

## ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ ПРОГРАМ «FEMLAB» ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПАРАМЕТРИЧНОГО ГІДРОАКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

*Параметричний гідролокатор дозволяє ефективно вести пошук морських родовищ нафти і газу, скупчень риби та ін. Особливою проблемою при створенні параметричних систем є формування у воді сигналів накачування. Приладом для формування хвиль накачування може бути електророзрядний випромінювач виконаний у вигляді масивного сферичного відбивача з введеними в нього разрядниками в ізоляторах. При математичному моделюванні просторовість, нелінійність і нестационарність випромінюваних хвиль призводять до необхідності розв'язання складних крайових задач нелінійної гідроакустики, яке можливе тільки із застосуванням комп'ютера.*

*Математичний пакет FEMLAB – потужне інтерактивне середовище для моделювання і розв'язання наукових і технічних проблем, заснованих на диференціальних рівняннях в часткових похідних. У даній статті розглянуті методи моделювання крайових задач гідроакустики в системі Femlab.*

*Ключові слова: гідроакустична випромінювальна система, акустичний тиск, електричний розряд, математична модель, акустичне поле, пакет програм.*

Параметричні випромінювачі і приймачі звуку це пристрої, засновані на використанні ефекту генерації комбінаційних тонів при взаємодії звукових хвиль, в яких роль випромінюючої (або приймальної) антени грає область середовища, де відбувається нелінійна взаємодія хвиль (рис. 1). Особливою проблемою при створенні параметричних систем є формування у воді сигналів накачування.

Приладом для формування хвилі накачування може бути електророзрядний випромінювач виконаний у вигляді циліндра з введеними в нього разрядниками в ізоляторах. При включенні генератора імпульсних струмів на робочому проміжку локатора виникає електрогідролінійний удар, який служить джерелом акустичних хвиль [2].

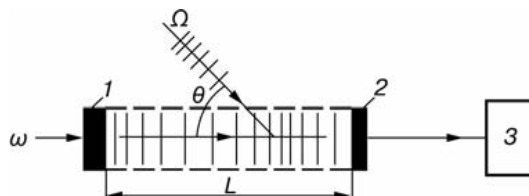


Рис. 1. Схема параметричного випромінювача:

$\omega$  – частота накачки;  $\Omega$  – частота сигналу; 1, 2 – випромінювач; 3 – прийомник

При дослідженні поширення нестационарних хвиль, які утворились в результаті функціонування акустичних випромінювачів, як правило, використовується один з двох підходів, які суттєво обмежують сферу застосування отриманих результатів. Перший з них застосовується при визначенні акустичного сигналу, прийнятого від випромінювача в безмежній або частково обмеженій рідині на великій відстані від джерела збурення. Для цього підходу характерна ідеалізація геометричної форми випромінювача або профілю випромінюваного імпульсу.

У більшості випадків розглядаються точкові джерела, а профілі хвиль тисків апроксимуються деяким набором елементарних функцій. Реальні ж випромінювачі містять ряд відображень і заломлюючих поверхней, що обумовлює складну форму імпульсу тиску і його просторову неоднорідність.

Розрахунок поля тиску нестационарного випромінювача можна здійснити якщо відомі значення звукового тиску, а також його просторових і часових похідних на деякій поверхні, що охоплює випромінювач. Зазначені величини знаходять з рішення задачі про поширення хвиль.

Задачам визначення полів випромінювачів присвячена велика кількість літературних джерел. Досить вказати монографії [1, 4], що містять вирішення різних задач, причому в цих роботах містяться огляди, які, зокрема, обіймають і питання випромінювання звукових хвиль. Інтерес до цієї тематики в наш час, як і раніше, залишається високим, тому що, незважаючи на ясність фізики процесу випромінювання, способи розрахунку конкретних пристроїв і генеруються ними звукових полів вельми складні і вимагають, як правило, значних ресурсів ЕОМ.

Традиційним у разі стаціонарних задач і найбільш використовуваним підходом є їх зведення до інтегрального рівняння щодо щільності розподілу особливостей по поверхні випромінювача. Якщо остання є канонічною, то процедура побудови рішення базується на розкладанні шуканого рішення за власними функціями задачі. В іншому випадку застосовують методи, в чомусь споріднені зазначеному, з тією відмінністю, що використовуються повні системи функцій для подання рішення, наприклад, метод допоміжних джерел, метод Т-матриць, метод граничних інтегральних елементів.

При вирішенні задачі вводяться наступні припущення фізичного та геометричного характеру: – в початковий момент часу вже сформований канал електричного розряду, що представляє собою циліндр кінцевої довжини, що дозволяє звести задачу до розгляду осесиметричного випадку; – рідина, що заповнює і навколишню конструкцію, ідеальна і стисла; рух рідини безвихровий; для опису руху навколишньої рідини допустимо акустичне при-наближенні; – деформування стінок випромінювача відбувається пружно, згідно закону Гука для ізотропних середовищ; – радіус циліндру не менше, ніж на порядок, перевищує товщину пружних стінок.

Поблизу плазмової порожнини, що утворюється при електричному розряді у воді, можуть формуватися ударні хвилі з великою амплітудою, що викликає необхідність залучення нелінійних співвідношень для їх опису, тому використовується система рівнянь газової динаміки в циліндричній системі координат  $roz$  [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(F_1 r)}{\partial t} + \frac{\partial(F_2 r)}{\partial z} + \frac{\partial(F_3 r)}{\partial r} &= F_4, \quad F_1 = [\rho, \rho u_r, \rho u_z, \varepsilon]^T, \\ F_2 &= [\rho u_z, \rho u_z u_r, \rho u_z^2 + p, (\varepsilon + p) u_z]^T, \quad F_3 = [\rho u_r, \rho u_r^2 + p, \rho u_z u_r, (\varepsilon + p) u_r]^T, \\ F_4 &= [0, p, 0, 0]^T, \quad \varepsilon = \rho \left[ E + (u_z^2 + u_r^2) / 2 \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Система рівнянь (1) замикається рівнянням стану. Для води в широкому діапазоні зміни тисків справедливо двочленне наближення співвідношення (2):

$$E = \frac{p + \gamma B}{\rho(\gamma - 1)} - \frac{c_0^2}{\gamma - 1}, \quad (2)$$

де  $B = \rho_0 c_0^2 / \gamma$ , при цьому для води  $\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $c_0 = 1460 \text{ м/с}$ ;  $\gamma = 7,15$ ;  $B = 298,6 \text{ МПа}$ .

Рух рідини у зовнішній по відношенню до оболонкової конструкції області описується в рамках акустичного наближення, справедливого для тиску, який не перевищує 100 МПа [4]. Хвильове рівняння записується щодо повного тиску в рідині з урахуванням осевої симетрії задачі в циліндричній системі координат  $(r, \theta, z)$ :

$$\frac{1}{c_0^2} \ddot{p} = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}, \quad (4)$$

На осі симетрії в циліндричній системі координат відповідно задаються умови

$$\left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, \pi} = 0, \quad (5)$$

оскільки через вісь не повинен відбуватися перетікання рідини.

Математичний пакет FEMLAB – потужне інтерактивне середовище для моделювання і розв'язання наукових і технічних проблем, заснованих на диференціальних рівняннях в часткових похідних (PDE). До того ж у FEMLAB є зручний засіб візуального відображення області існування рішення

крайової задачі. Найбільш поширені способи візуалізації – двовимірні поверхневі графіки, перетину, ізоповерхні, контурні графіки.

У FEMLAB є засоби експорту різних даних в робочу область MATLAB. Це дає можливість для обробки цих даних застосовувати функції командного рядка, що забезпечують доступ до всіх засобів FEMLAB і MATLAB [32]. У діалогових вікнах є кнопки і перемикачі, що забезпечують експорт моделей безпосередньо в інші інструментальні засоби MATLAB, такі як Simulink і Control System Toolbox.

При вирішенні PDE, які описують модель, в FEMLAB застосовуються кінцевоелементні методи (FEM). Програмне забезпечення пакету підтримує кінцевоелементну технологію разом з адаптивним побудовою сітки і контролем помилок при роботі з різними чисельними рішеннями.

Підсистема GUI FEMLAB містить набір геометричних інструментальних засобів (CAD) для одновимірного, двовимірного і тривимірного моделювання. У цьому інтерфейсі є засіб автоматичної генерації кінцевоелементної сітки для будь-якої геометрії.

Розглянемо поетапне знаходження рішення задачі з застосуванням пакету FEMLAB.

1. Визивається навігатор моделей і головне меню (рис. 2)

Розмірність моделі вибираємо в Model Navigator [Навігаторі моделей] на першій вкладці New в Space Dimension [розмірність простору], крім 1D, 2D і 3D там є Axial Symmetry (1D) і (2D) для осесиметричних моделей.

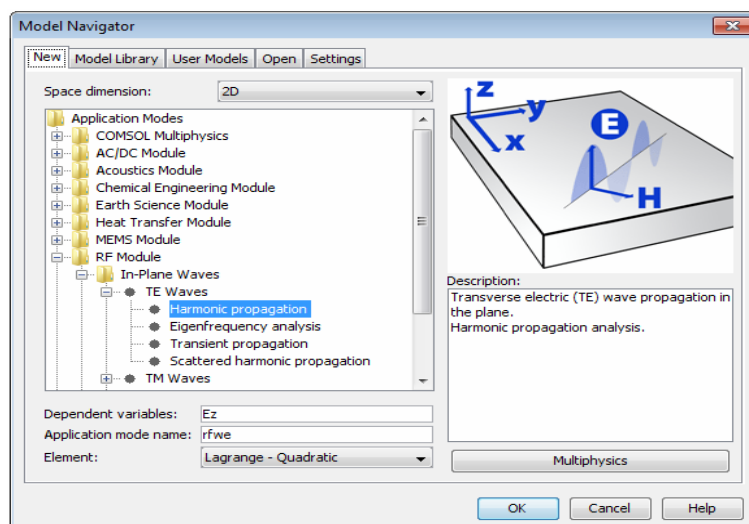


Рис. 2. Головне меню в пакеті FEMLAB

Після натискання клавіші ОК в Model Navigator відкривається вікно основної програми з робочою областю, інструментальними панелями і головним меню. Кнопки на інструментальних панелях повторюють пункти головного меню (рис. 3).

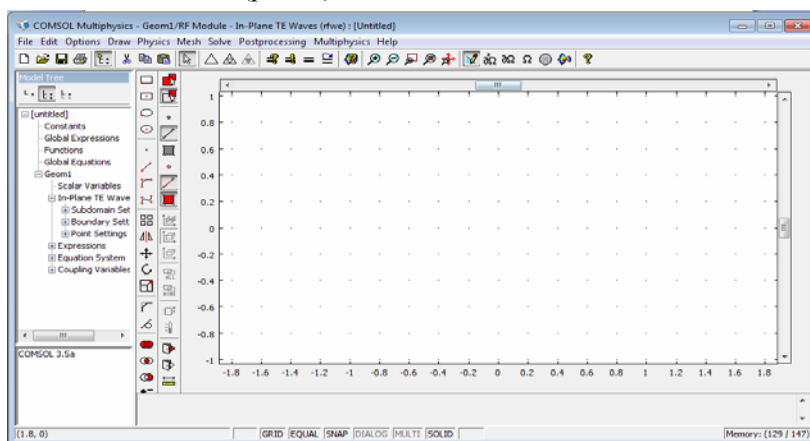


Рис. 3. Вікно основної програми з робочою областю

Граничні умови задаємо через Physics> Boundary Settings або F7 (рис. 4). У вікні Boundary Selection вибираємо по черзі або можна групами всі зовнішні кордони, відмічені яскравим чорним кольором, і в полі Boundary condition задаємо відповідні їм граничні умови.

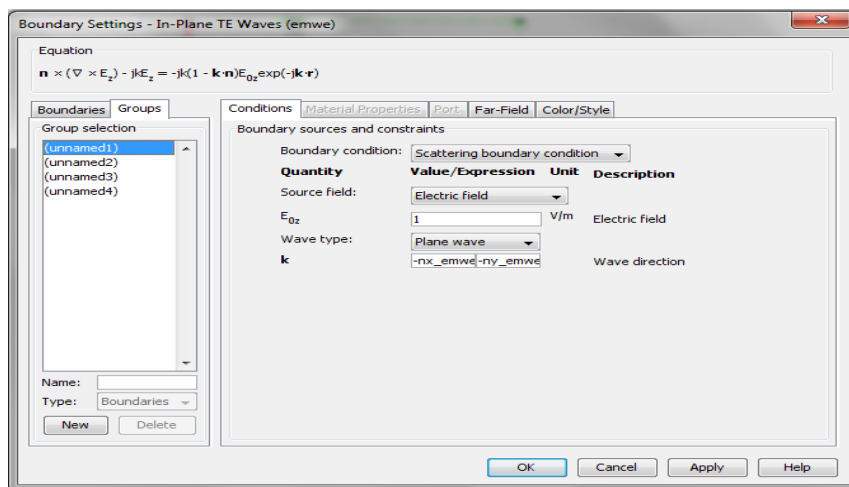


Рис. 4. Вікно введення граничних умов

Після завдання всіх властивостей і граничних умов настає черга побудови сітки. Для найпростіших моделей, на першому етапі оціночного розрахунку задаємо сітку за замовчуванням Mesh> Initialize Mesh (або кнопка з зображенням трикутника) і кілька разів натискаємо Mesh> Refine mesh і, отримаємо досить дрібну сітку, приступаємо до вирішення (рис. 5).

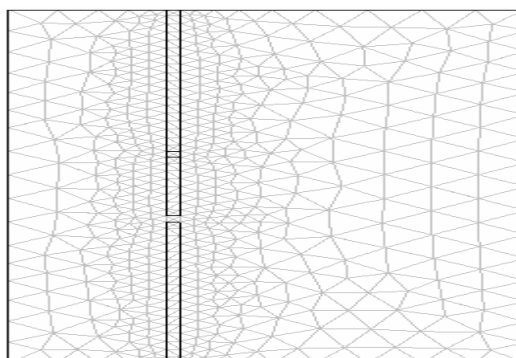


Рис. 5. Згенерована скінченноелементна сітка

Для підвищення точності розрахунку ми перевизначаємо (згущуємо) сітку за допомогою команди Mesh / Refine Mesh або клавіші Ctrl + M.

Так як змінювати параметри вирішувача, встановлені за замовчуванням, не треба, то для вирішення PDE треба тільки натиснути кнопку Solve або пункт меню Solve > Solve problem.

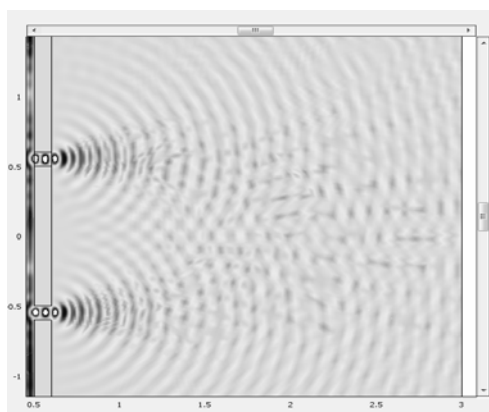


Рис. 6 Візуалізація інтерференції хвиль

Після завершення рішення автоматично включається режим Postprocessing [Режим постобробки], в якому можна спостерігати результати обчислення. вручну цей режим можна включити відповідною кнопкою – або командою Postprocessing> Plot parameters. Типово візуалізація проводиться у вигляді поверхні, спроєктованої на площину  $xOy$  (рис. 6).

Отже, при моделюванні взаємодії двох точкових джерел гідроакустичних хвиль отримано характерну просторову інтерференційну картину, яка близька до тієї, що виходить фізично. У меню Postprocessing / Plot parameters / Animate можна записати відеоролик у форматі avi про зміну гідроакустичного поля у часі.

### Список використаних джерел

1. Милн П. Х. Подводные инженерные исследования [Текст]. — Л. : Судостроение, 1989. — 230 с.
2. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика [Текст]. — Л. : Судостроение, 1981. — 264 с.
3. Синицкий С. Л. Краткое руководство по Femlab [Текст]. — Издательство: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 354 с.
4. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики [Текст]. — Л. : Судостроение, 1972. — 352 с.
5. Шмелев В. Е., Лебедева В. Д. Femlab 2.3. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://femlab.narod.ru/met/nu.htm>.
6. Шмелев В. Е. Заметки по использованию системы FEMLAB [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/femlab/book1>.

**Victor MELNIK, Sergey LUKYANCHIKOV**  
Nikolaev

### APPLICATION SOFTWARE PACKAGE «FEMLAB» TO SIMULATE OPERATION PARAMETRIC UNDERWATER SOUND PROJECTOR

*The paper discusses methods of modeling boundary-value problems in Femlab system, the mathematical model of sonar interference waves generated by the two sources. The calculation of the interference pattern, the model of the phenomenon of wave interference using Femlab package. The solution to these problems is the basis of mathematical and software of modern acoustic radiating systems and can be used for their implementation.*

*Key words: radiative sonar system, acoustic pressure, electrical discharge, a mathematical model, the acoustic field, a software package.*

**Виктор МЕЛЬНИК, Сергей ЛУКЪЯНЧИКОВ**  
г. Николаев

### ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ "FEMLAB" ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

*В работе рассмотрены методы моделирования краевых задач в системе Femlab, представлена математическая модель интерференции гидроакустических волн, генерируемых двумя источниками. Приведен расчет интерференционной картины, разработана модель явления интерференции волн с помощью пакета Femlab. Решение этих задач составляет основу математического и программного обеспечения современных акустических излучающих систем и может быть применено для их практической реализации.*

*Ключевые слова: гидроакустическая излучательная система, акустическое давление, электрический разряд, математическая модель, акустическое поле, пакет программ.*

Стаття надійшла до редколегії 30.09.2016