

Jacek Nurzyński*

WPŁYW PARAMETRÓW TECHNICZNYCH NA WŁAŚCIWOŚCI AKUSTYCZNE JEDNORAMOWYCH OKIEN WYKONANYCH Z PROFILI Z POLICHLORKU WINYLU

Przegląd dotychczasowych wyników badań izolacyjności akustycznej okien wykonanych z profili z polichlorku winylu pozwolił zaobserwować znaczne zróżnicowanie wartości wskaźników izolacyjności akustycznej właściwej uzyskiwanych przez okna z jednakowym standardowym oszkleniem. W celu znalezienia przyczyn tego zróżnicowania przeprowadzono analizę różnych czynników technicznych związanych z konstrukcją okna. Wykonano badania akustyczne szyb o różnej budowie i różnych wymiarach geometrycznych. Analizowano wpływ sposobu osadzenia szyby na jej właściwości akustyczne. Oszacowano – na podstawie pomiarów laboratoryjnych – izolacyjność akustyczną ramy okiennej. Przeprowadzono analizę wpływu uszczelnienia przemyków na właściwości akustyczne okna, przy czym rozpatrywano dwa aspekty zagadnienia, traktując uszczelnienie jako bezpośrednią drogę transmisji dźwięku oraz uwzględniając pracę uszczeltek jako elementu podpierającego skrzydło okienne na obwodzie. W wyniku przeprowadzonych analiz i prac badawczych opracowano udoskonalony model transmisji dźwięku przez okno.

1. Wprowadzenie

Okno jest elementem budynku spełniającym wiele istotnych funkcji, które mają decydujący wpływ na jego jakość użytkową. Jedną z nich jest ochrona przed docierającym z zewnątrz hałasem. Zastosowanie okien o odpowiedniej izolacyjności akustycznej spełnia zasadniczą rolę w tworzeniu prawidłowego klimatu akustycznego we wnętrzu pomieszczeń usytuowanych w budynkach mieszkalnych, biurowych, usługowych i w budynkach o innych funkcjach, w których hałas może wpływać na warunki odpoczynku, snu, pracy, czy na zachowanie prywatności i intymności we wnętrzu pomieszczenia.

Przegląd dotychczasowych wyników badań izolacyjności akustycznej okien wykonanych z profili z polichlorku winylu pozwolił zaobserwować znaczne zróżnicowanie izolacyjności okien należących do różnych systemów. Pomimo zastosowania jednakowego oszklenia szybą zespoloną 4/16/4 wartości wskaźników izolacyjności akustycznej właściwej R_w wahały się w dość szerokim przedziale (32 + 39) dB. Powstały zatem pytania: Jakże są przyczyny tak dużego zróżnicowania właściwości akustycznych okien

* dr inż. – adiunkt w ITB

oszkłonych takimi samymi szybami? Które parametry techniczne konkretnych rozwiązań systemowych i które parametry geometryczne konkretnych typów okien mają istotny wpływ na ich izolacyjność akustyczną? Poszukując na nie odpowiedzi, przeprowadzono analizę bardzo bogatego zbioru wyników badań izolacyjności akustycznej okien oszkłonych standardowymi szybami zespolonymi oraz zaprogramowano i zrealizowano szeroko zakrojony program badawczy, którego celem było zbudowanie modelu przenoszenia dźwięku przez okno jednoramowe z kształtowników PCV uwzględniającego możliwe do identyfikacji parametry techniczne i geometryczne konkretnego okna.

Przegląd i analizę wyników badań zebranych podczas oceny izolacyjności akustycznej okien w procesach aprobaacyjnych oraz procesach potwierdzania zgodności omówiono w artykule [1]. Przegląd tych danych wskazał na czynniki techniczne i geometryczne wpływające w istotny sposób na izolacyjność akustyczną okien, co ułatwiło zaprogramowanie badań ukierunkowanych na określenie ilościowe wpływu tych czynników. W niniejszym artykule omówiono wyniki badań poświęconych uogólnionemu modelowi przenoszenia dźwięku przez okno.

2. Izolacyjność akustyczna okna jako wypadkowa cząstkowych izolacyjności jego elementów składowych

Okno jest z punktu widzenia akustycznego konstrukcją złożoną, w której można wyróżnić izolacyjność cząstkową:

- ramy,
- oszklenia,
- przemyków.

Przyjmując upraszczające założenie, że między elementami charakteryzującymi się określonymi wartościami izolacyjności cząstkowej nie zachodzą interakcje, izolacyjność akustyczną dowolnego okna można przedstawić jako wypadkową izolacyjności cząstkowych w postaci:

$$R = 10 \log \tau_e \quad (1)$$

$$\tau_e = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S} 10^{-R_i/10} \quad (2)$$

gdzie: R_i – izolacyjność akustyczna elementu okna (ramy, oszklenia przyłgi), dB,
 S_i – pole powierzchni odpowiednio: ramy, oszklenia, przyłgi; m²,
 S – całkowita powierzchnia okna ($S = \sum S_i$), m².

Ponieważ powierzchnia przemyków jest trudna do określenia, wygodniej jest ocenić ich izolacyjność akustyczną w odniesieniu do jednostki długości. Przy takim założeniu wzór (2) przybiera postać:

$$R = -10 \log \left(\frac{S_r}{S} 10^{-0,1 R_r} + \frac{S_s}{S} 10^{-0,1 R_s} + \frac{l_p}{S} 10^{-0,1 R_p} \right) \quad (3)$$

gdzie: R_r – izolacyjność akustyczna ramy, dB,
 S_r – pole powierzchni ramy, m^2 ,
 R_s – izolacyjność akustyczna oszklenia, dB,
 S_s – pole powierzchni oszklenia, m^2 ,
 R_p – izolacyjność akustyczna przylgi, dB,
 l_p – całkowita długość przylgi, m,
 S – całkowita powierzchnia okna, m^2 .

Taka forma modelu [2], [3] jest przyjęta w załączniku do normy EN 12354-3 [4] z zastrzeżeniem, że jest to wzór, który może być wykorzystywany jedynie do oceny wpływu zmian poszczególnych składników na izolacyjność akustyczną okna, a nie do obliczania izolacyjności akustycznej konkretnego okna. Wzór ten należy zatem traktować jako model do oceny jakościowej wpływu poszczególnych części składowych okna na jego izolacyjność akustyczną [5]. Przyczyny tak ograniczonego zakresu wykorzystania omawianego modelu są następujące:

- pominięcie wzajemnego oddziaływania pod względem akustycznym poszczególnych części okna,
- brak dokładnego zdefiniowania izolacyjności cząstkowych w wyniku braku relacji między izolacyjnością akustyczną danego elementu występującego w konkretnym oknie a izolacyjnością akustyczną, jaka może być określona dla danej części składowej okna traktowanej jako wydzielony element,
- brak dostatecznie dokładnych metod pomiarowych umożliwiających wyznaczenie izolacyjności akustycznej poszczególnych części okna.

Omówione w niniejszym artykule prace badawcze miały na celu udoskonalenie modelu przenikania dźwięku przez okno, opisanego za pomocą wzorów (1–3) przez uwzględnienie w nim interakcji między poszczególnymi elementami okna oraz uwzględnienie parametrów geometrycznych wynikających z wymiarów okna i jego podziału wewnętrznego. Badania przeprowadzono metodami standardowymi na specjalnie przygotowanych stanowiskach badawczych, a także metodami, w których wykorzystuje się technikę pomiaru natężenia dźwięku oraz drgań.

3. Izolacyjność akustyczna oszklenia

3.1. Parametry akustyczne związane z budową oszklenia

Z punktu widzenia akustycznego szyby pojedyncze należy traktować jako płyty cienkie o skończonych wymiarach. Teoretyczne zależności określające izolacyjność akustyczną tego rodzaju płyt wskazują, że w przypadku szyb należy się liczyć z wystąpieniem zjawiska koincydencji w przedziale wysokich i średnich częstotliwości (w zależności od grubości szyby) oraz w przedziale niskich częstotliwości z rezonansem związanym z wymiarami konkretnej szyby i jej grubością.

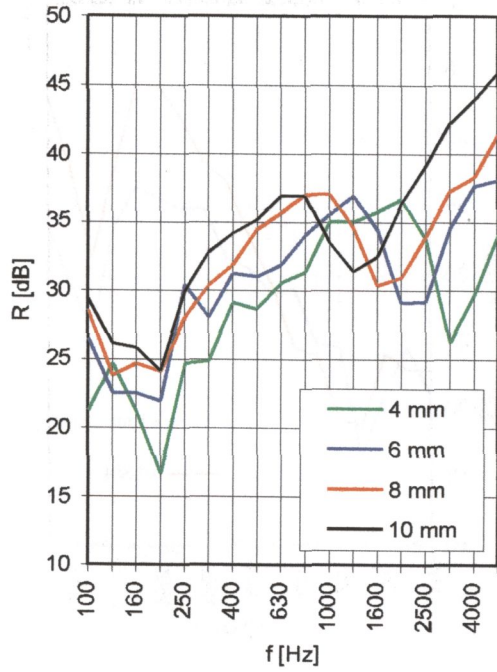
Przeprowadzono badania, które miały na celu określenie, w jakim stopniu te dwa zjawiska wpływają na ocenę izolacyjności akustycznej szyb w rozpatrywanym w budownictwie przedziale częstotliwości (100 + 5000) Hz. Pomiaru akustyczne wykonano zgod-

nie z PN EN 20140-3;1999 [6]. Norma bardzo ściśle precyzuje wymiary próbki oraz sposób jej zamontowania w otworze badawczym. Ma to na celu umożliwienie porównania izolacyjności akustycznej oszklęcia o różnej budowie, a także porównania wyników badań przeprowadzonych przez różne laboratoria. Na rysunku 1 przedstawiono zestawienie charakterystyk uzyskanych w przypadku pojedynczych szyb o grubości (4 + 10) mm najczęściej stosowanych w szybach zespolonych.

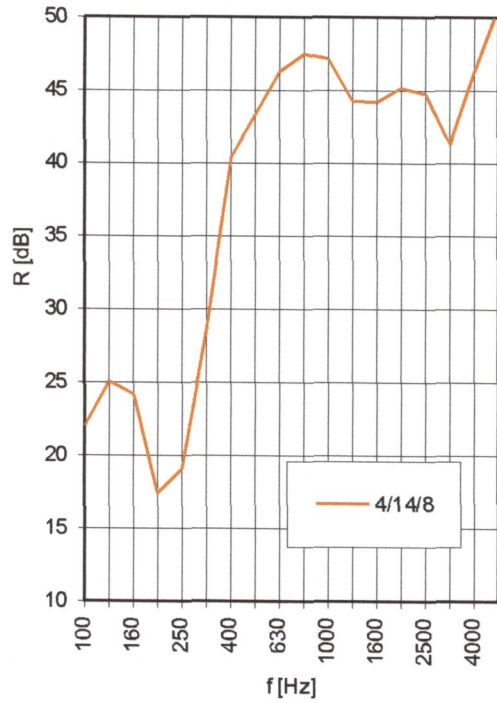
W rozpatrywanym przedziale częstotliwości bardzo wyraźnie wystąpiło zjawisko koincydencji. Ze względu na mały współczynnik tłumienia wewnętrznego szkła obniżenie izolacyjności akustycznej szyby przy częstotliwości koincydencji i w jej otoczeniu jest znaczne. Przy szybach grubości 4 mm (praktycznie jest to najmniejsza grubość szyby stosowana w oknie) występuje ono w 1/3 oktawowym pasmie o częstotliwości środkowej $f = 3150$ Hz, przemieszczając się w kierunku częstotliwości średnich wraz ze zwiększaniem grubości płyty szklanej.

Charakterystyczne przebiegi izolacyjności akustycznej w funkcji częstotliwości szyb pojedynczych przekładają się na izolacyjność akustyczną szyby zespolonej, która jest z nich zbudowana. Obserwuje się obniżenie izolacyjności akustycznej szyby zespolonej w otoczeniu częstotliwości koincydencji szyb składowych. Jako przykład, na rysunku 2 pokazano charakterystykę szyby 4/14/8 – jest wyraźnie widoczne obniżenie izolacyjności w pasmie (1200 + 1600) Hz (szyba 8 mm) i w pasmie 3150 Hz (szyba 4 mm). Charakterystyczne jest przy tym, że jeżeli wartości częstotliwości koincydencji szyb składowych są dostatecznie różne, to w wyniku wzajemnego oddziaływania szyb obniżenie izolacyjności akustycznej szyby zespolonej w rejonie częstotliwości koincydencji poszczególnych szyb jest mniejsze niż przy szybach pojedynczych. Odwrotne zjawisko występuje w przypadku, gdy częstotliwości koincydencji szyb składowych mają takie same lub zbliżone wartości, co zostało zilustrowane na rysunku 3. Z tego względu nie jest korzystne stosowanie szyb zespolonych symetrycznych [7], [8], zwłaszcza jeżeli grubość szyb powoduje, że zjawisko koincydencji występuje w pasmach częstotliwości mających znaczący wpływ na wartości jednoliczbowych wskaźników izolacyjności akustycznej ($h \geq 6$ mm). Należy przy tym dodać, że omawiane zjawiska, ponieważ dotyczą przedziału wysokich i średnich częstotliwości, mają większy wpływ na wartość wskaźników R_w i R_{A1} niż na wskaźnik R_{A2} [5].

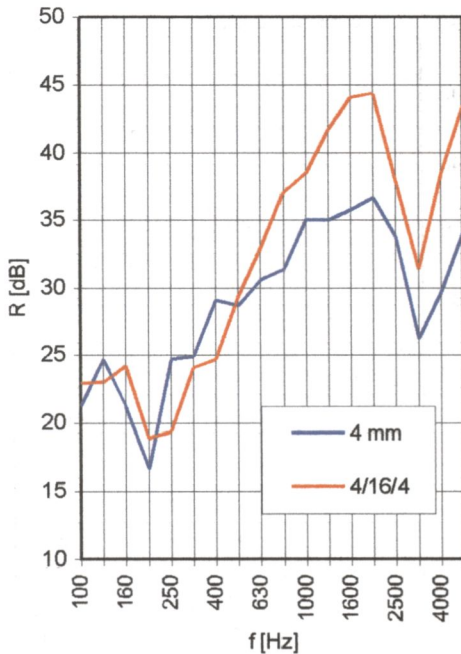
Badanie zjawiska rezonansu związanego z wymiarami szyb, jako występującego w zakresie niskich częstotliwości, nie mogło być przeprowadzone metodami klasycznymi zgodnie z PN EN 20140-3;1999. Wykonano pomiary drgań własnych przy mechanicznym pobudzeniu szyby przez uderzenie i ustalono częstotliwości rezonansowe (podstawowe i harmoniczne) dla szyb o grubości w zakresie (4 + 10) mm, mających jednakową powierzchnię $S_0 = 1,8$ m², lecz różne wymiary. Harmoniczne częstotliwości rezonansowe, określone przy mechanicznym pobudzaniu próbek do drgań, ujawniły się również przy pobudzaniu próbki dźwiękami powietrznymi, co wykazały badania polegające na pomiarze poziomu drgań na powierzchni próbki szyby, podczas gdy w komorze nadawczej były emitowane dźwięki powietrzne w kolejnych pasmach tercjowych w zakresie (100 + 3150) Hz. Ostatecznie stwierdzono, że w przypadku analizowanych próbek szyb zjawiska rezonansowe występują tylko w pasmach niskich częstotliwości, a podstawowa częstotliwość drgań własnych znajduje się poza zakresem rozpatrywanym w akustyce budowlanej.



Rys. 1. Izolacyjność akustyczna właściwa pojedynczych szyb
 Fig. 1. Sound insulation of single panes with different thickness



Rys. 2. Izolacyjność akustyczna właściwa szyby zespolonej 4/14/8
 Fig. 2. Sound insulation of 4/14/4 glazing



Rys. 3. Porównanie izolacyjności akustycznej szyby 4 mm i szyby zespolonej 4/16/4
 Fig. 3. The comparison of sound insulation of 4 mm panes and 4/16/4 glazing

Przy mniejszych powierzchniach szyb niż w przypadku badanych próbek częstotliwości drgań własnych są wyższe. Uwzględniając jednak powszechnie występujące wymiary szyb, można przyjąć, że obniżenie izolacyjności w obszarze częstotliwości drgań własnych nie ma wpływu na ocenę właściwości akustycznych szyb stosowanych w obiektach budowlanych. Stwierdzono również, że wyższe częstotliwości harmoniczne ujawnione przy pobudzaniu zarówno mechanicznym, jak i dźwiękami powietrznymi, nie mają istotnego wpływu na przebieg izolacyjności akustycznej szyby w rozpatrywanym przedziale częstotliwości.

3.2. Izolacyjność akustyczna oszklenia w konkretnym oknie

Okna składają się ze skrzydeł o różnej wielkości i kształcie. Przegląd literatury i dotychczasowych badań własnych wskazuje, że kształt i powierzchnia szyby może wywierać wpływ na jej właściwości akustyczne, a zatem izolacyjność akustyczna poszczególnych skrzydeł jednego okna może być zróżnicowana [9]–[13].

Kształt szyby. Badania wpływu kształtu szyby na jej właściwości akustyczne ograniczono do szyb prostokątnych, jako przypadku najczęściej występującego w praktyce. Analizowano, w jakim stopniu proporcje wymiarów liniowych tego rodzaju szyb wpływają na przebiegi charakterystyk izolacyjności akustycznej właściwej i wartości jednolicebowych wskaźników.

Badania przeprowadzono na próbkach, które miały powierzchnię $S \approx 1,8 \text{ m}^2$ (odpowiadającą powierzchni szyby o standardowych wymiarach $1230 \text{ mm} \times 1480 \text{ mm}$), oraz

proporcje wymiarów liniowych mieszczące się w przedziale 0,3–0,83, to jest takie, jakie najczęściej można spotkać w warunkach rzeczywistych oszklenia różnych skrzydeł okiennych.

Badaniami objęto pojedyncze szyby o grubości (4, 6, 10) mm, szyby warstwowe 44,4 oraz szyby zespolone 4/16/4 (razem 15 próbek). Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów stwierdzono, że w przypadku stosunkowo dużych powierzchni szyb prostokątnych nie obserwuje się wyraźnego wpływu proporcji wymiarów liniowych na wartości wskaźników izolacyjności akustycznej. Również w przebiegu charakterystyk izolacyjności akustycznej właściwej nie stwierdzono jednoznacznych tendencji czy prawidłowości.

W celu zweryfikowania wniosków wynikających z pomiarów izolacyjności akustycznej właściwej szyb przeprowadzonych metodami klasycznymi wykonano analogiczne badania techniką natężeniową. Badania te potwierdziły wnioski uzyskane wcześniej na podstawie pomiarów przeprowadzonych metodą klasyczną.

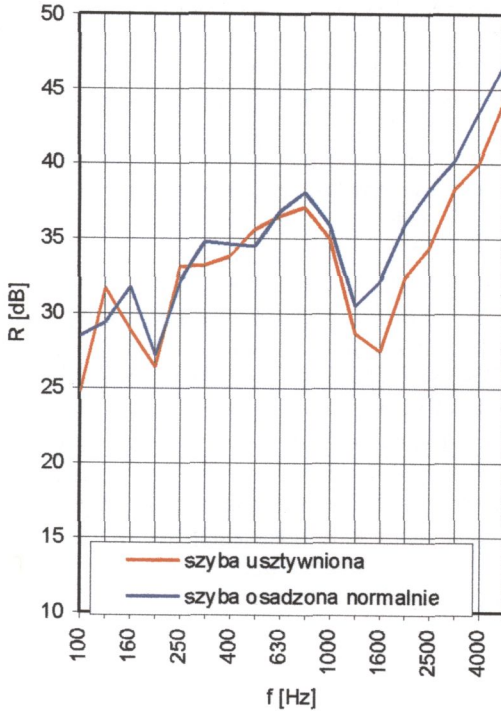
Badania samych szyb o stosunkowo dużej powierzchni nie wyjaśniły zatem zjawiska obserwowanego przy badaniach okien, które jednoznacznie wskazuje, że okna ze skrzydłami o kształcie zbliżonym do kwadratu charakteryzują się mniej korzystnymi parametrami akustycznymi niż okna, w których skrzydła mają kształt wydłużonego prostokąta [9]. Można zatem przypuszczać, że wpływ kształtu oszklenia ujawnia się przede wszystkim w przypadku szyb o stosunkowo małej powierzchni.

Pole powierzchni szyby. W przypadku szyby zespolonej 4/16/4, stanowiącej typowe oszklenie okien, wykonano badania próbek o jednakowych kształtach, lecz różnych polach powierzchni. Wskaźnik R_w przyjmował wyraźnie większe wartości podczas badania próbek o mniejszej powierzchni. Znacznie trudniej jest stwierdzić podobną prawidłowość w przypadku pozostałych wskaźników, a zwłaszcza wskaźnika R_{A2} . O jego wartości decydowała izolacyjność w pojedynczych pasmach 1/3-oktawowych w zakresie niskich częstotliwości (160 + 250) Hz, w których ujawniają się zjawiska modalne, a rozrzut wyników pomiaru jest znaczny (wartości dopuszczalnego rozrzutu wyników badań przy sprawdzaniu powtarzalności i odtwarzalności są także duże). W tym zakresie częstotliwości występuje również wpływ czynników nie mających związku z badaną próbką (na przykład układ komór pomiarowych i mody własne stanowiska pomiarowego, efekt niszy, rozkład pola akustycznego w komorze itp.).

Osadzenie szyby w skrzydle okna. Osadzenie próbki oszklenia na stanowisku badawczym nie odzwierciedla sposobu osadzenia oszklenia w ramie okiennej. Aby stwierdzić, czy i w jakim stopniu sposób zamocowania na obwodzie wpływa na izolacyjność akustyczną szyb, przeprowadzono serię badań kilku próbek szyb zamontowanych za pomocą miękkiego kitu szklarskiego. Następnie zmieniono sposób montażu, usztywniając zamocowanie próbek za pomocą drewnianych klinów rozmieszczonych równomiernie na obwodzie. Przykładowy wynik uzyskany w przypadku szyby o grubości 10 mm pokazano na rysunku 4. Podobne tendencje zaobserwowano badając pozostałe próbki.

W przypadku szyby 4/16/4 usztywnienie spowodowało spadek wartości wskaźnika R_w o 2 dB. Siła docisku uszczelki osadzącej i miejsce, w którym uchwyci ona szybę, może więc mieć wpływ na właściwości akustyczne okna. Również sposób i miejsce zaklinowania szyby wpływa na mody własne i sposób promieniowania energii akustycznej, jednak określenie dokładnych zależności ilościowych jest w tym przypadku bardzo trudne.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu wskazują, że sposób osadzenia szyb w skrzydle okna może mieć wpływ na izolacyjność akustyczną gotowego wyrobu, a tym samym może prowadzić do zróżnicowania izolacyjności akustycznej okien tego samego systemu i typu, lecz pochodzących od różnych producentów.



Rys. 4. Szyba 10 mm – wpływ sztywności osadzenia na izolacyjność akustyczną
 Fig. 4. Influence of edge support stiffness on the sound insulation of 10 mm pane

4. Izolacyjność akustyczna ramy

Dokładne określenie izolacyjności akustycznej ramy okiennej jako odrębnego wyrobu jest praktycznie niemożliwe, ponieważ nie istnieje standardowa procedura badawcza umożliwiająca bezpośredni pomiar, którego wyniki byłyby w pełni wiarygodne i powtarzalne. Żadna z norm pomiarowych nie precyzuje metody badawczej, jaką należałoby zastosować w celu określenia parametrów akustycznych ramy (tak jak to jest na przykład w przypadku oszklenia, kiedy dotycząca go standardowa procedura pomiarowa jest opisana bardzo dokładnie w PN EN 20140-3:1999 [6]). W związku z tym ani producenci profili okiennych należących do poszczególnych systemów, ani firmy montujące okna z tych profili nie podają izolacyjności akustycznej ramy jako parametru charakteryzującego wyrób, mogącego stanowić dane wejściowe do obliczeń. Jedyną metodą oszacowania izolacyjności akustycznej ramy na podstawie eksperymentu, a także empirycznego określenia wpływu ramy na izolacyjność akustyczną całego okna jest wyeliminowanie (w praktyce ograniczenie w maksymalnym możliwym stopniu) przenikania dźwięku przez

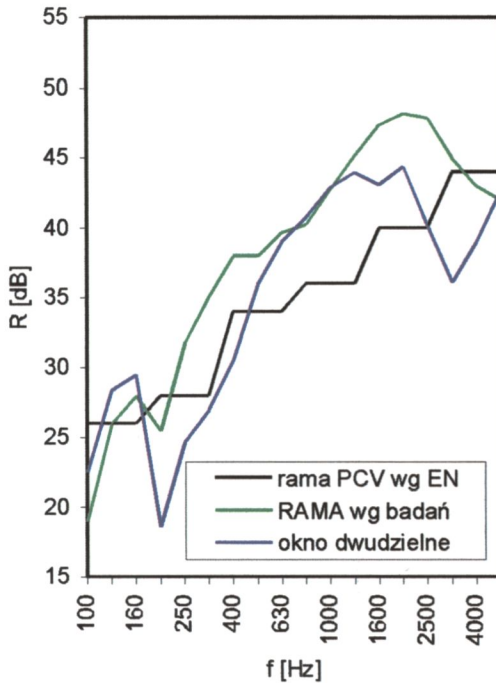
szyby i przemyki. W celu przeprowadzenia takiego badania próbka okna musi być poddana odpowiedniej modyfikacji. Dokładność oszacowania oraz wiarygodność wyników zależą w dużym stopniu od sposobu, w jaki przygotowano próbkę. Modyfikacja okna nie powinna wpływać na właściwości akustyczne badanej ramy. Dodatkowe ustroje izolacyjne zastosowane na szybie nie powinny obciążać ramy lub usztywniać jej w sposób odbiegający od warunków występujących przy normalnej eksploatacji okna.



Rys. 5. Okno dwudzielne przygotowane do pomiaru izolacyjności akustycznej ramy
Fig. 5. Double casement tilt window prepared for sound insulation measurements of frame

Przeprowadzono badania właściwości akustycznych ramy z kształtowników PVC, w skład której wchodziła ościeżnica oraz ramy skrzydeł okna dwudzielnego ze słupkiem ruchomym (wymiar okna 1465 mm × 1435 mm). Z góry założono, że dokładność pomiarów będzie stosunkowo mała i wyniki mogą być traktowane jedynie jako szacunkowe [14]. Z tego względu przyjęto, że uzyskana na podstawie pomiarów izolacyjność akustyczna ramy nie będzie odnoszona do konkretnego typu kształtowników PVC. W celu przeprowadzenia badań powierzchnie szyb w oknie zostały zaizolowane obustronnie warstwą wełny mineralnej oraz płytą gipsowo-kartonową, przy czym ustrój ten był oparty na odrębnej konstrukcji, nie powiązanej z ramą (rys. 5). Wyniki badania przedstawiono na rysunku 6, na którym naniesiono także izolacyjność akustyczną całego okna dwudzielnego oszklonego szybą 4/16/4 (bez ustroju izolującego tafle szklane). W celu porównania naniesiono także charakterystykę izolacyjności akustycznej ramy PVC, proponowaną w pierwotnej wersji normy prEN 12354-3 [15] jako obliczeniowe dane wejściowe do wykorzystania przy określaniu izolacyjności akustycznej elementów budowlanych na podstawie właści-

wości ich części składowych. Jest widoczne, że oszacowane na podstawie pomiarów wartości izolacyjności akustycznej ramy w pasmie średnich częstotliwości są bliskie wartościom izolacyjności okna przy standardowym oszkleniu szybą zespoloną 4/16/4, która charakteryzuje się stosunkowo słabą izolacyjnością akustyczną. Przy zastosowaniu w oknie szyb o większej izolacyjności okazałoby się, że w pasmie średnich częstotliwości przenikanie dźwięku przez ramę jest większe niż przez szybę, co oznaczałoby, że izolacyjność akustyczna ramy determinuje izolacyjność akustyczną całego okna. Takie przypadki występują w praktyce. Różnica pomiędzy krzywą izolacyjności akustycznej ramy według pierwotnej wersji normy EN a krzywą uzyskaną w wyniku przeprowadzonych badań jest bardzo duża prawie w całym zakresie częstotliwości. Widać więc, że krzywa EN nie jest prawidłowa i słusznie nie została wprowadzona do ustanowionej wersji normy.



Rys 6. Wyniki badań izolacyjności akustycznej ramy PCV
 Fig. 6. The results of sound insulation measurements of PVC frame

5. Rozwiązanie przyłgi

5.1. Bezpośrednia izolacyjność akustyczna uszczelnienia

Dotychczasowe doświadczenia własne oraz dane z literatury wskazują, że pomiar bezpośredniej izolacyjności akustycznej samego wyodrębnionego z ramy uszczelnienia nie jest możliwy nawet przy zastosowaniu niestandardowych metod pomiarowych (problemy występują już przy określaniu izolacyjności akustycznej całej ramy okna, o czym była mowa w poprzednim punkcie). Można jedynie podjąć próbę oszacowania wpływu

uszczelnienia przymyków i zastosowanego sposobu rozszczelnienia okna na jego właściwości akustyczne.

Okna nierozszczelnione. Wartości współczynników infiltracji powietrza ponad 150 rozpatrywanych okien nierozszczelnionych, oszklonych standardową szybą 4/16/4, mieszczą się prawie we wszystkich przypadkach w przedziale $(0 + 0,2) \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3}$. Przeprowadzona analiza porównawcza wyników badań akustycznych i wartości współczynnika infiltracji poszczególnych okien doprowadziła do wniosku, że przy zmieniających się w tak małym zakresie wartościach współczynników infiltracji powietrza nie stwierdza się zależności pomiędzy konkretną wartością współczynnika a izolacyjnością akustyczną okna. W celu potwierdzenia tego wniosku, w przypadku okien o różnym oszkleniu przeprowadzono dodatkowe badania, polegające na powtórnym pomiarze izolacyjności akustycznej tej samej próbki okna po dodatkowym uszczelnieniu przyłgi kitem silikonowym. Wyniki uzyskane przed i po dodatkowym uszczelnieniu wykazywały minimalne różnice. Bezpośredni wpływ uszczelnienia na wypadkową izolacyjność akustyczną okna PVC staje się widoczny przy współczynniku infiltracji powietrza przekraczającym $0,2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3}$, co dotyczy zwłaszcza okien z oszkleniem charakteryzującym się lepszymi właściwościami akustycznymi.

Przeprowadzono również analizę dotychczasowych wyników badań izolacyjności akustycznej właściwej okien należących do 27 różnych systemów, z uwzględnieniem kształtu przekroju zastosowanych w nich uszczelek. Wpływ kształtu i miejsca zastosowania uszczelki przylgowej uwidacznia się tylko przy porównaniu okien z systemem uszczelnienia AD i MD. W przypadku okien z uszczelnieniem MD, to jest takich, w których jest stosowana uszczelka środkowa i wewnętrzna, występuje obniżenie izolacyjności akustycznej w rejonie 1000 Hz [16] w porównaniu do izolacyjności akustycznej okien z uszczelką wewnętrzną i zewnętrzną (AD). Zostało to zilustrowane na rysunku 7, na którym naniesiono charakterystyki okien dwurzędowych należących do tego samego systemu, uszczelnionych w różny sposób (AD-MD).

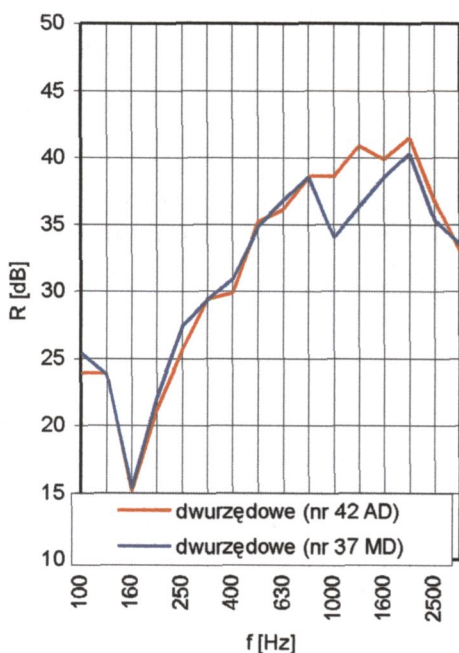
Okna rozszczelnione. W przypadku okien rozszczelnionych wartość współczynnika infiltracji powietrza mieściła się w granicach $a = (0,5 + 0,8) \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{daPa}^{2/3}$. Zaobserwowano, że obniżenie izolacyjności akustycznej okna zależy przede wszystkim od zastosowanego sposobu rozszczelnienia. W praktyce stosowane są najczęściej dwa podstawowe sposoby uzyskiwania zmniejszonej szczelności okien:

- miejscowe usunięcie fragmentów uszczelek obwodowych w sposób labiryntowy (po zostawieniu wykonanych wycięć albo wypełnienie ich uszczelką płaską lub perforowaną),
- uzyskanie jednakowej mikroszczeliny na całym obwodzie za pomocą uszczelek karbowanych lub przez mikrouchylenie skrzydła.

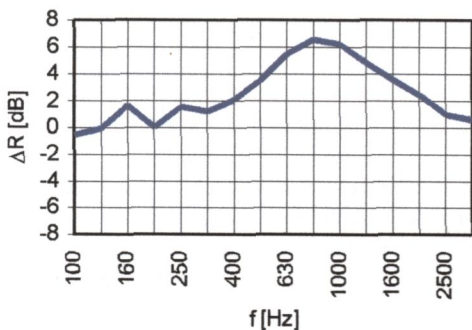
Najczęściej stosowane jest rozwiązanie pierwsze, polegające na usunięciu fragmentów uszczelki, w wyniku czego powstają lokalne nieszczelności. Decydujące znaczenie ma w tym przypadku rozmieszczenie wycięć uszczelki, wpływające na skuteczność utworzonego labiryntu, pełniącego rolę tłumika akustycznego, a także zastosowanie w miejscu wycięć uszczelki płaskiej lub perforowanej. Lokalne nieszczelności powodują zmniejszenie izolacyjności akustycznej, głównie w zakresie (630 + 1250) Hz. Na rysunku 8 pokazano wartości średnie spadku izolacyjności akustycznej spowodowanego rozszczelnieniem okien w omawiany sposób.

Drugie rozwiązanie jest stosowane rzadziej – w tym przypadku wpływ rozszczelnienia daje się zaobserwować w szerszym zakresie częstotliwości. Efekt rozszczelniania jest widoczny już w pasmie 250 Hz, dlatego też ma większy wpływ na wartości wskaźników jednoliczbowych niż w przypadku zmniejszania szczelności okna poprzez lokalne labiryntowe wycięcie uszczelki. Podobny spadek izolacyjności występuje przy mikrouchyłaniu skrzydła. Na rysunku 9 pokazano przykładowe wykresy izolacyjności akustycznej okna jednozielonego przy różnym stopniu mikrouchylenia.

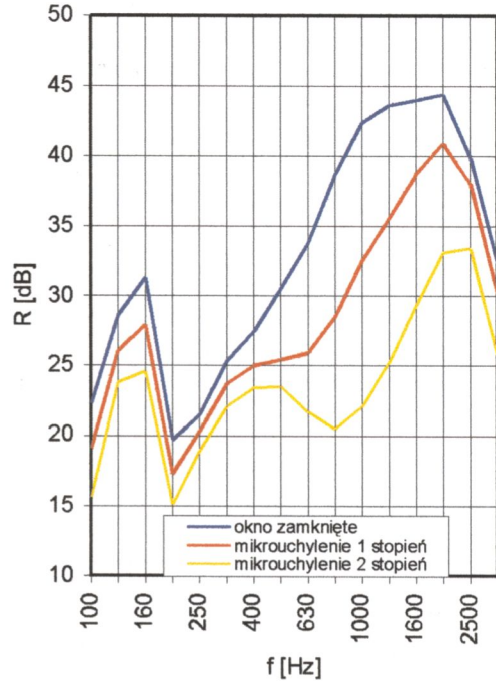
Zakres, w jakim zmienia się wartość wskaźnika izolacyjności akustycznej właściwej okien w wyniku rozszczelnienia, jest znaczny; w przypadku rozpatrywanych okien spadek wartości wskaźnika R_w wahał się w granicach od 0 dB do 7 dB.



Rys. 7. Okna dwurzędowe tego samego systemu z uszczelnieniem AD i MD
 Fig. 7. Two combined windows of the same system with external (AD) and central (MD) gasket



Rys. 8. Spadek izolacyjności akustycznej okien spowodowany miejscowym rozszczelnieniem; wartości średnie dla analizowanych próbek z oszkleniem 4/16/4
 Fig. 8. The drop of sound insulation of windows caused by local reduction of air-tightness, mean values for investigated samples with 4/16/4 glazing



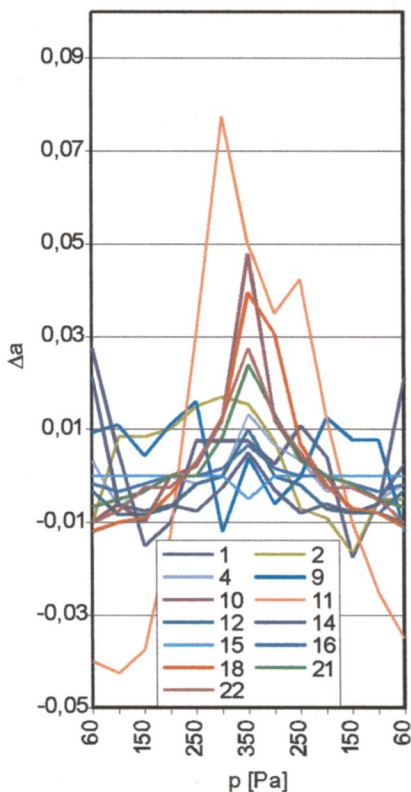
Rys. 9. Wpływ mikrouchylenia skrzydła na izolacyjność akustyczną okna
 Fig. 9. The influence of micro-opening of sash on the sound insulation of window

Obniżenie izolacyjności akustycznej okna w wyniku rozszczelnienia jest w większym stopniu zależne od sposobu rozszczelnienia niż od wartości współczynnika infiltracji powietrza. Z tego względu nie można określić stałego związku między wartością współczynnika infiltracji powietrza a , a obniżeniem izolacyjności. W przypadku rozszczelnienia lokalnego (wykonanego poprzez usunięcie fragmentów uszczelki na pewnych odcinkach przylgi) szczególnie korzystne jest wykonanie wycięć w górnym ramiaku i w dolnej części słupków, natomiast niekorzystne jest umieszczanie wycięć tylko w górnym ramiaku, zwłaszcza przy wąskich skrzydłach. Korzystne jest również jednoczesne zastosowanie trzech uszczelki w płaszczyźnie wewnętrznej, środkowej i zewnętrznej, co umożliwi bardziej swobodne kształtowanie labiryntu o odpowiednich właściwościach tłumiących. Ponieważ rozszczelnienie okna wpływa przede wszystkim na obniżenie jego izolacyjności w przedziale średnich częstotliwości, powoduje ono większy spadek wskaźnika R_w niż wskaźnika R_{A2} .

5.2. Uszczelki przylgowe jako oparcie skrzydła

Uszczelki przylgowe w oknie zapewniają odpowiedni stopień uszczelnienia przymyków oraz stwarzają określone warunki podparcia skrzydeł okiennych. Na podstawie przeglądu wyników badań akustycznych okien omówionego w [1] postawiono hipotezę, że zróżnicowane warunki podparcia skrzydeł, wynikające z różnych właściwości uszczelki, mają wpływ na izolacyjność akustyczną całego okna. Jako cechę właściwą uszczelki

lek w tym zakresie przyjęto zmienność cząstkowych wartości współczynnika infiltracji powietrza w funkcji zmiany różnicy ciśnienia od 60 Pa do 350 Pa, jakie stosuje się w procedurach badawczych przy wyznaczaniu współczynnika infiltracji powietrza jako miary stopnia uszczelnienia przemyków. Zaobserwowano, że okna w przypadku których większa jest dynamika wzrostu wartości cząstkowych współczynnika infiltracji powietrza wraz ze wzrostem różnicy ciśnienia Δp , charakteryzują się większą izolacyjnością akustyczną. W celu umożliwienia porównania charakteru zmian wartości cząstkowych $a(\Delta p)$ dla okien należących do różnych systemów, wartości te sprowadzono do „0” według wzoru $a_0(\Delta p) = a(\Delta p) - a$ i na podstawie tak uzyskanych krzywych, odnoszących się do poszczególnych okien, obliczono średnie krzywe poszczególnych systemów, które pokazano na rysunku 10. Można przyjąć, że dynamika przebiegu tych krzywych charakteryzuje podatności uszczelki na odkształcenie pod wpływem różnicy ciśnienia. Im większy był wzrost wartości cząstkowych współczynnika a w funkcji Δp , tym uszczelka stawała się bardziej elastyczna („podatna”). Na podstawie dotychczasowych wyników badań izolacyjności akustycznej okien można stwierdzić, że większość systemów, które charakteryzowały się właściwościami akustycznymi lepszymi od pozostałych, miało uszczelki, które można określić jako „podatne”.



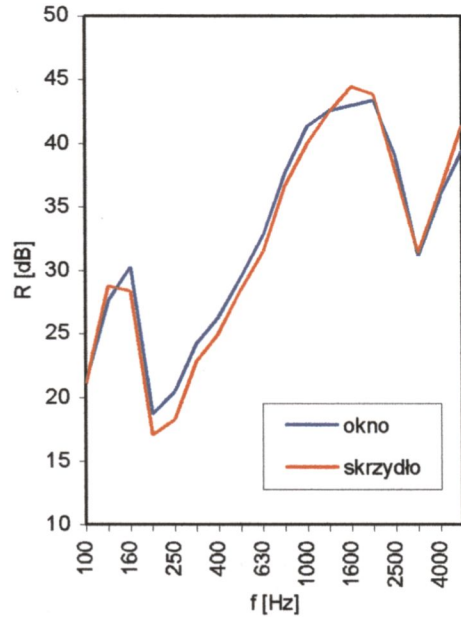
W celu bardziej szczegółowego zbadania zaobserwowanego zjawiska przeprowadzono pomiary izolacyjności akustycznej właściwej okien oszklonych szybą zespoloną 4/16/4, następnie samych skrzydeł wyjętych z tych okien i zamocowanych bezpośrednio w otwarte stanowiska badawczego, oraz ostatecznie samych szyb wyjętych z badanych wcześniej skrzydeł. Na rysunku 11 porównano uzyskane tym sposobem dwa wykresy izolacyjności akustycznej właściwej okna jednokształnego otwieranego i skrzydła wymontowanego z tego okna. Widoczna jest różnica pomiędzy charakterystyką uzyskaną w przypadku samego skrzydła i w przypadku okna, w którym to skrzydło było zamocowane za pośrednictwem uszczelki.

Rys. 10. Dynamika zmian współczynnika infiltracji powietrza, wartości sprowadzone do „0” i uśrednione dla poszczególnych systemów okien

Fig. 10. The changes of air permeability coefficient, values normalized to „0” and averaged for each of window systems: $p = (60 \div 350) \text{ Pa}$

W zakresie średnich częstotliwości izolacyjność okna jest wyraźnie wyższa. Świadczy to o tym, że oparcie skrzydła okiennego na elastycznej uszczelce powoduje wzrost izolacyjności akustycznej. Jest to potwierdzeniem podanego na wstępie wniosku, że system uszczelki przyłgowych ma większy wpływ na izolacyjność akustyczną okna niż tylko ograniczenie bezpośredniego przenikania dźwięku przez przymyk.

Rys. 11. Wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej właściwej okna i samego skrzydła
 Fig. 11. The results of sound insulation measurements of single window and the window sash alone



6. Zmodyfikowany model transmisji dźwięku przez okno

Przeprowadzone badania wykazały, że ze względu na znaczną liczbę czynników wpływających na właściwości akustyczne okna, z których wiele jest zależnych od indywidualnych cech wyrobu charakterystycznych dla danego systemu, producenta lub wręcz danego egzemplarza okna, określanie izolacyjności akustycznej okna w sposób obliczeniowy może być traktowane jedynie jako oszacowanie. Dokładne wyznaczenie izolacyjności akustycznej właściwej okna jest możliwe tylko na podstawie bezpośredniego pomiaru dotyczącego konkretnej próbki, wykonanego w warunkach laboratoryjnych. Ustalenie pewnych zależności i podanie ich w postaci modelu transmisji dźwięku może być wykorzystane przy szacunkowej ocenie zmian izolacyjności akustycznej pod wpływem zmian parametrów technicznych okna i przy uogólnianiu wyników pomiarów okien określonego systemu.

Przeprowadzone badania (opisane w p. 3, 4 i 5) pozwoliły na zmodyfikowanie modelu przenoszenia dźwięku przez okno (patrz p. 2) przez wprowadzenie do niego poprawek uwzględniających te czynniki techniczne i geometryczne, które wpływają na izolacyjność akustyczną okna.

Zmodyfikowany model można przedstawić w postaci:

$$R = -10 \log \left[\sum_i \frac{S_{s,i}}{S} 10^{-0,1 (R_{s0,i} + \sum_m \Delta_{sm,i})} + \sum_j \frac{S_{r,j}}{S} 10^{-0,1 (R_{r0,j} + \sum_n \Delta_{mj})} \right] + \Delta p \quad (4)$$

gdzie: $R_{s0,i}$ – izolacyjność akustyczna właściwa szyb określona dla standardowej próbki, dB,

$R_{r0,i}$ – wyjściowa izolacyjność akustyczna ramy, dB,

$S_{s,i}$ – pole powierzchni poszczególnych szyb w oknie, m^2 ,

$S_{r,j}$ – pole powierzchni poszczególnych elementów ramy, m^2 ,

S – całkowita powierzchnia okna, m^2 ,

$\Delta_{sm,i}$ – poprawki uwzględniające parametry techniczne szyby:

$\Delta_{s1,i}$ – pole powierzchni i -tej szyby, dB,

$\Delta_{s2,i}$ – kształt i -tej szyby, dB,

$\Delta_{s3,i}$ – zamocowanie i -tej szyby w skrzydle, dB,

$\Delta_{s4,i}$ – zamocowanie i -tego skrzydła w ościeżnicy, dB;

$\Delta_{rn,j}$ – poprawki uwzględniające parametry techniczne ramy:

$\Delta_{r1,j}$ – typ i wymiar elementu j ramy, dB,

$\Delta_{r2,j}$ – obecność i rodzaj usztywnienia profilem stalowym elementu j ramy, dB,

$\Delta_{r3,j}$ – otwory odwadniające itp. szczegóły konstrukcyjne elementu j ramy, dB;

Δp – poprawka uwzględniająca sposób uszczelnienia (rozszczelnienia) przylgi.

W modelu opisanym algorytmem (4) izolacyjność akustyczną ramy z PVC można przyjąć według danych zamieszczonych w p. 4. Izolacyjność akustyczna szyb powinna być przyjęta na podstawie wyników badań przeprowadzonych według PN-EN 20140-3:1999 [6] na próbkach o wymiarach (1230 × 1480) mm. Te dwie wielkości są więc jednoznacznie określone. Występujące we wzorze (4) poprawki mogą być wyznaczone empirycznie, przy czym w zależności od rodzaju parametru technicznego okna będą to konkretne wartości lub tylko przedziały wartości.

Wprowadzając te przedziały do wzoru (4) lub konkretne wartości poprawek tam, gdzie jest to możliwe, można uzyskać przedziały, w jakich będą się wahały wartości izolacyjności akustycznej okna. Można również oszacować, jaki wpływ na właściwości akustyczne okna będą miały zmiany jego parametrów technicznych reprezentowane przez poprawki. Ta druga możliwość wykorzystania omawianego modelu ma szczególnie istotne znaczenie w praktyce.

Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono przedziały, w jakich wahają się wartości poprawek przy oszkleniu okna standardowym zestawem 4/16/4.

A. Poprawki stosowane przy obliczaniu wartości wskaźnika R_w :

szyby – wartości $\Delta_{s1} - \Delta_{s4}$

$\Delta_{s1} = 0 + 4$ dB ($\Delta_{s1} = 0$ dB dla szyby o standardowych wymiarach 1230 mm × 1480 mm),

$\Delta_{s2} = (-1) + 0$ dB ($\Delta_{s2} = 0$ dB dla szyby o standardowych wymiarach 1230 mm × 1480 mm),

$\Delta_{s3} = (-2) + 0$ dB ($\Delta_{s3} = 0$ dB dla szyby uchwyconej uszczelką w obrębie ramki),

$\Delta_{s4} = 0 + 4$ dB ($\Delta_{s4} = 0$ dB dla okna stałego).

uszczelnienie – wartości zależnie od sposobu rozszczelnienia

| Sposób rozszczelnienia | Δ_p , dB |
|---|-----------------|
| Labiryntowe wycięcia uszczelek przylgowych wykonane w obrębie górnego ramiaka i dolnej części słupków z zastosowaniem uszczelki płaskiej lub perforowanej | -(0 + 1) |
| Labiryntowe wycięcia uszczelek przylgowych wykonane w obrębie górnego ramiaka i dolnej części słupków | -(2 + 3) |
| Labiryntowe wycięcia uszczelek przylgowych wykonane tylko w obrębie górnego ramiaka z zastosowaniem uszczelki płaskiej lub perforowanej | -(2 + 3) |
| Labiryntowe wycięcia uszczelek przylgowych wykonane tylko w obrębie górnego ramiaka | -(3 + 5) |
| Zastosowanie uszczelki „wentylacyjnej” lub mikrouchylenie | -(4 + 5) |

B. Widmowe wskaźniki adaptacyjne do obliczania wskaźników R_{A1} i R_{A2} :

| Rodzaje okien | C, dB | C_{tr} , dB |
|------------------------|-------|---------------|
| Okna nierozszczelnione | -2 | -5 |
| Okna rozszczelnione | -1 | -4 |

7. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wyraźnie wskazały na możliwość wyodrębnienia wpływu wybranych parametrów technicznych na izolacyjność akustyczną okien wykonanych z profili z polichlorku winylu. Ustalone zależności, podane w postaci modelu transmisji dźwięku, mogą być wykorzystane przy szacunkowej ocenie zmian izolacyjności akustycznej pod wpływem zmian parametrów technicznych okna i przy uogólnianiu wyników pomiarów akustycznych okien określonego systemu. Dokładne wyznaczenie izolacyjności akustycznej właściwej okna jest jednak możliwe tylko na podstawie bezpośredniego pomiaru konkretnej próbki, wykonanego w warunkach laboratoryjnych.

Bibliografia

- [1] Nurzyński J.: Analiza wyników badań izolacyjności akustycznej okien z polichlorku winylu należących do różnych systemów oraz pochodzących od różnych producentów. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 2, 2002
- [2] Gerretsen E.: European developments in prediction models for building acoustics. *Acta Acustica*, 2, 1994, s. 205–214
- [3] Gerretsen E., Nightingale T.R.T.: Prediction models in building acoustics – introduction to the special session at Forum Acusticum 1999 in Berlin. *Building Acoustics*, vol. 6, no 3–4

- [4] EN 12354-3:2000 Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of building from the performance of elements – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound
- [5] Nurzyński J.: Jednoliczbowe wskaźniki izolacyjności akustycznej okien uwzględniające widmo hałasu zewnętrznego. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 1–2, 1994
- [6] PN-EN 20140-3:1999 Akustyka. Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych. Pomiar laboratoryjne izolacyjności od dźwięków powietrznych elementów budowlanych
- [7] Rasmussen B.: Sound insulation for sealed triple glazings. Alborg University Denmark, 1986
- [8] Rasmussen B.: Sound insulation for hermetically – sealed double and triple glazing. Spring Conference Acoustics '86, University of Salford, 1986
- [9] Michelsen N.: Effect of size on measurements of the sound reduction index of a window or a pane. *Applied Acoustics*, 16, 1983, s. 215–234
- [10] Nurzyński J.: Czynniki wpływające na izolacyjność akustyczną okien jednoramowych z PCV. *Materiały 27. Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych*, Gliwice – Ustroń, 22–27 II 1999. Gliwice, Polskie Towarzystwo Akustyczne Oddział Górnoląski, Instytut Fizyki PŚ, 1999, s. 195–202
- [11] Szudrowicz B.: Właściwości akustyczne okien. *Materiały Budowlane*, 4, 1996, s. 12–16
- [12] Szudrowicz B.: Właściwości akustyczne szyb zespolonych. *Świat Szkła*, 4, 1997
- [13] Szudrowicz B., Nurzyński J.: Właściwości akustyczne okien jednoramowych w świetle badań Zakładu Akustyki ITB. 43 Konferencja Naukowa „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitet Nauki PZiTB, Poznań – Krynica 1997, t. 6; *Materiały budowlane. Fizyka budowli*. Politechnika Poznańska, Poznań 1997, s. 191–198
- [14] PN-EN 20140-2:1999 Akustyka. Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych. Wyznaczanie, weryfikacja i zastosowanie danych określających dokładność
- [15] Draft prEN 12354-3 Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products – Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound, 1995
- [16] Hoffmeyer D.: The influence of frame/sash constructions on sound insulation for windows. Nordic Acoustical Meeting, Danish Acoustical Institute, 1990

Wszystkie prace badawcze i analizy, których wyniki przedstawiono w artykule, zostały wykonane w ramach rozprawy doktorskiej „Wpływ parametrów technicznych na właściwości akustyczne jednoramowych okien wykonanych z profili z polichloru winylu”. Pragnę jeszcze raz podziękować promotorowi pracy, pani dr hab. inż. Barbarze Szudrowicz, za życzliwość i pomoc przy opracowaniu rozprawy oraz za pomoc w przygotowaniu niniejszego artykułu, przekazaną mi wiedzę i wiele cennych uwag.

THE INFLUENCE OF TECHNICAL PARAMETERS ON THE ACOUSTIC PERFORMANCES OF WINDOWS MADE OF POLYVINYL-CHLORIDE SECTIONS

Summary

The review of existing laboratory tests results carried out on windows made of plastics sections shows the considerable differences in the sound reduction index values obtained for windows with the same typically used glazing. To find the reason for such

a spread different technical factors connected with window's structure were analysed. Sound insulation measurements for glazing of different geometrical dimensions and different structure were done. The influence of the method of edges support on acoustic properties of panes was analysed. The sound insulation of window frame was estimated based on the results of laboratory measurements. The influence of sealing on the acoustic performances of window was investigated. Two main aspects were considered; the sealing as the direct path of sound transmission and perimeter gaskets as the support element of window sash. As a result of analyses and research works the improved model of sound transmission through window was developed.

Praca wpłynęła do Redakcji 5 VII 2002