

WPŁYW KAUSTYKI NA AKUSTYKĘ GROT SZEPTÓW W PARKU OLIWSKIM W GDAŃSKU

1. WPROWADZENIE

W dużych pomieszczeniach, których wnętrza formują wielkowymiarowe elementy krzywopowierzchniowe, spotyka się osobliwości akustyczne polegające na „ślizganiu się” dźwięku wzdłuż wklęsłej ściany lub koncentracji dźwięku w odległej części pomieszczenia w wyniku specyficznego układu sklepień. Fizyczna natura tych osobliwości jest odmienna, lecz ich efekt jest ten sam – pozwalają one na wzajemne słyszenie się osób na odległość w warunkach akustyki naturalnej, tj. bez użycia systemów nagłaśniających. W obiektach współczesnych zjawisko to jest traktowane jako usterka akustyczna, której projektanci usilnie starają się zapobiec. Praca dotyczy jednak pomieszczeń powstałych w czasie, w którym akustyka pomieszczeń nie była jeszcze dyscypliną naukową w dzisiejszym rozumieniu. Omawiane zjawiska nie podlegały zatem korekcie akustycznej, a nawet ich istnienie nie zawsze było uświadamiane, stąd można je spotkać w pomieszczeniach historycznych o funkcji reprezentacyjnej, ceremonialnej, liturgicznej itp., gdzie zwykle powstawały w sposób niezamierzony i były wykrywane przypadkowo, nierzadko wiele lat po zbudowaniu obiektu. Opisy tych osobliwości można znaleźć już w literaturze z początków rozwoju akustyki architektonicznej jako dyscypliny naukowej [13, 14, 16, 17].

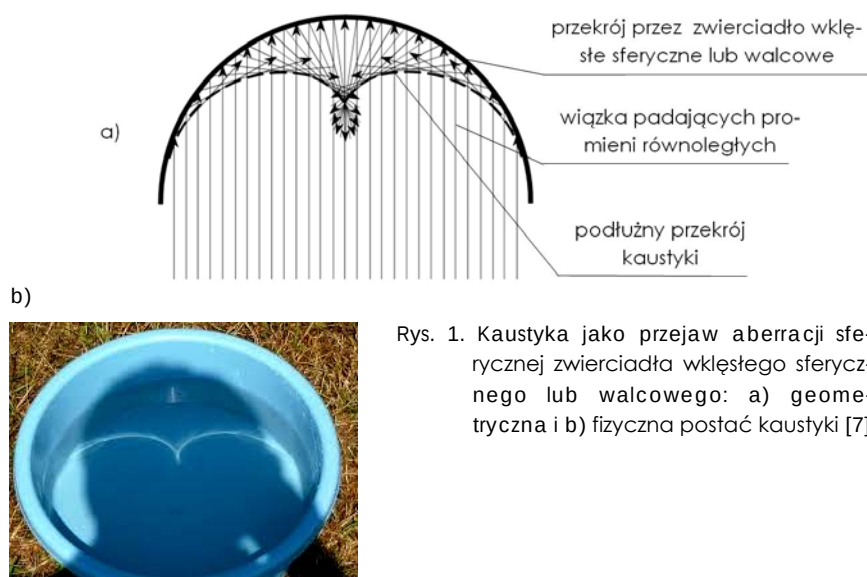
W pracy starano się wykazać, że omawiane zjawiska powstają w wyniku uformowania się kaustyki, tj. obwiedni wiązek promieni dźwiękowych, wybiegających z punkтового źródła, a następnie ulegających odbiciu. W pracy przedstawiono XVIII-wieczny obiekt zabytkowy, od początku zbudowany w celu publicznego demonstrowania omawianej osobliwości akustycznej jako ciekawostki fizycznej, zaś kaustykę w przemyślany sposób wykorzystano do jej uzyskania.

2. KAUSTYKA W AKUSTYCE POMIESZCZEŃ

Na rysunku 1 przedstawiono zjawisko formowania się kaustyki, opierając się na zasadzie akustyki optyki geometrycznej. Zasada ta jest także stosowana w akustyce pomieszczeń, w której dyskretne promienie dźwiękowe są interpretowane jako kierunki biegu fal akustycznych [10].

Geometryczna struktura pola akustycznego w pomieszczeniach dominuje energetycznie nad innymi strukturami pola, tj. falową i statystyczną. W szczególności dotyczy to początkowego okresu formowania się pola akustycznego w pomieszczeniu, tj. pierwszych kilkudziesięciu milisekund po pobudzeniu pomieszczenia. Okres ten ma duże znaczenie dla właściwości akustycznych

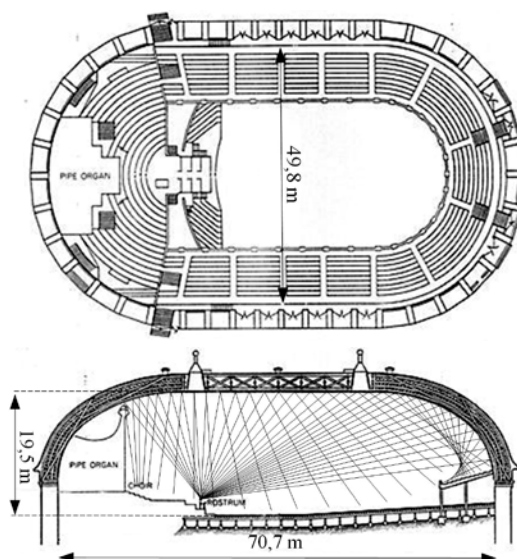
pomieszczenia, formowanie się kaustyk może zatem w znaczący sposób wpływać na akustykę danego wnętrza. Z reguły jest to wpływ niekorzystny, jednak jak wskazano na rysunku 2, istniejąca już kaustyka może być wykorzystana z pożytkiem dla akustyki sali. W rozdziale 3 wykazano też, że w przypadku pomieszczeń zabytkowych rozwiązania prowadzące do powstania kaustyki mogą być zamierzonym działaniem architekta.



Rys. 1. Kaustyka jako przejaw aberracji sferycznej zwierciadła wklęsłego sferycznego lub walcowego: a) geometryczna i b) fizyczna postać kaustyki [7]

Wnętrza zabytkowe często są uformowane przez sklepienia, ściany o rzucie krzywoliniowym i inne wielkowymiarowe elementy krzywopowierzchniowe. W takich pomieszczeniach w naturalny sposób występuje tendencja do ogniskowania dźwięku. Zwykle przyjmuje się, że ma ono postać punktowego ogniska. Ognisko punktowe powstaje jednak tylko wtedy, gdy zwierciadło jest wycinkiem paraboloidy obrotowej, zaś źródło dźwięku jest usytuowane na jej osi geometrycznej. W istniejących pomieszczeniach historycznych warunki te zwykle nie są dotrzymane. Krzywizny ściany i sklepień spełniają przede wszystkim wymagania konstrukcyjne i jedynie z przypadku przyjmują kształt zbliżony do wycinka paraboloidy. Ponadto źródła dźwięku, tj. osoby lub instrumenty muzyczne, przemieszczając się, mogą znaleźć się na osi symetrii tych krzywizn jedynie przypadkowo. Sprawia to, że skupienie dźwięku z reguły ma formę kaustyki.

Na rysunku 2 przedstawiono *Mormon Tabernacle* w Salt Lake City, USA, jako przykład wykorzystania już istniejącej kaustyki do poprawy słyszalności w części sali odległej od mówcy. W tym przypadku kaustyka jest efektem odbicia dźwięku od tylnej części sufitu, stanowiącej wklęsłe zwierciadło akustyczne. Przed zbudowaniem balkonu dźwięk, po skupieniu przez zwierciadło, padał na duży obszar widowni, przez co jego natężenie było małe. Po umieszczeniu balkonu na odpowiedniej wysokości ten sam strumień energii akustycznej pada na znacznie mniejszą powierzchnię. Powoduje to zwiększenie natężenia dźwięku, a w efekcie – poprawę słyszalności na balkonie [4].



Rys. 2. Mormon Tabernacle, Salt Lake City, Utah, USA (1869 r.). Pokazana kaustyka nad balkonem w tylnej części sali [6, 11]

3. ZJAWISKO DYFRAKCJI W FIZYCZNYM POLU AKUSTYCZNYM

Powyższe uwagi zawierają uproszczenie, wynikające z założeń geometrycznego modelu pola akustycznego. W tym modelu pole jest reprezentowane przez dyskretne promienie dźwiękowe, między którymi zawarta jest pusta przestrzeń. Zjawisko dyfrakcji jest wówczas zaniedbywane. Rzeczywiste pole akustyczne stanowi natomiast *continuum*, utworzone przez przemieszczające się fronty fal. Ważnym elementem pola fizycznego jest zjawisko dyfrakcji. Struktura takiego pola zależy od długości fali. W odniesieniu do akustyki pomieszczeń efektem dyfrakcji jest coraz słabsze „rozpoznawanie” przez fale geometrycznych detali przeszkody odbijającej dźwięk wraz ze wzrostem długości fali. Oznacza to, że długie fale nie „widzą” geometrycznych detali przeszkody i odbijają się od niej jak od płaszczyzny. Wymiary przeszkody oraz wielkość detali odbijających falę w sposób zwierciadlany, tj. nierównomierności jej powierzchni, strzałkę krzywizny przeszkody, gdy stanowi ona element krzywopowierzchniowy, itp. określa zależność (1) [8]:

$$l \geq K \lambda \quad (1)$$

gdzie: λ – długość najdłuższej fali ulegającej odbiciu zwierciadlanemu,

l – najmniejszy wymiar przeszkody lub wielkość jej detalu geometr.,

K – współczynnik zależny od przyjętego stosunku między energią odbitą w sposób zwierciadlany lub rozproszony.

W literaturze można spotkać wielkości K z reguły większe niż 1. Oznacza to, że w celu wytworzenia odbicia uznanego za zwierciadlane przeszkoda wraz z jej detalami geometrycznymi powinna być większa od długości fali – wg niektórych autorów [3, 12] – nawet 4-krotnie. Zgodnie z takim kryterium, przy najmniejszym wymiarze elementu odbijającego dźwięk, wynoszącym np. 1,5 m, odbiciu zwierciadlanemu ulegają fale o częstotliwościach większych od ok. 230-900 Hz. Spoty-

ka się także wartości K mniejsze od 1, przy których odbicie uznaje się za zwierciadlane przy znacznie większym składniku energii ulegającej rozproszeniu (np. $K = 1/3$ [15]). Przy takim kryterium element o wymiarze 1,5 m odbija w sposób zwierciadlany fale o częstotliwościach większych od 75 Hz.

Uproszczenie związane z geometrycznym modelem pola dotyczy także zjawiska skupienia dźwięku. Jak wspomniano w rozdziale 2, w modelu geometrycznym ogniska mają postać punktów, zaś przekroje kaustyk – postać linii. Ich wymiar geometryczny jest zatem zerowy. W polu o naturze falowej ognisko i kaustyka są natomiast efektem superpozycji frontów fal, zachodzącej w obszarze o wielkości zależnej od długości fali [9]. Oznacza to, że przy danym widmowym składzie dźwięku ognisko może mieć formę wielu nakładających się na siebie obszarów skupienia, odpowiadających poszczególnym składowym dźwięku. Odpowiedź na pytanie, dotyczące rozległości ogniska lub „grubości” poprzecznego przekroju kaustyki w polu akustycznym o naturze falowej, wykracza poza zakres prezentowanego opracowania. Z tego powodu w dalszej części pracy nadal jest wykorzystywany geometryczny model pola.

4. STUDIUM PRZYPADKU – GROTY SZEPTÓW W PARKU OLIWSKIM W GDAŃSKU

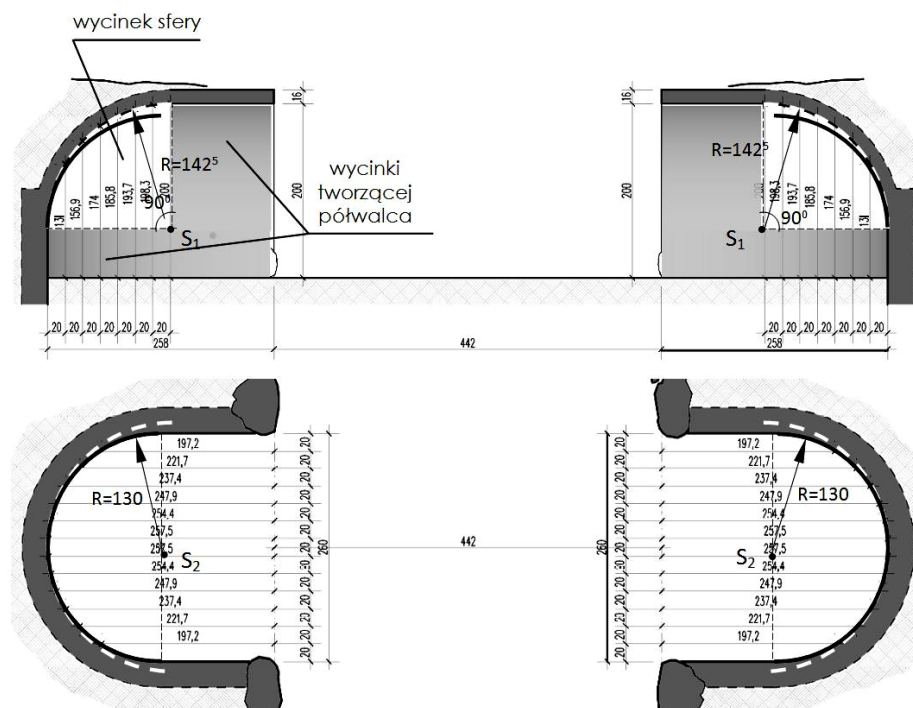
4.1. Opis obiektu

Groty Szeptów są jednym z zachowanych elementów XVIII-wiecznego założenia parkowego w Gdańsku-Oliwie. Są to dwie kamienno-ceglane budowle w kształcie ustawionych naprzeciw siebie owalnych grot o symetrycznej budowie, służących do plenerowej demonstracji praw akustyki (rys. 3). Występujący w nich efekt polega na tym, że gdy wewnątrz grot stoją osoby odwrócone do siebie plecami, dobrze się nawzajem słyszą, nawet gdy mówią szeptem. Przed podjęciem renowacji grot i biegnącej między nimi alejki parkowej zaszła potrzeba sprawdzenia, czy po renowacji ten efekt będzie zachowany. Przedstawiona praca jest rozwinięciem ekspertyzy, odpowiadającej na to pytanie.



Rys. 3. Groty Szeptów w Parku Oliwskim w Gdańsku (źródło: fot. T. Lepert-Trude [1])

Każda z grot składa się z $1/4$ sfery, stanowiącej zwierciadło akustyczne, oraz z dwóch powierzchni, każda z nich w formie tworzącej półwalca, będących uzupełnieniem konstrukcyjnym zwierciadła. Tworzące znajdują się przy podstawie grot (przy gruncie) oraz wokół wlotu do grot (rys. 4). Wycinki sfery są nieznacznie odkształcone – w przekroju pionowym i w rzucie promień krzywizny zwierciadeł akustycznych wynosi odpowiednio 142,5 cm i 130 cm (odpowiednio: linie przerywane i ciągłe na rys. 4).



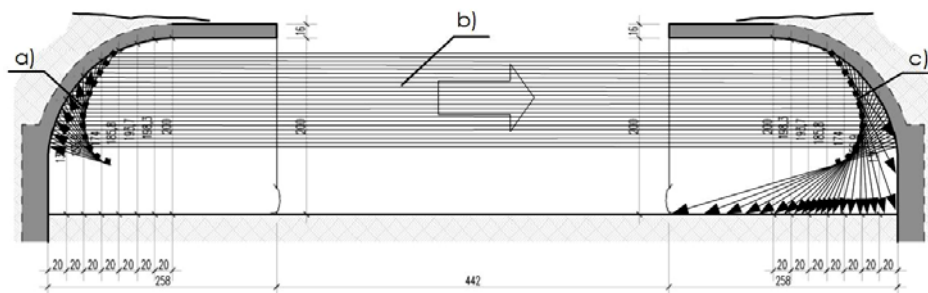
Rys. 4. Przekrój i rzut Grot Szeptów w Parku Oliwskim w Gdańsku. Linijką przerywaną i ciągłą zaznaczono krzywiznę zwierciadła odpowiednio w przekroju pionowym i w rzucie. S_1 , S_2 : środek krzywizny zwierciadła w przekroju i w rzucie ($S_1 \neq S_2$) (źródło: opracowanie własne)

4.2. Mechanizm wzmocnienia dźwięku w grotach szeptów

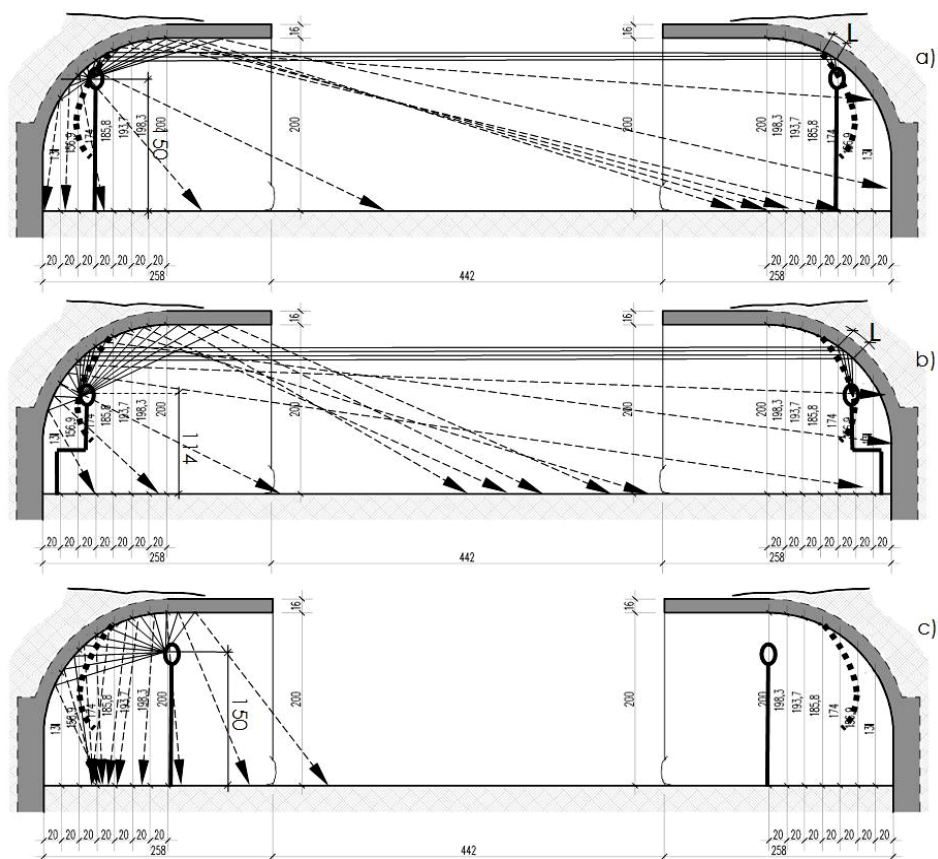
Groty Szeptów są układem dwóch zwróconych ku sobie sferycznych zwierciadeł wklęsłych. Wzmocnienie dźwięku polega tu na ogniskowaniu w zwierciadle odbiorczym kierunków biegu fal, nadbiegających ze zwierciadła nadawczego (rys. 5). Jak wskazano na rysunku 1, zjawisko to jest wynikiem aberracji sferycznej zwierciadła wklęsłego.

W przypadku dwóch zwierciadeł sferycznych poza zgodną z definicją kaustyką tworzoną przez promienie nadbiegające do zwierciadła odbiorczego można mówić także o kaustyce powstającej w zwierciadle nadawczym. Przez analogię do kaustyki odbiorczej kaustyka nadawcza jest obwiednią promieni wysyłanych przez źródło o określonym położeniu, stających się po odbiciu wiązką promieni równoległych. Przez „określone położenie” rozumie się zbiór pól źródeł fali kulistej, po odbiciu przekształcanej w falę płaską. Miejscem geometrycznym tego zbioru jest kaustyka nadawcza (rys. 5a). Powierzchnie kaustyczne nadawcza i odbiorcza są swoimi zwierciadlanymi odbiciami.

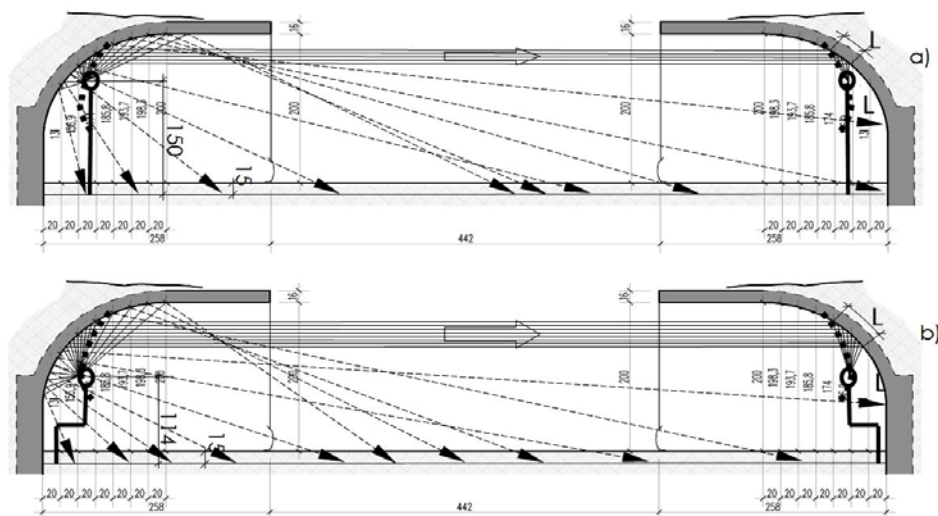
Odbierane słuchem wzmocnienie dźwięku zachodzi, gdy mówca i słuchacz są usytuowani na symetrycznie położonych fragmentach swoich kaustyk, (rys. 6a, b, rys. 7). Gdy głowa mówcy lub słuchacza znajduje się poza kaustyką, efekt wzmocnienia dźwięku zanika (rys. 6c).



Rys. 5. Przekrój pionowy Grot Szeptów w Parku Oliwskim: a) kaustyka nadawcza, tj. miejsce geometryczne potożeń źródła fali kulistej, po odbiciu przekształconej w falę płaską, b) fala płaska, c) kaustyka odbiorcza, tj. obszar ogniskowania fali płaskiej po odbiciu (źródło: opracowanie własne)



Rys. 6. Promienie w pionowym przekroju Grot Szeptów w Parku Oliwskim przy obecnym poziomie gruntu. L: wycinek zwierciadła akustycznego ogniskujący dźwięk. Usta człowieka o wzroście ok. 166-168 cm znajdują się na wysokości ok. 150 cm (źródło: opracowanie własne)



Rys. 7. Promienie w pionowym przekroju Grot Szeptów w Parku Oliwskim dla: a) stojącej i b) siedzącej pozycji mówcy i słuchacza. Po obniżeniu poziomu gruntu o 15 cm ogniskowanie dźwięku zachodzi z większą intensywnością – zwiększa się długość odcinka L w porównaniu z rysunkiem 6a, b (źródło: opracowanie własne)

Rozmycie ogniska w formie kaustyki osłabia efekt wzmocnienia dźwięku, gdyż w skupianiu dźwięku uczestniczy tylko część obu zwierciadeł. Wielkość powierzchni skupiającej dźwięk zależy od położenia mówcy i słuchacza na kaustyce (patrz oznaczenie „L” na rys. 6a, b oraz rys. 7). Wraz ze wzrostem tej powierzchni rośnie stopień wzmocnienia dźwięku, można zatem określić położenie mówcy i słuchacza, przy którym efekt wzmocnienia dźwięku jest największy. Położenie to znajduje się na ostrzu kaustyki, gdzie zagęszczenie promieni tworzących kaustykę jest największe. Wynika to zarówno z graficznej analizy formowania się kaustyki (rys. 1a, rys. 5c), jak i z badań eksperymentalnych dotyczących technicznego wykorzystania zwierciadeł sferycznych [2].

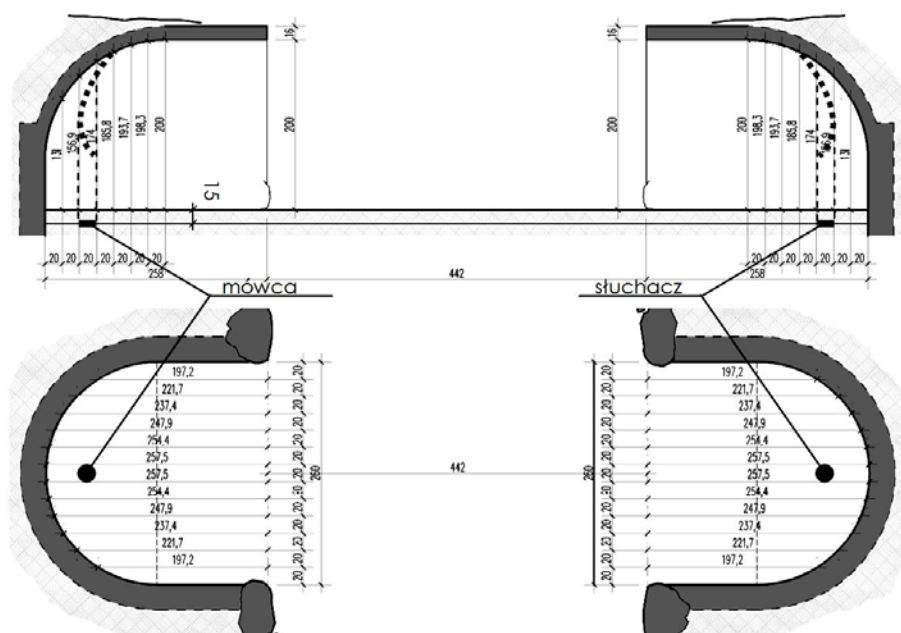
Na rysunkach 6 i 7 linią przerywaną oznaczono kierunki propagacji fali, niebiorące udziału w formowaniu omawianej osobliwości akustycznej grot.

4.3. Uwarunkowania konserwatorskie

Kaustyka jako forma rozmycia ogniska zwierciadła wklęsłego jest znana w optyce od kilkuset lat (“One of the earliest discoveries in optics (F. Maurolycus, 1575) was that the rays of a normal system are tangential to a surface, the so-called caustic surface” [5]). Mimo silnych związków akustyki pomieszczeń z zasadami optyki geometrycznej we współczesnej literaturze w tej dziedzinie termin „kaustyka” jest w zasadzie nieobecny. Można jednak przypuszczać, że twórcom obiektów historycznych, w których w zamierzony sposób są wywołane omawiane efekty akustyczne, termin ten był dobrze znany.

Biorąc pod uwagę usytuowanie kaustyki nadawczej i odbiorczej wewnątrz grot, należy założyć, że ich projektant uwzględnił ergonomiczny aspekt tych budowli. Musiał zatem przewidzieć takie ustawienie sylwetki człowieka w grocie, aby mógł on usytuować głowę we właściwym miejscu, a następnie uwzględnia-

Pierwotne nachylenie alejek parkowych prowadzących do Grot Szeptów musiało być zatem znacznie większe od obecnego i wynosiło szacunkowo ok. 15%. Ze względu na ograniczoną możliwość ingerencji w ukształtowanie terenu objętego ochroną konserwatorską, a także mając na uwadze aktualnie obowiązujące przepisy dopuszczające nachylenie alejki nie większe niż 6%, podczas planowanej renowacji grot przewiduje się obniżenie poziomu gruntu tylko o ok. 15 cm (rys. 7). Można oczekiwać, że wystarczy to dla wzmocnienia akustycznego efektu grot. Wynika to ze wzrostu powierzchni ogniskującej dźwięk wraz z obniżaniem się położenia obserwatora (patrz oznaczenie „L” na rys. 6a, b i rys. 7).



Kształt grot nakazuje mówcy i słuchaczowi stanąć tuż przy ścianie, twarzą do ściany, co nie jest intuicyjnie oczywiste. W celu zapewnienia poprawnego przebiegu eksperymentu uzasadnione jest więc oznaczenie obszarów, które po-

winni zajmować mówca i słuchacz, np. przez odpowiednie zróżnicowanie nawierzchni w grotach. Obszar ten odpowiada rzutowi kaustyki nadawczej i odbiorczej na powierzchnię gruntu (rys. 8). Działania rewaloryzacyjne obejmują również zastąpienie obecnej nawierzchni asfaltowej żwirem. Rodzaj nawierzchni pokrywającej alejki między grotami oraz grunt wewnątrz grot nie mają wpływu na efekt wzmocnienia dźwięku, gdyż wiązka równoległych promieni biegnie na wysokości od ok. 0,8 do ok. 1,8 m nad powierzchnią gruntu.

W celu usunięcia zasoleń i odspojeń tynku oraz śladów wcześniejszych napraw na podniebieniu grot przewiduje się zastąpienie obecnych tam gładkich mas szpachlowych porowatym tynkiem renowacyjnym. Ze względów akustycznych korzystniejsze jest użycie tynku spoistego, gdyż przed dotarciem do słuchacza dźwięk podlega odbiciu w grocie nadawczej, a następnie odbiorczej. Aby zachować efekt wzmocnienia dźwięku, odbicia te powinny zachodzić z możliwie małymi stratami. W związku z zawilgoceniem materiału pokrywającego podniebienia grot zatrzymanie jego erozji uznaje się jednak za konieczność o wyższym priorytecie i w zakresie zaleceń akustycznych dopuszcza się użycie porowatego tynku renowacyjnego malowanego farbami silikatowymi.

5. UWAGI KOŃCOWE

Często spotykanymi elementami konstrukcyjnymi dużych pomieszczeń historycznych są sklepienia i wklęsłe ściany. Duże rozmiary tych elementów powodują, że oddziałują one na akustykę pomieszczeń jak wklęsłe zwierciadła akustyczne, prowadząc do lokalnej koncentracji dźwięku. W pracy wykazano, że koncentracja ta rzadko ma formę punktowego ogniska, którą często wskazuje się w literaturze. Dominującą formą koncentracji dźwięku jest natomiast kaustyka, niemal nieobecna w piśmiennictwie dotyczącym akustyki architektonicznej. Ma ona postać hiperpowierzchni, będącej obwiednią wiązki promieni dźwiękowych po ich odbiciu od zwierciadła wklęsłego.

W pracy wykazano, że pojęcie kaustyki, od dawna znane w optyce, było również znane budowniczym obiektów historycznych, wznoszonych w celu demonstrowania osobliwości akustycznych. Obiektem o takim przeznaczeniu, szczegółowo opisanym w pracy, są zabytkowe Groty Szeptów w XVIII-wiecznym Parku Oliwskim w Gdańsku. Są dowodem wykorzystania kaustyki w przemyślany sposób, świadczący o dużej kompetencji XVIII-wiecznych twórców architektury w zakresie akustyki.

Przekazy historyczne wskazują, że przypadkowo wykrywane osobliwości akustyczne, opisywane w pracy, powodowały powstanie pokusy, żeby tak aranżować pomieszczenia, aby skrycie uzyskiwać informacje o poufnej, a nawet intymnej treści, nieprzeznaczonej dla osób trzecich. W tym rozumieniu przedstawiona praca wskazuje na możliwość rozszerzenia zakresu badań związanych z akustyką obiektów zabytkowych o ich kontekst historyczny.

LITERATURA

- [1] Blog, 2015. <https://tereska12045.flog.pl/archiwum/albumy/232073/trojmiasto/> (dostęp: 20.07.2016).
- [2] Castagnède B. et al., 2009. Cuspidal caustic and focusing of acoustical waves generated by a parametric array onto a concave reflecting surface. C.R. Mecanique, 337,

http://perso.univ-lemans.fr/~vtournat/wa_files/CRCastagnede2009.pdf (dostęp: 20.07.2016).

- [3] Egan M.D., 1972. Concepts in Architectural Acoustics. McGraw-Hill Book Company New York.
- [4] Esplin S.C., 2007. Introduction to The Tabernacle: "An Old and Wonderful Friend". Religious Studies Center, Brigham Young University Provo, 11-63, <https://rsc.byu.edu/archived/tabernacle-old-and-wonderful-friend/introduction> (dostęp: 20.07.2016).
- [5] Herzberger M., 1958. Modern Geometrical Optics. Interscience Publishers. [In:] Schmidt R.F., 1987. Analytical Caustic Surfaces. NASA Technical Memorandum 87805, NASA Technical Reports Server, <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880001678.pdf> (dostęp: 20.07.2016).
- [6] HyperPhysics, 2016. HyperPhysics, Sound and Hearing. Georgia State University, http://vnsound.tripod.com/snarchi/snarchi_3.html (dostęp: 20.07.2016).
- [7] Jankowski L.J., 2011. Wyznaczanie współczynnika intensywności naprężeń metodami optycznymi – materiały pomocnicze, <http://www.biomech.pwr.wroc.pl/wp-content/uploads/2016/09/pdcw14.pdf> (dostęp: 20.07.2016).
- [8] Kulowski A., 2011. Acoustics of Halls – Design recommendations for architects (in Polish). Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [9] Kuttruff H., 1993. Some remarks on the simulation of sound reflection from curved walls. ACUSTICA 77, 176-182.
- [10] Kuttruff H., 2000. Room Acoustics. Chapter 4.4: Enclosures with curved walls. Spon Press London – New York, <https://danylastchild07.files.wordpress.com/2016/05/room-acoustics-kuttruff.pdf> (dostęp: 12.04.2017).
- [11] Mormon Tabernacle, 2012. http://www.engineergirl.org/what_engineers_do/FunFacts/MormonTabernacle.aspx (dostęp: 20.07.2016).
- [12] Puzyna Cz., 1970. Zwalczanie hałasu w przemyśle – zasady ogólne. WNT Warszawa.
- [13] Raman C.V., 1922. On whispering galleries. Proc. Indian Ass. Cultiv. Sci. 7, 159-172, <http://repository.ias.ac.in/69841/1/69841.pdf> (dostęp: 30.12.2016).
- [14] Sabine W.C., 1922. Collected Papers on Acoustics. Chapter 11: Whispering Galleries. Harvard University Press Cambridge, <https://ia902705.us.archive.org/22/items/collectedpapers00sabi/collectedpapers00sabi.pdf> (dostęp: 30.12.2016).
- [15] Sadowski J., 1971. Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie. Arkady Warszawa.
- [16] Strutt J.W., Baron Rayleigh., 1896. The Theory of Sound. Vol. II, chapter XIV, § 287: Whispering Galleries. Macmillan and Co. Ltd. London – New York, <https://archive.org/details/theoryofsound02raylrich> (dostęp: 30.12.2016).
- [17] Strutt J.W., Baron Rayleigh., 1910. The problem of the whispering gallery. Philosophical Magazine Vol. XX, 1001-1004. [In:] Scientific Papers Vol. V, 1902-1910, Art. 348. University Press Cambridge 1912, <https://archive.org/stream/scientificpapers05rayliala#page/n637/mode/1up> (dostęp: 30.12.2016).
- [18] Wikipedia, 2016. https://pl.wikipedia.org/wiki/Park_Oliwski (dostęp: 20.07.2016).

WPŁYW KAUSTYKI NA AKUSTYKĘ GROT SZEPTÓW W PARKU OLIWSKIM W GDAŃSKU

STRESZCZENIE. W pracy omówiono kaustykę jako uporządkowaną formę rozmycia ogniska, tworzonego przez zwierciadło wklęsłe. Zaprezentowano przykład kaustyki powstającej przy odbiciu światła od zwierciadła wklęsłego. Na tym tle wskazano na możliwość powstawania kaustyk w pomieszczeniach. Szczególną uwagę zwrócono na duże pomieszczenia o charakterze historycznym ze względu na częstą obecność w nich zwierciadeł akustycznych w postaci sklepień i wklęsłych ścian. Jako studium przypadku omówiono XVIII-wieczne Groty Szeptów w Parku Oliwskim w Gdańsku, w konstrukcji których wykazano wykorzystanie kaustyki w przemyślany sposób w celu uzyskania zamierzonego efektu akustycznego.

Słowa kluczowe: akustyka pomieszczeń, wnętrza historyczne, komnata szeptów, rozmyte ognisko, kaustyka