

## ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ ПРИ АКУСТИЧНІЙ ОБРОБКИ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

**Заїченко В.І., доцент**

*Харківський національний університет міського господарства  
імені О.М. Бекетова*

*Шумовий вплив на працюючих один із шкідливих факторів виробничого середовища, який є причиною не тільки професійних захворювань, а й травматизму на виробництві. В статті розглянуто потенційні можливості використання геометричної теорії акустики для формування і моделювання звукового поля у приміщенні з джерелами шуму. Встановлено, що відбиття звукових променів від стелі і стін значно збільшують рівень шуму від джерела. Характер відбиття залежить від форми поверхні, яка відбиває промені звуку. При відбитті від плоскої поверхні виникають уявні джерела звуку і це приводить до того, що в точку спостереження приходять не тільки прямий звук безпосередньо від джерела, але й відбитий від поверхонь, який посилює рівні звуку реальних джерел. Основні критерії, які впливають на формування шумового режиму у виробничих приміщеннях з акустичною обробкою це фактор спрямованості для напрямку на точку спостереження і кут простору, в який випромінюється звук. Для того, щоб уявні джерела на поверхні стін випромінювали звукову енергію зовні робочої зони пропонується змінювати кути падіння променів і кут простору випромінювання нижнього ряду звукопоглинального личкування. Таким чином, враховуючи положення геометричної акустики і змінюючи кут відбиття звукових променів можна максимально зменшити присутність у робочій зоні відбитої звукової енергії від уявних джерел.*

*Побудова оптимального профілю звукопоглинальної поверхні дасть можливість уникнути накладення звукового тиску від уявних джерел на реальні. Такі архітектурно-конструктивні рішення у виробничих приміщеннях дозволять значно зменшити рівні шуму на робочих місцях, а це створить умови для збереження здоров'я і працездатності робітників.*

**Постановка проблеми.** Згідно Закону України «Про охорону праці» № 229-IV від 21.11.2002, ст.13 роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

В кожному виробничому приміщенні, практично, жоден технологічний процес не виконується без використання тих чи інших машин і механізмів, обладнання, засобів механізації, ручного електричного та пневматичного інструмента. Враховуючи, що рівень звуку в таких приміщеннях, а це ремонтно-механічні, металообробні, деревообробні цеха, машинні зали та інші

складає понад 90 дБА, при нормі 80 дБА (ДСНЗ.3.6.037-99), то відповідно до цього велика кількість працюючих підпадає під дію високо інтенсивних шумів по всьому діапазону частот, які нормуються.

Шум – один із основних негативних чинників і складає 22% від усіх шкідливих факторів, які мають місце у виробничих приміщеннях. Збільшення потужності устаткування, насиченість виробництва високошвидкісними механізмами, різке збільшення транспортного потоку приводить до збільшення рівня шуму як у побуті, так і на виробництві.

Діючи на кору головного мозку, шум чинить дратуючу дію, прискорює процес втоми, послабляє увагу і сповільнює психічні реакції. По цим причинам інтенсивні шуми при виконанні технологічних операцій сприяють виникненню аварійних ситуацій, травматизму і професійному захворюванню.

Шкідливий вплив шуму на організм людини досить різноманітний. Реакція і сприйняття шуму людиною залежать від багатьох факторів: рівня інтенсивності, частоти (спектрального складу), тривалості дії, тимчасових параметрів звукових сигналів, стану організму.

Тривалий вплив інтенсивного шуму (вище 80 дБА) на слух приводить до його часткової або повної втрати. Скрізь волокна слухових нервів подразнення шумом передається на центральну і вегетативну нервові системи, а через них впливає на внутрішні органи, приводячи до значних змін у функціональному стані організму, впливає на психічний стан людини. Причому вплив шуму на нервову систему виявляється навіть при невеликих рівнях звуку (30 ... 70 дБА).

Таким чином, дослідження акустичних процесів у виробничих приміщеннях з метою створення механізму поліпшення шумового режиму є завданням першочергового плану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При вирішенні завдання акустичного проектування малошумних виробничих приміщень, які мають у своєму складі різноманітне технологічне обладнання приймаються рішення виходячи з трьох існуючих теорій: хвильової, статистичної і геометричної.

Геометрична теорія є граничним випадком хвильової, вона проста й наглядна. Ця теорія діє поняттям звукового променя. Звукове поле представляється у вигляді променів, побудованих за законами оптики. У відповідності з законами геометричної оптики, при відбитті від дзеркальних поверхонь кут відбиття дорівнює куту падіння і промені що падають і відбиваються лежать в одній площині. Методи геометричної акустики застосовують, якщо довжина звукового променя ( $l$ ) більше довжини звукової хвилі ( $\lambda$ ), або дорівнює їй, тобто  $l \geq \lambda$ . За їх допомогою описуються звукові поля в довгих замкнутих приміщеннях і вирішуються задачі відбиття звуку від поверхонь.

Основи геометричної теорії акустики були закладені У. Себіним і удосконалювалися Л. Баранеком, Г. Л. Осиповим, Н. І. Івановим, Є. Я. Юдиним, І. І. Ключіним, Р. Лайоном, а також Г. М. Курцевим, А. С. Нікіфоровим, В. І. Заборовим та ін.

**Постанова завдання.** Розглянемо формування звукового поля у виробничому приміщенні з погляду геометричної теорії акустики.

Звукові хвилі в приміщенні багаторазово відбиваються від стін, стелі та різних предметів. Відбиття значно збільшують рівень шуму від джерела в приміщенні на 10-15 дБА у порівнянні з шумом такого ж джерела на відкритому повітрі. В приміщенні рівень шуму в розрахунковій точки (РТ) від джерела шуму (ДЖ) складається з прямих ( $I_{пр}$ ) і відбитих ( $I_{від}$ ) від стін, стелі та підлоги (рис.1).

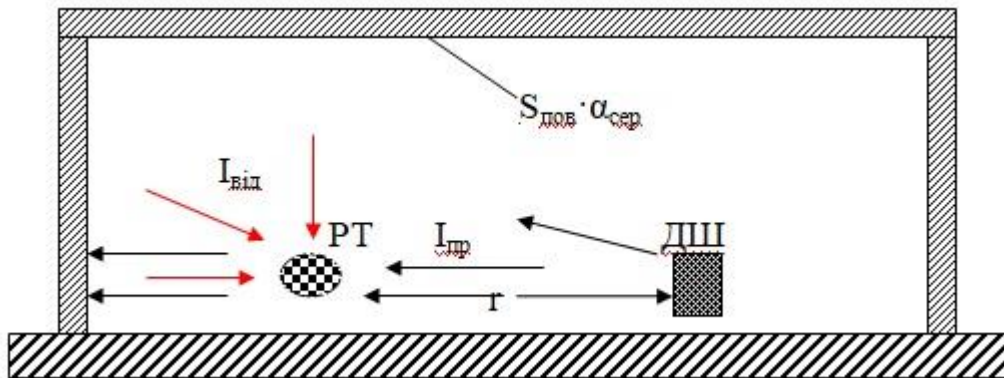


Рис. 1 – Випромінювання звукових хвиль в приміщенні

Рівні звуку в розрахункових точках приміщення можна підрахувати за такою формулою:

$$L = L_p + 10 \lg(\Phi/S + 4/B), \text{ дБА}, \quad (1)$$

де:  $L_p$  – рівень звукової потужності джерела звуку, дБА, і визначається його технічними характеристиками;  $\Phi$  – фактор спрямованості, рівний відношенню інтенсивності звуку, який створюється джерелом у вільному полі в даній точки сфери, в центрі якої воно знаходиться, ( $I_i$ ) до середньої інтенсивності звуку на поверхні тієї ж сфери ( $I_{сеп}$ ):

$$\Phi = I_i / I_{сеп}, \quad (2)$$

$S$  – площа поверхні, в яку випромінюється звук на відстані  $r$ ;  
 $B$  – постійна приміщення, яка характеризує звукопоглинання:

$$B = A / (1 - \alpha), \text{ м}^2, \quad (3)$$

де:  $A = \alpha \cdot S_{ог}$  – сумарне звукопоглинання у приміщенні або еквівалентна площа звукопоглинання,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha$  – коефіцієнт звукопоглинання внутрішніх поверхонь приміщення площею  $S_{ог}$ .

Якщо проаналізувати зміст формули (1), то виявляється, що для захисту від акустичних коливань в приміщенні можна використовувати методи:

- зниження шуму в джерелі його виникнення (зменшення  $L_p$ );

- боротьба з шумом на шляхах його розповсюдження (звукоізоляція);
- акустична обробка приміщень (звукопоглинання).

Зниження шуму в джерелі його виникнення – найбільш радикальний метод і є основним. Але зниження шуму в джерелі його виникнення технічно дуже складний процес і потребує плідної праці вчених, конструкторів, проектувальників, а також значних фінансових вкладень, що на даному етапі розвитку країни дуже проблематично.

Акустична обробка приміщень передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинальними матеріалами та конструкціями. Відбираючи акустичну енергію падаючих на них звукових хвиль, матеріали, які вбирають звук, трансформують її в теплову енергію. Внаслідок цього знижується інтенсивність відбитих звукових хвиль. Цей метод технічно простий і не потребує особистих фінансових вкладень, але потребує нових технічних рішень які б дозволили підвищити ефективність звукопоглинання і тим самим значно покращити умови праці робітників.

**Виклад основного матеріалу.** Точну картину звукових полів у приміщеннях дає тільки хвильова теорія, однак ця теорія дуже складна. В той же час ступень точності, достатня у більшості практичних завдань акустики приміщень, досягається більш простими методами геометричної акустики, в яких розглядається розповсюдження звукових промінів (рис. 2), а не хвиль. Ці методи можна використовувати коли

$$l_{\text{мін}} > 3 \cdot \lambda, \text{ тобто } f > 1000 / l_{\text{мін}},$$

де:  $l_{\text{мін}}$  - мінімальний лінійний розмір приміщення, м;  $\lambda$ ,  $f$  – довжина і частота звукової хвилі.

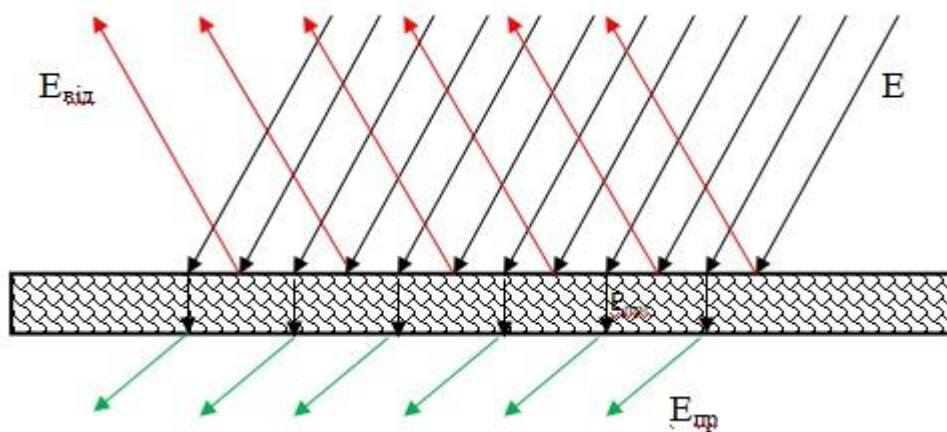


Рис.2 – Механізм звукопоглинання будівельними матеріалами

При падінні звукової енергії ( $E$ ) на перешкоду одна частина її відбивається ( $E_{\text{від}}$ ), друга – поглинається матеріалом ( $E_{\text{пог}}$ ), третя – проходить крізь перешкоду ( $E_{\text{пр}}$ ). Схематично механізм звукопоглинання представлений на рис. 2.

Звукопоглинальні матеріали характеризуються коефіцієнтом звукопоглинання  $\alpha$ , рівним відношенню звукової енергії, яка поглинається матеріалом до енергії, яка падає на нього:

$$\alpha = E_{\text{пог}} / E < 1, \quad (4)$$

Відбиття звукової енергії від перешкоди (рис. 2) характеризується коефіцієнтом відбиття  $\beta$ :

$$\beta = E_{\text{від}} / E < 1, \quad (4)$$

Проходження звуку крізь перешкоду характеризується коефіцієнтом звукопровідності  $\tau$ :

$$\tau = E_{\text{пр}} / E < 1, \quad (5)$$

Сума коефіцієнтів (ф-ли 4,4,5) дорівнює:

$$\alpha + \beta + \tau = 1, \quad (6)$$

Відомо [6], що енергія, яка пройшла крізь будівельну конструкцію складає тисячні долі від енергії, яка падає на неї. Тому при розгляданні явищ поглинання і відбиття звуку у внутрі приміщень з точністю, цілком достатньої для практики, можна долю енергії, яка пройшла перешкоду, не враховувати.

Існує два основних методи опису відбитого звуку в приміщенні: геометричний і статистичний (дифузного поля тобто однорідного). Обидва ці методи свідчать, якщо біля розрахунковій точки є поверхні з коефіцієнтом поглинання  $\alpha$ , то в цю точку приходить не тільки прямий звук безпосередньо від джерела, але й відбиті від поверхонь (рис. 1). Останні в силу рівняння кутів падіння і відбиття можна майже завжди розглядати як прямі, випромінювані уявними джерелами, які є дзеркальними відображеннями дійсного джерела. В той же час уявні джерела, створені на одній поверхні, стають такими ж уявними джерелами на іншій поверхні, але меншої потужності (рис. 3).

Характер відбиття залежить від форми поверхні, яка відбиває промені звуку. При відбитті від плоскої поверхні (рис. 3, а) виникає уявне джерело звуку  $I'$ . Відбиття від вгнутої поверхні (рис. 3, б) приводить до фокусування променів у точки  $I'$ . Випуклі поверхні розсіюють звук (рис. 3, в).

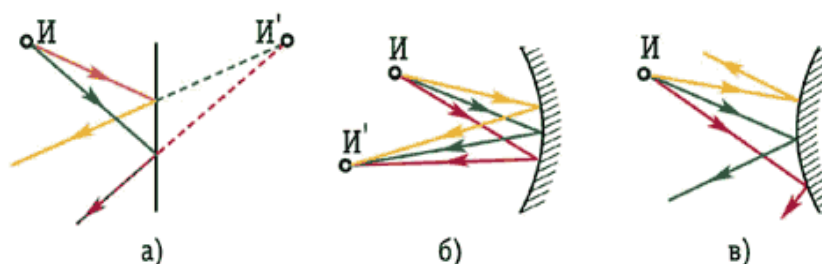


Рис. 3 – Характер відбиття променів звуку від форми поверхні

Розсіювання звукової енергії в приміщенні доцільно за таких причин: по-перше, спектр шуму в приміщенні змінюється за рахунок більшої ефективності (8-10 дБ) личкування на високих частотах, він робиться більш глухим і менш дратуючим; по друге, стає більш визначеним шум обладнання, з'являється можливість слухового контролю його роботи, стає легше розмовляти, поліпшується розбірність мови [5].

Таким чином, відбиття від плоских і вгнутих поверхонь приводить до появи уявних джерел шуму, які посилюють рівні звуку реальних джерел.

Розглянемо основні критерії, які впливають на формування шумового режиму у виробничих приміщеннях з акустичною обробкою. По-перше – це фактор спрямованості,  $\Phi$ , для напрямку на точку спостереження і кут простору,  $\Omega$ , в який випромінюється звук. Повний кут простору  $\Omega = 4\pi$ . Простішим фактором спрямованості обдає монополь  $\Phi = 1$  (не спрямоване джерело) і диполь  $\Phi = \cos^2\theta$ . Для реальних джерел з кінцевими розмірами фактор  $\Phi$  залежить від смуги частот, яка розглядається. Більшість реальних джерел випромінюють звук неоднаково в різних напрямках, але при орієнтованій оцінці шуму, який створює джерело з невідомим  $\Phi$  джерело рахують не спрямованим.

Якщо прослідкувати за розповсюдженням звукових променів (рис. 4), то побачимо, що прямі промені від джерела створюють уявні джерела на поверхні відбиття, які, у свою чергу, випромінюють звукову енергію.

Вклад відбитого звуку від звукопоглинальних поверхонь треба ураховувати, зменшивши кут випромінювання  $\Omega$  по зрівнянню зі значенням монополя у якого  $\Omega = 4\pi$ . Для джерел, розташованих на поверхні конструкцій, які огорожують  $\Omega = 2\pi$ , в двогранному куті створеним цими поверхнями,  $\Omega = 2\pi$ , в трьох граному –  $\Omega = \pi/2$ .

Повернемося до геометричної теорії акустики, де звукові хвилі розглядають як звукові промені (рис. 4).

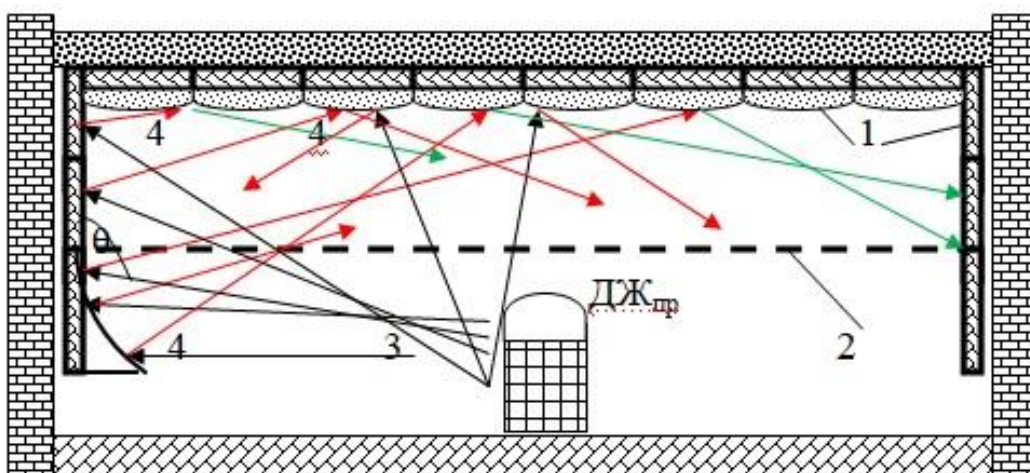


Рис. 4 – Схема розповсюдження звукових променів від джерела шуму у виробничому приміщенні, яке акустично оброблене: 1 – звукопоглинальні плити; 2 – межа робочої зони по вертикалі; 3 – прямі звукові промені від явного джерела шуму ДЖ<sub>пр</sub>; 4 – відбиті звукові промені від уявних джерел шуму, які створюються на поверхні відбиття;  $\theta$  – кут відбиття.

Таким чином, якщо уявне джерело створене на плоскій поверхні і кут падіння  $\theta = 90^\circ$ , то звукова енергія, крім поглиненої енергії, знов таки потрапляє у робочу зону. Проміні, які падають з кутом  $\theta \neq 90^\circ$ , відбиваються у верхній простір приміщення (припускаємо, що пряме джерело випромінює звук у простір  $\Omega = 2\pi$ ), де знов таки створюють уявні джерела на поверхнях конструкцій.

Для того, щоб уявні джерела на поверхні стін випромінювали звукову енергію зовні робочої зони пропонується змінити кути падіння променів і кут простору випромінювання нижнього ряду звукопоглинального личкування (рис. 5).

Таким чином, враховуючи положення геометричної акустики і змінюючи кут відбиття звукових променів можна максимально зменшити присутність у робочій зоні відбитої звукової енергії від уявних джерел. Поверхні відбиття повинні випромінювати звук у простір  $\Omega < 2\pi$ , тобто з кутом падіння  $\theta \neq 90^\circ$  (рис 5). Плити вигнутої конфігурації встановлюють при личкуванні стіни на рівні верхньої частини робочої зони. Каркас таких плит виготовляють із листової сталі товщиною 2 мм на який наносять звукопоглинальний матеріал.

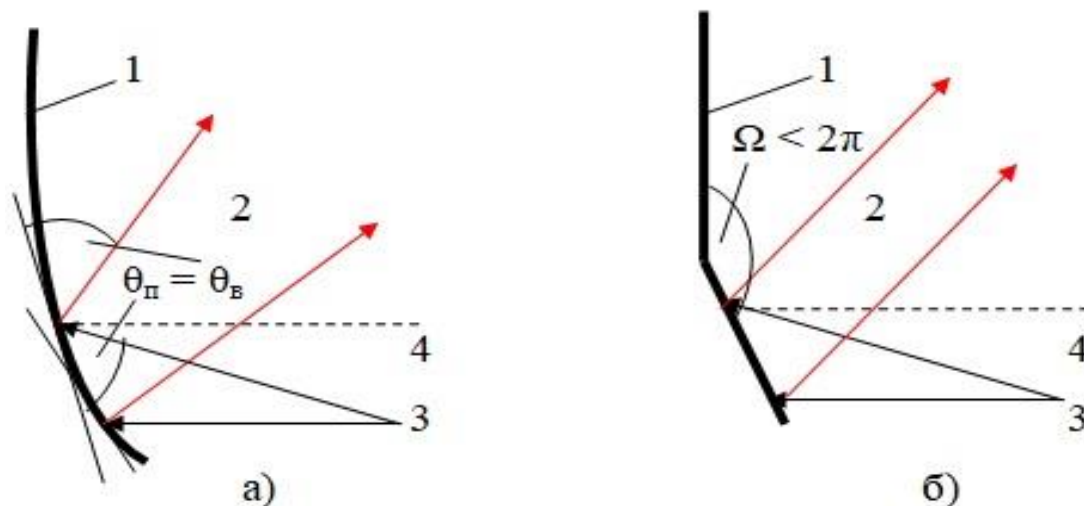


Рис. 5 – Поверхні нижнього ряду стінових звукопоглинальних плит: а – з кривизною у нижній частині; б – двогранна, де 1 – звукопоглинальна плита; 2 – звукові проміні відбиття від уявних джерел; 3 – проміні падіння від явного джерела; 4 – межа робочої зони по вертикалі

Вибір звукопоглинального матеріалу залежить від різних параметрів: призначення приміщення, лінійних розмірів, місць розташування джерел шуму, частотного діапазону, який треба скорегувати та ін.

До поглинальних матеріалів відносяться легкі пористі матеріали у вигляді плит, виготовлені з мінеральної або скловати, синтетичних чи деревинних волокон. Коефіцієнт поглинання таких матеріалів повинен бути в діапазоні 0,3 – 1,1 по всьому нормованому спектру частот.

**Висновки.** Геометрична акустика оперує поняттям звукового променя – лінії, під котрій мається на увазі напрямок поширення звукової енергії. Користуючись законами оптики, геометрична акустика дозволяє побудувати на кресленнях приміщення схему поширення звукових променів від джерела і після відбиття від поверхонь різної конфігурації, дати аналіз формування

звукового поля, визначити фокусування і властивостей поверхонь розповсюджувати звук, досліджувати можливість виникнення уявних джерел шуму і вплив форми приміщення на розподіл в ньому відбитої звукової енергії і побудувати траєкторії звукових променів.

Це дозволяє проводити побудову поверхні, яка відбиває звук, з кутом нахилу, що забезпечує необхідну траєкторію звукових променів за межі робочої зони. Крім того, побудова оптимального профілю звукопоглинальної поверхні дасть можливість уникнути накладення звукового тиску від уявних джерел на реальні. Такі архітектурно-конструктивні рішення у виробничих приміщеннях дозволять значно зменшити рівні шуму на робочих місцях, а це створить умови для збереження здоров'я і працездатності робітників.

Таким чином, можна стверджувати, що геометрична теорія може бути використана в якості теоретичної бази для отримання математичної моделі розрахунку очікуваної шумності у виробничих приміщеннях.

### Список використаних джерел

1. ДСН 3.3.6-037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
2. Измерова Н. Ф. Гигиена труда./ Под ред. Н. Ф. Измерова, В. Ф. Кириллова. – М.: ГЭОТАР–Медиа, 2010. – 592 с.
3. Виробнича санітарія: Навч. посіб./Ткачук К.Н., Каштанов С.Ф. Зацарний В.В., Ткачук К.К. - К.: НТУУ«КПІ», 2009. - 323 с.
4. Акустика: Справочник / под ред. М.А. Сапожкова. - М.: Радио и связь, 1989.
5. Борьба с шумом на производстве. Справочник. /Под. общ. ред. Е.Я. Юдина – М.: Машиностроение. -1985. 400 с.
6. Борьба с шумом. Под ред. проф. Е.Я. Юдина, -М.: 1964. -702 с.
7. Новак С.М., Логвинец А.С. Защита от шума и вибрации в строительстве. К.: Будівельник, 1990.
8. Иванов Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Логос, 2013. – 432с.
9. Иванов Н. И., Никифоров А. С. Основы виброакустики: Учебник для вузов – СПб.: Политехника, 2000. – 482с.: ил.

### Аннотация

#### **ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРИ АКУСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

Заиченко В.И.

*Шумовое воздействие на работающих один из вредных факторов производственной среды, который является причиной не только профессиональных заболеваний, но и травматизма на производстве. В статье рассмотрены потенциальные возможности использования геометрической теории акустики для формирования и моделирования звукового поля в помещении с источниками шума. Установлено, что отражение звуковых лучей от потолка и стен значительно увеличивают уровень шума от источника. Характер отражения зависит от формы поверхности, отражающей лучи звука. При отражении от плоской поверхности возникают мнимые источник звука и это приводит к тому, что в точку наблюдения приходит не только*



*прямой звук непосредственно от источника, но и отраженный от поверхностей. который усиливает уровни звука реальных источников. Основные критерии, которые влияют на формирование шумового режима в производственных помещениях с акустической обработкой это фактор направленности для направления на точку наблюдения и угол пространства, в которое излучается звук. Для того, чтобы воображаемые источники на поверхности стен излучали звуковую энергию снаружи рабочей зоны предлагается изменять углы падения лучей и угол пространства излучения нижнего ряда звукопоглощающего облицовки. Таким образом, учитывая положения геометрической акустики и изменяя угол отражения звуковых лучей можно минимизировать присутствие в рабочей зоне отраженной звуковой энергии от мнимых источников.*

*Построение оптимального профиля звукопоглощающей поверхности позволит избежать наложения звукового давления от мнимых источников на реальные. Такие архитектурно - конструктивные решения в производственных помещениях позволят значительно уменьшить уровни шума на рабочих местах, а это создаст условия для сохранения здоровья и работоспособности работников.*

## **Abstract**

### **APPLICATION OF GEOMETRIC THEORY IN THE ACOUSTIC PROCESSING OF INDUSTRIAL PREMISES**

Zaichenko V.I.

*The noise impact on working one of the harmful factors of the production environment, which is the cause of not only occupational diseases, but also injuries in the workplace. In the article potential possibilities of using the acoustic geometric theory for formation and simulation of sound field in premises with noise sources are considered. It is established that the reflection of sound beams from the ceiling and walls greatly increases the noise level from the source. The reflection pattern depends on the shape of the surface, which reflects the beams of the sound. When reflected from the plane surface there is an imaginary source of sound and this leads to the fact that the point of observation comes not only direct sound directly from the source, but also reflected from the surfaces. which increases the sound level of real sources. The main criteria that influence the formation of a noise regime in the production premises with acoustic processing is the directional factor for the direction of the observation point and the angle of the space in which the sound is emitted. In order that imaginary sources on the surface of the walls radiate the sound energy outside the working area, it is proposed to change the angles of falling of the rays and the angle of radiation of the lower row of sound absorption. Thus, taking into account the position of geometric acoustics and changing the angle of reflection of sound beams, it is possible to minimize the presence in the working area of reflected sound energy from imaginary sources.*

*Construction of the optimal profile of the sound absorbing surface will make it possible to avoid imposing sound pressure from imaginary sources on the real. Such architectural and design solutions in industrial premises will significantly reduce noise levels in the workplace, which will create conditions for maintaining the health and working capacity of workers.*