

Використання торсових поверхонь в якості акустичних екранів

Олексій Підгорний¹, Юрій Козак²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037
¹podgornyoleksiy@gmail.com, orcid.org/0000-0002-9966-1671
²oelpost@gmail.com, orcid.org/0000-0001-8723-3779

DOI: 10.32347/2310-0516.2018.11.77-86

Анотація. В задачах сучасної акустики значне місце займає побудова відбиттів від поверхонь в області дії джерел звуку, використання спеціальних екранів, урахування форм огорожуючих екранів стін та стелі. Набуває все більше значення управління відбитою енергією, узгодженою з специфікою акустики, обумовленою універсальністю залів. Відомо, що з геометричної точки зору конгруенції падаючих, відбитих та заломлених звуків залишаються нормальними після будь-якого числа цих явищ і це дозволяє управляти потоками звукової енергії обмеженими контурами робочої зони згідно з правилами геометричної акустики.

Все це обумовлює розвиток досліджень більш широкого кола відбиваючих поверхонь з поглибленим використанням поверхонь 2-го порядку, лінійчатих косих та розгортних поверхонь вищих порядків, кінематичних поверхонь переносу, обертих та більш складних рухів.

При цьому доцільно розшаровувати конгруенції нормалей відбиваючої поверхні вздовж її твірних або сім'ї плоских перерізів. Це приводить до розшарування конгруенції падаючих та відбитих променів, що проходять через ті ж самі твірні або лінії перерізів відбиваючої поверхні.

Завдяки запропонованій систематизації відбиваючих поверхонь по принципу поверхонь нормалей до їх твірних, відбиваючі поверхні діляться на п'ять груп. До першої групи відносяться відбивачі з пучками паралельних нормалей до їх твірних, саме такими є торсові поверхні. В якості відбивачів торсові поверхні зручно використовувати, вони легко створюються, є розгортними та їх трансформація дає можливість універсалізувати видовищні зали шляхом зміни положення відбиваючих екранів та їх форми, що впливає на



Олексій Підгорний
професор кафедри
архітектурних конструкцій
д.т.н., проф.



Юрій Козак
Ст. викл. кафедри
архітектурних конструкцій

формування зон надходження звукової енергії, її концентрацію або розсіювання, а також завдяки трансформації можна змінювати час реверберації в видовищних залах.

Торсові поверхні створюються дотичними до лінії перетину двох поверхонь другого порядку або двоїстим способом методом обкатки двох поверхонь другого порядку або кривих другого порядку, або двох кривих другого порядку. На основі цих методів в статті розглядаються загальні способи побудови торсових поверхонь 4-8 порядку 3 і 4 класів та досліджуються властивості конгруенції відбитих ними променів та прикладі часних випадків пропонуються варіанти вирішення прикладних задач. Ці випадки розглядаються як найбільш пристосовні до механічного вирішення завдання побудови відбивачів: торсові поверхні, отримані обкаткою двох кривих другого порядку, які лежать в паралельних площинах, перпендикулярних або під кутом. Завдяки відомим рівнянням однозначної відповідності для твірних торсових поверхонь, є можливість аналітичного опису поверхонь відбитих променів.

Конгруенція нормалей торса розшаровується на площину паралельних прямих. Двопараметрична множина відбитих променів розшаровується на плоскі пучки прямих, які можна побудувати двома способами: відносно поверхні нормалей або дотичної до твірної торса. Аналітичне описання поверхонь відбитих променів на основі геометричних побудов та відомих рівнянь торсових поверхонь.

Ключові слова. Акустика, поверхні відбитих променів, торсова поверхня, обкатка площиною, ребро звороту.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Під час акустичного розрахунку видовищних залів виникає необхідність побудови відбиваючих екранів для дифузного розповсюдження звукової енергії та перенаправлення на найбільш віддалених глядачів від джерела звуку. Використання торсових поверхонь надає такі переваги як простота їх побудови, розгортні властивості та можливість їх використання в якості трансформованих екранів. Саме останнє дає змогу використовувати трансформацію форми та положення для універсалізації залів, впливати на час реверберації, перенаправляти звукову енергію в місця бажаного підсилення звуку, створювати звукові та світлові ефекти.

Тому необхідно дослідити відбиття від торсових поверхонь взагалі і зокрема від торсів 4-8 порядків 3 і 4 класів, виділити ділянки поверхонь, які можуть виконувати роль відбивачів, розглянути можливість створення керованих моделей суцільної форми або фасетовані.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В публікації [1] проаналізована доцільність використання торсових поверхонь в якості відбивачів сонячних променів. Розглянуті види фокальних фігур конгруенції нормалей торсових поверхонь, конгруенцій відбитих променів, особливостей ортотомік (поверхонь фронту хвилі) при відбитті від торсових поверхонь.

В публікації [2] продовжено розгляд теоретичних питань утворення торсових

поверхонь та їх властивостей в якості відбивачів сонячних променів.

В публікації [3] відома властивість множини променів залишатись нормальними конгруенціями при будь-якій кількості відбиттів та заломлень поширена на явища відбиття, заломлення і дифрагування та їх комбінації при всіх видах джерел падаючих променів: точкових власних і невластних, лінійних (прямі і криві), площинних та поверхневих.

Публікація [4, 5] аналізує побудову потоків відбитих променів від різних поверхонь, яка ведеться з використанням розшарування конгруенцій нормалей відбиваючих поверхонь на прості поверхні нормалей: плоскі пучки, конічні поверхні, гіпери та інші з наступним утворенням поверхонь відбитих променів. Для відбиваючих нерозгортних поверхонь 2-го порядку на цій основі виникло розшарування конгруенцій вздовж ліній перерізів з отриманням лінійчатих поверхонь відбитих променів 3-4 порядків. При цьому враховано, що дотичні площини вздовж ліній перерізів утворюють конічні поверхні. Це зводить побудову для ряду поверхонь до побудов для перерізів конічних поверхонь при вирішенні задач світлотехніки та акустики.

Дослідження поверхонь нормалей у вигляді пучків паралельних прямих, гіперів, конічних поверхонь та поверхонь 4-го порядку для побудови відбиттів продовжено в публікаціях [6, 7, 8]. Розглянуто алгоритм написання рівняння поверхні відбитих променів.

Акустичне проектування використовує методи розрахунку та вимоги до залів, що розглянуто в [9, 10].

Методи проектування сучасних оболонок в будівництві розглянуто в [11, 12, 13, 14]. Принципи розвитку проективної геометрії, використання диференційної геометрії в проектуванні та імплементація досліджень торсових поверхонь в сучасній архітектурі приведені в [15, 16, 17]. Дослідження аналітичних поверхонь, їх аналітичний опис та візуалізація надані в [18, 19, 20].

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ребро звороту торса можна отримати як результат перетину двох конусів 2-го порядку шляхом пучка січних площин з віссю, що проходить через вершини конусів. Твірні конусів у взаємному перетині в кожній площині пучка дають точки ребра звороту. Вздовж цих твірних дотичні площини перетинаються по твірних торса. Сліди дотичних площин на площині перерізу Π дають дотичні до основ конусів, які перетинаються в точці перетину площини та твірної торса. Ці перетини дають переріз торса на площині перерізу Π .

Двоїстим до цього способу створення торсу є спосіб обкатки площиною двох поверхонь 2-го порядку або поверхні другого порядку, або двох кривих 2-го порядку.

Розглянемо розгортні торсові поверхні, що формуються однопараметричною сім'єю дотичних площин, створених при обкатці двох кривих або як множина дотичних до ребра звороту. Вздовж прямолінійних твірних торсів дотична площина не змінюється. В векторній формі торсова поверхня буде мати вигляд:

$$r = r(u, v) = a(v) + ul(v), \quad (1)$$

де: $a(v)$ радіус ребра звороту, $l(v)$ – одиничний дотичний вектор, заданий в кожній точці ребра звороту. Координатні лінії u співпадають з прямолінійними твірними.

Можна вивести рівняння однопараметричного сімейства дотичних площин $M(x, y, z, v) = 0$ та рівняння торсу в неявному вигляді або рівняння ребра звороту:

$$\begin{aligned} a(v) &= xi + yj + zk = \\ &= x(v)i + y(v)j + z(v)k. \end{aligned} \quad (2)$$

У конуса ребро звороту вироджується в точку – вершину конуса. У циліндричної поверхні ребро звороту є невласним.

Конгруенція нормалей вздовж твірних торсових поверхонь розшаровується на плоский пучок паралельних нормалей. Поверхнею відбитих променів є плоский пучок відбитих променів, які перетинаються в уявному джерелі.

Знайдемо рівняння поверхні відбитих променів.

Зручно використати метод побудови за допомогою уявного джерела. Нехай джерело звуку буде $S(x_s, y_s, z_s)$. Нехай торс заданий параметричним рівнянням. Тоді дотична площина буде визначатися рівнянням:

$$\begin{vmatrix} X - x & Y - y & Z - z \\ x'_\beta & y'_\beta & z'_\beta \\ x'_\gamma & y'_\gamma & z'_\gamma \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

де:

$$\begin{aligned} A &= \begin{vmatrix} y'_\beta & z'_\beta \\ y'_\gamma & z'_\gamma \end{vmatrix}, \\ B &= \begin{vmatrix} z'_\beta & x'_\beta \\ z'_\gamma & x'_\gamma \end{vmatrix}, \\ C &= \begin{vmatrix} x'_\beta & y'_\beta \\ x'_\gamma & y'_\gamma \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Якщо дотична площина представлена рівнянням:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (5)$$

то уявне джерело буде лежати на продовженню перпендикуляру до площини симетрично відносно неї. Рівняння перпендикуляра:

$$\frac{x_p - x_s}{A} = \frac{y_p - y_s}{B} = \frac{z_p - z_s}{C}, \quad (6)$$

де x_p – основа перпендикуляра. З системи рівнянь проєкцій перпендикуляра на площину та рівняння дотичної площини знаходимо координати основи перпендикуляра x_p, y_p, z_p як точки перетину перпендикуляра і площини:

$$\begin{aligned} x_p &= -\frac{-B^2x_s - C^2x_s + AB y_s + AC z_s}{A^2 + B^2 + C^2}, \\ y_p &= -\frac{ABx_s - A^2y_s - C^2y_s + BCz_s}{A^2 + B^2 + C^2}, \\ z_p &= -\frac{ACx_s + BCy_s - A^2z_s + B^2z_s}{A^2 + B^2 + C^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для знаходження координат уявного джерела $S'(x'_s, y'_s, z'_s)$, використовуємо фор-

мулу ділення відрізка навпіл (8), звідки виводимо координати уявного джерела (9):

$$x_p = \frac{x_s + x_{s'}}{2}, \quad y_p = \frac{y_s + y_{s'}}{2}, \quad z_p = \frac{z_s + z_{s'}}{2}, \quad (8)$$

$$x_{s'} = 2x_p - x_s, \quad y_{s'} = 2y_p - y_s, \quad z_{s'} = 2z_p - z_s. \quad (9)$$

Записується рівняння відбитого променя як прямої, що проходить через уявне джерело $S'(x_{s'}, y_{s'}, z_{s'})$ та точку відбиття $A(x_a, y_a, z_a)$:

$$\begin{aligned} x &= x_{s'} + t(x_a - x_{s'} - k x_{\beta}), \\ y &= y_{s'} + t(y_a - y_{s'} - k y_{\gamma}), \\ z &= z_{s'} + t(z_a - z_{s'} - k(z_{\beta} - z_{\gamma})). \end{aligned} \quad (10)$$

При заміні координат $A(x_a, y_a, z_a)$ рівнянням твірної розгортної поверхні, отримуємо плоский пучок відбитих променів. Твірна записується як пряма, яка проходить через точки кривих 2-го порядку, які знаходяться в однозначній відповідності.

Розглянемо кілька видів торсових поверхонь [20, 21, 22].

Візьмемо (рис.1, а) приклад торса, отриманий обкаткою двох еліпсів, які лежать у взаємно перпендикулярних площинах, а їх осі співпадають з координатними осями.

Торс в якості напрямних має два еліпси:

$$\beta: x = l + d\sqrt{1 - \frac{z^2}{c^2}}, \quad y = 0, \quad \text{та:} \quad (11)$$

$$\gamma: x = 0, \quad y = b\sqrt{1 - z^2/a^2}. \quad (12)$$

Прямолінійні твірні пройдуть через точку відповідної координати $z(\beta)$ та $z(\gamma)$, які зв'язані відношенням:

$$\gamma = \frac{a^2 d \beta}{c^2 d + c l \sqrt{c^2 - \beta^2}}, \quad (13)$$

де: $-c \leq \beta \leq c, -a \leq \gamma \leq a$.

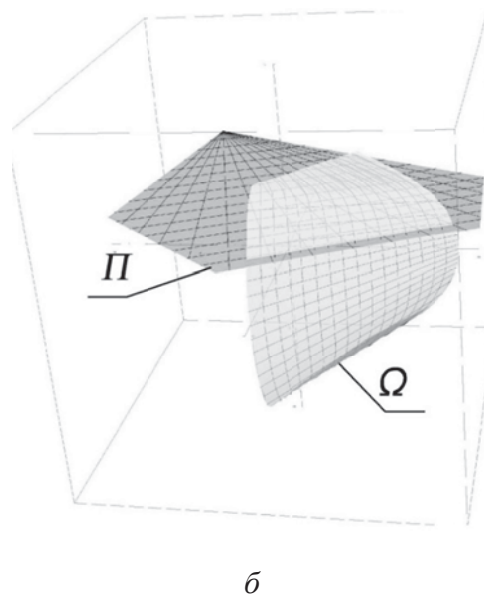
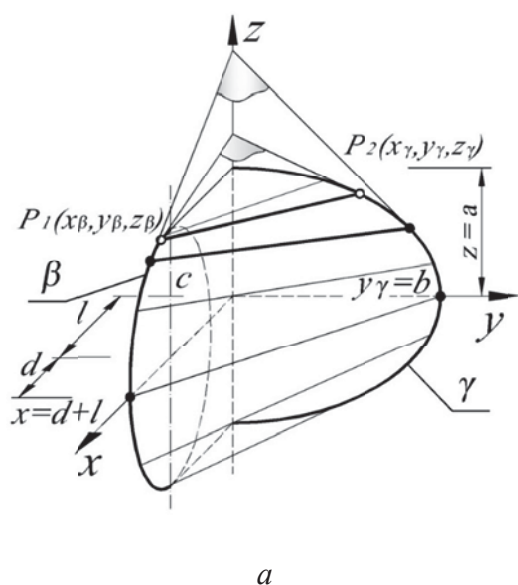


Рис.1. Торс з двома еліпсами, які лежать у взаємно перпендикулярних площинах, осі яких співпадають з координатними осями: а – побудова торсу методом обкатки площинами; б – побудова поверхні відбитих променів Π від прямолінійної твірної торсової поверхні Ω в програмі Mathematica.

Fig.1. Developable surface with ellipses that are situated on orthogonal planes with axes that coincide with coordinate planes: а – construction of developable surface by rolling method; б – construction of reflected rays surface Π from straight generatrix of surface Ω in Mathematica.

Таким чином, задаючи точку еліпса β отримуємо відповідну точку еліпса γ . Параметричне рівняння торса:

$$\begin{aligned} x &= \left(l + \frac{d\sqrt{c^2 - \beta^2}}{c} \right) (1 - \lambda), \\ y &= \lambda b \sqrt{1 - \frac{a^2 d^2 \beta^2}{(c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2})^2}}, \\ z &= \beta(1 - \lambda) + \frac{a^2 d \beta \lambda}{c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2}}, \end{aligned} \quad (14)$$

де: $-c \leq \beta \leq c, 0 \leq \lambda \leq 1$, та:

$$A = \begin{vmatrix} b \sqrt{1 - \frac{a^2 d^2 \beta^2}{(c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2})^2}} & \beta \left(-1 + \frac{a^2 d}{c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2}} \right) \\ - \frac{a^2 b d^2 \beta (cl + d\sqrt{c^2 - \beta^2}) \lambda}{c\sqrt{c^2 - \beta^2} (cd + l\sqrt{c^2 - \beta^2})^3 \sqrt{1 - \frac{a^2 d^2 \beta^2}{(c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2})^2}}} & 1 + \left(-1 + \frac{a^2 d (cl + d\sqrt{c^2 - \beta^2})}{\sqrt{c^2 - \beta^2} (cd + l\sqrt{c^2 - \beta^2})^2} \right) \lambda \end{vmatrix}. \quad (15)$$

$$B = \begin{vmatrix} \beta \left(-1 + \frac{a^2 d}{c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2}} \right) & - \frac{cl + d\sqrt{c^2 + \beta^2}}{c} \\ 1 + \left(-1 + \frac{a^2 d (cl + d\sqrt{c^2 - \beta^2})}{\sqrt{c^2 - \beta^2} (cd + l\sqrt{c^2 - \beta^2})^2} \right) \lambda & - \frac{d\beta(-1 + \lambda)}{c\sqrt{c^2 + \beta^2}} \end{vmatrix}. \quad (16)$$

$$C = \begin{vmatrix} - \frac{cl + d\sqrt{c^2 + \beta^2}}{c} & b \sqrt{1 - \frac{a^2 d^2 \beta^2}{(c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2})^2}} \\ - \frac{d\beta(-1 + \lambda)}{c\sqrt{c^2 + \beta^2}} & - \frac{a^2 b d^2 \beta (cl + d\sqrt{c^2 - \beta^2}) \lambda}{c\sqrt{c^2 - \beta^2} (cd + l\sqrt{c^2 - \beta^2})^3 \sqrt{1 - \frac{a^2 d^2 \beta^2}{(c^2 d + cl\sqrt{c^2 - \beta^2})^2}}} \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Торсова поверхня, представлена на Рис. 1, має 4-й клас та 8-й порядок [1, 2]. При загальному положенні двох конік відносно одна одної виникає торс T_4^8 . Саме чотири площини, проведені з довільної точки, дотичні до двох конік одночасно, що встановлює четвертий клас. Щодо порядку, в площині XOZ будуть знаходитись подвійна крива 2-го порядку та чотири твірні торса, з чого виникає 8-й порядок поверхні. При зміні взаємного положення еліпсів (Рис.2, а) таким чином, щоб криві не торкались одна одної та крива β проходила крізь γ , отримуємо також торс T_4^8 . Якщо β перетинає γ , торс T_4^8 розпадається на T_4^7 та площину

$$c(c d + l\sqrt{c^2 - \beta^2}) \geq a d \beta.$$

Для побудови поверхні відбитих променів записується рівняння дотичної площини торса, яка приводиться до вигляду (5). По формулах 6-8 записується рівняння пучка відбитих променів у вигляді (8). Побудова (рис.1, б) в програмі Mathematica можлива після підстановок параметрів формул (7,9). Для торсової поверхні, що розглядається, знайдені параметри нормального вектора дотичної площини А, В, С, що показано в рівняннях (15-17).

(Рис.2, б). Торс T_4^6 виникає у випадку коли еліпс β дотикається площини еліпса γ (Рис.2, в). У випадку, коли площина еліпса γ дотикається еліпса β та перетинається з ним, виникає випадок торса T_4^5 . У випадку, коли лінія перетину площин, до яких належать еліпси, є дотичною одночасно до двох конік, зменшується клас торсової поверхні завдяки проходженню довільної площини через спільну дотичну та зменшується порядок торса до 4, тому що торс задається кривими 2-го порядку, які одночасно дотикаються до спільної вісі, торс розпадається з виділенням двох подвійних площин, що знижує його порядок на чотири.

Розглянемо другий вид торсу (Рис. 3), направляючими якого є два еліпса, які лежать в паралельних площинах (18) і (19).

$$\beta: \frac{(y - m)^2}{c^2} + \frac{(z - n)^2}{d^2} = 1, \quad (18)$$

$x = 0$ та:

$$\gamma: \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{a^2} = 1, \quad x = b \sqrt{1 - \frac{z^2}{a^2}}. \quad (19)$$

Прямолинійні твірні пройдуть через точку відповідної координати $z(\beta)$ та $z(\gamma)$, які зв'язані відношенням:

$$\gamma = \frac{a^2 c (\beta - n)}{\sqrt{b^2 d^4 + (\beta - n)^2 (a^2 c^2 - b^2 d^2)}}. \quad (20)$$

Таким чином, задаючи точку еліпса β отримуємо відповідну точку еліпса γ .

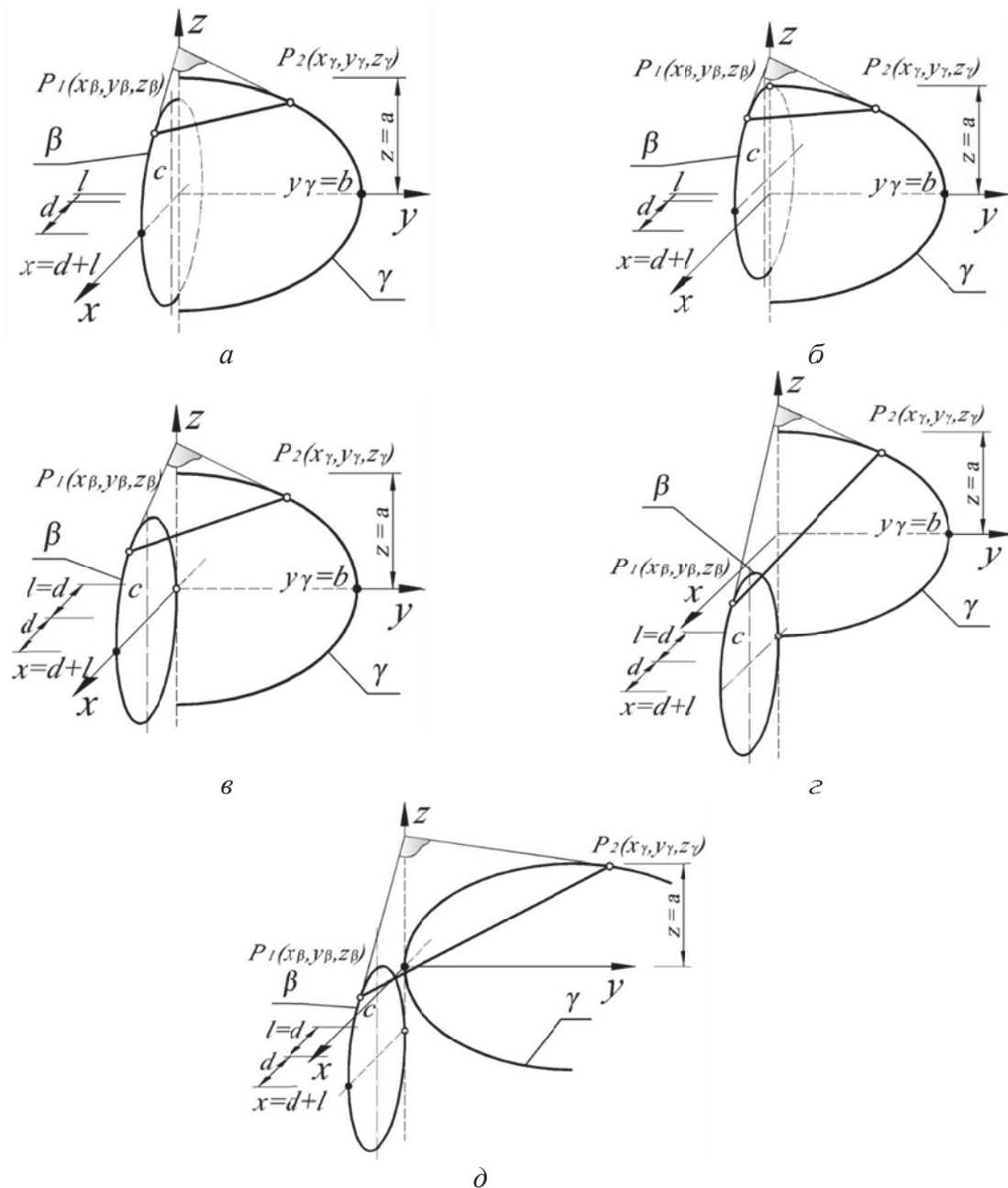


Рис.2. Торс з двома еліпсами, які лежать во взаємно перпендикулярних площинах: $a - T_4^8$; $\beta - T_4^7$, $\epsilon - T_4^6$, $z - T_4^5$, $\delta - T_3^4$.

Fig.2. Developable surface with ellipses that are situated in orthogonal planes: $a - T_4^8$; $\beta - T_4^7$, $\epsilon - T_4^6$, $z - T_4^5$, $\delta - T_3^4$.

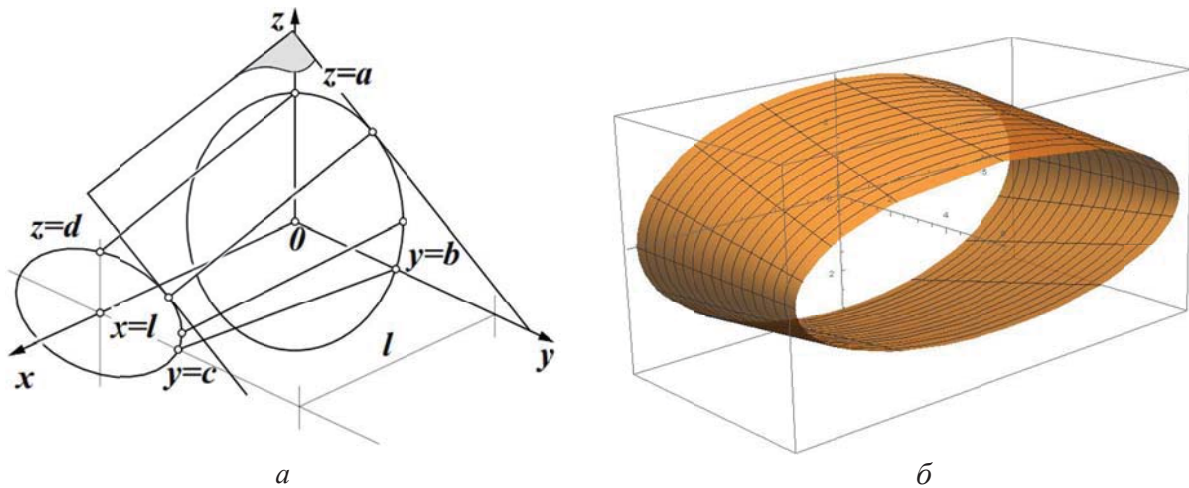


Рис.3. Торс з двома еліпсами, які лежать в паралельних площинах, осі одного співпадають з координатними осями: *a* – побудова торсу методом обкатки площинами; *б* – побудова торса програмі Mathematica.

Fig.3. Developable surface with ellipses that are situated on parallel planes with axes that coincide with coordinate planes: *a* – construction of developable surface by rolling method; *б* – construction of developable surface Π in Mathematica.

Параметричне рівняння торса:

$$\begin{aligned} x &= x(\lambda) = l\lambda, \\ y &= y(\lambda, u) = \\ &= b \sin u \left[1 - \lambda + \frac{\lambda a}{f(u)} \right], \\ z &= z(\lambda, u) = \\ &= a \cos u [a - a\lambda + \lambda d^2 / f(u)], \end{aligned} \quad (21)$$

де: $-f^2(u) = d^2 \cos^2 u + a \sin^2 u, 0 \leq \lambda \leq 1,$

$$c (cd + l \sqrt{c^2 - \beta^2}) \geq a d \beta.$$

Зовнішній вид торса показано на Рис. 2, знайдені параметри нормального вектора дотичної площини А, В, С показано в рівняннях (22-24).

Аналогічним чином знаходяться коефіцієнти А, В, С, для знаходження поверхні відбитих променів для інших видів торсів. Для використання торсових поверхонь в якості відбиваючих екранів разом з вже розглянутими можна використовувати торси з двома напрямними такими як торс з двома параболою, вісі яких перетинаються, торс з параболою, які лежать в площинах що перетинаються але мають паралельні вісі, торс з двома параболою, які мають спільну вісь, але лежать в площинах що перетинаються, торс з параболою та колом в паралельних площинах, торс з параболою та гіперболою в паралельних площинах та інші. Ці поверхні можна проектувати трансформованими для керованого перерозподілу звукової енергії на поверхню глядачів.

$$A = \begin{vmatrix} b \cos u \left(1 + \frac{a(-a^2+d^2)\lambda \sin^2 u}{(f^2(u))^{3/2}} + \lambda \left(-1 + \frac{a}{f(u)} \right) \right) & \sin u \left(a(-1 + \lambda) + \frac{d^2(-a^2+d^2)\lambda \cos u^2}{(f^2(u))^{3/2}} - \frac{d^2 \lambda}{f(u)} \right) \\ b \sin u \left(-1 + \frac{a}{f(u)} \right) & \cos u \left(-a + \frac{d^2}{f(u)} \right) \end{vmatrix}, \quad (22)$$

$$B = \begin{vmatrix} \sin u \left(a(-1 + \lambda) + \frac{d^2(-a^2+d^2)\lambda \cos u^2}{(f^2(u))^{3/2}} - \frac{d^2 \lambda}{f(u)} \right) & 0 \\ \cos u \left(-a + \frac{d^2}{f(u)} \right) & 1 \end{vmatrix}, \quad (23)$$

$$C = \begin{vmatrix} 0 & b \cos u \left(1 + \frac{a(-a^2+d^2)\lambda \sin u^2}{(f^2(u))^{3/2}} + \lambda \left(-1 + \frac{a}{f(u)} \right) \right) \\ 1 & b \sin u \left(-1 + \frac{a}{f(u)} \right) \end{vmatrix}, \quad (24)$$

$$f^2(u) = d^2 \cos^2 u + a^2 \sin^2 u. \quad (25)$$

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В статті розглядаються кілька часних випадків торсових поверхонь, для яких написані рівняння поверхонь відбитих променів. Змінними коефіцієнтами таких поверхонь є нормальний вектор дотичної площини.

Аналітичний опис пучка відбитих променів на основі геометричного аналізу властивостей торсів та поверхонь відбитих променів дає можливість отримати ряд геометричних та прикладних задач таких як отримання зон концентрації відбитих променів, знаходження квазіфокальних ліній та поверхонь в просторі, отримання відбиваючої поверхні по наперед заданій поверхні відбитих променів та вирішення задач трансформації форми відбиваючої поверхні для керування акустичним середовищем видовищних залів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Підгорний О.** Можливості використання торсових поверхонь в якості відбивачів сонячних променів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. К.: КНУБА. 2008. №80. С. 11-15.
2. **Підгорний О.** Можливості використання торсових поверхонь в якості відбивачів сонячних променів (продовження). *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. К.: КНУБА. 2017. №9. С. 194-197.
3. **Підгорний О.** Моделювання ланцюжків прямих, відбитих, заломлених та дифрагуючих випромінювань на основі об'єднання хвильового та променевого трактувань розповсюдження коливань. *Геометричне та комп'ютерне моделювання*. Харків. 2004. №4. 20-31с.
4. **Подгорный А.** Поверхности отражённых лучей. *Прикладная геометрия и инженерная графика*. Киев. 1975. №20. С. 13-16.
5. **Підгорний О.** Розшарування конгруенцій нормалей поверхонь 2-го порядку вздовж ліній плоских перерізів. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. КДТУБА. 1996. 60. С. 8-14.
6. **Козак Ю.** Дослідження поверхонь нормалей як засіб систематизації поверхонь відбиття. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі*. К.: КНУБА. 2013. №5. С. 66-69.
7. **Козак Ю.** Геометричне моделювання відбиттів від торсових поверхонь. *Сучасні проблеми моделювання: збірник Наукових Праць. МДПУ ім. Хмельницького*. Мелітополь. 2017. №9. С. 63-68.
8. **Козак Ю.** Естественная акустика залов как фактор энергосбережения. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym. Politechnika Chestochowska*. 2014. С. 41-48
9. **Ermann M.** Architectural acoustics illustrated. *New Jersey: John Wiley & Sons*. 2015. 266 p. doi.org/10.1121/1.4920562
10. **Alton F., Ken C.**, Master Handbook of Acoustics. *New York: Mc Graw-Hill*. 2009. 510 p. doi.org/10.1121/1.4920562
11. **Krivoshapko S.** Static analysis of shells with developable middle surfaces. *Applied Mechanics Reviews (USA)*. 1998. 12(1). P. 731-746 doi.org/10.1115/1.3098985
12. **Pottmann H., Wallner J.** Computational Line Geometry. *Springer-Verlag, Berlin*. 2001. 565 p. doi.org/10.1007/978-3-642-04018-4
13. **Maan H.** Design of Plate and Shell Structures. *New York. ASME*. 2004. 476 p.
14. **Renton J.** Characteristic response of hollow cones. *J.Elast.* 1997. 49(2). P. 101-112.
15. **Jürgen R.-G.** Perspectives on Projective Geometry: A Guided Tour through Real and Complex Geometry. *Springer, Berlin*. 2011. 571 p. doi.org/10.1007/978-3-642-17286-1
16. **Gray A.** Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica, 2nd ed. *Boca Raton, CRC Press LLC*. 1997. 531 p.
17. **Glaeser G., Gruber F.** Developable surfaces in contemporary architecture. *Journal of Mathematics and the Arts*. 2007. 1(1). P. 59-71. doi.org/10.1080/17513470701230004

18. **Krivoshapko S., Ivanov V.** Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland. 2015. 752 p. doi.org/10.1007/978-3-319-11773-7
19. **Agnew A., Bobe A., Boskoff W., Suceava B.** Tzitzeica Curves and Surfaces. *The Mathematica Journal*. 2010. 12. P.1-18. doi.org/10.3888/tmj.12-3
20. **Barrère R.** An Analytical Approach to Form Modeling As an Introduction to Computational Morphology. *The Mathematica Journal*. 2009. 11(2). P. 186-225. doi.org/10.1007/978-3-319-11773-7

REFERENCES

1. **Podgorny O. (2008).** Mozhlivosti vykorystannya torsovyh poverhon v yakosti vidbyvachiv sonyachnyh promeniv [Possibilities of using torso surfaces as reflectors of sun rays]. *Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika*. Kiev. 80, 11-15.
2. **Podgorny O. (2017).** Mozhlivosti vykorystannya torsovyh poverhon v yakosti vidbyvachiv sonyachnyh promeniv (prodovzhennya) [Possibilities of using torso surfaces as reflectors of sunlight (continued)]. *Energoefektivnist v budivnytvi ta arhitekturi*. Kyiv. 9, 194-197.
3. **Podgorny O. (2004).** Modelyuvannya lancuzhkiv pryamyh, vidbytyh, zalomlennyh ta dyfraguuchyh vyprominuvan na osnovi obednannya hvylovogo ta promenevogo traktuvannya rozpovsudzhennya kolyvan [Simulation of the direct, reflected, refracted and diffraction radiation chains based on the combination of wave and beam interpretations of the propagation of oscillations]. *Geometrychne ta komputerne modeluvannya*. Harkiv. 4, 20-31.
4. **Podgorny O. (1975).** Poverhnosty otrazhennyh luchey [The surfaces of reflected rays]. *Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika*. Kiev. 20(13), 16.
5. **Podgorny O. (1996).** Roztashuvannya kongruencyi normaly poverhon 2-go poryadku vzdovz liniy ploskyh pereriziv [Stratification of congruences of normal surfaces of the 2nd order along the lines of plane cross sections]. *Prikladnaya geometriya i inzhenernaya grafika*. Kiev. 60, 8-14.
6. **Kozak Yu. (2013).** Doslidzhennya poverhon normaly yak zasib systematyzacii poverhon vidbyttya [Surveying of normal surfaces as a means of systematization of reflection surfaces]. *Energoefektivnist v budivnytvi ta arhitekturi*. Kyiv. 5, 66-69.
7. **Kozak Yu. (2017).** Geometrychne modeluvannya vidbyttiv vid torsovyh poverhon [Geometrical modeling of reflections from torso surfaces]. *Suchasni problem modeluvannya. Zbirnyk naukovykh prac*. Melitopol. 9, 63-68.
8. **Kozak Yu. (2014).** Estestvennaya akustika zalov kak factor energosberegeniya [Natural acoustics of halls as a factor of energy saving]. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. Politechnika Chestochowska. 41-48.
9. **Ermann M. (2015).** Architectural acoustics illustrated. *New Jersey: John Wiley & Sons*. 266. doi.org/10.1121/1.4920562
10. **Alton F., Ken C. (2009).** Master Handbook of Acoustics. *New York: Mc Graw-Hill*. 510. doi.org/10.1121/1.4920562
11. **Krivoshapko S.N. (1998).** Static analysis of shells with developable middle surfaces. *Applied Mechanics Reviews (USA)*. 12(1), 731-746. doi.org/10.1115/1.3098985
12. **Pottmann H., Wallner J. (2001).** Computational Line Geometry. Springer-Verlag, Berlin, 565. doi.org/10.1007/978-3-642-04018-4
13. **Maan H. (2004).** Design of Plate and Shell Structures. *New York. ASME*, 476.
14. **Renton J. (1997).** Characteristic response of hollow cones. *J. Elast.* 49(2), 101-112.
15. **Jürgen R.-G. (2011).** Perspectives on Projective Geometry: A Guided Tour through Real and Complex Geometry. Springer, Berlin, 571. doi.org/10.1007/978-3-642-17286-1
16. **Gray A. (1997).** Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematics, 2nd ed. Boca Raton, CRC Press LLC, 531.
17. **Glaeser G., Gruber F. (2007).** Developable surfaces in contemporary architecture. *Journal of Mathematics and the Arts*. 1(1). 59-71. doi.org/10.1080/17513470701230004
18. **Krivoshapko S., Ivanov V. (2015).** Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 752. doi.org/10.1007/978-3-319-11773-7
19. **Agnew A., Bobe A., Boskoff W., Suceava B. (2010).** Tzitzeica Curves and Surfaces. *The Mathematica Journal*. 12, 1-18. doi.org/10.3888/tmj.12-3
20. **Barrère R. (2009).** An Analytical Approach to Form Modeling As an Introduction to Computational Morphology. *The Mathematica Journal*. 11(2), 186-225. doi.org/10.1007/978-3-319-11773-7

Using of Developable Surfaces as Acoustics Screens

*Oleksiy Pidgorny,
Yury Kozak*

Summary. A significant place of modern acoustics problems is occupied by the necessity of surfaces reflections construction of the 2nd order and more complex ones. Due to the proposed systematization of reflecting surfaces on the principle of surfaces of normal to their generatrix, reflective surfaces are divided into five groups. The first group includes reflectors with beams of parallel direct normals to generatrices of developable surfaces. As reflectors, the developable surfaces are convenient to use, they are easy to create, are scattered and their transformation makes it possible to universalize the spectacle halls by changing the position of the reflecting screens and their shape, which affects the formation of zones of sound energy reception, its concentration or dispersion, and also due to the transformation it is possible to change the time of reverberation in the spectacle halls.

Developable surfaces are tangent to the intersection of the two surfaces of the second order

or the double method, which is the method of running two surfaces of the second order or second order curves, or two curves of the second order. On the basis of these methods, the article deals with general methods of constructing developable surfaces of the 4-8th order of 3 and 4 classes and researches the properties of the congruence of the reflected rays, and, on the example of time cases, variants of the implementation of applied problems are offered. These cases are considered as most adaptable to the mechanical solution of the problem of constructing reflectors: developable surfaces obtained by rolling plane on two curves of the second order, which lie in parallel planes, perpendicular or at an angle. Due to the well-known equation of single-valued correspondence for the creation of torso surfaces, there is an analytical description of the surfaces of reflected rays. The congruence of normals of the developable surfaces is divided into a plane of parallel lines. The two-parameter set of reflected rays is divided into flat beams of straight lines, which can be constructed in two ways: relative to the surface of normal or tangent to the generatrix of the developable surface.

Keywords: acoustics, the surface of reflected rays, developable surface.