

УДК 621.7.022.6

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., О.М. КРАВЧЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИМ УЛЬТРАЗВУКОМ

Мета. Визначення найбільш ефективних програмних продуктів для моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль в процесі очищення виробничого устаткування за допомогою високоінтенсивного акустичного опромінення та побудова тривимірної моделі для дослідження просторової розподіленості процесу очищення.

Методи дослідження. Аналіз наявних програмних продуктів для моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль, їхніх особливостей та методів, на яких вони базуються. Моделювання процесу ультразвукового очищення на основі обраного програмного засобу.

Наукова новизна. На основі проведеного аналізу наявних систем моделювання обрано підхід, що забезпечує максимально точне та швидке моделювання поля акустичного тиску в процесі ультразвукового очищення, побудовано тривимірну модель процесу ультразвукового очищення виробу складної конфігурації. Визначено закономірності відзеркалень ультразвукових хвиль під час очищення.

Практична значимість. Визначено оптимальний з точки зору точності та тривалості процедури вирішення сформульованої задачі програмний засіб для моделювання процесу ультразвукового очищення та побудовано тривимірну модель, аналіз якої надає змогу зробити висновки щодо формування цілеспрямованого керуючого впливу ультразвуковим джерелом в залежності від даних, що отримані датчиками тиску.

Результати. На основі аналізу програмних засобів для моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль та принципів і методів, які є їхньою основою, обрано найбільш оптимальний варіант для моделювання процесу ультразвукового очищення за критеріями точності та тривалості цієї процедури. За допомогою обраного програмного засобу побудовано тривимірну модель процесу очищення та зроблено аналіз результатів вимірювань ультразвукових датчиків. Виявлено, що у процесі очищення найменшу дисперсію тиску має найближчий до забруднення датчик. Під час очищення (при моделюванні відбувається зменшення товщини забруднення) відхилення акустичного тиску найближчого до забруднення датчика починають збільшуватись в обох напрямках, набуваючи максимального значення, коли тіло очищене. Отже, для визначення результатів очищення доцільно формувати цілеспрямований керуючий вплив інтенсивним ультразвуком з урахування відносних змін та дисперсії акустичного тиску в обраних точках контролю.

Ключові слова: ультразвукове очищення, моделювання, програмний засіб, ультразвуковий тиск.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-62-68

Проблема та зв'язок її з науковими та практичними задачами. Системи ультразвукового очищення забезпечують більш якісне та ефективне очищення, порівняно з ручним, механічним та хімічними способами. Але велика кількість факторів, що впливають на ефективність процесу очистки (розчин для миття, температура, наявність стоячих хвиль, потужність та частота ультразвуку, розмір і форма резервуара, тип забруднення, розташування ультразвукового перетворювача тощо) роблять цей процес досить складним для автоматичного керування. До того ж при очищенні виробів складної конфігурації необхідно враховувати їхню просторову розподіленість та формувати керуючий вплив згідно даних щодо стану об'єкта очищення. Оцінювання стану об'єкта очищення можна проводити шляхом аналізу результатів процесу відзеркалення ультразвукових хвиль. Для визначення залежностей, що можуть бути основою для оцінювання стану процесу ультразвукового очищення, необхідно змоделювати цей процес та проаналізувати його перебіг. Існує велика кількість програмних засобів, що дозволяють моделювати процес розповсюдження ультразвукових хвиль. Проаналізуємо їхні особливості та визначимо оптимальне рішення щодо системи, яка має використовуватись для моделювання саме процесу очищення.

Аналіз досліджень та публікацій. Існує велика кількість програмних оболонок, що дозволяють моделювати процес поширення ультразвукових хвиль у неоднорідних середовищах. Це і програми загального призначення, які дозволяють моделювати дуже широкий спектр фізичних, хімічних, інженерних процесів, мають в своєму арсеналі велику кількість реалізованих методів розв'язування диференціальних рівнянь та систем диференціальних рівнянь. Яскравим представником такого програмного забезпечення є Comsol, за допомогою якого можна змоделювати майже всі фізичні процеси. Переваги таких систем в універсальності, у великій кількості методів розв'язку поставлених завдань, у зручному інтерфейсі, недоліки – це закритий код, що не завжди враховує останні розробки. Більш спеціалізовані програмні засоби базуються на обмеженій кількості використаних методів і призначені для певної сфери застосування. Взагалі, питання моделювання будь-яких процесів зводиться до того, на основі яких законів буде будуватися модель та якими методами будуть розв'язані еквівалентності, що лежать в основі цих законів. Саме за цими параметрами і доцільно класифікувати програмні засоби для моделюван-

ня ультразвукових розповсюджень з урахуванням особливостей інтерфейсу та можливості візуалізації отриманих результатів.

Одним з основних законів, що описує процес розповсюдження ультразвукових хвиль є рівняння Гельмгольца

$$\nabla \cdot -\frac{1}{\rho}(\nabla p) - \frac{\omega^2 p}{c^2 \rho} = 0,$$

де акустичний тиск $p = p_0 \exp(i\omega t)$, ω – кутова частота хвилі. Константи c та ρ – швидкість хвилі та густина рідини відповідно.

До програм, що базуються на моделюванні саме на цьому рівнянні відноситься Bem++ (boundary element method). Як зрозуміло з назви в основі цього програмного засобу лежить метод граничних елементів. Щоб застосувати природну сильну постановку граничних інтегральних задач, бібліотека використовує поняття просторів, подвійних просторів, операторів та функцій сітки. Слабка форма дискретизація робиться автоматично за потреби. Автоматичні проєкції забезпечують відображення між просторами функцій та їх відображеннями, щоб функції в сітках завжди представлені у правильних просторах. Згідно праці [1] основна перевага Bem++ - у використанні об'єднаних інтегральних рівнянь поля, що порівняно з більш простими формулами забезпечує стабільність на резонансних частотах.

Інший підхід використано у програмному пакеті Clawpack, що розроблено для вирішення нелінійних гіперболічних диференціальних рівнянь у часткових похідних із використанням методу кінцевого обсягу високої роздільної здатності, засновані на розв'язках та обмеженнях Рімана. Набір програмних засобів Clawpack призначений для вирішення нелінійних законів збереження, балансу та інших гіперболічних часткових диференціальних рівнянь першого порядку. Основні рішення засновані на алгоритмах поширення хвиль, описаних LeVeque в [2], і розроблені для декартової рівномірної або картографічної сітки або адаптивної ієрархії таких сіток. В одновимірному просторі гіперболічні системи, що вирішено у Clawpack, зазвичай мають форму закону збереження

$$q_t(x,t) + f(q(x,t))_x = 0, \quad (1)$$

та неконсервативної лінійної системи

$$q_t(x,t) + A(X)q(x,t)_x = 0, \quad (2)$$

де індекси позначають часткові похідні, а $q(x,t)$ – вектор з $m \geq 1$ компонентами. Матриця коефіцієнтів A в (2) або якобіанська матриця $f'(q)$ в (1) вважається діагоналізованою з дійсними власними значеннями для всіх відповідних значень q , x і t . Ця умова гарантує, що система гіперболічна з рішеннями, що є хвилеподібними. Власні вектори системи визначають співвідношення між різними компонентами системи або хвилі, а власні значення визначають швидкості, з якими ці хвилі розповсюджуються. Права частина цих рівнянь може бути замінена на "вихідний термін" $\psi(q, x, t)$, що призводить до появи неоднорідне рівняння, яке іноді називають «законом балансу», а не збереження. Функції потоку $f(q,x)$ в (1), що змінюються в просторі, також можна керувати за допомогою f -хвильового підходу.

Field II – це програмне забезпечення, яке може імітувати всі види ультразвукових перетворювачів та пов'язані з ними зображення полів. Програмний продукт Field використовує концепцію просторових імпульсних характеристик, розроблену Turholme і Stepanishen у серії робіт [3-5]. Підхід спирається на теорію лінійних систем для того щоб знайти поле ультразвуку як для імпульсної, так і для неперервної хвилі. Це робиться через просторову імпульсну характеристику. Це дає можливість визначити випромінюване ультразвукове поле у певній точці простору як функцію часу, коли перетворювач збуджений дельта-функцією Дірака. Поле для будь-якого типу збудження може бути знайдене шляхом згортання просторового імпульсу з функцією збудження. Імпульсна відповідь буде змінюватися залежно від положення щодо перетворювача, звідси і назва просторової імпульсної реакції. Специфіка програми – у можливості моделювання ультразвукових перетворювачів будь-якої форми, що потім моделюються за допомогою розділення на квадратні випромінювачі заданого розміру (рис.1).

Програмний продукт μ -diff – це набір інструментів Matlab з відкритим кодом для вирішення задач багаторазового розв'язання за допомогою кластерів круглих циліндрів. Його застосування розглянуто в праці [6]. Суворе математичне формулювання ґрунтується на формулах інтегральних рівнянь. Метод наближення кінцевої розмірності – це спектральний метод Фур'є в поєднанні з лінійними методами алгебри (прямий гаусовий метод усунення або попередньо обумовлені ітераційні методи підпростору Крилова).

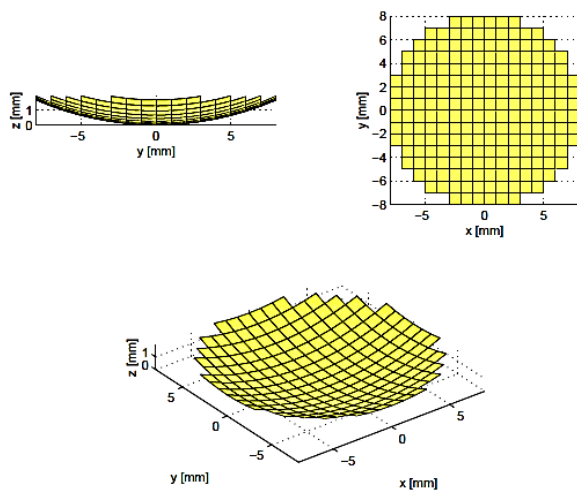


Рис. 1. Увігнутий, круглий перетворювач радіусом 8 мм, розділений на 1×1 мм математичні елементи

Ultrasim є інтерактивним графічним інтерфейсом, що виконує моделювання звукового поля від заданих ультразвукових перетворювачів. Однією з переваг такого підходу є те, що він є простим для користування. Для знаходження параметрів поля використовують інтеграл Релея

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \iint \frac{u_n(r_0, t - r/c)}{r} dS, \quad (3)$$

де потенціал швидкості ϕ задається нормальною швидкістю u_n , інтегрованою над активною поверхнею перетворювача. Джерело передбачається площинним, тобто бічні розміри і радіус кривизни є великими порівняно

з довжиною хвилі і таким чином вигнуті перетворювачі, що використовуються в ультразвуковому діапазоні моделюються згідно з цим припущенням.

Існує також можливість впоратися з відхиленням середовища, беручи до уваги різні властивості середовища для кожного шляху від джерела до означеної точки. Інтеграл Релея знаходиться за допомогою дискретизації випромінюючої поверхні, припускаючи, що площинне джерело вібрає в одному режимі (режим товщини), і з урахуванням того, що поверхнева швидкість розділяється на просторову та часову частини

$$u_n(r, t) = O(r) \cdot u(t). \quad (4)$$

Площина спостереження також дискретизована, а інтеграція здійснюється шляхом знаходження відстані а затримка часу квантована від кожної точки джерела до кожної з точок спостереження. Форма хвилі є або безперервною хвилею або імпульсом, що нагадає тиск, вимірний у фокусній точці акустичної осі.

SimSonic – програмний засіб для моделювання розповсюдження ультразвуку на основі розв'язку еластодинамічних рівнянь методом кінцевих різниць в часовій області (FDTD). Розроблення SimSonic було розпочато в 2003 році Еммануелем Боссі. SimSonic використовується здебільшого для досліджень, пов'язаних із поширенням ультразвуку в кістній тканині. Однак, його можна застосувати у різних ситуаціях, пов'язаних із поширенням ультразвуку у рідинах та/або твердих тілах (біомедична візуалізація, неруйнівне тестування, фотоакустична візуалізація тощо) [7].

FOCUS – це безперервний і перехідний хвильовий ультразвуковий симулятор, призначений для імітації ультразвукових хвиль в різних середовищах. FOCUS використовує два основні методи моделювання: швидкий ближній метод (FNM) та кутовий спектральний підхід (ASA). Для обчислення за допомогою FNM використовуються поля тиску біля грані перетворювача, тоді як підхід кутового спектра використовується для швидкого обчислення тиску на дальній ділянці [8].

DREAM (Discrete Representation Array Modeling) – це панель інструментів з відкритим кодом, що дозволяє аналізувати фокусування променя та апофіза для широкосмугового (імпульсного) збудження як у ближньому, так і в далекому полі. Пакет інструментів DREAM використовує числову процедуру, що застосовує обчислювальну концепцію дискретного представлення і базується на загальному підході просторових імпульсних реакцій. Однією з переваг є наявність графічного інтерфейсу, що спрощує керування налаштуваннями [9].

Для моделювання саме високоінтенсивного ультразвуку є ряд програмних оболонок, в основі яких лежить рішення рівняння Хохлова-Заболоцької-Кузнецова. KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) рівняння – це диференційне рівняння третього порядку у частинних похідних, що описує розповсюдження звукового пучка в нелінійному середовищі з дисипацією

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial \tau} - \frac{c_0}{2} \nabla^2_{\perp} p - \frac{\delta}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial \tau^3} = \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial \tau^2}, \quad (5)$$

де p – тиск, z – основний напрямок поширення звуку, $\tau = t - z/c_0$ – затримка часу, c_0 – мала

сигнальна швидкість звуку, $\nabla^2_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – лапласіан, що діє в площині, перпендикулярній

осі z , β – коефіцієнт нелінійності, ρ_0 – щільність, d – дифузивність звуку.

Для моделювання високоінтенсивного ультразвуку також застосовуються такі програми, як KZKTexas та HIFU_Simulator. KZKTexas – це комп'ютерний код, розроблений в Техаському університеті в Остіні для моделювання осесиметричних звукових променів у рідинах. Код ґрунтується на розширеному рівнянні KZK, яке враховує нелінійність, дифракцію, термовіскозну абсорбцію, поглинання та дисперсію через довільну кількість явищ релаксації. Існує дві версії коду, одна для нефокусованих джерел (KZKTexas1) та інша для орієнтованих джерел (KZKTexas2). Третій код (BurgersTX) використовує той же алгоритм, але для одновимірного поширення ультразвуку (без дифракції) в неоднорідній рідині. Код розроблено на основі досліджень, що наведено у праці [10].

HIFU_Simulator передбачає визначення багатьох важливих характеристик пучків безперервної хвилі, високоінтенсивного терапевтичного ультразвуку (HIFU) та їх нагрівальну дію. Це робиться шляхом інтеграції параболічного наближення високого порядку осесиметричного рівняння Вестервельта, відомого також як ширококутне рівняння Хохлова-Заболоцької-Кузнецова (КЗК), з точки зору частотної області. Це призводить до просторового розподілу тиску кожної гармоніки з урахуванням дифракції пучка, ефектів перешкод, енергетичної частотної залежності ослаблення та відповідної дисперсії швидкостей фази, частки втрат енергії, що перетворюється на тепло, нелінійних ефектів вищого гармонічного генерування / поглинання фронтового фронту, посиленого вироблення тепла завдяки ударним формам хвиль. З цих полів тиску обчислюється середня часова інтенсивність та щільність потужності. Потім щільність потужності використовується як джерело для рівняння передачі біологічного нагріву, яке інтегрується для визначення температурних та теплових полів. Існує можливість імітувати широкий діапазон осесиметричних полів. Можливо вказати стільки шарів тканини, скільки потрібно. Просторове усереднення використовується для імітації наслідків гідрофонних вимірювань поля тиску. Система має досить гнучкий графічний вихід.

HIFU_Simulator створено для модулювання застосування HIFU для неінвазивних методів лікування раку. Пакет складається з двох модулів, які вирішують рівняння KZK (5) та рівняння біопереносу тепла Пеннеса (ВНТ)

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T - \frac{w}{\rho} T + \frac{H}{\rho c_p}, \quad (6)$$

де k – теплопровідність, c_p – питома теплоємність; w – швидкість перфузії крові.

Згідно праці [11] KZK розв'язуються різними числовими схемами, використовуючи оператор розщеплення умови. Лінійний член визначається в частотній області двома методами другого порядку: за допомогою діагональної неявної схеми Рунге-Кутта в області біля поверхні перетворювача, де рішення швидко коливається, і схеми Кранка-Ніколсона за межами цього регіону. Нелінійний термін вирішується у часовій області методом "висхідного / нисхідного". Однак для того, щоб утримувати обчислювальне навантаження на необхідному рівні, нелінійний член не обчислюється, якщо амплітуда рішення незначно мала. З числового рішення для тиску P , швидкість передачі енергії від розповсюджувальної хвилі тиску до середовища H , обчислюється відповідно до відношення $H = \alpha \rho_0^2 P^2 / \rho c_0$, де α – згаданий вище параметр загадання, ρ_0 – тиск, що створюється вихідним перетворювачем, ρ – щільність матеріалу і c_0 – швидкість звуку. H – це джерело нагрівання у ВНТ. Оскільки рівняння KZK засноване на параксіальному наближенні, воно моделює акустичне поле в положеннях, не надто близьких до джерела ультразвуку або занадто далеко від осі. Рівняння ВНТ, вирішується за допомогою неявної схеми Рунге-Кутта другого порядку. Потім обчислена температура T використовується для обчислення розподілу теплового розподілення.

Розглянуті програмні засоби моделюють розповсюдження ультразвукових коливань на основі диференціальних рівнянь в частинних похідних другого та вищих порядків. Це призводить до досить високих витрат до обчислювальної техніки та займає значні проміжки часу. Відмінність k-Wave – це побудова моделі на основі системи диференціальних рівнянь у частинних похідних першого порядку

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho_0 \nabla \cdot u - u \cdot \nabla \rho_0, \end{aligned}$$

$$p = c_0^2(\rho + d \cdot \nabla \rho_0 - L\rho),$$

де u – акустична швидкість частинки, d – зміщення акустичної частинки, p – акустичний тиск, ρ – акустична щільність, ρ_0 – навколишня (або рівноважна) щільність, c_0 – ізотропна швидкість звуку. L є лінійним інтегро-диференціальним оператором, що визначає акустичне поглинання та дисперсію [12]

$$L = \tau \frac{\partial}{\partial t} \left(-\nabla^2 \right)^{\frac{y}{2}-1} + \eta \frac{\partial}{\partial t} \left(-\nabla^2 \right)^{\frac{y+1}{2}-1},$$

де τ і η – коефіцієнти пропорційності поглинання та дисперсії

$$\tau = -2\alpha_0 c_0^{y-1}, \quad \eta = 2\alpha_0 c_0^y \tan(\pi y / 2),$$

тут α_0 – префактор закону про потужність в Np (rad/s) $^{-y} m^{-1}$, а y – показник закону потужності.

Розв'язок будується на основі псевдоспектрального методу k -space та методу колокації Фу-р'є і надає змогу будувати точні 3-D моделі за прийнятний час [13-14]. Не зважаючи на те, що початковою метою створення k -wave було моделювання розповсюдження ультразвукових хвиль в живих тканинах, наразі за допомогою цього програмного засобу виконується моделювання і в інших сферах застосування ультразвуку, наприклад, для визначення характеристик рудних матеріалів [15].

Постановка задачі. За допомогою обраного програмного засобу промоделювати процес ультразвукового очищення з метою встановити залежність між ультразвуковими відгуками, що отримують датчики у заданих точках, та перебігом процесу очищення.

Викладення матеріалу та результати. Розглянемо моделювання процесу ультразвукового очищення при наступних початкових умовах: в центрі ємності для очищення знаходиться об'єкт у вигляді астроїдального циліндру із забрудненням на одній із сторін (рис. 2а), датчики знаходяться на кожній з бокових сторін ємності по центру (рис. 2б). Чотири точкових джерела ультразвуку знаходяться на дні ємності на однакових відстанях від центру (рис. 3).

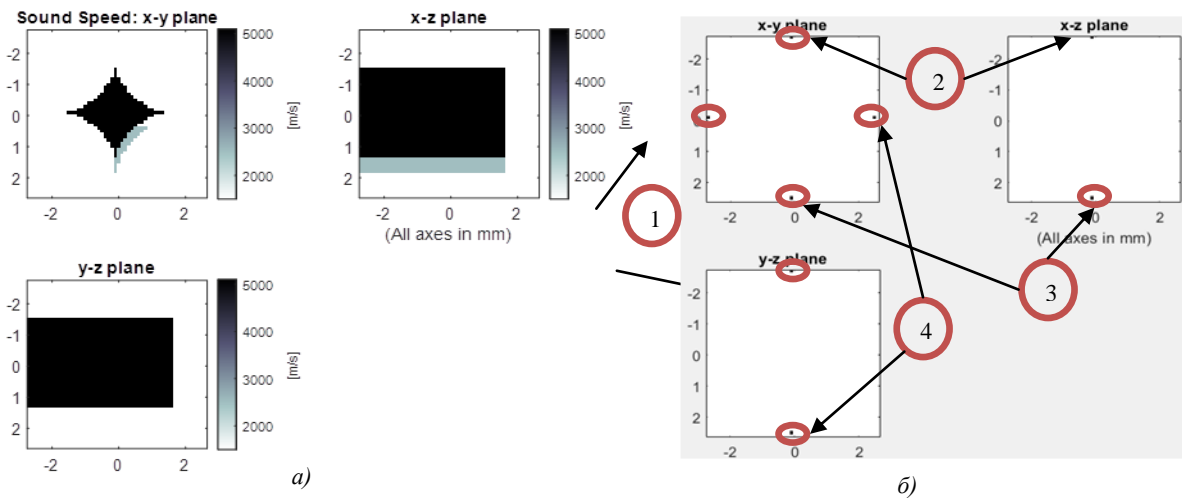


Рис.2. Початкові умови моделювання: а – об'єкт, що очищується зі щільністю $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=5170 \text{ м/с}$, забруднення зі щільністю $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$, швидкістю УЗ хвиль $c=2500 \text{ м/с}$ та товщиною 5 мм; б – розташування датчиків

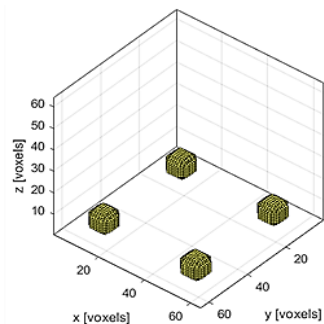


Рис.3. Джерела ультразвукових хвиль

Результати вимірювань датчиків отримані при початкових умовах наведено на рис. 4а. Можна побачити, що найменше відхилення тиску спостерігається на датчику 4, який розташовано безпосередньо навпроти забрудненої сторони. Під час очищення забруднення (тобто зменшення його товщини) значення відхилення тиску 4 датчика зростає (рис. 4б), в той час як значення інших датчиків залишаються постійними. І у випадку очищеного тіла маємо максимальні дані для 4 датчика (рис. 4в) і постійні значення для інших трьох датчиків. Відхилення тиску зростає як в додатному, так і у від'ємному напрямку, що обумовлюється конфігурацією об'єкта. Отже, наявність забруднення найбільше змінює зміни акустичного тиску того датчика, який знаходиться

найближче до нього і найменше впливає на віддалені датчики. Тому є сенс формувати управління процесом ультразвукової очистки цілеспрямовано із врахуванням цього фактору.

Висновки та напрями подальших досліджень. На основі аналізу особливостей існуючих програмних засобів моделювання процесів розповсюдження ультразвукових хвиль, принципів і методів, на яких вони побудовані, виявлено оптимальний варіант для моделювання ультразвукового очищення виробів складної конфігурації за критеріями точності та тривалості цієї процедури. На основі обраного програмного засобу побудовано тривимірну модель процесу очищення та зроблено аналіз результатів вимірювань ультразвукових датчиків. Виявлено, що у процесі очищення найменше відхилення тиску фіксує найближчий до забруднення датчик, результати вимірювань якого збільшуються під час очищення забруднення. Отже, для визначення результатів очищення доцільно формувати цілеспрямований керуючий вплив інтенсивним ультразвуком з урахуванням відносних змін та дисперсії акустичного тиску в обраних точках контролю.

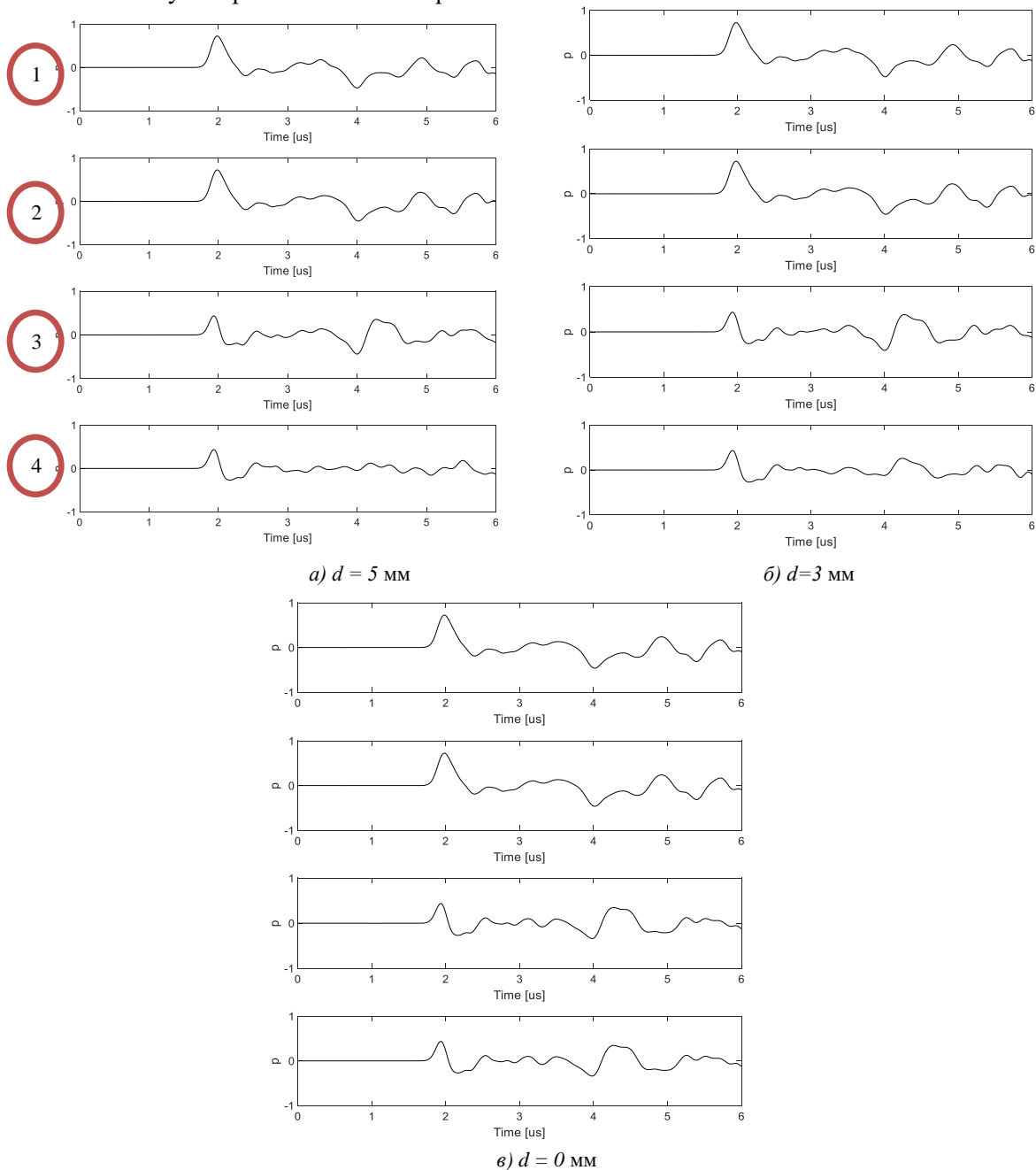


Рис.4. Результати вимірювань акустичного тиску датчиками при моделюванні процесу ультразвукового очищення, d – товщина забруднення

Список літератури

1. Smigaj W., Betscke T., Arridge S., Phillips J., Schweiger M. Solving boundary integral problems with BEM++. ACM Trans. Math. Softw. 2015, Vol. 41, No. 2, Article 6. doi: <http://dx.doi.org/10.1145/2590830>.
2. LeVeque R. J. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge University Press. 2002, P. 687. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511791253>.
3. Topholme G. E. Generation of acoustic pulses by baffled plane pistons. Mathematika. 1969, Vol. 16, P. 209–224. doi: [10.1112/S0025579300008184/](https://doi.org/10.1112/S0025579300008184/)
4. Stepanishen P. R. The time-dependent force and radiation impedance on a piston in a rigid infinite planar baffle. J. Acoust. Soc. Am. 1971, Vol. 49, P. 841-849. doi: [10.1121/1.1912424](https://doi.org/10.1121/1.1912424).
5. Stepanishen P. R. Transient radiation from pistons in an infinite planar baffle. J. Acoust. Soc. Am. 1971, Vol. 49, P. 1629–1638. <https://doi.org/10.1121/1.1912541>.
6. Thierry B., Xavier A., Chokri C., Alzubaidi H. Mu-diff: an Open-Source Matlab Toolbox for Computing Multiple Scattering Problems by Disks. Computer Physics Communications. 2015, Vol.192, P. 348–362. doi: [10.1016/j.cpc.2015.03.013](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.03.013).
7. <http://www.simsonic.fr>.
8. FOCUS Quick Start Guide. Michigan State University. November, 2013. <https://www.egr.msu.edu/~fultras-web/files/documentation/Field-to-FOCUS.pdf>.
9. Lingvall F. User Manual for the DREAM Toolbox. 2009.
10. Lee Y.-S. Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids. The University of Texas at Austin: Ph.D. dissertation, 1993.
11. Pozzi S., Borrazzov C., Carni M., Di Castro E., Valentini S., Caccia B. A computational tool for evaluating HIFU safety. Ann Ist Super Sanità. 2016, Vol. 52, No. 2, P. 256-260. doi: [10.4415/ANN_16_02_18](https://doi.org/10.4415/ANN_16_02_18).
12. Treeby B. E., Cox B. T. k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. Journal of Biomedical Optics. 2010, Vol. 15, No. 2. doi: [10.1117/1.3360308](https://doi.org/10.1117/1.3360308).
13. Morkun V. S., Morkun N. V., Pikilnyak A. V. Augmented reality as a tool for visualization of ultrasound propagation in heterogeneous media based on the k-space method. CEUR Workshop Proceedings. 2020, Vol. 2547, P. 81-91.
14. Morkun, V., Pikilnyak, A. Simulation of high-energy ultrasound propagation in heterogeneous medium using k-space method. Metallurgical and Mining Industry. 2014, Vol. 6, P. 23-27.
15. Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A. Iron ore flotation process control and optimization using high-energy ultrasound. Metallurgical and Mining Industry. 2014, Vol. 6(2), P. 36-42.

Рукопис подано до редакції 21.03.2020

UDC 331.101.38:622.012

N.G. KUTOVA¹, Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer, A.Y. SHAKHNO, Doctor of Economic Sciences, Assoc. Prof., K.O. DEMIANENKO, student, Kryvyi Rih National University

DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE STATE OF PERSONNEL INCENTIVES OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES

Purpose. To conduct diagnostics of personnel incentives, by which it is necessary to establish the influence of certain factors on the productivity of personnel at enterprises.

Research methods. The methods of statistical analysis, regression analysis, modelling of economic indicators using MS Excel are used.

Scientific novelty lies in the identification of significant factors for the stimulation of personnel to form an evaluation system improving the economic mechanism of incentives for the personnel at enterprises.

Practical value is that the results of the study revealed the most problematic aspects of the employee incentive system, and suggested a systematic approach to improve the process of forming an economic incentive mechanism for enterprise personnel.

Results. The efficiency of industrial enterprises personnel use was analyzed on the basis of comparing the level of labour productivity and the average monthly salary of the personnel, the indicators of productivity of labour and payment of management and industrial-production personnel were calculated. The study of the dynamics of the basic and additional pay growth rates, incentives and compensation in the payroll of the management staff of enterprises showed that accrued bonuses in the payroll fund have a negative tendency. The interdependence between business performance and personnel incentives has been identified. This analysis has revealed the negative impact of certain factors on labour productivity, the main ones being the imperfection of the current labour legislation, the lack of proper control over its observance, the spread of opacity in labour relations and the reduction of social protection of workers.

Key words: personnel, personnel incentives, diagnostics, personnel use evaluation, labour productivity, payroll, labour incentive issues.

doi: [10.31721/2306-5451-2020-1-50-68-73](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2020-1-50-68-73)