Modelling; Bilbao; 2023; ISBN: 978-84-09-52429-7; DOI: 10.5281/zenodo.8367724
- [24] Brancher M., Capelli L., van Harreveld A., Schauburger G.; New International Handbook on the Assessment of Odour Exposure Using Dispersion Modelling; AMIGO / Olores.org; 2023; DOI: 10.5281/zenodo.8367724
- [25] Environmental Protection Agency Ireland (EPA Ireland); AG9 Odour Emissions Guidance Note; Wexford; 2019
- [26] Polski Komitet Normalizacyjny; PN-EN 13725:2022-07 Emisje ze źródeł stacjonarnych – Oznaczenie stężenia odorów za pomocą olfaktometrii dynamicznej i szybkości emisji odorów, Warszawa; 2022 (EN 13725:2022 Stationary source emissions – Determination of odour concentration by dynamic olfactometry and odour emission rate; Europa Committee for Standardization, Brussels, Belgium; 2022)
- [27] Janusz, M.; Nadziakiewicz, J.; Modelowanie rozpraszania emisji z pojazdów samochodowych w terenie zabudowanym; Archives of Environmental Protection; 2002; 28(3); 5–20;
- [28] Mitosek M., Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2007
- [29] Ministerstwo Środowiska RP, Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji w powietrzu, wraz z Załącznikiem nr 3: Referencyjne metodyki modelowania poziomów substancji w powietrzu, Dz.U. nr 16, poz. 87, Warszawa, 26.01.2010 r.
- [30] Ministerstwo Środowiska RP, Ustawa o przeciwdziałaniu uciążliwości zapachowej, Warszawa, projekt z dn. 18 października 2008 r.
- [31] Merecka B.; Prawne regulacje zapachowej uciążliwości powietrza; Przegląd Komunalny; 2009; nr 10; s. 44–47

Mechanika płynów

Wybrane zagadnienia w ujęciu komputerowym

Kazimierz Żarski

Warszawa 2007

Sprzedaż prowadzi:

Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”
02-674 Warszawa, ul. Marynarska 14, tel./fax: (22) 843-77-71
e-mail: redakcja@informacjainstal.com.pl
wydawnictwo@informacjainstal.com.pl

