



ELŻBIETA WALERIAN<sup>1)</sup>  
RYSZARD JANCZUR<sup>2)</sup>  
MIECZYŚLAW CZECHOWICZ<sup>3)</sup>

## SKUTECZNOŚĆ EKRAŃÓW AKUSTYCZNYCH JAKO ZABEZPIECZENIA PRZED HAŁASEM DROGOWYM W OBSZARACH ZURBANIZOWANYCH

**STRESZCZENIE.** Zastosowanie ekranu akustycznego do ograniczania hałasu tras komunikacyjnych powinna poprzedzać szczegółowa analiza skuteczności tego rozwiązania w konkretnym układzie urbanistycznym. W obszarze zabudowanym, wprowadzony ekran jest nie tylko źródłem cienia, ale również dodatkową powierzchnią odbijającą modyfikującą pole akustyczne w jego otoczeniu. Dlatego podstawą racjonalnej decyzji o zastosowaniu ekranu powinna być szczegółowa analiza rozkładu poziomego hałasu na fasadzie chronionego budynku jak i w jego otoczeniu. Przeprowadzenia takiej analizy można dokonać korzystając z symulacyjnych programów komputerowych, takich jak PROP7 przedstawiony w artykule. Program ten pozwala obliczyć skuteczność ekranowania przy uwzględnieniu wpływu szeregu parametrów charakteryzujących układ urbanistyczny, w tym usytuowanie budynków w stosunku do trasy komunikacyjnej, oraz parametrów trasy komunikacyjnej jako złożonego źródła hałasu.

### 1. WPROWADZENIE

Jakość klimatu akustycznego została doceniona jako równie istotny element przyjaznego człowiekowi środowiska, co czystość powietrza i wód. Świadczą o tym dokumenty przygotowane przez Unię Europejską [1] – [2] jak i działania podejmowane w Polsce [3] – [7]. Zgodnie z dyrektywami Unii przygotowane zostało polskie "Prawo ochrony środowiska" [8], z którego wynika obowiązek sporządzenia co 5 lat, map

<sup>1)</sup>dr hab. - Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk

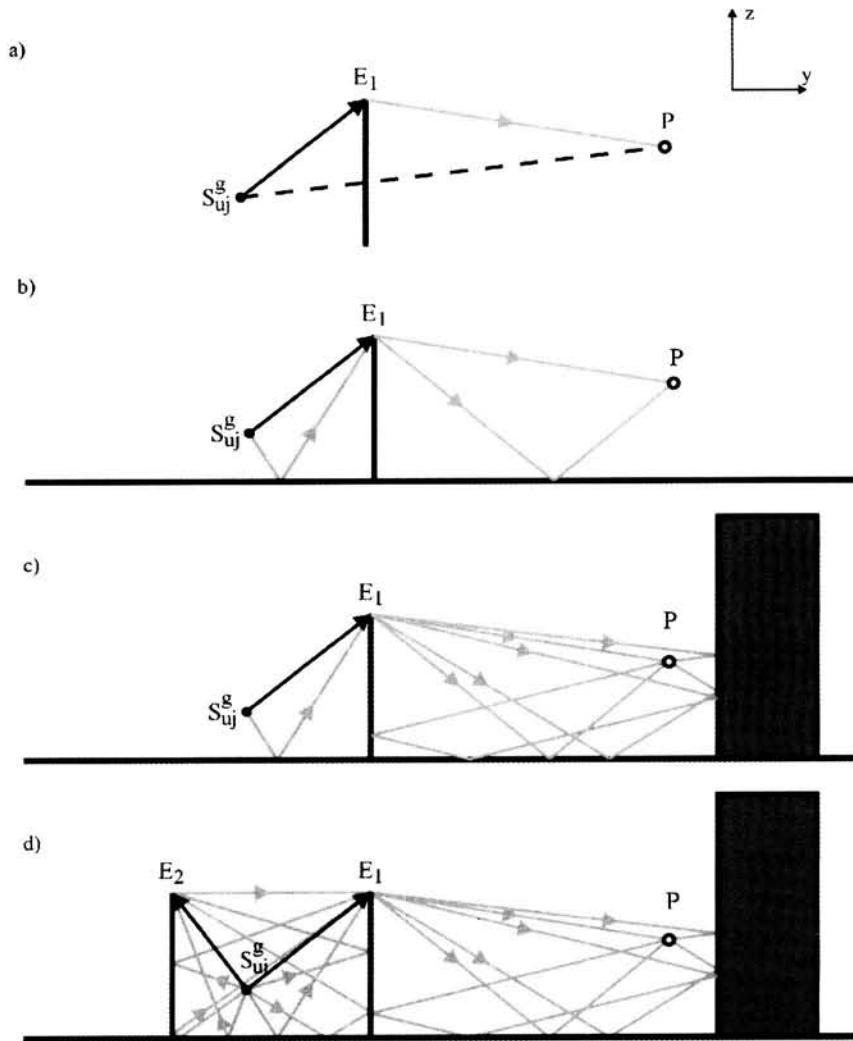
<sup>2)</sup>dr inż. - Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk

<sup>3)</sup>mgr inż. - Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Polska Akademia Nauk

akustycznych wraz z odpowiednimi planami działania, mającymi na celu zmniejszenie zagrożenia hałasem.

W obszarach miejskich najbardziej uciążliwymi źródłami hałasu, odpowiadającymi za dyskomfort akustyczny, są poruszające się pojazdy. Powszechnie wiadomo, że najskuteczniejsze jest zwalczanie hałasu u źródła. Jednocześnie, z punktu widzenia działań administracyjnych, łatwiej jest kontrolować hałas emitowany przez pojazdy i nakładać pewne ograniczenia na strumienie pojazdów poruszających się po poszczególnych trasach niż wprowadzać kosztowne zmiany przebiegu trasy czy ekrany akustyczne. Dopuszczalne poziomy hałasu emitowanego przez pojazdy, zgodnie z normami ISO 362, ISO 7188, zdefiniowane są przy określonych parametrach ruchu w obszarze niezabudowanym [9], [10]. W latach od 1966 do 1999 dopuszczalne poziomy zostały obniżone z 84 do 74 dB(A). Pomimo tego hałas w obszarach miejskich nie obniżył się w takim samym stopniu [11]. Wskazuje to na brak prostej, ilościowej zależności pomiędzy normami ISO, dotyczącymi hałasu emitowanego przez pojazdy, a rzeczywistym poziomem hałasu w obszarach miejskich. Obserwowany wzrost poziomu hałasu w miastach ma swoją główną przyczynę w rosnącej liczbie pojazdów. Ponadto parametry ruchu pojazdów w warunkach miejskich odbiegają od zdefiniowanych w normach ISO, a obszar propagacji hałasu nie jest otwartą przestrzenią, ale obszarem zabudowanym [12], [13]. Jak z tego wynika, działania mające na celu ograniczenie hałasu w obszarach miejskich muszą uwzględniać zarówno specyfikę emisji hałasu przez pojazdy w warunkach ruchu miejskiego, jak i to, że proces propagacji odbywa się w obszarze zabudowanym.

Proponowane jako rozwiązanie ograniczające propagację hałasu ekrany akustyczne eliminują falę bezpośrednią powodując powstanie cienia akustycznego. Jednak cień ten nie jest cieniem absolutnym, gdyż w wyniku oddziaływania fali z krawędzią, punkt krawędzi (punkt działania  $E_1$ ) przez który przebiega najkrótsza droga od źródła do punktu obserwacji, staje się wtórnym źródłem fali dyfrakcyjnej (rys. 1a). Fala ta jest obecna w całej przestrzeni, jednak największą amplitudę, równą połowie amplitudy fali bezpośredniej, ma w pobliżu granicy cienia. W warunkach rzeczywistych, umieszczony na podłożu ekran działa w obecności co najmniej jednej dodatkowej powierzchni odbijającej. Punkt działania  $E_1$  na krawędzi osiąga dwie fale: fala bezpośrednia i fala odbita od podłoża, które do punktu obserwacji mogą dotrzeć bezpośrednio lub po odbiciu od podłoża (rys. 1b). Konsekwencją odbić od podłoża jest to, że w punkcie obserwacji zamiast jednej fali dyfrakcyjnej, całkowite pole jest sumą czterech fal. W przypadku, gdy ekran stanowi ochronę fasady budynku przed hałasem tworzy on wraz z fasadą układ dwóch powierzchni odbijających. Wielokrotne odbicia między tymi powierzchniami stwarzają dla każdej fali, osiągnącej krawędź ekranu po stronie źródła, możliwość dotarcia do punktu obserwacji wieloma drogami (rys. 1c). Stąd całkowite pole w punkcie obserwacji jest sumą przyczynków wnoszonych przez wszystkie możliwe drogi docierania fali do punktu obserwacji. Zastosowanie dwóch równoległych ekranów odpowiednio zwielokrotnia liczbę fal osiągnąjących krawędź ekranu i w konsekwencji liczbę fal docierających do punktu obserwacji (rys. 1d).

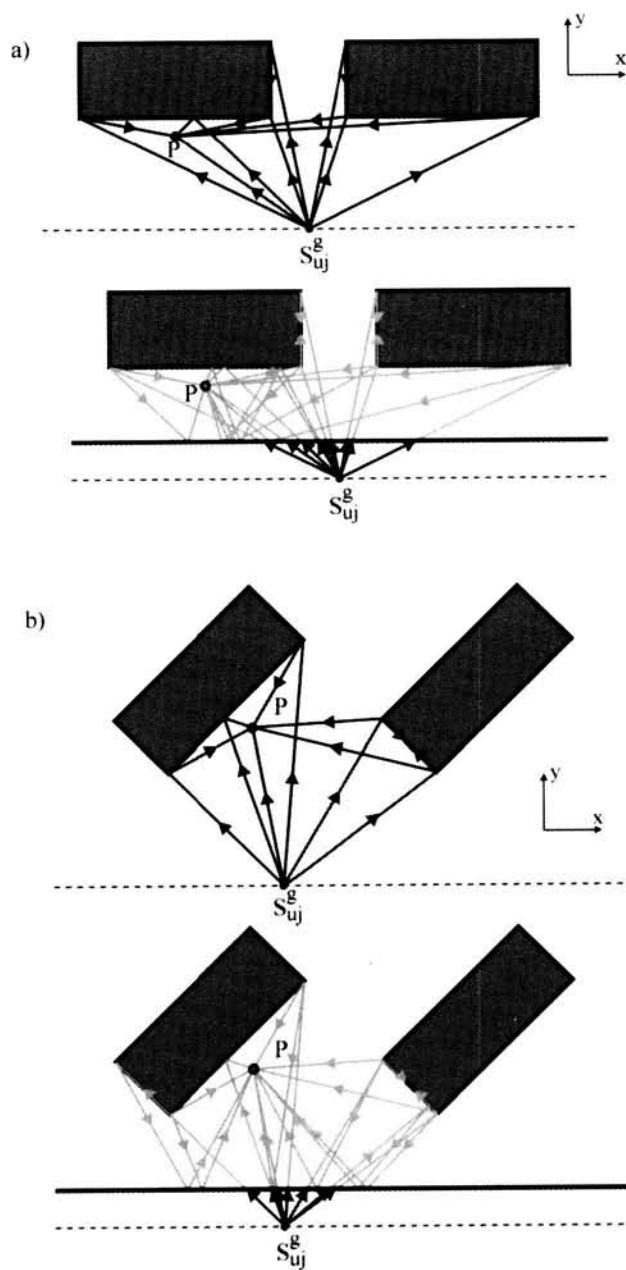


Rys.1. Efekt działania ekranu: a) w wolnej przestrzeni, b) w wolnej półprzestrzeni, c) z oddziaływaniem z fasadą chronionego budynku, d) z oddziaływaniem z fasadą chronionego budynku, gdy źródło umieszczone jest między dwoma równoległymi ekranami  
 Fig.1. Effect of screen application in: a) a free space, b) a free half-space, c) the case of interaction with a protected building façade, d) the case of interaction with a protected building façade when a source is between two parallel screens

W obszarze zabudowanym, nawet bez ekranu, proces docierania fal do punktu obserwacji odbywa się wieloma drogami w wyniku odbić od sąsiednich budynków i dyfrakcji na ich krawędziach (rys. 2). Wprowadzenie ekranu, eliminując falę bezpośrednią, powoduje jednocześnie powstanie szeregu wtórnych źródeł na krawędzi ekranu. Emitowane przez nie fale docierają do punktu obserwacji w wyniku szeregu dalszych obić i dyfrakcji. Skutkiem wielokrotnych oddziaływań, w których uczestniczy również ekran, zwielokrotniona zostaje liczba fal docierających do punktu obserwacji. W związku z tym skuteczność ekranowania jest mniejsza niż w wolnej przestrzeni, gdzie jedyną falą docierającą do punktu obserwacji, położonego w obszarze cienia geometrycznego ekranu, jest fala dyfrakcyjna (rys. 1a).

W wolnej przestrzeni, gdy źródło jest źródłem punktowym, emitującym czysty ton, skuteczność ekranu w obszarze cienia zależy tylko od położenia źródła i punktu obserwacji względem krawędzi. W rzeczywistym układzie urbanistycznym, gdzie propagacja odbywa się w półprzestrzeni z wieloma przeszkodami (budynkami), a dodatkową przeszkodę stanowi sam ekran, usytuowanie źródła i punktu obserwacji w stosunku do krawędzi ekranu oraz widmo emitowanego hałasu pozostają czynnikami decydującymi o skuteczności ekranowania. Jako dodatkowy istotny czynnik pojawia się oddziaływanie z okoliczną zabudową (rys. 2). Ponadto, jeśli ekran ma zabezpieczać przed hałasem ulicznym, zamiast źródła punkowego emitującego czysty ton należy wprowadzić odpowiedni model trasy komunikacyjnej jako źródła złożonego z szeregu źródeł punktowych, emitujących hałas w szerokim zakresie widma.

Spółeczna akceptacja zastosowania ekranów zależy od czynników pozaakustycznych. Z uwagi na ograniczenia techniczne i finansowe, wprowadzając ekran należy uzyskać tak znaczące obniżenie poziomu hałasu, aby mieszkańcy zaakceptowali np. zmieniony widok z okien [14]. Uzyskiwana skuteczność ekranowania zależy od położenia punktu obserwacji na fasadzie chronionego budynku, gdzie niewykluczone jest pojawienie się również efektu negatywnego, czyli zwiększenie poziomu hałasu. Dlatego do prognozowania skuteczności działania ekranu i określania rozkładu poziomu hałasu na fasadach budynków stosuje się symulacyjne programy komputerowe [15] – [19]. Rodzina symulacyjnych programów komputerowych PROP(...), oparta na modelu hałasu środowiskowego [20] – [26], pozwala przewidywać poziomy hałasu (dźwięku A) w obszarze zurbanizowanym [19], [27] – [30]. Model hałasu środowiskowego, złożony z modelu źródła i modelu propagacji, zawiera odpowiedni model trasy komunikacyjnej jako złożonego źródła hałasu. Propagacja przedstawiona jest jako proces wielokrotnych oddziaływań (transmisji, odbicia, dyfrakcji) z przeszkodami w półprzestrzeni. Ośrodkiem propagacji jest idealny gaz w spoczynku, w związku z tym pominięte zostało tłumienie w powietrzu, refrakcja i wpływ wiatru. W przygotowanych programach symulacyjnych budynki są modelowane w postaci umieszczonych na podłożu sześcianów o czterech ścianach bocznych i płaskim dachu. Bardziej skomplikowane kształty można modelować poprzez zastosowanie odpowiednich wielościanów. Własności akustyczne poszczególnych ścian przeszkód scharakteryzowane są przez odpowiednie współczynniki izolacyjności i odbicia. Płaskie obiekty, takie jak ekrany akustyczne



Rys.2. Efekt działania ekranu w układzie dwóch budynków: a) umieszczonych równoległe do trasy komunikacyjnej, b) umieszczonych ukośnie do trasy komunikacyjnej  
Fig.2. Effect of screen application in a system of two buildings placed: a) parallel to the road, b) inclined to the road

lub gęste pasy zieleni, modelowane są jako pojedyncze ściany (panele) o określonej izolacyjności i współczynniku odbicia.

W artykule pokazano jak zmienia się skuteczność ekranowania 3-metrowego płaskiego ekranu w zależności od charakteru otaczającej zabudowy. Przy użyciu programu symulacyjnego PROP7 obliczono skuteczność ekranowania pojedynczego ekranu i dwóch równoległych ekranów umieszczonych po obu stronach trasy, zastosowanych w celu obniżenia hałasu w układach urbanistycznych o różnym usytuowaniu budynków. Uwzględniona została jedno i dwustronna zabudowa, przy dwóch rodzajach usytuowania budynków w stosunku do trasy: równolegle do osi drogi i ukośnie pod kątem  $45^\circ$ .

## 2. POLE AKUSTYCZNE W OBSZARZE ZURBANIZOWANYM

W modelu hałasu środowiskowego złożone źródła hałasu modelowane są przy pomocy źródeł punktowych, emitujących sygnał o znanym widmie mocy. W przypadku trasy komunikacyjnej poruszające się po niej pojazdy reprezentowane są przez zastępcze źródła punktowe. Energia akustyczna emitowana na  $j$ -tym pasie przez pojazd należący dla  $g$ -klasy jest sumą energii emitowanych w kolejnych dyskretnych położeniach, oddalonych od siebie o  $\Delta x_E$  (rys. 3). Jeśli w przedziale czasu  $T$  strumień pojazdów o natężeniu  $N_j^g$  [poj./h] porusza się po  $j$ -tym pasie ze średnią prędkością  $v_j^g$  [m/h], to obserwowany w punkcie obserwacji  $P$  równoważny poziom hałasu wynosi [28], [29]:

$$L_{Aeq_j^g}(T, P) = L_{WA}^g + 10 \log \frac{\Delta x_E}{\Delta x_j^g} + L_j^g(U_j, P) . \quad (1)$$

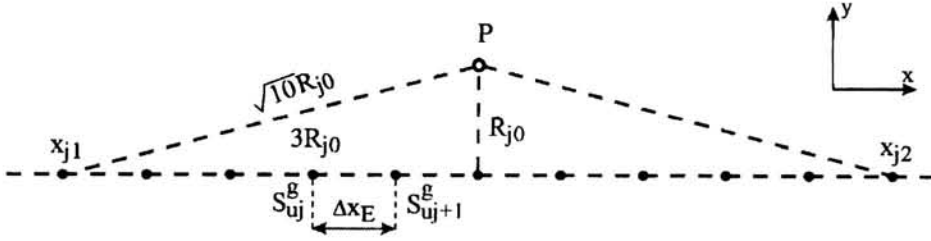
Wielkość  $L_{WA}^g$  jest skorygowanym poziomem mocy źródła zastępczego o względnym widmie mocy

$$q_A^g(f_w) = \frac{W_A^g(f_w)}{\sum_{w=1}^{10} W_A^g(f_w)} , \quad (2)$$

gdzie:

$$\sum_{w=1}^{10} W_A^g(f_w) = W_A^g = W_0 10^{0.1L_{WA}^g} \quad (3)$$

jest całkowitą wyemitowaną mocą w przyjętym przedziale dziesięciu oktaw. Charakterystyczne dla danego strumienia ruchu zagęszczenie pojazdów na pasie (długość



Rys.3. Przejazd pojazdu reprezentowany przez ciąg dyskretnych położeń wzdłuż toru ruchu  
Fig.3. Discretization of vehicle positions along its route

odcinka pasa przypadającą na jeden pojazd), przedstawia iloraz:

$$\Delta x_j^g = v_j^g / N_j^g . \quad (4)$$

Poziom hałasu w równaniu (1)

$$L_j^g(U_j, P) = 10 \log \left( \frac{1}{4\pi} \sum_{w=1}^{10} q_A^g(f_w) w^g(f_w, U_j, P) \right) , \quad (5)$$

jest poziomem pochodzącym od zbioru  $U_j$  zastępczych źródeł punktowych, reprezentujących ruch pojazdu  $g$ -klasy wzdłuż  $j$ -tego pasa. Średnia moc akustyczna w oktawie

$$w^g(f_w, U_j, P) = \frac{1}{D_w} \sum_{d=1}^{D_w} \sum_{u=1}^{U_j} \left| H(R_j^g(u\Delta x_E), f_{wd}) \right|^2 \quad (6)$$

jest wynikiem działania zbioru  $U_j$  źródeł elementarnych o jednostkowej mocy, emitujących czyste tony o częstotliwościach  $f_{wd} \in \langle F_w^{(1)}, F_w^{(2)} \rangle$ . Występująca w wyrażeniu (6) funkcja przejścia układu urbanistycznego

$$H(R_j^g(u\Delta x_E), f_{wd}) = p(S_{uj}^g, P, f_{wd}) \quad (7)$$

przedstawia ciśnienie akustyczne, obserwowane w punkcie  $P$  układu urbanistycznego jako skutek działania elementarnego źródła punktowego o jednostkowej mocy,



emitującego czysty ton o częstotliwościach  $f_{wd}$ . Na skutek oddziaływania fali z występującymi w układzie przeszkodami, dla każdego z dyskretnych położzeń  $S_{uj}^g$  pojazdu  $g$ -klasy w trakcie ruchu po  $j$ -tym pasie (rys. 3), całkowite ciśnienie  $p(S_{uj}^g, P, f_{wd})$  w punkcie  $P$  jest sumą przyczynków wnoszonych przez poszczególne drogi propagacji, możliwe dla danego położenia źródła i punktu obserwacji (rys. 2).

### 3. PROGRAM SYMULACYJNY DLA OBSZARU ZURBANIZOWANEGO

#### 3.1. TRASA KOMUNIKACYJNA JAKO ŹRÓDŁO HAŁASU

W programie symulacyjnym PROP7 źródłem hałasu jest droga o  $J$  pasach, po których poruszają się pojazdy przypisane do  $G$  różnych klas. A zatem, w przedziale czasu  $T$ , równoważny poziom hałasu jest wynikiem sumowania przyczynków  $L_{Aeq_j}^g(T, P)$  (1), pochodzących od wszystkich klas pojazdów na wszystkich pasach:

$$L_{Aeq}(T, P) = 10 \log \left\{ \sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J 10^{0.1 L_{Aeq_j}^g} \right\}. \quad (8)$$

Przy pomocy programu symulacyjnego można zbadać jak zmieni się równoważny poziom hałasu w zależności od parametrów wejściowych opisujących źródło i układ urbanistyczny.

W modelu drogi przyjętym w programie PROP7 występują następujące parametry charakteryzujące tabor poruszający się po trasie [28], [29]:

$G$  – liczba wyróżnionych klas pojazdów,

i parametry opisujące zastępcze źródła punktowe dla pojazdów każdej  $g$ -klasy:

$\{q_A^g(f_w)\}$  – zbiór zredukowanych widm mocy źródeł zastępczych (2),

$\{L_{WA}^g\}$  – zbiór poziomów mocy źródeł zastępczych,

$\{z_0^g\}$  – zbiór położzeń źródeł zastępczych nad podłożem.

Parametry zastępczych źródeł punktowych reprezentujących odpowiednie klasy pojazdów mogą być zależne od prędkości pojazdu i mogą się też zmieniać w zależności od nawierzchni trasy i jej nachylenia. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że opis taboru ma charakter lokalny i przenoszenie parametrów ustalonych dla innego kraju może być niewłaściwe ze względu np. na znaczny udział w ruchu starych pojazdów w złym stanie technicznym czy też dużą częstotliwość używania sygnałów dźwiękowych jak to ma miejsce w krajach Bliskiego Wschodu.



Geometrię drogi opisują:

- $J$  – liczba pasów ruchu,  
 $\{y_{j0}\}$  – zbiór położenia pasów dla osi  $x$  równoległej do odcinka drogi.

Obserwowana w punkcie  $P(x_p, y_p, z_p)$  energia akustyczna, będąca wynikiem przejazdu pojedynczego pojazdu, reprezentowana jest przez energię wyemitowaną podczas przejazdu odcinka trasy  $(x_{j1}, x_{j2})$  o ograniczonej długości (rys. 3). Długości odcinka trasy  $(x_{j1}, x_{j2})$  przyjęto tak, aby przyczynki od krańcowych położenia były mniejsze o 10 dB od największego przyczynku. Ruch pojazdu wzdłuż  $j$ -tego pasa reprezentuje ciąg  $U_j$  jego dyskretnych położenia, czyli zbiór źródeł  $\{S_{ij}^g(x_{j0}(u), y_{j0}, z_0^g)\}$  (6,7). Współrzędna  $z$ -owa dla zbioru źródeł  $\{S_{ij}^g(x_{j0}(u), y_{j0}, z_0^g)\}$  wynika z przynależności do odpowiedniej klasy pojazdów i ustalonego dla niej położenia źródła zastępczego nad podłożem. Współrzędną  $y$ -ową określa położenie  $j$ -tego pasa ruchu. Natomiast dla wybranej przez użytkownika wielkości kroku  $\Delta x_E$  sumowania energii wzdłuż trasy przejazdu (rys. 3) automatycznie obliczana jest dla kolejnych źródeł:

$$x_{j0}(u) = x_{j1} + u\Delta x_E \quad - \quad \text{współrzędna } x\text{-owa, przy czym } 1 \leq u \leq U_j,$$

gdzie

$$U_j = 1 + 2 \frac{(x_{j2} - x_{j1})/2 + \varepsilon}{\Delta x_E}, \quad \varepsilon < \Delta x_E, \quad (9)$$

$$x_{j2} - x_{j1} \geq 6R_{j0}, \quad (10)$$

$$R_{j0} = \sqrt{(y_{j0} - y_p)^2 + (z_0^g - z_p)^2}. \quad (11)$$

Jak wynika z równania (11) długość uwzględnianego odcinka trasy i wynikająca z niego liczba źródeł na pasie (9) wzrasta wraz ze wzrostem wysokości punktu obserwacji nad podłożem. Takie modelowanie odcinka trasy jest jedną z przyczyn pozwalających otrzymać obserwowaną w praktyce prawie stałą wartość równoważnego poziomu hałasu na fasadach budynków tworzących ulicę o dwustronnej zabudowie w postaci wąwozu [27].

Pozostałe parametry trasy jako źródła hałasu są związane z organizacją ruchu:

- $\{\Delta x_j^g\}$  – zbiór parametrów opisujących zagęszczenie pojazdów na pasach ruchu (1, 4).

### 3.2. PROCES PROPAGACJI HAŁASU W OBSZARZE ZURBANIZOWANYM

W układzie urbanistycznym dla ustalonego położenia źródła  $S_{uj}^g(x_{j0}(u), y_{j0}, z_0^g)$  i punktu obserwacji  $P$  funkcja przejścia  $H(\mathbf{R}_j^g(u\Delta x_E), f_{wd})$  (7) przedstawia wypadkowe ciśnienie akustyczne w punkcie  $P$ , będące wynikiem superpozycji fal docierających różnymi drogami ze źródła o jednostkowej mocy, emitującego ton o częstotliwości  $f_{wd}$ . Zawierająca funkcję przejścia obszaru zurbanizowanego  $H(\mathbf{R}_j^g(u\Delta x_E), f_{wd})$  średnia moc akustyczna (6) w oktawie o środkowej częstotliwości  $f_w$ , dla zbioru  $U_j$  źródeł elementarnych, rozmieszczonych wzdłuż  $j$ -tego pasa,

$$w^g(f_w, U_j, P) = \quad (12)$$

$$= w(N, \{\mathbf{R}(n)\}, \{R(n)\}, \{T(n)\}, \mathbf{R}(P), S_{uj}^g(x_{j0}(u) = x_{j1} + u\Delta x_E; y_{j0}; z_0^g), K, U_j(\Delta x_E), f_w)$$

jest funkcją następujących parametrów układu urbanistycznego:

- $N$  – liczba paneli,
- $\{\mathbf{R}(n)\}$  – zbiór wektorów opisujących geometrię paneli,
- $\{R(n)\}$  – zbiór współczynników odbicia paneli,
- $\{T(n)\}$  – zbiór współczynników transmisji paneli,
- $\mathbf{R}(P)$  – wektor położenia punktu obserwacji,
- $K$  – maksymalny rząd oddziaływań.

W wyrażeniu (12), oprócz zależności od parametrów charakteryzujących układ urbanistyczny, występuje zależność od liczby  $U_j(\Delta x_E)$  i położenia źródeł w zbiorze  $\{S_{uj}^g(x_{j0}(u) = x_{j1} + u\Delta x_E; y_{j0}; z_0^g)\}$  stanowiącym model trasy.

Średnia moc akustyczna w oktawie (6, 12) obliczona jest przy narzuceniu maksymalnej liczby  $K$  oddziaływań (transmisji, odbicia, dyfrakcji) na możliwych drogach docierania fali do punktu obserwacji. Maksymalna liczba oddziaływań  $K$  i krok sumowania  $\Delta x_E$  mogą być wybrane dowolnie przez użytkownika w zależności od wymaganej dokładności oraz geometrii układu urbanistycznego i trasy komunikacyjnej.

### 3.3. ZASTOSOWANIE PROGRAMU SYMULACYJNEGO DO OKREŚLENIA EFEKTYWNOŚCI EKTRANOWANIA

Sposób modelowania układu urbanistycznego pozwala na wstępne ograniczenie jego charakterystyki do tych elementów, które są istotne dla danego typu układów. W rozważanym obszarze zurbanizowanym przeszkody są modelowane jako zbiór paneli. W przypadku budynków są to umieszczone na podłożu prostopadłościowy o czterech ścianach bocznych i płaskim dachu. Ze względu na położenie źródła w pobliżu podłoża, płaskie dachy budynków nie uczestniczą w procesie odbić. W związku z tym układ urbanistyczny jest charakteryzowany przez liczbę tworzących go paneli, którymi są ściany boczne budynków i podłoże. Dla każdego budynku liczba krawędzi dyfrakcyjnych, traktowanych jako niezależne obiekty z którymi oddziałuje fala, wynosi sześć. Są to dwie krawędzie górne i dwie pary krawędzi bocznych. Dyfrakcja na wklęsłych narożach tworzonych przez ściany budynków z podłożem została pominięta. Podstawą do pominięcia tego oddziaływania jest rozwiązanie kanoniczne oddziaływania fali z wklęsłym narożem prostokątnym o doskonale odbijających ścianach, gdzie pole dyfrakcyjne jest zerowe.

Liczba dróg, którymi fala może dotrzeć do punktu obserwacji zależy od liczby paneli tworzących układ i przyjętej maksymalnej liczby oddziaływań. Dla układu pięciu budynków, przy maksymalnej liczbie oddziaływań  $K = 3$ , liczba możliwych dróg propagacji, na których następują trzy kolejne odbicia, wynosi  $I(N = 4 \times 5 + 1 = 21, K = 3) = 8842$  [20], [23]. W związku z tym, że budynki stanowią przeszkody nieprzepuszczalne dla dźwięku, eliminowane są drogi, na których bezpośrednio po sobie następowałyby odbicia między panelami tworzącymi ściany jednego budynku. Wtedy liczba możliwych dróg maleje do  $I(N = 21, K = 3) = 842$ . Dalsze ograniczenia, które są uwzględniane w trakcie realizacji odpowiedniego algorytmu obliczeniowego wynikają z faktu, że źródło położone jest w pobliżu podłoża a budynki są do niego prostopadłe. Ogranicza to liczbę dróg propagacji do tych, na których następuje tylko jednokrotne odbicie od podłoża.

Dla maksymalnej liczby oddziaływań  $K = 3$  możliwe są również te drogi propagacji, na których zachodzą dwa procesy odbicia i jeden proces dyfrakcji lub dwa procesy dyfrakcji i jeden proces odbicia. Dla rozważanych układów urbanistycznych przyjęto, że zjawisko podwójnej dyfrakcji na narożach budynku daje istotny wkład tylko w przypadku dwóch równoległych, najbliższych krawędzi: dwóch najbliższych górnych krawędzi budynków i dwóch par najbliższych krawędzi bocznych (rys. 2).

Z pozostałych po wstępnej eliminacji możliwych dróg propagacji niezerowy wkład do całkowitego ciśnienia akustycznego dają tylko te, które są możliwe do fizycznego zrealizowania ze względu na położenie i rozmiary obiektów [20] – [26].

Propagacja hałasu w układzie urbanistycznym, odbywa się w półprzestrzeni z przeszkodami (budynkami) opisanymi jako zbiór odpowiednich  $N$  paneli i  $M$  krawędzi. Zmiana usytuowania budynków oznacza zmianę położenia poszczególnych paneli  $\{\mathbf{R}(n)\}$ , co w zasadniczy sposób zmienia proces propagacji, czyniąc dominującymi

zupełnie inne drogi propagacji. Wprowadzenie płaskiego ekranu akustycznego eliminuje falę bezpośrednią w pewnym obszarze. Jednocześnie sam ekran stanowi dodatkowy  $(N + 1)$ -szy panel o trzech krawędziach, modyfikujący propagację w całym układzie. Propagacja teraz odbywa się w układzie o  $N + 1$  panelach i  $M + 3$  krawędziach. W przypadku gdy ekran można uznać za nieskończenie długi liczba krawędzi wyniesie  $M + 1$ .

Skuteczność ekranowania nieskończenie długiego ekranu jest obliczana jako różnica poziomu hałasu (8) w danym punkcie układu urbanistycznego bez ekranu i po jego zastosowaniu:

$$\begin{aligned} \Delta L &= L_{Aeq}(N, M, T, P) - L_{Aeq}(N + 1, M + 1, T, P) = \\ &= 10 \log \left\{ \frac{\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J 10^{0.1 L_{Aeq_j^g}(N, M, T, P)}}{\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J 10^{0.1 L_{Aeq_j^g}(N+1, M+1, T, P)}} \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Odpowiednie przyczynki  $L_{Aeq_j^g}(N(+1), M(+1), T, P)$  od kolejnych klas pojazdów na poszczególnych pasach dane są równaniem (1). W przypadku, gdy źródłem jest jezdnia jednopasmowa, z pojazdami tej samej klasy, skuteczność ekranowania przybiera najprostszą postać:

$$\begin{aligned} \Delta L(G = 1, J = 1) &= L_{Aeq_{j=1}^{g=1}}(N, M, T) - L_{Aeq_{j=1}^{g=1}}(N + 1, M + 1, T) = \\ &= L_{WA}^{g=1} + 10 \log \frac{\Delta x_E}{\Delta x_{j=1}^{g=1}} + L_{j=1}^{g=1}(N, M, U_{j=1}, P) - \\ &- L_{WA}^{g=1} + 10 \log \frac{\Delta x_E}{\Delta x_{j=1}^{g=1}} + L_{j=1}^{g=1}(N + 1, M + 1, U_{j=1}, P) = \\ &= 10 \log \left\{ \frac{\sum_{w=1}^{10} q_A^{g=1}(f_w) w(N, M, f_w, U_{j=1} = U(\Delta x_E), P)}{\sum_{w=1}^{10} q_A^{g=1}(f_w) w(N + 1, M + 1, f_w, U_{j=1} = U(\Delta x_E), P)} \right\}. \end{aligned} \quad (14)$$

Nie zależy ona od poziomu mocy źródła  $L_{WA}^{g=1}$  a tylko od względnego widma mocy  $q_A^{g=1}(f_w)$  i funkcji przejścia układu, w której zawarta jest zależność od drugiego parametru źródła - jego położenia nad podłożem  $z_0^{g=1}$ . W ogólnym przypadku, mimo że skuteczność ekranowania określona jest przy niezmiennych parametrach źródła, potrzebna jest pełna znajomość parametrów trasy występujących w wyrażeniach (1) i (13).

#### 4. SKUTECZNOŚĆ EKRAŃU W RÓŻNYCH UKŁADACH URBANISTYCZNYCH

Analizie została poddana skuteczność ekranowania płaskiego ekranu w układach urbanistycznych o różnej liczbie budynków, w różny sposób usytuowanych w stosunku do trasy stanowiącej źródło hałasu. Stosując program symulacyjny PROP7 przyjęto krok sumowania energii wzdłuż toru ruchu pojazdu  $\Delta x_E = 5$  m, oraz maksymalną liczbę odbić  $K = 3$ . Wykorzystany model trasy jako źródła hałasu MAK2[31], uwzględnia dwie klasy pojazdów: lekkie i ciężkie ( $g = 1 = l$ ,  $g = 2 = h$ ), których źródła zastępcze mają widma mocy zależne od prędkości. Dla danej klasy pojazdów na wszystkich pasach przyjęto tę samą prędkość ( $v_j^l = v^l = 50$  km/h,  $v_j^h = v^h = 40$  km/h). Obliczenia wykonano dla trasy dwupasmowej o całkowitym natężeniu ruchu 2400 pojazdów/h, równomiernie rozłożonym na dwóch pasach ruchu, przy 20% udziale pojazdów ciężkich. Odpowiednie, dla przyjętego modelu trasy MAK2 ( $J=2$ ,  $G=2$ ), wartości parametrów przedstawione są w tabelicy 1.

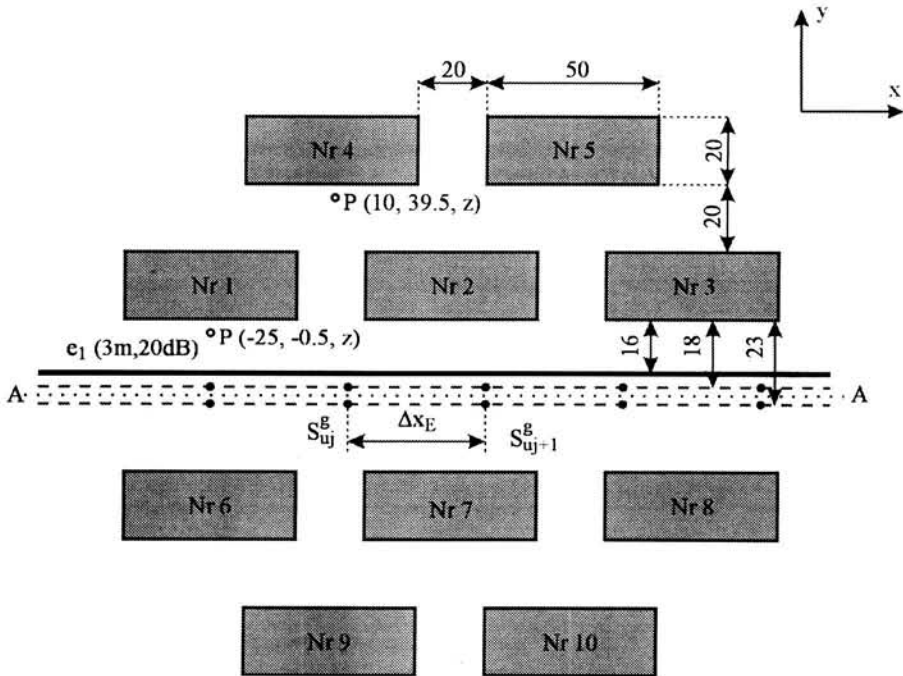
Tablica 1. Wartości parametrów opisujących trasę komunikacyjną jako źródło hałasów  
Table 1. Road parameters as a noise source

$v^l$	$v^h$	$N_j$	$\Delta x_j^l$	$\Delta x_j^h$	$z_0^{l*}$	$z_0^{h*}$	$L_{WA}^l(v^l)$	$L_{WA}^h(v^h)$
[km/h]	[km/h]	[poj./h]	[m/poj.]	[m/poj.]	[m]	[m]	[dB(A)]	[dB(A)]
50	40	1200 $N_j^l = 960$ $N_j^h = 240$	52,08	166,67	0,50	1,20	99,35	104,32

\* - [32]

Obliczono rozkłady poziomu hałasu w funkcji wysokości, wzdłuż linii środkowej fasady, w punktach odpowiadających położeniu okien na poszczególnych piętrach, w odległości 0,5 m od fasady. Dla parteru przyjęto wysokość 1,5 m a dla odległości między piętrami 3 m. Otrzymany rozkład przyjęto jako reprezentatywny dla całej fasady, jednak w zależności od potrzeb można przedstawić pełen rozkład poziomu hałasu na całej fasadzie, w punktach odpowiadających położeniu poszczególnych okien.

Przeanalizowano skuteczność ekranowania w dwóch typach usytuowania budynków: równoległe do trasy lub pod kątem  $45^\circ$  (rys. 4 – rys. 6). Uwzględniono jedno i dwustronną zabudowę, zmienną liczbę budynków oraz ich usytuowanie. Badano skuteczność ekranowania 3-metrowego, bardzo długiego ekranu o średniej izolacyjności 20 dB. Przyjęto jednakowe wymiary budynków  $(20\text{ m} \times 50\text{ m}) \times 12\text{ m}$ . Wartości współczynnika odbicia ścian budynków, podłoża i ekranu, podobnie jak w przypadku izolacyjności, przyjęto w postaci uśrednionej dla całego zakresu częstotliwości, przyjmując że dla wszystkich obiektów współczynnik odbicia jest rzeczywisty, równy 0,9.



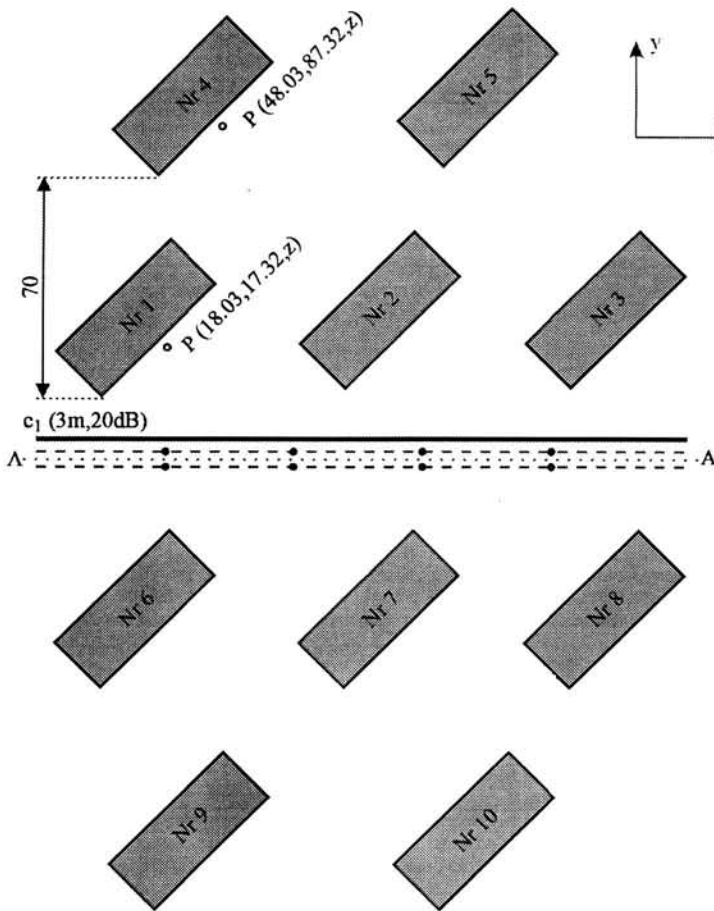
Rys.4. Układ dziesięciu budynków usytuowanych równoległe do trasy komunikacyjnej po obu jej stronach

Fig.4. The arrangement of ten buildings parallel to the road axis

Zbadano rozkłady poziomego hałasu na fasadach wybranych budynków (Nr...) (tabl. 2). Struktura opisu obliczonych poziomów hałasu jest następująca:

$$L_{[...] }^{r(u)}(Nr...), \quad (15)$$

gdzie górny wskaźnik  $r$  oznacza zabudowę równoległą do trasy, natomiast wskaźnik  $u$  zabudowę ukośną. Brak dolnego wskaźnika oznacza wolną przestrzeń, dolny wskaźnik  $p$  - półprzestrzeń. Podana wartość liczbowa dolnego wskaźnika oznacza liczbę budynków występujących w układzie urbanistycznym stanowiącym półprzestrzeń z budynkami.



Rys.5. Układ dziesięciu budynków usytuowanych ukośnie (pod kątem 45°) do trasy komunikacyjnej po obu jej stronach  
 Fig.5. The arrangement of ten buildings inclined to the road axis at 45° angle

Różnice między poziomami hałasu

$$\Delta L_{[...]}^{r(u)}(Nr...) = L_{[...]}^{r(u)}(Nr...) - L_{[...]}^{r(u)}(Nr...), \quad (16)$$

zdefiniowane w tabelicy 3 i przedstawione na rysunku 7c pokazują charakterystyczne cechy pola akustycznego. Dla fasady wybranego budynku (Nr...) różnicę (16) między poziomem hałasu bez ekranu i z ekranem (tabl. 4, tabl. 5) przedstawia skuteczność ekranowania (13) w danym układzie urbanistycznym (rys. 8, rys. 10). Porównując uzyskane wyniki z danymi literaturowymi należy zwrócić uwagę na definicję skuteczności ekranowania. Jako wartość odniesienia może tam występować poziom dźwięku w swobodnej przestrzeni, w półprzestrzeni lub, tak jak w tej pracy, poziom dźwięku w układzie urbanistycznym bez ekranu.

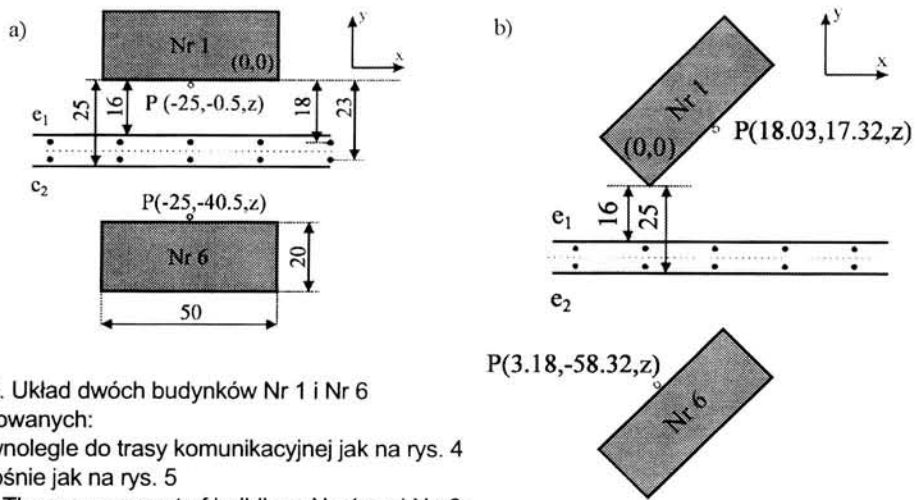


Tablica 2. Poziomy hałasu na rys. 7a, rys. 7b, rys. 9  
 Table 2. Sound levels in Fig. 7a, Fig. 7b, Fig. 9

Krzywa	Poziomy hałasu w dB(A)	Układ urbanistyczny
(1)	$L^{r(u)}(Nr\ 1(4))$	wolna przestrzeń
(2)	$L_p^{r(u)}(Nr\ 1(4))$	półprzestrzeń
(3)	$L_2^{r(u)}(Nr\ 1) = L_2^{r(u)}(Nr\ 6)$	podłoże, dwa budynki
(4)	$N_5^{r(u)}(Nr\ 1(4))$	podłoże, pięć budynków
(5)	$L_{10}^{r(u)}(Nr\ 1(4))$	podłoże, dziesięć budynków
(6)	$L^{r(u)}(e_i; Nr\ 1(4))$	wolna przestrzeń, ekran
(7)	$L_p^{r(u)}(e_i; Nr\ 1(4))$	podłoże, ekran
(8)	$L_2^{r(u)}(e_i; Nr\ 1) = L_2^{r(u)}(e_2; Nr\ 6)$	podłoże, dwa budynki, ekran
(9)	$L_2^u(e_i; Nr\ 6) = L_2^u(e_2; Nr\ 1)$	podłoże, dwa budynki, ekran
(10)	$L_5^{r(u)}(e_i; Nr\ 1(4))$	podłoże, pięć budynków, ekran
(11)	$L_{10}^{r(u)}(e_i; Nr\ 1(4))$	podłoże, dziesięć budynków, ekran
(12)	$L_p^{r(u)}(e_1, e_2; Nr\ 1) = L_p^{r(u)}(e_1, e_2; Nr\ 6)$	podłoże, dwa ekrany
(13)	$L_2^{r(u)}(e_1, e_2; Nr\ 1) = L_2^{r(u)}(e_1, e_2; Nr\ 6)$	podłoże, dwa budynki, dwa ekrany

Tablica 3. Różnice poziomów hałasu na rys. 7c i ich przyczyny  
 Table 3. Sound levels differences in Fig. 7c and their causes

Krzywa	Różnice poziomów w dB(A)	Przyczyna
(31)	$\Delta L_p^{r-u}(Nr\ 1) = L_p^r(Nr\ 1) - L_p^u(Nr\ 1)$	różnica odległości od trasy w półprzestrzeni dla układów równoległych i ukośnych
(32)	$\Delta L_2^{r-u}(Nr\ 1) = L_2^r(Nr\ 1) - L_2^u(Nr\ 1)$	różnica odległości od trasy budynków w układach równoległym i ukośnym
(33)	$\Delta L_2^r(Nr\ 1) = L_2^r(Nr\ 1) - L_p^r(Nr\ 1)$	odbicia między budynkami
(34)	$\Delta L_2^u(Nr\ 1) = L_2^u(Nr\ 1) - L_p^u(e_i; Nr\ 1)$	odbicia między budynkami
(35)	$\Delta L_2^r(e_i; Nr\ 6) = L_2^r(Nr\ 6) - L_2^r(e_i; Nr\ 6)$	odbicia od pojedynczego ekranu po przeciwnej stronie trasy
(36)	$\Delta L_2^u(e_i; Nr\ 6) = L_2^u(Nr\ 6) - L_2^u(e_i; Nr\ 6)$	odbicia od pojedynczego ekranu po przeciwnej stronie trasy



Rys.6. Układ dwóch budynków Nr 1 i Nr 6 usytuowanych:

- a) równoległe do trasy komunikacyjnej jak na rys. 4  
b) ukośnie jak na rys. 5

Fig.6. The arrangement of buildings No 1 and No 6:  
a) parallel to the road axis as in Fig. 4  
b) inclined to the road axis as in Fig. 5

Tablica 4. Skuteczność ekranowania w równoległych układach budynków i ich przyczyny (rys. 8, rys. 10)

Table 4. Screen effectiveness in the parallel building arrangements and their causes (Fig. 8, Fig. 10)

Krzywa	Różnice poziomów w dB(A)	Przyczyna
(41)	$\Delta L'(e_i; Nr 1) = L'(Nr 1) - L'(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran w wolnej przestrzeni (efektywność ekranu)
(42)	$\Delta L'_p(e_i; Nr 1) = L'_p(Nr 1) - L'_p(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran w półprzestrzeni
(43)	$\Delta L'_p(e_1, e_2; Nr 1) = L'_p(Nr 1) - L'_p(e_1, e_2; Nr 1)$	ekranowanie przez dwa równoległe ekrany w półprzestrzeni
(44)	$\Delta L'_2(e_i; Nr 1) = L'_2(Nr 1) - L'_2(e_i; Nr 1)$	ekranowanie budynku przez pojedynczy ekran
(45)	$\Delta L'_2(e_1, e_2; Nr 1) = L'_2(Nr 1) - L'_2(e_1, e_2; Nr 1)$	ekranowanie budynku przez dwa równoległe ekrany
(46)	$\Delta L'_5(e_i; Nr 1) = L'_5(Nr 1) - L'_5(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran
(47)	$\Delta L'_5(e_i; Nr 4) = L'_5(Nr 4) - L'_5(e_i; Nr 4)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran i pierwszą linię zabudowy
(48)	$\Delta L'_{10}(e_i; Nr 1) = L'_{10}(Nr 1) - L'_{10}(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran
(49)	$\Delta L'_{10}(e_i; Nr 4) = L'_{10}(Nr 4) - L'_{10}(e_i; Nr 4)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran i pierwszą linię zabudowy

Tablica 5. Skuteczność ekranowania w ukośnych układach budynków i ich przyczyny (rys. 8, rys. 10)

Table 5. Screen effectiveness in the inclined building arrangements and their causes (Fig. 8, Fig. 10)

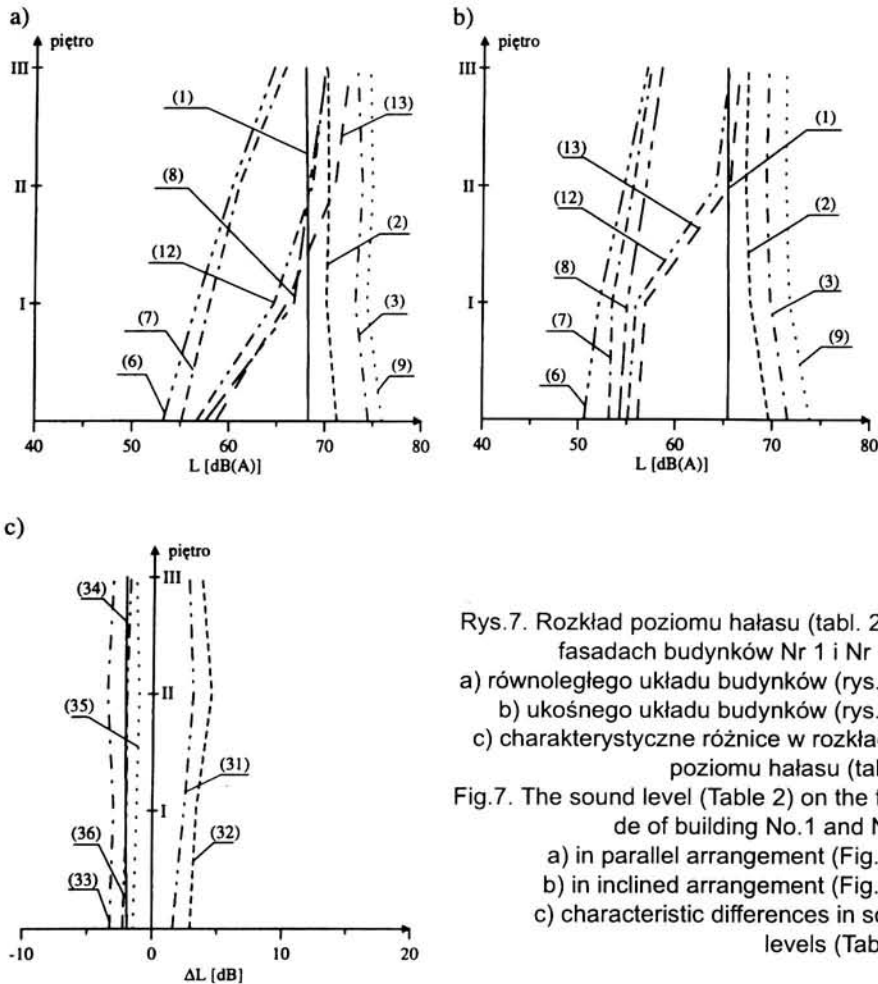
Krzywa	Różnice poziomów w dB(A)	Przyczyna
(51)	$\Delta L^u(e_i; Nr 1) = L^u(Nr 1) - L^u(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran w wolnej przestrzeni (efektywność ekranu)
(52)	$\Delta L_p^u(e_i; Nr 1) = L_p^u(Nr 1) - L_p^u(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran w półprzestrzeni
(53)	$\Delta L_p^u(e_1, e_2; Nr 1) = L_p^u(Nr 1) - L_p^u(e_1, e_2; Nr 1)$	ekranowanie przez dwa równoległe ekrany w półprzestrzeni
(54)	$\Delta L_2^u(e_i; Nr 1) = L_2^u(Nr 1) - L_2^u(e_i; Nr 1)$	ekranowanie budynku przez pojedynczy ekran
(55)	$\Delta L_2^u(e_1, e_2; Nr 1) = L_2^u(Nr 1) - L_2^u(e_1, e_2; Nr 1)$	ekranowanie budynku przez dwa równoległe ekrany
(56)	$\Delta L_5^u(e_i; Nr 1) = L_5^u(Nr 1) - L_5^u(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran
(57)	$\Delta L_5^u(e_i; Nr 4) = L_5^u(Nr 4) - L_5^u(e_i; Nr 4)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran i pierwszą linię zabudowy
(58)	$\Delta L_{10}^u(e_i; Nr 1) = L_{10}^u(Nr 1) - L_{10}^u(e_i; Nr 1)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran
(59)	$\Delta L_{10}^u(e_i; Nr 4) = L_{10}^u(Nr 4) - L_{10}^u(e_i; Nr 4)$	ekranowanie przez pojedynczy ekran i pierwszą linię zabudowy

#### 4.1. SKUTECZNOŚĆ W UKŁADACH DWÓCH BUDYNKÓW PO OBU STRONACH DROGI

W celu porównania skuteczności ekranowania pojedynczego ekranu  $e_1$  i dwóch ekranów równoległych  $e_1, e_2$  wykorzystano proste układy złożone z dwóch budynków umieszczonych po przeciwnych stronach trasy, pod różnymi kątami do osi trasy. Badania przeprowadzono dla budynków usytuowanych równoległe do trasy (rys. 6a) i pod kątem  $45^\circ$  (rys. 6b). Obliczone poziomy hałasu (tabl. 2), dla środka fasady budynków Nr 1 i Nr 6 przedstawione są na rysunku 7.

Na rysunku 7a oraz 7b można prześledzić jak w obu układach wzrasta poziom hałasu w wyniku wprowadzania kolejnych powierzchni odbijających i wzrastającej w związku z tym liczby odbić. Dla sytuacji bez ekranu najniższe poziomy występują dla wolnej przestrzeni (krzywe (1)), które odpowiednio wzrastają przez wprowadzenia podłoża (krzywe (2)) i umieszczenia na nim budynków (krzywe (3)). Umieszczenie w układach o wzrastającej liczbie powierzchni odbijających ekranu  $e_1$

chroniącego budynek Nr 1, również daje w wyniku odpowiednio coraz to większe poziomy hałasu (krzywe (6) - (8)). Przy czym zdecydowanie odmienny przebieg mają krzywe (8) przedstawiające efekt zastosowania pojedynczego ekranu w układzie równoległym i ukośnym. Dla budynku Nr 6, znajdującego się po przeciwnej stronie trasy, ekran  $e_1$  stanowi dodatkową powierzchnię odbijającą. W związku z tym obserwowany jest wzrost poziomu hałasu (krzywe (9)) w stosunku do sytuacji bez ekranu (krzywe (3)). Wprowadzenie dwóch ekranów  $e_1$ ,  $e_2$  równoległych tworzy układy symetryczne gdzie oba budynki są w tym samym stopniu chronione. Powstałe układy charakteryzują się największą liczbą powierzchni odbijających, co daje poziomy hałasu (krzywe (13)) największe wśród poziomów z obecnością ekranu.



Rys.7. Rozkład poziomu hałasu (tabl. 2), na fasadach budynków Nr 1 i Nr 6 dla a) równoległego układu budynków (rys. 6a), b) ukośnego układu budynków (rys. 6b), c) charakterystyczne różnice w rozkładach poziomu hałasu (tabl. 3)

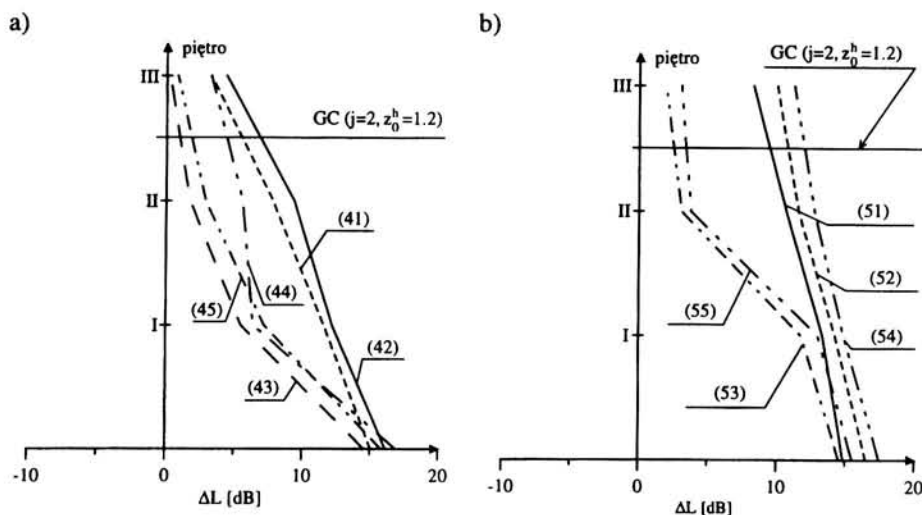
Fig.7. The sound level (Table 2) on the facade of building No.1 and No.6: a) in parallel arrangement (Fig. 6a), b) in inclined arrangement (Fig. 6b), c) characteristic differences in sound levels (Table 3)

Występujące dla układu równoległego i ukośnego różnice w rozkładach poziomu hałasu wzdłuż pięter przy braku ekranu wynikają z różnego wzajemnego usytuowania budynków jak i w stosunku do trasy (rys. 7c). To, że ekran w różny sposób oddziałuje z budynkami w obu układach jest przyczyną różnej skuteczności zastosowania w nich ekranów (rys. 8).

Różne usytuowanie budynków w stosunku do trasy powoduje to, że w układzie ukośnym (rys. 6b) linie środkowe fasad znajdują się nieco dalej od trasy niż w przypadku układu równoległego (rys. 6a), stąd poziomy hałasu w układzie ukośnym są nieco niższe zarówno dla półprzestrzeni jak i półprzestrzeni z budynkami (tabl. 3, rys. 7c, krzywe (31), (32)). Różnica między poziomami w obu układach z budynkami (krzywa (32)) jest nieco większa niż różnica dla wolnej półprzestrzeni (krzywa (31)). Wynika to z tego, że oprócz wpływu różnicy odległości, w układzie ukośnym odcinek trasy mający wpływ na poziom hałasu jest częściowo ekranowany przez same budynki, a fasady budynków po przeciwnych stronach drogi nie tworzą powierzchni równoległych, sprzyjających wielokrotnym odbiciom.

Wzrost poziomu hałasu będący wynikiem wprowadzania do półprzestrzeni budynków dla obu układów przedstawiają krzywe (33), (34). Ten sam efekt zwiększenia poziomu hałasu na fasadzie budynku Nr 6 powoduje wprowadzenie pojedynczego ekranu chroniącego budynek Nr 1 (krzywe (35), (36)). Ponieważ rozkłady poziomów są symetryczne względem osi trasy (tabl. 2), różnice poziomów przedstawione krzywymi (33) i (34) obrazują przyrosty, którym podlegają przedstawione na rysunku 7a i rysunku 7b poziomy w półprzestrzeni (krzywe (2)) w wyniku wprowadzenia budynków (krzywe (3)) a następnie przez dodanie ekranu po przeciwległej stronie trasy (krzywe (9)). W układzie równoległym fasady budynków Nr 1 i Nr 6 tworzą układ dwóch równoległych powierzchni odbijających, powodując zjawisko wielokrotnych odbić (rys. 6a) i odpowiedni wzrost poziomu hałasu (krzywa (33)). Wprowadzenie ekranu powoduje to, że dwie równoległe powierzchnie tworzą fasada budynku Nr 6 i ekran  $e_1$  położony nieco bliżej niż fasada budynku Nr 1. W związku z tym następuje kolejny przyrost poziomu hałasu (krzywa (35)). Dla układu ukośnego wprowadzenie ekranu po przeciwległej stronie trasy (krzywa (36)) nie stwarza sytuacji sprzyjającej wielokrotnym odbiciom (rys. 6b). Nadal nie ma dwóch równoległych powierzchni odbijających podobnie jak w sytuacji bez ekranu (krzywa (34)), gdzie ich powstaniu zapobiegają ograniczone rozmiary fasad budynków. W układzie równoległym, gdzie cały czas pole akustyczne jest polem między równoległymi powierzchniami, wprowadzenie ekranu jako dodatkowej powierzchni odbijającej powoduje przyrost poziomu o połowę mniejszy od przyrostu wywołanego wprowadzeniem budynków (krzywa (33), (krzywa (35))). W układzie ukośnym kolejne przyrosty są tej samej wielkości (krzywa (34), (krzywa (36))).

Zmienną skuteczność ekranowania w układach o wzrastającej liczbie powierzchni odbijających przy równoległym (tabl. 4) i ukośnym (tabl. 5) usytuowaniu budynków przedstawia rysunek 8. Efektywność ekranu, czyli skuteczność jego zastosowania w wolnej przestrzeni dla sygnału o zadanym widmie (krzywe (41), (51)), zależy tylko od



Rys.8. Skuteczność ekranowania: a) w równoległym układzie dwóch budynków (tabl. 4),  
b) w ukośnym układzie dwóch budynków (tabl. 5)

Fig.8. Screen effectiveness in the arrangement of two buildings: a) parallel to the road (Table 4), b) inclined to the road (Table 5)

położenia źródła i punktu obserwacji względem krawędzi ekranu. Na skuteczność ekranowania w danym układzie urbanistycznym (16) czyli różnicę między poziomem hałasu bez ekranu i z ekranem, ma wpływ pole fal odbitych. Mimo że można by oczekiwać, że ekran będzie najbardziej skuteczny w wolnej przestrzeni, skuteczności ekranowania w półprzestrzeni (krzywe (42), (52)) okazują się być nieco większe od skuteczności ekranu w wolnej przestrzeni (krzywe (41), (51)). Jest to wynikiem sumarycznego efektu działania ekranu na falę bezpośrednią i falę odbitą od podłoża. Charakterystyczne jest to, że w wolnej półprzestrzeni skuteczność pojedynczego ekranu (krzywe (42),(52)) jest znacznie większa od skuteczności dwóch równoległych ekranów (krzywe (43), (53)). Porównanie skuteczności ekranowania pojedynczego ekranu i skuteczności dwóch równoległych ekranów w układzie budynków usytuowanych równolegle lub ukośnie do trasy ma odmienny charakter. Odmienności mają swoje źródło w zdecydowanie różnym przebiegu krzywych (8) na rysunku 7 przedstawiających rozkłady poziomu hałasu na fasadach budynków po zastosowaniu pojedynczego ekranu w obecności budynków. W układzie budynków usytuowanych równolegle, dwa ekrany równoległe (krzywa (45)) stają się mniej skuteczne od pojedynczego ekranu (krzywa (44)) powyżej pierwszego piętra. W ukośnym układzie budynków pojedynczy ekran jest bardziej skuteczny niż dwa równoległe ekrany. Przy czym w obecności budynków przewaga skuteczności pojedynczego ekranu (krzywa (54)) nad dwoma równoległymi (krzywa (55)) jest znacznie większa w układzie ukośnym budynków niż w układzie równoległym. Jednocześnie, inaczej niż w układzie



równoległym (krzywa (44)), skuteczność ekranowania w układzie ukośnym w obecności budynków (krzywa (54)) jest większa od skuteczności ekranu w wolnej przestrzeni (krzywa (51)) i skuteczności ekranowania w półprzestrzeni (krzywa (52)).

We wszystkich przypadkach widać, że skuteczność zastosowania ekranu do ochrony przed hałasem trasy komunikacyjnej, będącej złożonym źródłem reprezentowanym przez szereg źródeł punktowych, nie może być większa niż jego skuteczność ekranowania dla pojedynczego źródła, dla którego ekran jest najmniej skuteczny. Dla przyjętego modelu trasy, najmniej ekranowane jest to źródło, które reprezentuje ciężkie pojazdy, znajdujące się na najbardziej odległym – drugim pasie ruchu. Granica cienia (GC) dla tego źródła leży między drugim i trzecim piętrem, gdzie skuteczność ekranu w wolnej przestrzeni osiąga wartość 6 dB(A). Powyżej granicy cienia, szczególnie wtedy, gdy istotny staje się wpływ fal odbitych od występujących w otoczeniu przeszkód, można czasami obserwować ujemną skuteczność ekranu, czyli wzrost poziomu hałasu.

Otrzymane wyniki potwierdzają fakt złożoności pola, jakie powstaje w wyniku oddziaływania wprowadzonego ekranu z ośmioma ścianami dwóch budynków umieszczonych na podłożu. W związku z tym, nie chcąc popełniać istotnych błędów, skuteczności ekranowania w różnych układach urbanistycznych można przewidzieć tylko przy zastosowaniu programów symulacyjnych zawierających odpowiednie algorytmy obliczeniowe, uwzględniające ciągi wielokrotnych oddziaływań między występującymi w układach obiektami (rys. 1, rys. 2).

## 4.2. SKUTECZNOŚĆ W UKŁADACH JEDNO I DWUSTRONNEJ ZABUDOWY

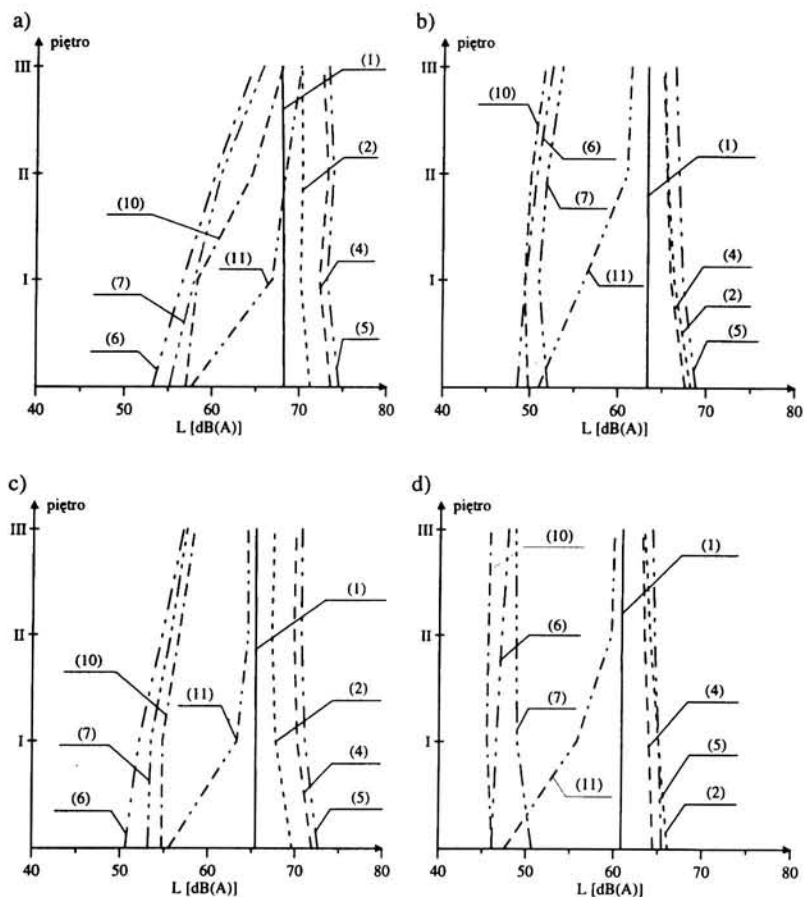
W celu prześledzenia zmian skuteczności pojedynczego ekranu  $e_1$  w warunkach rzeczywistej zabudowy, gdzie po obu stronach trasy występuje szereg obiektów (budynków) o własnościach odbijających, przebadano jak ich obecność i usytuowanie w układzie urbanistycznym wpływa na skuteczność ekranowania.

Do rozważań przyjęto układ pięciu budynków usytuowanych w dwóch rzędach równoległe do trasy (rys. 4) i pod kątem  $45^\circ$  (rys. 5). Dla obu ustawień analizowano sytuacje jednostronnej i dwustronnej zabudowy. W pierwszej sytuacji pięć budynków usytuowanych w dwóch rzędach znajduje się po jednej stronie trasy, w drugiej - otoczenie trasy stanowi dziesięć budynków, po pięć z każdej strony. Zbadano rozkłady poziomu hałasu na fasadzie budynku Nr 1 położonego w pierwszym rzędzie i budynku Nr 4 usytuowanego w drugim rzędzie (tabl. 2).

Wpływ rosnącej liczby obiektów w przestrzeni na wzrost liczby odbić i poziomu hałasu na fasadzie budynku Nr 1 dla równoległego (rys. 9a) i ukośnego ustawienia budynków (rys. 9c) obrazują krzywe (1), (2), (4), (5). W przypadku układu ukośnego, ze względu na większą odległość od trasy, krzywe (1), (2), (4), (5) przedstawiają nieco niższe poziomy niż w przypadku układu równoległego. Jednocześnie ze względu na brak odbić



między równoległymi powierzchniami, wprowadzenie ekranu  $e_1$  skutkuje większym obniżeniem poziomów niż w przypadku układu równoległego, czego konsekwencją jest odpowiednio większa skuteczność ekranowania (rys. 10a, rys. 10b).



Rys.9. Rozkład poziomu hałasu (tabl. 2) na fasadzie budynku:

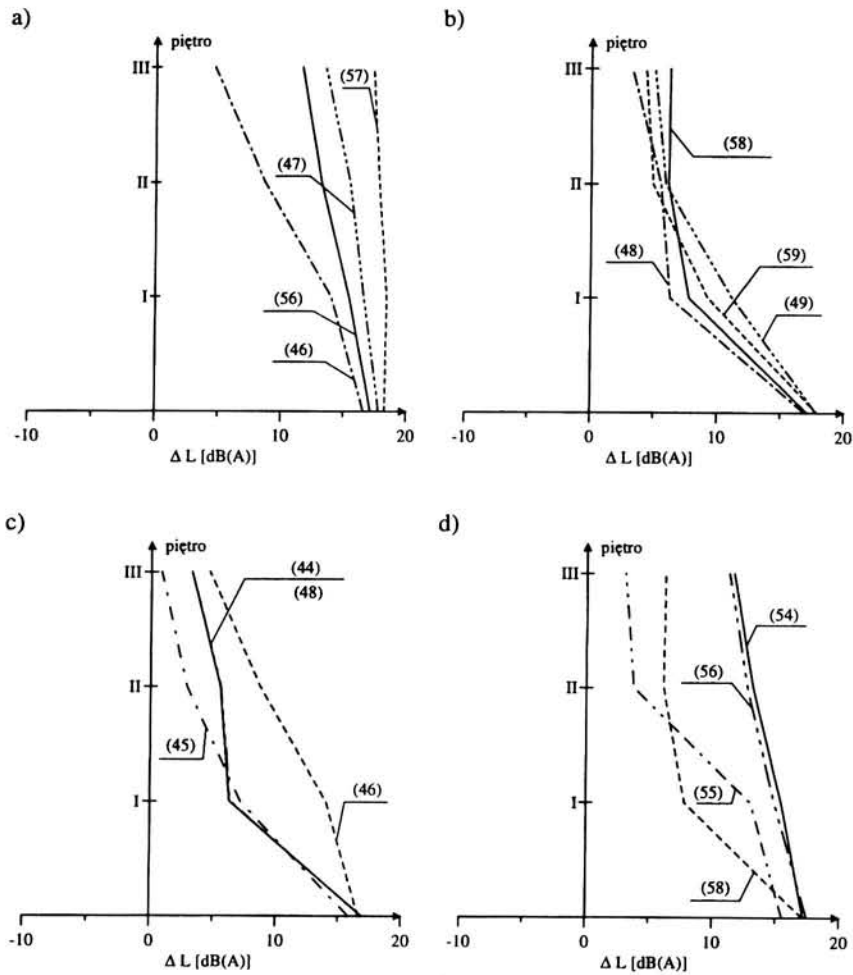
- a) Nr 1 w układzie równoległym (rys. 4),
- b) Nr 4 w układzie równoległym (rys. 4),
- c) Nr 1 w układzie ukośnym (rys. 5),
- d) Nr 4 w układzie ukośnym (rys. 5)

Fig.9. The sound levels (Table 2) on the facade of building:  
 a) No.1 in the system of a parallel arrangement (Fig. 4),  
 b) No.4 in the system of a parallel arrangement (Fig. 4),  
 c) No.1 in the system of a inclined arrangement (Fig. 5),  
 d) No.4 in the system of a inclined arrangement (Fig. 5)

Dla fasady budynku Nr 4 leżącego w drugim rzędzie (rys. 9b, rys. 9d) zwiększenie poziomu wynikające z odbić między ścianami budynków jest równoważone przez ekranowanie pierwszym rzędem zabudowy. Poziom hałasu dla półprzestrzeni z jednostronną zabudową (krzywe (4)) jest zbliżony do poziomów dla wolnej półprzestrzeni (krzywe (2)). W przypadku dwustronnej zabudowy, obecność budynków po przeciwnej stronie trasy powoduje wzrost poziomu, który dla układu równoległego przeważa nad efektem ekranowania pierwszym rzędem budynków, dając poziom (krzywe (5)) wyższy od poziomu w półprzestrzeni (krzywa (2)). W układzie ukośnym (rys. 9d), ekranowanie przez pierwszy rząd budynków daje poziom hałasu (krzywa (4)) niższy niż w wolnej półprzestrzeni (krzywa (2)). Obecność budynków po przeciwnej stronie trasy likwiduje ten efekt i krzywa (5) prawie pokrywa się z krzywą (2). Przy czym do pierwszego piętra krzywa (5) leży nieco poniżej krzywej (2), dla wyższych pięter – powyżej. Dla obu układów budynków wprowadzenie ekranu  $e_1$  przy jednostronnej zabudowie daje w wyniku niższe poziomy hałasu (krzywe (10)) niż dla ekranu w wolnej półprzestrzeni (krzywe (7)). Wynika to stąd, że krzywe (10) przedstawiają sumaryczny efekt ekranowania przez ekran i pierwszy rząd budynków.

We wszystkich sytuacjach dwustronna zabudowa trasy (rys. 9) jest przyczyną występowania wyższych poziomów hałasu (krzywe (5)) niż w układach o jednostronnej zabudowie (krzywe (4)). Zastosowanie ekranu w układach o dwustronnej zabudowie (krzywe (11)) daje w wyniku poziomy rosnące wraz z wysokością, zbliżające się do poziomów w wolnej przestrzeni (krzywe (1)). Dla budynku Nr 1 następuje to na wysokości pierwszego piętra, dla budynku Nr 4 – na wysokości drugiego. Jak widać na rys. 9a, dla budynku Nr 1 poziom hałasu w układzie równoległym z ekranem (krzywa (11)) powyżej drugiego piętra jest nawet wyższy od poziomu w wolnej przestrzeni (krzywa (1)).

Skuteczności ekranowania ((13), (16)) ekranu  $e_1$  (tabl. 4, tabl. 5) w obszarze o jednostronnej lub dwustronnej zabudowie przedstawione są na rysunku 10. Zgodnie z ogólną zasadą: im budynek znajduje się głębiej w obszarze cienia akustycznego ekranu, tym większa jest skuteczność ekranu. Jednak tylko dla układu o jednostronnej równoległej zabudowie skuteczność ekranowania budynku Nr 1 (rys. 10a, krzywa (46)) wykazuje dominujący wpływ najmniej ekranowanego źródła, którym jest najbliższy pojazd ciężki z najbardziej odległego pasa ruchu. Skuteczność ekranowania maleje wraz z wysokością, zbliżając się do wartości 6 dB na granicy cienia dla najmniej ekranowanego źródła, między drugim a trzecim piętrem, na wysokości około 9 m. W układzie ukośnym (rys. 10a, krzywa (56)), gdzie fasada budynku Nr 1 nie tworzy z ekranem dwóch równoległych powierzchni odbijających, skuteczność ekranowania jest odpowiednio większa. Dla budynku Nr 4, przy braku ekranu fale bezpośrednie mogą do niego docierać tylko przez przerwę między budynkami Nr 1 i Nr 2 (rys. 4, rys. 5). Zastosowanie ekranu eliminuje fale bezpośrednie wraz z towarzyszącymi im odbiciami od bocznych ścian budynków Nr 1 i Nr 2. W wyniku tego skuteczność ekranowania budynku Nr 4 (krzywe (47), (57)) jest większa niż skuteczność ekranowania budynku Nr 1, znajdującego się w pierwszej linii zabudowy (krzywe (46), (56)).



Rys.10. Skuteczność ekranowania (tabl. 4, tabl. 5) w obszarach urbanistycznych dla:  
 a) jednostronnej zabudowy,  
 b) dwustronnej zabudowy,  
 c) budynku Nr 1 w obszarach o równoległej zabudowie,  
 d) budynku Nr 1 w obszarach o ukośnej zabudowie  
 Fig.10. Screen effectiveness (Table 4, Table 5) for:  
 a) the building arrangement flanking one side of the road,  
 b) the building arrangement flanking both sides of the road,  
 c) the building No.1 in the parallel arrangement,  
 d) the building No.1 in the inclined arrangement

Dla dwustronnej ukośnej zabudowy czynnikiem decydującym o skuteczności ekranowania jest również położenie w cieniu akustycznym (rys. 10b), ale porównywalnie istotny jest tu wpływ obecności budynków i ich usytuowanie. Skuteczności ekranowania dla

budynku Nr 4 zbliżają się do wartości 6 dB(A) na wysokości drugiego piętra (krzywe (49), (59)), dla budynku Nr 1 - już na wysokości pierwszego piętra (około 4 m) (krzywe (48), (58)). W najmniej korzystnej sytuacji znajduje się budynek Nr 1 w układzie równoległym (krzywa (48)).

Dla porównania na rysunku 10c przedstawione są skuteczności ekranowania budynku Nr 1 dla równoległego usytuowania budynków. Skuteczności ekranowania pojedynczego ekranu  $e_1$  w układzie dwóch budynków usytuowanych po przeciwnych stronach trasy (krzywa (44)) i dla dwustronnej zabudowy (krzywa (48)) są w przybliżeniu tożsame. Wynika stąd wniosek, że dla zabudowy dwustronnej, złożonej z dziesięciu budynków, po pięć z każdej strony trasy, istotny jest tylko wpływ dwóch budynków położonych naprzeciwko siebie. Wprowadzenie drugiego równoległego ekranu  $e_2$  (krzywa (45)) obniża skuteczność ekranowania. Natomiast zastosowanie pojedynczego ekranu  $e_1$  dla jednostronnej zabudowy (krzywa (46)) daje odpowiednio większą skuteczność ekranowania.

Rysunek 10d przedstawia skuteczności ekranowania budynku Nr 1 dla ukośnego usytuowania budynków. W tym przypadku skuteczności ekranowania pojedynczego ekranu  $e_1$  w układzie dwóch budynków usytuowanych po przeciwnych stronach trasy (krzywa (54)) i w układzie o jednostronnej zabudowie (krzywa (56)) są w przybliżeniu równe. Świadczy to o mało istotnym wpływie czterech sąsiednich budynków w przypadku jednostronnej zabudowy oraz budynku usytuowanego po przeciwnej stronie trasy dla układu dwóch budynków. Obecność budynku po przeciwnej stronie trasy nie stwarza sytuacji sprzyjającej wielokrotnym odbiciom zarówno w sytuacji z ekranem jak i bez, kiedy odbicia między fasadami położonych naprzeciwko siebie budynków też są ograniczone (rys. 6b). Wprowadzenie drugiego równoległego ekranu  $e_2$  do układu dwóch budynków (krzywa (55)), podobnie jak zastosowanie pojedynczego ekranu  $e_1$  (krzywa (58)) dla dwustronnej zabudowy obniża skuteczność ekranowania. Przy czym dwa równoległe ekrany  $e_1, e_2$  (krzywa (55)) są bardziej skuteczne niż pojedynczy ekran  $e_1$  przy dwustronnej zabudowie (krzywa (58)) poniżej drugiego piętra, powyżej drugiego piętra sytuacja jest odwrotna.

Ogólny wniosek jest następujący: maksymalizacji skuteczności ekranowania pojedynczego ekranu sprzyja jednostronna zabudowa trasy komunikacyjnej z budynkami usytuowanymi ukośnie do trasy. Jednocześnie należy zaznaczyć, że równoległy układ pięciu budynków usytuowanych w dwóch rzędach (rys. 4) zajmuje pas terenu o szerokości 80 m, podczas gdy układ ukośny (rys. 5) – pas szerokości 140 m, co może być istotnym czynnikiem przy podejmowaniu decyzji o zabudowie.

O dwóch ekranach równoległych można powiedzieć, że są mniej skuteczne od pojedynczego ekranu powyżej pewnego obszaru, który można nazwać efektywnym obszarem działania ekranu, w rozważanych przypadkach obszar ten obejmuje parter i pierwsze piętro. Sytuację w obszarze efektywnego działania ekranu determinuje rodzaj najbliższej zabudowy, w zależności od niej bardziej skuteczny może być pojedynczy ekran lub dwa równoległe ekrany.

### 4.3. DOKŁADNOŚĆ PRZEWIDYWANIA SKUTECZNOŚCI EKРАНOWANIA

Specjaliści zajmujący się zwalczaniem hałasu w miastach zdają sobie sprawę z zależności między zmierzonym poziomem hałasu a parametrami ruchu drogowego jako źródła hałasu i parametrami otaczającego obszaru zurbanizowanego [33] – [43]. Przy ocenie skuteczności ekranowania, używając prostego wyrażenia dla pola swobodnego i źródła punktowego emitującego czysty ton, wprowadzają szereg poprawek uwzględniających rzeczywiste otoczenie ekranu i rzeczywiste źródło dźwięku, jakim jest trasa komunikacyjna. Wartości uwzględnianych w praktyce projektowej poprawek są ustalane eksperymentalnie. Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że im szerszy zakres efektów ma obejmować dana poprawka tym jej dokładność jest mniejsza [44].

Ze względu na wymaganą precyzję przy określaniu skuteczności ekranowania najlepszym narzędziem do prognozowania poziomu hałasu są programy symulacyjne, takie jak PROP7, oparte na odpowiednio dokładnym modelu hałasu środowiskowego. Dzięki zastosowaniu programu PROP7 uzyskuje się odpowiedź ilościowo określającą skuteczności ekranowania w danej sytuacji i możliwość obserwacji zmian tej skuteczności w zależności od parametrów źródła i otaczającej zabudowy. Dokładność prognozowania zależy od dokładności modelu hałasu środowiskowego i dokładności z jaką ustalane są parametry wejściowe. Uzyskanie niektórych parametrów nie jest łatwym zadaniem. Jednakże dla oceny skuteczności ekranowania w obszarze zurbanizowanym nie jest wymagana wartość bezwzględna równoważnego poziomu hałasu. Wystarczy względna zmiana spowodowana działaniem ekranu. Wówczas wpływ przyjętych uproszczeń i pominięcie niektórych zjawisk podczas modelowania jest mniej istotne niż w przypadku bezwzględnej wartości poziomu hałasu.

Największe ograniczenia dokładności w przewidywaniu poziomu hałasu wynikają z uproszczeń przyjętych przy modelowaniu trasy jako źródła hałasu. Dla źródła o charakterze statystycznym, jakim jest trasa komunikacyjna, zbieranie niezbędnych danych wymaga dużo czasu i pieniędzy. A zatem należy maksymalnie ograniczyć zbiór danych wykorzystywanych przy tworzeniu modelu trasy. Ogólnie wiadomo, że źródło, w którego widmie mocy przeważają składowe niskoczęstotliwościowe, jest ekranowane mniej skutecznie niż źródło o przewodze składowych wysokoczęstotliwościowych. Jednocześnie im bliżej źródła zostanie umieszczony element ekranujący tym skuteczniej ekranowane jest to źródło. A zatem różnice w położeniach źródeł zastępczych pojazdów i widmach emitowanego hałasu są najważniejsze z punktu widzenia zjawiska dyfrakcji.

W symulacyjnym programie PROP7 - zamiast zastępować trasę komunikacyjną stacjonarnym źródłem punktowym lub, przy uwzględnieniu ruchu pojazdów, skoncentrować cały ruch na osi jezdni i wprowadzić jedno źródło zastępcze dla wszystkich pojazdów – uwzględnia się strukturę pasów ruchu i różne źródła zastępcze dla pojazdów różnych klas. Widma mocy źródeł zastępczych dla wyróżnionych klas pojazdów

są funkcjami prędkości. W zastosowanym modelu pojazd reprezentuje pojedyncze punktowe źródło zastępcze mimo, że występuje w nim szereg źródeł hałasu. Wiadomo jednak, że przy większej prędkości zaczyna dominować hałas opon. A zatem położenie źródła zastępczego przesuwają się w dół a widmo emitowanego hałasu staje się bogatsze w składowe o wyższych częstotliwościach. Z tego powodu w przyszłości położenie źródła zastępczego powinno być określone jako funkcja częstotliwości i prędkości pojazdu.

Z poprzednich badań wynika, że przy ekranowaniu przez pojedynczy budynek różnica wyników uzyskanych dla modelu trasy z ruchem skoncentrowanym na osi jezdni, bez wyróżniania klas pojazdów a modelem drogi z dwoma pasami ruchu i dwoma wyróżnionymi klasami pojazdów wynosi 3 dB(A) [28]. Dla układu obejmującego budynek i znajdujący się przed nim ekran różnica ta wynosi 5 dB(A) [28]. Występujące różnice, uzasadniają konieczność stosowania możliwie dokładnego modelu trasy.

Inne badania dotyczące rozkładu pola akustycznego na fasadach budynków tworzących ulicę z dwustronną zabudową typu wąwóz, potwierdziły istotną zależność poziomu hałasu od geometrii drogi: liczby pasów ruchu i ich położenia. Natomiast wprowadzenie jednego źródła zastępczego dla wszystkich pojazdów lub wyróżnienie dwóch klas pojazdów nie wpływało w istotny sposób na wynik [30]. Oznacza to, że zróżnicowanie w zakresie widma emitowanego hałasu i niewielkie różnice w wysokości źródeł zastępczych nad podłożem mają mniej istotny wpływ niż modelowanie trasy z uwzględnieniem struktury pasów ruchu. Mały wpływ zróżnicowania w zakresie widma ma swoją przyczynę w stosowaniu korekcji A przy obliczaniu równoważnego poziomu hałasu. Dopuszczalne dla ulicy typu wąwóz uproszczenie modelu źródła przez użycie tylko jednego rodzaju źródła zastępczego pozwoliło skrócić czas obliczeń i ułatwiło interpretację wyników. Niemniej dla przypadków określania skuteczności ekranowania projektowanego ekranu, lub wzajemnego ekranowania budynków w przypadku rozproszonej zabudowy, gdy decydującym zjawiskiem jest dyfrakcja, wydaje się być wskazane uwzględnienie możliwie precyzyjnego modelu źródła zarówno w zakresie opisu jego geometrii jak widma emitowanego hałasu.

## **5. EFEKTYWNOŚĆ STOSOWANIA EKRAŃÓW A EFEKTYWNOŚĆ INNYCH ŚRODKÓW OGRANICZAJĄCYCH HAŁAS**

Na podstawie przedstawionych wyników widać, że zastosowanie ekranów skutecznie ogranicza hałas na niższych piętrach budynku. Jednak w miastach przeważają budynki wysokie i dwustronna zabudowa ulic, gdzie często brak jest miejsca na postawienie ekranu. Biorąc to pod uwagę należy również rozważyć stosowanie innych środków ograniczających hałas drogowy. Samo ograniczanie hałasu w obsza-



racach miejskich należy traktować jako złożony proces, w ramach którego stosowanie pojedynczych rozwiązań może dawać obniżenie poziomu hałasu rzędu jednego lub kilku decybeli. Natomiast łączne stosowanie wszystkich możliwych rozwiązań i środków pozwala na istotne obniżenie poziomu hałasu i uzyskanie zadowalającego klimatu akustycznego.

Ograniczenie hałasu przez zmniejszenie hałaśliwości źródeł jest najskuteczniejszym narzędziem walki z hałasem. W tym zakresie skuteczne jest stosowanie metod administracyjnych, za których pośrednictwem można wprowadzić maksymalne dopuszczalne poziomy hałasu dla pojazdów i we właściwy sposób organizować ruch w miastach. Poprzez odpowiednie rozporządzenia można sterować parametrami strumieni pojazdów na trasie: natężeniem ruchu, średnią prędkością pojazdów na poszczególnych pasach, udziałem pojazdów ciężkich. Ciężki transport tranzytowy można usunąć poza obszar miejski, a ciężki transport miejski skierować na specjalnie dla niego wydzielone pasy ruchu. Należy zauważyć, że parametry opisujące strumienie pojazdów nie są wzajemnie niezależne. Zmiana średniej prędkości pojazdów wpływa na inne parametry, takie jak natężenie ruchu i parametry źródeł zastępczych reprezentujących pojazdy. Wykorzystując program PROP7 uwzględniający te relacje, dla ulicy o dwustronnej zabudowie, gdzie średnia prędkość dla pojazdów lekkich wynosiła 70 km/h a dla pojazdów ciężkich 60 km/h, obliczono że przez obniżenie średnich prędkości dla obu typów pojazdów o 20 km/h uzyska się obniżenie poziomu hałasu rzędu 5 dB(A)[30].

W obowiązujących normach jako miarę zagrożenia hałasem przyjmuje się równoważny poziom hałasu dla określonych przedziałów czasowych, czyli średnią energię akustyczną odebraną przez organ słuchu. Przy tak zdefiniowanej mierze zagrożenia hałasem, zmiany rzędu 1 dB(A) są subiektywnie odczuwane, co potwierdza badania ankietowe. Jednak występujący w normach równoważny poziom hałasu jest tylko przybliżoną miarą subiektywnie odczuwanej uciążliwości. Między innymi dlatego że nie uwzględnia pełnej czasowej i częstotliwościowej struktury hałasu ani wpływu czynników pozaakustycznych, które czasami odgrywają bardzo ważną rolę. A zatem wyniki dotyczące równoważnego poziomu hałasu nie mogą być uważane za jedynie decydujące przy podejmowaniu decyzji dotyczącej np. zmian organizacji ruchu. Przykładem niech będzie rozwiązanie w postaci przesunięcia ciężkiego transportu miejskiego (autobusów) na zewnętrzne pasy ruchu, podczas gdy inne pojazdy są skoncentrowane na wewnętrznych pasach. Rozwiązanie to nie daje obniżenia poziomu hałasu[30], ale może być pożądane z punktu widzenia sprawności komunikacji miejskiej. W zmodyfikowanej sytuacji, mimo niezmiennego równoważnego poziomu hałasu, występują ostre maksima spowodowane przejazdami autobusów po najbliższym pasie ruchu, w związku z tym hałas może być oceniony jako bardziej uciążliwy. Jest to jeden z przypadków, gdy przebieg czasowy hałasu, w którym występują ostre maksima, może w istotny sposób wpływać na ocenę uciążliwości a równoważny poziom hałasu nie będzie w dobrej korelacji z jego oceną subiektywną.



Z poprzednich badań wynika, że dla praktycznie możliwego zakresu zmian parametrów występujących w programie symulacyjnym PROP7, obserwowane zmiany w rozkładzie poziomu hałasu, są rzędu pojedynczych decybeli. Na przykład, dla ulicy zabudowanej dwustronnie rozkład poziomu hałasu na fasadach budynków w funkcji wysokości jest prawie stały z lokalnymi zmianami rzędu 1 dB(A) [27]. Ale skoro jest to wciąż odczuwalne subiektywnie, występowanie lokalnych maksimów może być ważne przy wyborze piętra dla ludzi szukających cichszych mieszkań. Dla porównania poszerzenie istniejącej trasy o dwa dodatkowe pasy ruchu w przypadku stosunkowo wąskiej ulicy o dwustronnej zabudowie powoduje wzrost poziomu hałasu o około 3 dB(A) lub o 2 dB(A) kiedy poszerzeniu trasy towarzyszy odpowiednie poszerzenie ulicy, co jest możliwe na etapie projektowania trasy wraz z zabudową [29]. Skoro tak drastyczna zmiana źródła hałasu jak dodanie dwóch pasów ruchu powoduje wzrost poziomu hałasu rzędu dwóch, trzech decybeli to warto jest interesować się położeniem lokalnych maksimów i minimów w rozkładach poziomu hałasu na fasadach budynków nie tylko ze względu na ich subiektywną odczuwalność.

Praktyczną decyzję o zastosowaniu konkretnego rozwiązania należy poprzedzić analizą wpływu dodatkowych czynników na subiektywne odczucie uciążliwości, w tym czynników pozaakustycznych związanych z efektywnością funkcjonowania infrastruktury miejskiej a także efektów estetycznych, od których zależy społeczna akceptacja danego rozwiązania. W związku z tym należy rozważyć szereg wariantów ukształtowania środowiska dysponując wynikającymi z nich rozkładami poziomów hałasu na fasadach budynków. Odpowiednie dane można uzyskać stosując jeden z programów symulacyjnych PROP(...). Metodą analizy różnych wariantów ukształtowania środowiska można znaleźć optymalne rozwiązania na etapie projektowania zabudowy lub wprowadzić odpowiednie korekty w istniejących układach urbanistycznych [27] – [30].

## 6. WNIOSKI

Zastosowanie ekranu jako środka zmniejszającego hałas nie jest rozwiązaniem takim, dlatego decyzję o jego użyciu należy poprzedzić szczegółową analizą skuteczności ekranowania w danym układzie urbanistycznym. Posługiwanie się uproszczonymi metodami prognozowania, uwzględniającymi tylko zjawisko istnienia fali dyfrakcyjnej w obszarze cienia, z ewentualnymi poprawkami na typ okolicznej zabudowy i rodzaj źródła, jest dopuszczalne tylko w stosunkowo prostych sytuacjach. Metoda taka w oczywisty sposób musi być zawodna na przykład przy ocenie skuteczności ekranu dla budynków usytuowanych ukośnie do trasy. W tym przypadku danych o skuteczności ekranowania nie da się przewidzieć na podstawie żadnej uproszczonej analizy. Ponadto wprowadzenie ekranu modyfikuje propagację hałasu zmieniając nie tylko rozkład poziomu hałasu na fasadzie chronionego budynku, ale również w jego otoczeniu, w tym na fasadzie budynku znajdującego się po przeciwnej stronie trasy, naprzeciwko budynku chronionego ekranem gdzie poziom

hałasu wzrasta. W celu uzyskania odpowiedzi jak zmieniają się wtedy rozkłady poziomu hałasu na fasadach okolicznych budynków należy stosować programy symulacyjne takie jak np. PROP7.

Prognozowanie poziomu hałasu jest zawsze oparte na modelu hałasu środowiskowego i zależy od jego dokładności. Przewidując względną zmianę poziomu hałasu po zastosowaniu ekranu eliminuje się systematyczne błędy modelowania. Nadal jednak dokładność prognozy będzie zależna od dokładności wyznaczenia parametrów wejściowych, w szczególności parametrów źródła hałasu, które w przypadku trasy komunikacyjnej określane są metodami statystycznymi. Poza tym, na skutek wzajemnych powiązań tych parametrów, w wyniku wprowadzania np. korekt w organizacji ruchu, zmianie podlega więcej niż jeden z parametrów opisujących trasę. W tym zakresie wskazane jest rozwijanie odpowiednich baz danych. W przyszłości należy również starać się o precyzyjniejsze modelowanie brył budynków oraz precyzyjniejszy opis własności akustycznych ścian budynków i podłoża. W tym kierunku autorzy zamierzają rozwijać posiadane oprogramowanie.

W celu uzyskania pożądanej jakości klimatu akustycznego zazwyczaj nie wystarczy zastosowanie jednego rozwiązania czy środka ograniczającego hałas. Programy symulacyjne stanowią narzędzie przy użyciu którego można uzyskać końcową prognozę w postaci rozkładu poziomu hałasu na fasadach budynków, będącą wynikiem równoczesnego zastosowania wszystkich możliwych dla danej sytuacji środków w różnych ich wariantach. Natomiast podstawę do podejmowania decyzji inwestycyjnych, dotyczących sposobów ograniczenia hałasu powinna stanowić analiza wszystkich możliwych wariantów rozwiązań, z uwzględnieniem aspektów psycho-socjologicznych, które wpływają na społeczną akceptację proponowanych rozwiązań.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Future Noise Policy – European Commission Green Paper COM(96)540 final, listopad 1996 – <http://europa.eu.int/comm/environment/noise/greenpap.htm>
- [2] The noise policy of the European Union, Year 2 (1999-2000). European Communities, 2000 – <http://europa.eu.int/comm/environment/noise/greenpap.htm>
- [3] *Rabiega M., Rudno-Rudzińska B., Rudno-Rudziński K., Jaroch A.*: Polityka hałasowa Unii Europejskiej. Materiały XXIX Szkoły Zimowej Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, 231-240, Gliwice - Wisła 2001
- [4] *Malecki I., Engel Z., Lipowczan A., Sadowski J.*: Problems of noise control in Poland on the way to European integration. Proceedings of NOISE CONTROL'95, 1-39, Warsaw 1995
- [5] PN-ISO 1996-1 Akustyka – opis i pomiar hałasu środowiskowego.

- 
- [6] PN ISO 1996-2 Akustyka - opis i pomiar hałasu środowiskowego - uzyskanie danych w zakresie zagospodarowania przestrzennego.
- [7] PN- ISO 9613-1 Akustyka - tłumienie dźwięku podczas jego propagacji na zewnątrz - obliczenia pochłaniania dźwięku przez atmosferę.
- [8] Prawo ochrony środowiska. Dz. U. Nr 62 z dnia 27 kwietnia 2001 r
- [9] ISO 362:1981 Acoustics: Measurements of noise emitted by accelerating road vehicle, engineering method
- [10] ISO 7188:1985 Acoustics, measurements of noise emitted by passenger car under condition of representative urban driving.
- [11] *Grossmann H., Ehinger P.*: Vehicle pass-by noise control at Porsche. Proceedings of INTER-NOISE 97, 75-80, Budapest, Hungary 1997
- [12] *Sandberg U.*: A new porous pavement with extended acoustical lifetime and useful even on low-speed roads. Proceedings of INTER-NOISE 97, 99-104, Budapest, Hungary 1997
- [13] *Render-Williams Et Al C.*: SAE cooperative research program - sound level urban drive cycle. Proceedings of INTER-NOISE 97, 81-85, Budapest, Hungary 1997
- [14] *De Boer E.*: Public acceptance of noise barriers, a balance of noise nuisance and visual nuisance. Proceedings of Association International contre le Bruit Congress, AICB'92, Prague 1992
- [15] *Rudno-Rudzinska B.*: Modelowanie emisji i propagacji dźwięku do prognozowania klimatu akustycznego środowiska zurbanizowanego. Oficyna Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 39, Wrocław 1994
- [16] *Rudno-Rudzińska B., Jurkiewicz J.*: Investigation of sound field in an urban area using geometrical model. Proceedings of ICA'95, 2, 149-152, Trondheim, Norway 1995
- [17] *Rudno-Rudzinska B., Jurkiewicz J.*: Application of the geometrical method for computer aided acoustic designing of urban system. Proceedings of NOISE CONTROL'95, 343-348, Warsaw 1995
- [18] *Lebiedowska B.*: *Hałas wokół autostrad*. Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998
- [19] *Walerian E., Janczur R., Czechowicz M.*: Screens effectiveness in urban area. Applied Acoustics, **58**, 153-172, 1999
- [20] *Walerian E.*: Description of noise propagation in a built-up area. Institute of Fundamental Technological Research Reports 29, 1995
- [21] *Walerian E., Janczur R., Czechowicz M.*: Practical description of diffraction at wedges. Acta Acustica, **88**, 65-76, 2002
- [22] *Walerian E.*: Multiple diffraction at edges and right angle wedges. Acustica, **78**, 201-209, 1993
- [23] *Janczur R., Walerian E., Oglaza J.*: Acoustical field in space with obstacles. Part I: Description of geometrical field. Acustica, **78**, 154-162, 1993

- [24] *Walerian E., Janczur R.*: Acoustical field in space with obstacles. Part II: Propagation between buildings. *Acustica*, **78**, 210-219, 1993
- [25] *Walerian E., Janczur R.*: Noise shielding efficiency in an urban system. *Journal of Sound and Vibration*, **212**(2), 187-214, 1998
- [26] *Walerian E., Janczur R., Czechowicz M.*: Applications of the road traffic noise model to urban systems. *Archive of Acoustics*, **24**(2), 145-160, 1999
- [27] *Walerian E., Janczur R., Czechowicz M.*: Sound levels forecasting for city-centers. Part I: Sound level due to a road within urban canyon. *Applied Acoustics*, **62**(4), 359-380, 2001
- [28] *Walerian E., Janczur R., Czechowicz M.*: Sound levels forecasting for city-centers. Part II: Effect of source model parameters on sound level in built-up area. *Applied Acoustics*, **62**(5), 461-492, 2001
- [29] *Janczur R., Walerian E., Czechowicz M.*: Sound levels forecasting for city-centers. Part III: A road lane structure influence on sound level within urban canyon. *Applied Acoustics*, **62**(5), 493-512, 2001
- [30] *Janczur R., Walerian E., Czechowicz M.*: Sound levels forecasting for city-centers. Part IV: Vehicles stream parameters influence on sound level distribution within canyon street. *Applied Acoustics*, **62**(6), 645-664, 2001
- [31] *Makarewicz R.*: Representative spectrum of road traffic noise. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, **17**(5), 249-254, 1996
- [32] *Glegg S. A. L., Yoon J. R.*: Determination of noise source heights, Part II. Measurement of the equivalent source height of highway vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, **143**, 39-50, 1990
- [33] *Sadowski J.*: Metody sporządzania kompleksowych planów akustycznych miast i obszarów. ITB INSTRUKCJA Nr 310, Warszawa 1991
- [34] *Kucharski R.*: Prognozowanie klimatu akustycznego mieszkań w funkcji charakterystyk terenu i źródła hałasu. Praca doktorska, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1990
- [35] *Lipowczan A.*: Elementy przeglądu ekologicznego dużej jednostki administracyjnej kraju, na przykładzie prac realizowanych w województwie katowickim. Prace XLI Otwartego Seminarium z Akustyki, 17-26, Wrocław-Szklarska Poręba 1994
- [36] *Makarewicz R.*: Zunifikowane metody pomiaru i obliczania własności akustycznych elementów urbanistycznych, ITB INSTRUKCJA Nr. 315, Warszawa 1991
- [37] *Makarewicz R.*: Barrier attenuation in terms of A-weighted sound exposure level, *Journal of Acoustical Society of America*, **91**(3), 1500-1503, 1991
- [38] *Kokowski P.*: Metody i programy komputerowe do prognozowania hałasu autostrad. Materiały Konferencji nt. "Wpływ autostrad na klimat akustyczny środowiska", 67-74, Warszawa 1996
- [39] *Engel Z., Sadowski J., Stawicka-Walkowska M., Zaremba S.*: Ekran akustyczny. Ministerstwo Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych i Leśnych, Instytut Mechaniki i Wibroakustyki AGH, Kraków 1990

- [40] *Żuchowicz-Wodnikowska I., Czyżewski K.* : Metoda określania emisji i imisji hałasu przemysłowego w środowisku oraz program komputerowy. ITB INSTRUKCJA Nr 338, Warszawa 1996
- [41] *Kokowski P.*: Źródło punktowe w ruchu przyśpieszonym. Model hałasu drogowego. Praca doktorska, Uniwersytet im. A. Mickiewicza, Poznań 2000
- [42] *Stawicka-Walkowska M.*: Katalog ekranów akustycznych. ITB, Warszawa 1990
- [43] Katalog drogowych urządzeń ochrony środowiska. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 2002
- [44] *Attenborough K.*: Aspects of the new ISO standard for outdoor noise prediction. Acoustics Bulletin 21(1), 5-8, 1996

## **EFFECTIVENESS OF ACOUSTICAL SCREENS AGAINST TRAFFIC NOISE IN URBAN AREAS**

### **Abstract**

Since a screen application as noise abatement measure is not a cheap solution, the detailed analysis of its effectiveness in the urban system has to be performed. Taking into account only a shadow of direct wave is not enough in an urban system as multiple reflections are basis of propagation process. A screen introduction into an urban system results in not only a shadow appearance but also a screen itself takes part in multiple reflections as an addition plane. The decision about a screen in the urban system has to be proceeded by the quantitative analysis of its effectiveness along the whole façade of the protected building. The analysis can be performed by use of simulation program such as the here-applied PROP7. By use of this tool the influence of urban system detailed parameters, among them building arrangement, and a road model parameters can be investigated.