

Modelowanie propagacji hałasu w otoczeniu wiertni na podstawie mocy akustycznej urządzeń oraz kalibracji wynikami pomiarów terenowych

Modeling of Noise Propagation in the Vicinity of a Drilling Rig Based on Equipment Sound Power and Calibration with Field Measurement Results

Janusz Buczek, Zbigniew Balawajder, Tadeusz Kwilosz

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: W artykule przedstawiono zmodyfikowaną procedurę modelowania propagacji hałasu emitowanego przez urządzenia wiertnicze pracujące w terenie otwartym. Problem badawczy wynika z potrzeby sporządzania prognoz oddziaływania akustycznego już na etapie planowania lub przygotowania prac, kiedy często nie są jeszcze dostępne pełne dane pomiarowe z docelowej lokalizacji. W takich przypadkach podstawą oceny mogą być nominalne poziomy mocy akustycznej urządzeń oraz dane z pomiarów wykonanych na obiektach o zbliżonej konfiguracji technologicznej. Celem pracy było opracowanie i sprawdzenie modelu pozwalającego na wyznaczenie przestrzennego rozkładu poziomu hałasu w otoczeniu wiertni, z uwzględnieniem skumulowanej mocy akustycznej źródeł, odległości od źródła równoważnego, kierunku propagacji oraz korekty położenia źródła za pomocą parametrów dx i dy . Model kalibrowano z wykorzystaniem algorytmu Monte Carlo, przyjmując jako kryterium minimalizację różnic między wartościami zmierzonymi i obliczonymi. Do weryfikacji wykorzystano dwa zestawy danych pomiarowych, obejmujące porę dzienną i nocną, uzyskane w otoczeniu czynnej wiertni. Uwzględniono również podstawowe warunki meteorologiczne występujące podczas pomiarów, w tym prędkość i kierunek wiatru, temperaturę, wilgotność względną oraz ciśnienie atmosferyczne. Wyniki modelowania zestawiono z mapami rozkładu hałasu sporządzonymi metodą krigingu, stosowaną jako metoda interpolacyjna i porównawcza. Analiza wykazała, że zmodyfikowany model umożliwia odtworzenie rozkładu poziomu hałasu z akceptowalną zgodnością z pomiarami terenowymi. Średnie różnice między wartościami pomiarowymi i obliczeniowymi nie przekroczyły 9,3% w przypadku pory dziennej oraz 10,6% w przypadku pory nocnej, natomiast błąd RMSE wyznaczony w procedurze walidacyjnej wyniósł odpowiednio 3,2 dB i 3,26 dB. Uzyskane rezultaty wskazują, że zaproponowana procedura może stanowić użyteczne narzędzie wspomagające prognozowanie oddziaływania akustycznego urządzeń wiertniczych oraz przygotowywanie analiz środowiskowych dla obiektów planowanych lub modernizowanych.

Słowa kluczowe: hałas środowiskowy, wiertnia, moc akustyczna, propagacja hałasu, modelowanie numeryczne, kriging, Monte Carlo.

ABSTRACT: The article presents a modified procedure for modeling the propagation of noise emitted by drilling equipment operating in open terrain. The research problem results from the need to prepare acoustic impact forecasts at the planning or preparation stage of drilling works, when complete measurement data from the target location are often not yet available. In such cases, the assessment may be based on nominal sound power levels of the equipment and on measurement data obtained from facilities with a similar technological configuration. The aim of the study was to develop and verify a model enabling the spatial distribution of noise levels in the vicinity of a drilling rig to be determined, taking into account the cumulative sound power of the sources, the distance from the equivalent source, the direction of propagation and correction of the source position using the dx and dy parameters. The model was calibrated using the Monte Carlo algorithm, with the minimization of differences between measured and calculated values adopted as the optimization criterion. Two measurement data sets, representing daytime and night-time conditions, obtained in the vicinity of an operating drilling rig, were used for verification. The basic meteorological conditions occurring during the measurements were also included, such as wind speed and direction, temperature, relative humidity and atmospheric pressure. The modeling results were compared with noise distribution maps prepared using the kriging method, treated as an interpolation and reference method. The analysis showed that the modified model makes it possible to reproduce the distribution of noise levels with acceptable agreement with field measurements. The average differences between measured and calculated values did not exceed 9.3% for daytime and 10.6% for night-time conditions, while the RMSE determined in the validation procedure was 3.2 dB and 3.26 dB, respectively. The results indicate that the proposed

procedure may be a useful tool supporting the forecasting of the acoustic impact of drilling equipment and the preparation of environmental analyses for planned or modernized facilities.

Keywords: environmental noise, drilling rig, sound power level, noise propagation, numerical modeling, kriging, Monte Carlo.

Wstęp

Praca urządzeń wiertniczych zainstalowanych w rejonach poszukiwań ropy i gazu wiąże się z emisją hałasu o charakterze ciągłym lub okresowo zmiennym. Źródłami emisji są przede wszystkim napędy urządzeń technologicznych, pompy płuczkowe, agregaty prądotwórcze, układy wyciągowe oraz urządzenia pomocnicze. Hałas ten może oddziaływać na tereny chronione akustycznie, zwłaszcza gdy wiertnia jest lokalizowana w pobliżu zabudowy mieszkaniowej, terenów rekreacyjnych lub obszarów cennych przyrodniczo. Z tego względu ocena propagacji hałasu jest istotnym elementem analiz środowiskowych oraz dokumentacji przygotowywanej na potrzeby decyzji administracyjnych (Schoenmakers i in., 2007; Woźny i in., 2014; Zaleska-Bartosz i Niemczewska, 2020).

W praktyce oceny oddziaływania akustycznego często wykonuje się jeszcze przed rozpoczęciem prac terenowych. Na tym etapie brakuje wyników pomiarów w docelowej lokalizacji, dlatego wykorzystuje się dane katalogowe, wyniki pomiarów z podobnych obiektów oraz modele obliczeniowe. Kluczowym problemem jest wówczas określenie, w jakim stopniu nominalne poziomy mocy akustycznej urządzeń mogą być wykorzystane do prognozowania rozkładu poziomu hałasu w otoczeniu wiertni. Drugi problem dotyczy porównania modeli opartych na fizycznych założeniach propagacji z metodami interpolacyjnymi, takimi jak kriging, które opisują rozkład przestrzenny na podstawie danych pomiarowych, ale nie odnoszą się bezpośrednio do mechanizmu emisji i tłumienia dźwięku (Deutsch, 2002; Bednarz i Urba, 2005; Urba i Bednarz, 2007; Caineta, 2010; Balawajder i Buczek, 2014).

Cel i zakres pracy

Celem pracy było opracowanie i sprawdzenie zmodyfikowanego modelu propagacji hałasu w otoczeniu wiertni, w którym punktem wyjścia jest skumulowany poziom mocy akustycznej urządzeń wiertniczych, a parametry modelu są kalibrowane na podstawie wyników pomiarów terenowych. Zakres pracy obejmował: określenie danych wejściowych modelu, wyznaczenie skumulowanej mocy akustycznej źródeł, kalibrację parametrów metodą Monte Carlo, wykonanie map rozkładu poziomu hałasu dla pory dziennej i nocnej, porównanie wyników z rozkładami otrzymanymi metodą krigingu oraz ocenę niepewności z wykorzystaniem krosvalidacji.

Metodyka modelowania propagacji hałasu w środowisku pracy urządzeń wiertniczych

W dotychczasowych opracowaniach autorów tego artykułu dotyczących oceny hałasu w otoczeniu wiertni podstawą analiz były pomiary terenowe oraz mapy przestrzennego rozkładu poziomu hałasu. W niniejszej pracy wykorzystano te doświadczenia do sprawdzenia modelu, który łączy dane o nominalnej mocy akustycznej urządzeń z kalibracją względem wyników pomiarowych. Takie podejście pozwala zachować związek modelu z fizycznymi parametrami źródeł emisji, a jednocześnie ograniczyć błąd wynikający z przyjęcia zbyt uproszczonej lokalizacji źródła zastępczego (Bednarz i Urba, 2005; Urba i Bednarz, 2007; Balawajder i Buczek, 2014).

Jako metodę odniesienia przyjęto kriging, czyli metodę interpolacyjną stosowaną do wyznaczania wartości badanego parametru w punktach nieobjętych pomiarem na podstawie przestrzennej korelacji danych. Zaletą krigingu jest możliwość szybkiego tworzenia map rozkładu hałasu na podstawie punktów pomiarowych. Ograniczeniem tej metody jest jednak efekt wygładzania oraz brak bezpośredniego uwzględnienia parametrów źródeł hałasu, takich jak moc akustyczna, kierunkowość emisji lub tłumienie związane z odległością i warunkami terenowymi (Deutsch, 2002; Caineta, 2010).

Z tego powodu kriging potraktowano w artykule jako metodę porównawczą, a nie jako model fizyczny propagacji. Porównanie wyników uzyskanych z krigingu i z modelu obliczeniowego pozwala na dokonanie oceny, czy wprowadzanie informacji o źródłach hałasu poprawia interpretację przestrzennego rozkładu poziomu dźwięku.

Model obliczeniowy oparto na założeniu, że zespół urządzeń wiertniczych można przedstawić jako równoważne źródło hałasu o skumulowanym poziomie mocy akustycznej, wyznaczonym z wykorzystaniem zasad sumowania energetycznego poziomów mocy akustycznej oraz założeń propagacji w terenie otwartym (PN ISO 9613-2:2002; Nalepa i in., 2015; Kirpluk, 2017). W odróżnieniu od wcześniejszego podejścia nie przyjęto jednak sztywno, że źródło to znajduje się w geometrycznym środku wiertni. Położenie źródła równoważnego zostało skorygowane parametrami dx i dy , wyznaczanymi podczas kalibracji modelu. Dzięki temu model nie tylko dopasowuje poziom hałasu, ale także wskazuje najbardziej prawdopodobne położenie źródła zastępczego względem punktów pomiarowych.

Założenia modelu przyjęte w obliczeniach:

- Źródła składowe znajdujące się w obrębie wiertni zastąpiono jednym równoważnym źródłem hałasu, którego

poziom mocy akustycznej obliczono przez energetyczne sumowanie nominalnych poziomów mocy akustycznej poszczególnych urządzeń (PN ISO 9613-2:2002; Nalepa i in., 2015; Kirpluk, 2017).

- Analizę prowadzono dla terenu otwartego, w którym propagacja hałasu zależy głównie od odległości, kierunku propagacji, warunków atmosferycznych oraz charakteru powierzchni terenu (PN ISO 9613-2:2002).
- Punkty pomiarowe rozmieszczono na kierunkach podstawowych N, S, W, E oraz na dodatkowych kierunkach pośrednich wyznaczonych pod kątem 45° względem osi podstawowych.
- Parametry modelu kalibrowano oddzielnie dla dwóch zestawów danych: pory dziennej i pory nocnej. Pozwoliło to ocenić wpływ zmiennych warunków pomiaru na dopasowanie modelu.
- Pomiaru wykonywane były w niezabudowanym terenie otwartym, gdzie na tłumienie hałasu wpływają warunki atmosferyczne (wilgotność powietrza, temperatura powietrza, prędkość i kierunek wiatru) oraz rodzaj powierzchni terenu (trawa, niskie zarośla itp.).
- Punkty pomiarowe umiejscowione były na dwóch osiach prostopadłych (w stosunku do źródła dźwięku) w kierunkach: N, S, W, E.
- Tłumienie hałasu zależy od: odległości punktu pomiarowego od źródła, kierunku, warunków atmosferycznych i rodzaju powierzchni terenu.

Konstrukcję modelu opracowano w etapach przedstawionych poniżej:

Etap 1.

Wyliczono skumulowaną wartość poziomu mocy akustycznej na podstawie założonej nominalnej mocy akustycznej poszczególnych źródeł składowych.

Etap 2.

Wybrano nieliniowy model propagacji hałasu:

$$Y_{mod}(i) = a_1 * SWL_{max} - a_{3,k} * 20 \log \left(\frac{a_2}{R(i)} \right) - 11 \quad (1)$$

gdzie:

- i – numer kolejnego punktu pomiarowego,
- $R(i)$ – odległość punktu pomiarowego od źródła hałasu,
- a_1 – parametr modelu skalujący skumulowaną moc akustyczną źródła hałasu,
- a_2 – parametr modelu uwzględniający tłumienie hałasu ze względu na odbicia od przeszkód,
- $a_{3,k}$ – parametr modelu uwzględniający tłumienie hałasu w kierunku k (1 – S, 2 – W, 3 – N, 4 – E).

Etap 3.

Dokonano kalibracji modelu, tzn. wyliczenia takich wartości parametrów modelu (a_1 , $a_{2,k}$, a_3), aby suma reszt modelu

(różnic pomiędzy wartościami zmierzonymi w punktach pomiarowych a wyliczonymi na podstawie modelu) była jak najmniejsza. Jako miarę dopasowania parametrów modelu do wykonanych pomiarów wybrano funkcję celu (Gładysz i Mercik, 2007):

$$F_{celu} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{|y_{mod}(i) - y_{pom}(i)|}{y_{mod}(i)} \right) \quad (2)$$

gdzie:

$y_{pom}(i)$ – zmierzona wartość hałasu w punkcie i ,

n – liczba punktów pomiarowych.

Założono, że parametry modelu (a_j) posiadają rozkład prawdopodobieństwa zmiennej losowej zgodny z rozkładem trójkątnym o parametrach: $a_{j,min}$, $a_{j,śred}$, $a_{j,max}$, gdzie $a_{j,min}$, $a_{j,śred}$, $a_{j,max}$ – minimalna, średnia i maksymalna wartość parametru j .

Do wyznaczenia minimalnej wartości funkcji celu zastosowano algorytm Monte Carlo. Metoda ta została użyta jako procedura optymalizacyjna pozwalająca przeszukać przestrzeń dopuszczalnych wartości parametrów modelu i wybrać taki ich zestaw, dla którego różnice między wartościami pomierzonymi oraz obliczonymi są najmniejsze. Po kalibracji model może być wykorzystany do obliczania poziomu hałasu w dowolnym punkcie analizowanego obszaru. Otrzymane wartości można następnie przedstawić w postaci mapy przestrzennego rozkładu hałasu oraz porównać z rozkładem uzyskanym metodą krigingu (Deutsch, 2002; Caineta, 2010).

W niniejszym artykule wprowadzono dwie zasadnicze modyfikacje modelu: korektę położenia równoważnego źródła dźwięku oraz rozszerzenie układu punktów pomiarowych o kierunki pośrednie.

Pierwsza modyfikacja polegała na odejściu od założenia, że źródło równoważne znajduje się w z góry ustalonym centralnym punkcie wiertni. Przyjęcie takiego uproszczenia może prowadzić do błędów, ponieważ rzeczywiste rozmieszczenie urządzeń, ich czas pracy oraz udział w emisji hałasu powodują, że akustyczny środek układu nie musi pokrywać się ze środkiem geometrycznym obiektu.

Wprowadzono zatem parametry dx i dy , opisujące przesunięcie źródła równoważnego względem środka siatki obliczeniowej. Parametry te są traktowane jako zmienne losowe o rozkładzie trójkątnym i są wyznaczane w toku procedury Monte Carlo równolegle z pozostałymi parametrami modelu.

Konsekwencją tej modyfikacji jest każdorazowe obliczanie odległości między aktualnym położeniem źródła równoważnego, a wszystkimi punktami pomiarowymi i węzłami siatki modelu. Wynikiem procedury jest więc nie tylko mapa hałasu, lecz także oszacowanie położenia źródła zastępczego najbardziej zgodnego z wynikami pomiarów.

Zasadniczą zmianą jest odejście od założenia, że teoretyczne skumulowane źródło dźwięku, wyliczone na podstawie nominalnych mocy akustycznych urządzeń pracujących w obszarze wiertni, znajduje się w z góry ustalonym miejscu – centralnym punkcie obszaru wiertni. Przyjęcie takiego założenia prowadziło do błędów wynikających z wadliwej metody liczenia odległości skumulowanego źródła dźwięku od punktów pomiarowych w terenie.

Materiał pomiarowy i realizacja obliczeń

Do sprawdzenia modelu wykorzystano dwa komplety danych pomiarowych, obejmujące pomiary wykonane w porze dziennej i nocnej w otoczeniu wiertni podczas pracy urządzeń. Dane te potraktowano jako materiał referencyjny do kalibracji i oceny modelu. W analizowanym układzie pracowały następujące urządzenia, dla których przyjęto nominalne poziomy mocy akustycznej LWA:

- silniki elektryczne wyciągu wiertniczego typu BAFD 400S 623 Ex (2 szt.) – 120 dB;
- silnik spalinowy pompy płuczkowej typu CAT D399 (1 szt.) – 120 dB;
- silnik spalinowy pompy płuczkowej typu CAT 3508C (1 szt.) – 120 dB;
- silniki spalinowe typu CAT 3456 napędzające agregaty prądotwórcze IVECO (2 szt.) – 122 dB;
- pompa płuczkowa typu PZ-8 (1 szt.) – 108 dB;
- pompy płuczkowe typu F-801 (2 szt.) – 106 dB.

Posługując się znanymi metodami (PN ISO 9613-2:2002; Nalepa i in., 2015; Kirpluk, 2017; Zaleska-Bartosz i Niemczewska, 2018), skumulowany poziom mocy akustycznej pracujących urządzeń obliczono metodą sumowania energetycznego poziomów mocy akustycznej. Dla analizowanego zestawu urządzeń uzyskano wartość 125,54 dB. Wartość tę przyjęto jako wejściową charakterystykę źródła równoważnego w modelu propagacji.

Kolejną modyfikacją modelu jest uzupełnienie rozlokowania punktów pomiarowych o dodatkowe dwa kierunki wyznaczone na liniach usytuowanych pod kątem 45° w stosunku do uprzednio zdefiniowanych osi wyznaczających kierunki: N, S, W, E.

Realizacja opracowanej metody

W celu przetestowania opracowanego modelu wybrano dwa komplety pomiarów hałasu (dzień i noc) wykonanych w otoczeniu wiertni podczas pracy urządzeń. Warunki atmosferyczne panujące podczas wykonywania pomiarów zawarte są w tabeli 1.

W celu wyznaczenia przestrzennych rozkładów hałasu współrzędne geograficzne punktów pomiarowych przekształcono do

Tabela 1. Warunki atmosferyczne podczas wykonywania pomiarów hałasu

Table 1. Atmospheric conditions when performing noise measurements

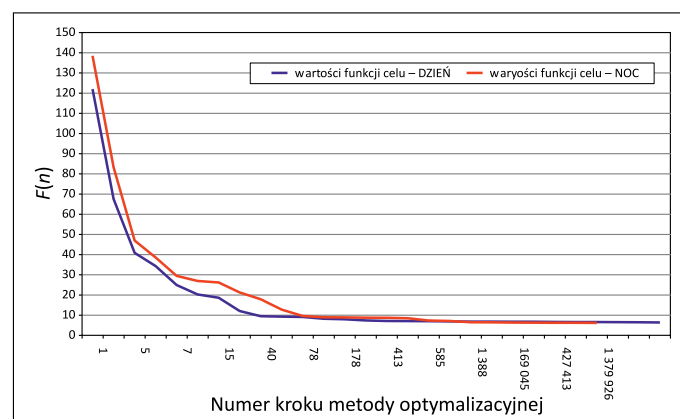
Wielkości mierzone (średnie)	Wartość (dzień/noc)
Prędkość i kierunek wiatru [m/s]	0÷0,5 południowy / 0,5÷1 południowy
Temperatura otoczenia [°C]	+13 / +9
Wilgotność względna [%]	52 / 70
Ciśnienie atmosferyczne [hPa]	996 / 996

układu lokalnego obejmującego obszar 1000 m × 1000 m. Obszar obliczeniowy pokryto siatką o oczku 50 m × 50 m. Punkt o współrzędnych (500, 500) przyjęto jako początkowe położenie źródła równoważnego, natomiast jego ostateczne położenie korygowano za pomocą parametrów dx i dy .

Kalibrację modelu wykonano metodą Monte Carlo dla tych samych zestawów danych, które wykorzystano do utworzenia map metodą krigingu. Dzięki temu porównanie obu metod opierało się na identycznych danych wejściowych, co ogranicza wpływ różnic wynikających z doboru punktów pomiarowych (Deutsch, 2002; Gładysz i Mercik, 2007; Caineta, 2010).

W centralnym punkcie siatki, o współrzędnych (500, 500), umieszczono źródło hałasu. Punkty pomiarowe rozmieszczono w węzłach siatki modelu. W pierwszej kolejności utworzono przestrzenny rozkład hałasu, w oparciu o wyniki pomiarów, metodą krigingu. Na tej podstawie wyliczono wartości poziomu hałasu we wszystkich węzłach siatki modelu. Wyliczeń dokonano dla dwóch zestawów danych pomiarowych (dzień i noc). Wygenerowano mapy przestrzennych rozkładów hałasu (rysunki 2 i 5).

Następnie, posługując się metodą Monte Carlo, przeprowadzono kalibrację opracowanego modelu numerycznego propagacji hałasu, używając tych samych zestawów danych.



Rysunek 1. Zmiany wartości funkcji celu $F(n)$ metody optymalizacyjnej

Figure 1. Changes in the value of the objective function $F(n)$ of the optimization method

Na podstawie przeprowadzonych testów metody optymalizacyjnej stwierdzono, że po wykonaniu 2 000 000 kroków (losowań) nie obserwuje się zmiany wartości funkcji celu. W związku z tym wszystkie eksperymenty numeryczne związane z zastosowaniem metody Monte Carlo przeprowadzono dla $n = 2\,000\,000$ kroków. Przebieg zmian wartości funkcji celu zaprezentowany jest na rysunku 1.

Tabela 2. Parametry rozkładu oraz wyniki dopasowania parametrów modelu

Table 2. Distribution parameters and results of fitting model parameters

Parametry modelu	Parametry rozkładu			Wyniki dopasowania	
	minimum	średnia	maksimum	dzień	noc
a_1	0,9	1,00	1,1	1,003	1,005
a_2	1,0	1,25	1,5	1,402	1,446
$a_{3,1}$	1,0	1,25	1,5	1,426	1,451
$a_{3,2}$	1,0	1,25	1,5	1,405	1,428
$a_{3,3}$	1,0	1,25	1,5	1,255	1,274
$a_{3,4}$	1,0	1,25	1,5	1,389	1,411
dx	-20	0,0	20	7,4	3,6
dy	-20	0,0	20	10,7	9,9
F_{celu}				6,375	6,162

W wyniku zastosowanej procedury uzyskano zestawy parametrów modelu minimalizujące funkcję celu dla pory dziennej i nocnej. Parametry dx i dy wskazują, że optymalne położenie źródła równoważnego było przesunięte względem środka modelu, co potwierdza zasadność rezygnacji ze sztywnego

założenia o centralnej lokalizacji źródła. Wyniki dopasowania parametrów modelu przedstawiono w tabeli 2.

Tabela zawiera również reszty, czyli względne różnice między wartościami modelowymi i pomiarowymi. Największe odchylenia wyniosły 9,3% dla pory dziennej oraz 10,6% dla pory nocnej.

Na podstawie skalibrowanego modelu obliczono wartości poziomu hałasu we wszystkich węzłach siatki. Następnie wygenerowano mapy przestrzennego rozkładu poziomu hałasu dla pory dziennej i nocnej. Analogiczne mapy przygotowano metodą kriginu, wykorzystując bezpośrednio wyniki pomiarów.

Wartości poziomu hałasu w punktach pomiarowych uzyskane z pomiarów terenowych oraz z obliczeń modelem przedstawiono w tabeli 3.

Różnice między rozkładami otrzymanymi metodą kriginu i z modelu obliczeniowego przedstawiono na mapach różnic. Ich interpretacja pozwala wskazać obszary, w których model fizyczno-empiryczny daje wyniki zbliżone do interpolacji, oraz obszary, w których widoczne są większe rozbieżności, wynikające z odmiennego sposobu tworzenia rozkładu przestrzennego.

W dalszej kolejności na podstawie opracowanego modelu wyliczono wartości poziomu hałasu we wszystkich węzłach siatki modelu. Stosując metodę kriginu dla tak otrzymanych wartości, wygenerowano mapy przestrzennych rozkładów hałasu (rysunki 3 i 6).

Następnie, w celu porównania wyników uzyskanych obydwiema metodami, wyliczono różnice wartości poziomu hałasu w odpowiadających sobie węzłach modelu i zobrazowano je w postaci map (rysunki 4 i 7).

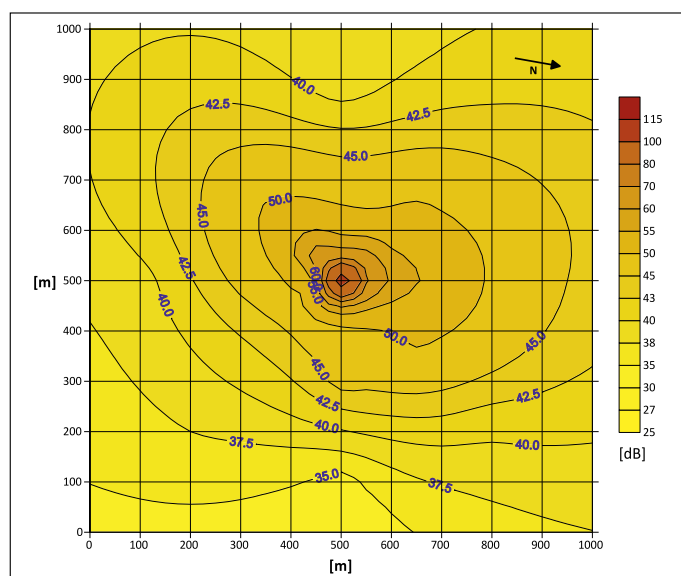
Tabela 3. Poziom hałasu w punktach pomiarowych

Table 3. Noise level at measurement points

Współrzędne siatki modelu		Dzień			Noc		
		poziom hałasu [dB]					
		pomiar	model	reszta [%]	pomiar	model	reszta [%]
500	500	125,5	114,96	−8,40	125,5	115,14	−8,25
500	450	61,6	59,8	−2,90	61,40	58,88	−4,10
500	400	49,1	52,5	6,80	48,50	51,24	5,70
500	300	46,3	44,5	−3,90	43,30	43,09	−0,50
500	100	34,0	36,2	6,60	33,10	34,65	4,70
450	500	57,1	61,2	7,20	57,20	60,97	6,60
400	500	51,2	53,7	4,90	48,00	52,95	10,30
300	500	46,6	45,7	−1,90	44,80	44,61	−0,40
100	500	39,6	37,5	−5,30	38,50	36,14	−6,10
550	500	—	—	—	—	—	—
600	500	59,1	61,8	4,60	58,00	60,46	4,20
700	500	54,0	53,9	−0,20	53,20	52,63	−1,10
900	500	46,0	46,2	0,30	45,10	44,87	−0,50

cd. Tabela 3/cont. Table 3

Współrzędne siatki modelu		Dzień			Noc		
		poziom hałasu [dB]					
		pomiar	model	reszta [%]	pomiar	model	reszta [%]
500	550	65,4	66,4	1,50	64,10	65,31	1,90
500	600	54,1	56,6	4,70	53,40	55,43	3,80
500	700	47,2	47,6	0,80	46,20	46,29	0,20
500	900	38,7	38,9	0,50	38,50	37,48	−2,60
465	465	60,9	59,9	−1,60	60,50	59,39	−1,80
429	429	48,2	52,7	9,30	—	—	—
359	359	43,1	44,9	4,20	41,50	43,69	5,30
217	217	38,5	36,8	−4,50	37,00	35,31	−4,60
465	535	70,8	66,0	−6,80	70,60	65,74	−6,90
429	571	57,3	58,0	1,30	57,00	57,25	0,40
359	641	51,2	50,0	−2,40	50,50	48,89	−3,20
217	783	44,7	41,9	−6,30	43,20	40,64	−5,90
535	535	70,0	69,5	−0,70	69,10	67,62	−2,10
571	571	54,8	59,8	9,00	53,20	58,29	9,60
641	641	51,2	51,0	−0,40	49,10	49,62	1,10
783	783	44,0	42,6	−3,10	42,80	41,25	−3,60
535	465	62,5	62,1	−0,70	61,30	60,68	−1,00
571	429	51,2	54,1	5,80	50,80	52,71	3,80
641	359	50,0	45,9	−8,20	47,60	44,40	−6,70
783	217	41,0	37,5	−8,50	40,20	35,93	−10,60

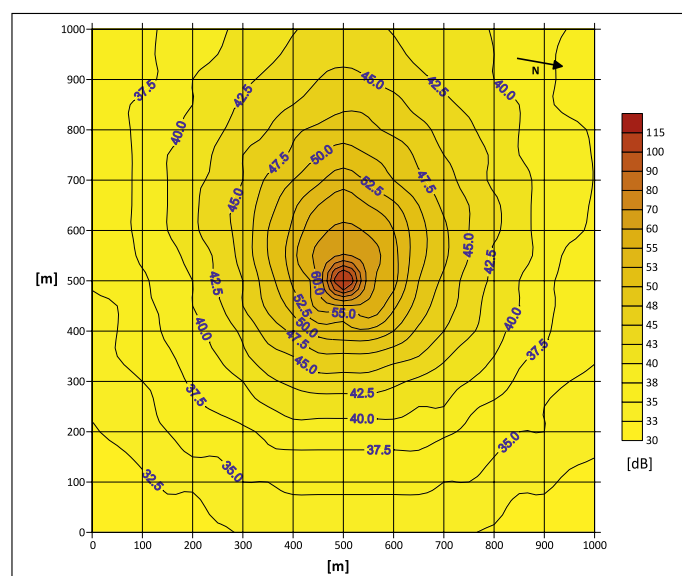


Rysunek 2. Mapa rozkładu poziomu hałasu utworzona metodą krigingu na podstawie wyników pomiarów dla pory dziennej

Figure 2. Noise level distribution map created using the kriging method based on measurement results for daytime

Ocena niepewności metodą krosvalidacji

Rozkłady przestrzenne poziomu hałasu są obarczone niepewnością wynikającą z ograniczonej liczby punktów

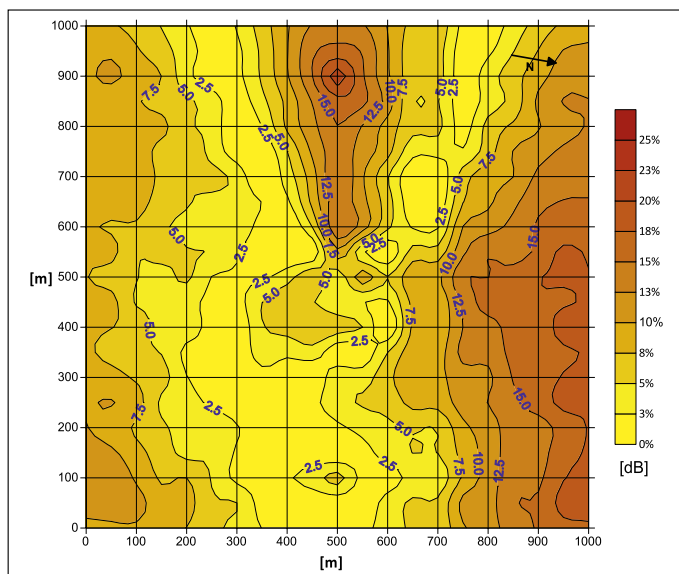


Rysunek 3. Mapa rozkładu poziomu hałasu utworzona na podstawie wyliczeń modelu dla pory dziennej

Figure 3. Noise level distribution map created based on model calculations for daytime

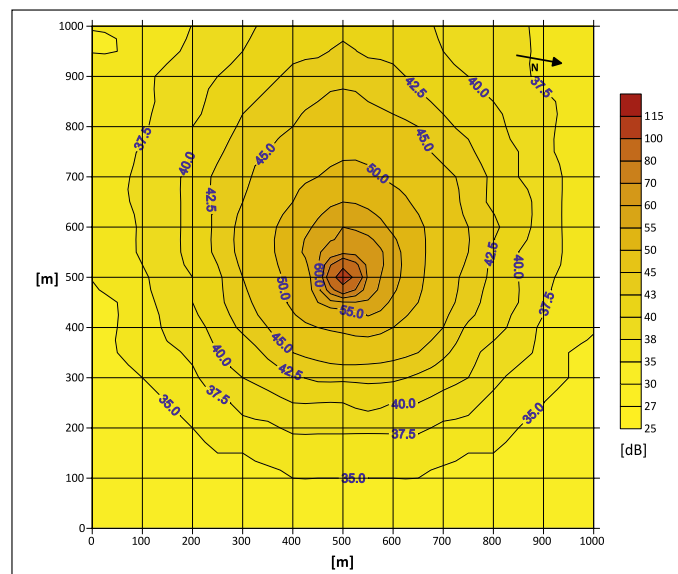
pomiarowych, zmienności warunków terenowych oraz przyjętej metody interpolacji lub modelowania.

Do oceny tej niepewności zastosowano krosvalidację typu *leave-one-out*.



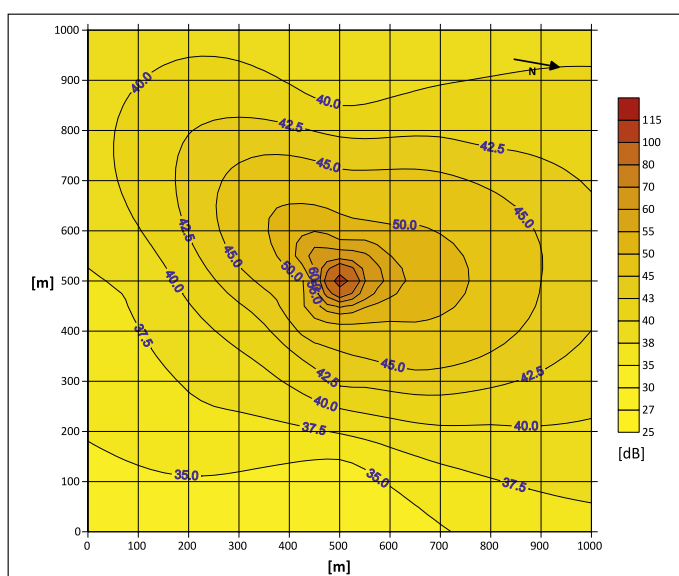
Rysunek 4. Mapa względnych różnic między wartościami poziomu hałasu wyliczonymi metodą krigingu oraz na podstawie skalibrowanego modelu dla pory dziennej

Figure 4. Map of relative differences between noise levels calculated using kriging and the calibrated model for daytime



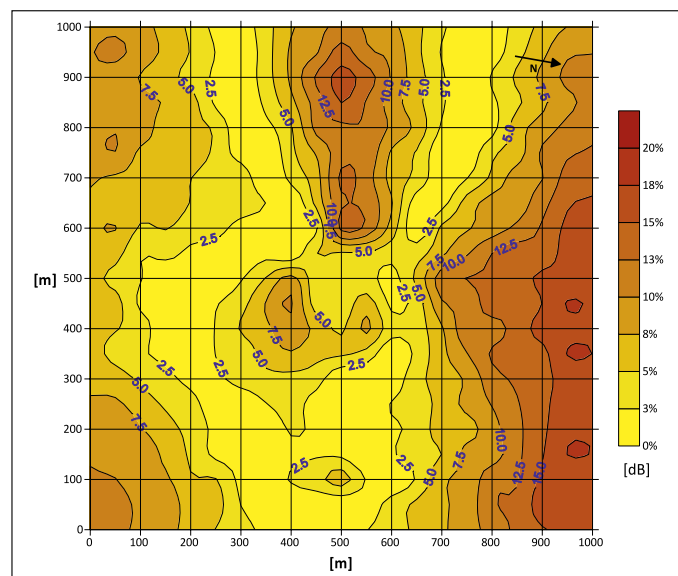
Rysunek 6. Mapa rozkładu poziomu hałasu utworzona na podstawie wyliczeń modelu dla pory nocnej

Figure 6. Noise level distribution map created based on model calculations for nighttime



Rysunek 5. Mapa rozkładu poziomu hałasu utworzona metodą krigingu na podstawie wyników pomiarów dla pory nocnej

Figure 5. Noise level distribution map created using the kriging method based on measurement results for the nighttime



Rysunek 7. Mapa względnych różnic między wartościami poziomu hałasu wyliczonymi metodą krigingu oraz na podstawie skalibrowanego modelu dla pory nocnej

Figure 7. Map of relative differences between noise levels calculated using kriging and the calibrated model for nighttime

Metoda krosvalidacji

Uzyskane wyniki przestrzennych rozkładów obarczone są niepewnością. Stopień poprawności modelu można ocenić, porównując wartości estymowane z rzeczywistymi (pochodzącymi z pomiarów). Można tego dokonać dzieląc zbiór danych źródłowych (na przykład używając metody losowej) na dwa podzbiory. Pierwszy z nich wykorzystywany jest jako zbiór danych źródłowych (punktów pomiarowych), a drugi służy do porównania wartości źródłowych z odpowiadającymi im

wartościami wyliczonymi. Metoda ta nazywana jest walidacją podzbiorem (*jackknifing*). Wadą tej metody jest to, że wymaga ona znacznej wielkości zbioru danych źródłowych, oraz fakt, że zmniejszając zbiór danych użytych do interpolacji, jednocześnie wpływamy na pogorszenie dokładności dopasowania modelu. Pewną modyfikacją tej metody jest tzw. krosvalidacja (ang. *cross-validation*). Polega ona na:

- eliminowaniu jednego punktu pomiarowego;
- wykonaniu interpolacji na pozostałych punktach modelu;

- odnotowaniu różnicy pomiędzy wartością w punkcie źródłowym i interpolowanym;
- zwróceniu punktu pomiarowego do zbioru danych źródłowych i eliminowaniu kolejnego punktu.

Proces powtarzano dla wszystkich punktów pomiarowych, uzyskując zbiór różnic między wartościami obserwowanymi i odtworzonymi. Na tej podstawie obliczono pierwiastek średniego błędu kwadratowego RMSE. Należy podkreślić, że choć krosvalidacja przy niewielkiej liczbie punktów pomiarowych ma charakter orientacyjny, to pozwala porównać stabilność otrzymanych rozkładów (Ivsinovic i in., 2019).

Ze względu na ograniczoną liczebność zbiorów danych zastosowanie krosvalidacji było szczególnie ważne. Pozwoliło ono uniknąć oceny modelu wyłącznie na podstawie wizualnego podobieństwa map i wprowadziło ilościową miarę błędu rekonstrukcji rozkładu poziomu hałasu.

Do oceny wybrano 7 punktów pomiarowych (testowych) oddalonych od źródła hałasu na odległość 100 m i 200 m. Punkty testowe wybrano w taki sposób, aby nie znajdowały się blisko źródła hałasu (mniej niż 100 m) ani na brzegu modelu. Jako miarę błędu (różnicy wartości zmierzonej i obliczonej) użyto pierwiastka średniego błędu kwadratowego RMSE (ang. *root mean squared error*), gdyż ma on wymiar mierzonego parametru (w tym przypadku poziom hałasu [dB]).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Pierwiastek średniego błędu kwadratowego RMSE

Table 4. Root Mean Square Error RMSE

Parametr	RMSE [dB]	
	dzień	noc
Poziom hałasu	2,72	3,26

Dyskusja wyników

Analiza wyników wskazuje, że skalibrowany model odtwarza poziomy hałasu w punktach pomiarowych z dokładnością wystarczającą do zastosowań prognostycznych i porównawczych. Największe różnice między wartościami pomierzonymi i obliczonymi wyniosły 9,3% w przypadku pory dziennej oraz 10,6% w przypadku pory nocnej. Wartości te należy interpretować w kontekście zmienności warunków terenowych, ograniczonej liczby punktów pomiarowych oraz uproszczenia polegającego na zastąpieniu wielu źródeł jednym źródłem równoważnym (PN ISO 9613-2:2002; Zaleska-Bartoszyńska i Niemczewska, 2018).

Model oparty na mocy akustycznej nie powinien być traktowany jako metoda konkurencyjna wobec pomiarów terenowych. Jego zaletą jest możliwość powiązania rozkładu poziomu hałasu z parametrami źródeł emisji oraz wykorzystania go na etapie prognozowania, gdy pełny zbiór danych pomiarowych nie jest jeszcze dostępny (Nalepa i in., 2015; Kirpluk, 2017).

Porównanie z krigingiem wykazało, że obie metody mogą prowadzić do zbliżonych rozkładów w sąsiedztwie punktów pomiarowych, natomiast większe różnice pojawiają się w obszarach oddalonych od punktów pomiarowych i źródła hałasu. Wynika to z faktu, że kriging jest metodą interpolacyjną, natomiast model obliczeniowy uwzględnia założenia dotyczące propagacji hałasu i położenia źródła równoważnego (Deutsch, 2002; Caineta, 2010).

Wprowadzenie parametrów dx i dy poprawiło interpretowalność modelu, ponieważ umożliwiło wyznaczenie akustycznie uzasadnionego położenia źródła równoważnego. Uzyskane przesunięcia wskazują, że przyjęcie centralnego położenia źródła może prowadzić do systematycznych błędów w obliczaniu odległości propagacji.

Krosvalidacja wykazała wartości RMSE równe 2,72 dB w przypadku pory dziennej oraz 3,26 dB w przypadku pory nocnej. Wyniki te potwierdzają, że niepewność rekonstrukcji rozkładu jest większa w porze nocnej, co może wynikać z odmiennych warunków meteorologicznych oraz innego udziału poszczególnych źródeł w emisji hałasu. Zastosowanie krosvalidacji jest uzasadnione zwłaszcza przy niewielkich zbiorach danych pomiarowych (Ivsinovic i in., 2019).

Wnioski

1. Zaproponowany model, po kalibracji parametrami wyznaczonymi metodą Monte Carlo, może być stosowany jako narzędzie wspomagające prognozowanie rozkładu poziomu hałasu w otoczeniu wiertni.
2. Wykorzystanie nominalnych poziomów mocy akustycznej urządzeń pozwala na powiązanie obliczeń z fizycznymi parametrami źródeł hałasu, jednak wymaga weryfikacji lub kalibracji na podstawie danych pomiarowych.
3. Różnice między wartościami pomiarowymi a wartościami obliczonymi z modelu nie przekroczyły 9,3% w przypadku pory dziennej i 10,6% w przypadku pory nocnej, co potwierdza poprawność dopasowania w analizowanych warunkach pomiarowych.
4. Korekta położenia źródła równoważnego za pomocą parametrów dx i dy ogranicza błąd wynikający z przyjęcia centralnego położenia źródła. Optymalne położenie źródła było przesunięte względem punktu centralnego o 7,4 m w kierunku E i 10,7 m w kierunku N w przypadku pory

dziennej oraz o 3,6 m w kierunku E i 9,9 m w kierunku N w przypadku pory nocnej.

5. Metoda krigingu pozostaje użytecznym narzędziem do wizualizacji danych pomiarowych, ale nie uwzględnia mechanizmów propagacji ani charakterystyki źródeł emisji. W analizach prognostycznych zasadne jest więc łączenie metod interpolacyjnych z modelami opartymi na mocy akustycznej.
6. Zastosowana krosvalidacja wykazała oszacowaną niepewność rozkładu na poziomie RMSE = 2,72 dB w przypadku pory dziennej oraz RMSE = 3,26 dB w przypadku pory nocnej, co należy uwzględnić przy interpretacji map rozkładu hałasu.
7. Dalsze prace powinny objąć walidację modelu na większej liczbie obiektów wiertniczych, przy zróżnicowanych warunkach meteorologicznych, różnych konfiguracjach urządzeń oraz większej liczbie punktów pomiarowych.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Modelowanie propagacji hałasu do środowiska w oparciu o moc akustyczną źródeł dźwięku i pomiary terenowe* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr arch. sprawy: DK-4100-21/24, nr arch. sprawozdania: KA-4101-1/23, zlec. wew. INiG – PIB: 0018/KA/23.

Literatura

- Balawajder Z., Buczek J., 2014. Badania poziomu hałasu emitowanego do środowiska przez urządzenia wiertnicze 2014–2015 r. *Materiały Instytutu Nafty i Gazu Państwowego Instytutu Badawczego, Oddział w Krośnie*.
- Bednarz S., Urba R., 2005. Noise intensity researches in drilling rig operation environment. Transactions of the VSB-Technical. University Ostrava, Mining and Geological Series. Monograph, 15.
- Caineta J.A.R., 2010. Applying Spatial Bootstrap and Bayesian Update in uncertainty assessment at oil reservoir appraisal stages. arXiv:1702.04450v1. DOI: 10.48550/arXiv.1702.04450.
- Deutsch C.V., 2002. Geostatistical Reservoir Modelling. Oxford University Press, Oxford.
- Gładysz B., Mercik J., 2007. Modelowanie ekonometryczne. Studium przypadku. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław*.
- Ivsnovic J., Velic J., Rajic R., 2019. Kriging with a Small Number of Data Points Supported by Jack Knifing, a Case Study in the Sava Depression (Northern Croatia). *Geosciences*, 9(1). DOI: 10.3390/geosciences9010036.
- Kirpluk M., 2017. Podstawy akustyki. Warszawa, NTL.
- Nalepa A., Kiprian K., Siemiątkowski G., Łach P., 2015. Metody wyznaczania mocy akustycznej źródła. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*, 21: 43–57.
- Schoenmakers J., Kerckers T., Böttger D., 2007. Noise management practices enable, promote drilling operations in densely populated areas. *Drilling Contractor*, May/June.
- Urba R., Bednarz S., 2007. Emisja hałasu urządzeń wiertniczych do środowiska otaczającego wiertnię. *WUG: Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, 12: 15–20.
- Woźny A., Dobosz M., Pacana A., 2014. Wpływ hałasu na jakość pracy. *Humanities and Social Sciences*, vol. XIX, 21 (2/2014): 251–258. DOI: 10.7862/rz.2014.hss.31.
- Zaleska-Bartos J., Niemczewska J., 2018. Emisje hałasu w górnictwie nafty i gazu – wiertnie. *Nafta-Gaz*, 4: 319–335. DOI: 10.18668/NG.2018.04.08.
- Zaleska-Bartos J., Niemczewska J., 2020. Wprowadzenie do oceny śladu środowiskowego dla sektora produkcji ropy naftowej i gazu ziemnego. *Nafta-Gaz*, 8: 527–532. DOI: 10.18668/NG.2020.08.05.

Akty prawne i normatywne

Norma PN ISO 9613-2:2002 Akustyka. Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczenia.



Janusz BUCZEK
Specjalista techniczny; kierownik Laboratorium
Badań Środowiskowych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: janusz.buczek@inig.pl



Zbigniew BALAWAJDER
Specjalista techniczny w Laboratorium Badań
Środowiskowych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: zbigniew.balawajder@inig.pl



Dr Tadeusz KWIŁOSZ
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania
Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl