

MOTOR LINIAR PIEZOELECTRIC PENTRU APLICAȚII DE EXTRACȚIE A ULEIULUI ESENȚIAL

Yelda VELI¹, Florin SĂFTOIU², Alexandru M. MOREGA^{1,3}

¹ Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București

² Școala Doctorală de Inginerie Electrică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

³ Institutul de Statistică Matematică și Matematică Aplicată "Gheorghe Mihoc-Caius Iacob",
Academia Română

yelda.veli@upb.ro¹, florinsaftoiu@gmail.com², amm@iem.pub.ro³

Rezumat. Diverse metode de extracție a uleiului esențial din diverse plante pot fi folosite, însă printre metodele neconvenționale se numără utilizarea procesului de microcavitație și separare de substanță prin intermediul motoarelor liniare piezoelectrice de ultrasunet. Microcavitația furnizată de sursa de ultrasunet furnizează avantaje suplimentare față de metodele convenționale de extracție prin distilație. Lucrarea prezintă modelarea numerică a unui motor liniar piezoelectric de ultrasunet, cu simetrie axială, în regim armonic permanent, utilizând metoda elementului finit.

1. INTRODUCERE

În vederea realizării extracției uleiului esențial din diverse plante se pot utiliza diverse metode convenționale (distilarea sau extracția pe bază de aburi) sau neconvenționale [1] de extracție a uleiului esențial. Printre metodele neconvenționale de extracție se numără metodele de extracție prin ultrasunet (US) care utilizează procesul de microcavitație pentru a realiza separarea de substanță.

Sursa de ultrasunet poate fi reprezentată de diverse motoare liniare, magnetostrictive (MST) sau piezoelectrice (PZE), iar procesul de extracție prin microcavitație vine cu avantaje suplimentare: timp redus de extracție, calitate superioară a produsului final obținut, cantitatea produsului extras, reducerea componentelor volatile etc. [1–5]. Utilizarea motoarelor liniare PZE de US prezintă o serie de avantaje față de utilizarea motoarelor MST de US, dintre care amintim eficiența de extracție și calitatea procesului de microcavitație [2].

Majoritatea surselor PZE de US sunt reprezentate de transductoare PZE de US, și, după caz, se poate atașa o carcasă de amplificare a undei de sunet, respectiv un sonotrod, cu rol de focalizare a acesteia. Intervalul de frecvențe pentru aplicațiile US de extracție variază de la 20 – 40 kHz, valori mai înalte corespunzând pentru extracții mai fine, de calitate ridicată, pe când cele de frecvențe mai joase corespunzând extracțiilor mai grosiere, unde efectul de cavitație este mai puternic. Un alt aspect important este încălzirea datorată undelor de US: cu cât frecvența este mai joasă, cu atât extracția prin cavitație este mai puternică, iar încălzirea este mai pronunțată. Efectul de încălzire are un efect negativ deoarece influențează și scade eficiența și calitatea produsului extras [4-5].

În această lucrare se analizează numeric un motor liniar PZE de US care prezintă atașat la capătul sonotrodului un vas de lucru în care se consideră un amestec de apă, solvent, cu rol de amplificare a procesului de extracție, și o suspensie de frunze de lavandă. Domeniul de calcul este unul bidimensional (2D) cu simetrie axială, iar dispozitivul PZE prezintă patru straturi de material piezoelectric activ dispuse intercalat cu alte patru straturi din cupru. Straturile PZE sunt conectate electric între ele, iar modelul este analizat prin metoda elementului finit (MEF) [6], prin intermediul interfeței acustic – piezoelectric, care modelează și rezolvă problema din punct de vedere al problemei de câmp electric – câmp mecanic, respectiv câmp acustic de

ultrasunet. Pentru vasul de lucru se consideră suplimentar și o problemă de curgere, sursa de mișcare a fluidului de lucru fiind forța datorată câmpului US.

2. MODELAREA APARATULUI EXPERIMENTAL

Figura 1 prezintă domeniul de calcul 2D cu simetrie axială al întregului ansamblu, motorul liniar împreună cu vasul de lucru în care se regăsește amestecul de apă, solvent și suspensia de frunze de lavandă. Sunt indicate toate elementele constitutive ale ansamblului și sunt menționate condițiile la limită (săgeți roșii) pentru problema care modelează interacțiunea US – fluid de lucru.

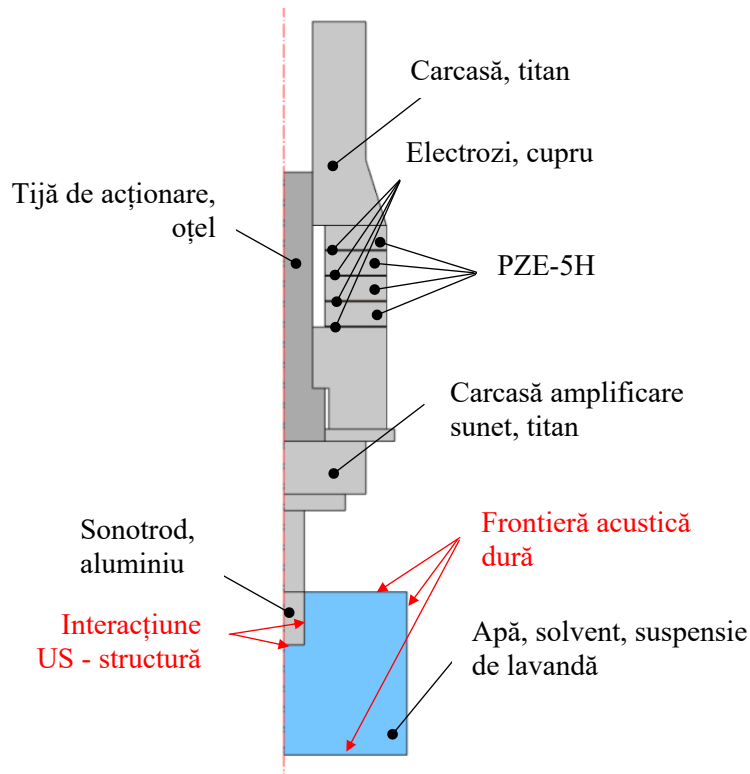
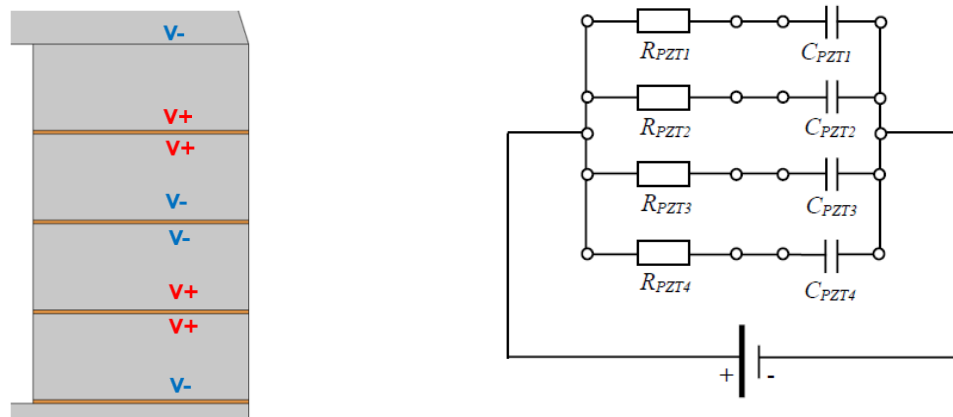


Fig. 1. Motorul liniar PZE US și vasul de lucru

Condițiile la limită utilizate în interfața interacțiunii câmp acustic – câmp piezoelectric și care modelează modul de cuplare a straturilor de material piezoelectric sunt reprezentate în Fig. 2, *a* iar circuitul electric echivalent care caracterizează acest mod de cuplare a straturilor este reprezentat în Fig. 2, *b*.



a. condițiile la limită pentru straturile PZE.

b. circuitul electric echivalent.

Fig. 2. Conexiunile electrice ale straturilor PZE, respectiv circuitul electric echivalent acestea.

Astfel, straturile sunt cuplate în paralel și alimentate la tensiunea continuă de 400 V.

Studiul numeric se realizează în regim armonic permanent, pentru problema de presiune acustică – interacțiune câmp piezoelectric, respectiv dinamic pentru problema de curgere din vasul de lucru.

Se determină frecvențele naturale, respectiv frecvența de rezonanță a dispozitivului pentru o anumită valoare a frecvenței naturale, iar pentru valoarea frecvenței de rezonanță, determinată la pasul anterior, se consideră regimul armonic permanent și se analizează funcționarea motorului din punct de vedere acustic, respectiv a transmisiei undei de US și a mișcării fluidului din vasul de lucru ca urmare a acesteia.

3. MODELUL FIZIC ȘI MATEMATIC

Modelul matematic care descrie funcționarea motorului liniar PZE de US în regim armonic permanent este:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_0 c_s^2} = 0 \quad (1)$$

unde p [Pa] este presiunea sunetului, c_s [m/s] este viteza sunetului, ρ_0 [kg/m³] este densitatea de masă.

Ecuatiile care modelează conversia energie piezoelectrică – energie mecanică sunt:

$$\begin{cases} \mathbf{T} = c_d \mathbf{S} - q^t \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = -q \mathbf{S} + \epsilon_s^{-1} \mathbf{D} \end{cases} \quad (2)$$

unde \mathbf{T} [N/m²] este solicitarea mecanică, c_d [N/m²] este matricea rigidității mecanice, \mathbf{S} este deformarea mecanică, q^t [N/C] este transpusa matricii coeficienților piezoelectrici de cuplare, \mathbf{D} [C/m²] este inducția electrică, \mathbf{E} [V/m] este intensitatea câmpului electric, iar ϵ este [F/m] permitivitatea electrică.

Cele două ecuații Navier-Stokes, de conservare a impulsului, respectiv a masei, modelează problema de curgere din vasul de lucru:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F}, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (4)$$

unde \mathbf{u} [m/s] este viteza fluidului din vasul de lucru, μ [Pa·s] este vâscozitatea dinamică. Aici, p [Pa] reprezintă presiunea din vasul cu lichid.

Forța \mathbf{F} [N/m³] care pune în mișcare amestecul de lichid din vasul de lucru este dată de intensitatea sunetului, astfel:

$$\mathbf{F} = \frac{2\alpha}{c_s} \mathbf{I}, \quad (5)$$

unde α [Np/m] este coeficientul de atenuare pentru mediul lichid și \mathbf{I} [W/m²] este intensitatea sunetului de US. La aceste ecuații se mai adaugă modelul fizic descris de legile de câmp electromagnetic: legea de conservare a sarcinii electrice, $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$, legea conducției electrice $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$, legea fluxului electric, $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v$, consecința legii inducției electromagnetice, $\mathbf{E} = -\nabla V$, respectiv legea de material, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} + \mathbf{P}$. Aici, \mathbf{J} [A/m²] este densitatea curentului electric, σ [S/m] este conductivitatea electrică, ρ_v [C/m³] reprezintă densitatea volumetrică a sarcinii electrice, iar \mathbf{P} [C/m²] este polarizarea electrică specifică straturilor din material activ, PZT-5H. Pentru celelalte materiale se consideră o lege liniară a legii de material, în care polarizarea electrică nu intervine ca mărime de calcul.

4. REZULTATELE SIMULĂRII NUMERICE

În Tabelul 1 sunt indicate valorile frecvențelor naturale ale modurilor proprii de deformare pentru motorul liniar piezoelectric cu sonotrodul scufundat în vasul de lucru.

Tabelul 1.
Frecvențele naturale ale modurilor proprii de deformare.

Frecvență naturală	Valoare [Hz]
f_{n1}	8029,84
f_{n2}	14503,39
f_{n3}	23925,77
f_{n4}	25881,33
f_{n5}	28455,39

Frecvențele naturale determinate trebuie să coincidă cu gama de frecvențe corespunzătoare US. Astfel, doar f_{n3} , f_{n4} , respectiv f_{n5} corespund intervalului de frecvențe necesară undelor de US. În Tabelul 2 sunt incluse frecvențele de rezonanță determinate în jurul celor trei frecvențe naturale.

Tabelul 2.
Frecvențele de rezonanță

Frecvență de rezonanță	Valoare [Hz]
f_{r1}	24013,92
f_{r2}	25978,41
f_{r3}	28520,83

Figura 1 prezintă câmpul de deformare al motorului PZE liniar de US pentru valoarea frecvenței de rezonanță $f_{r3} = 28,520$ kHz. Se alege cea mai mare valoare a frecvenței de rezonanță deoarece valori ridicate ale acesteia furnizează un proces de extracție mai eficient și calitativ prin păstrarea a mai multor componente volatile, deși crește timpul de extracție [3].

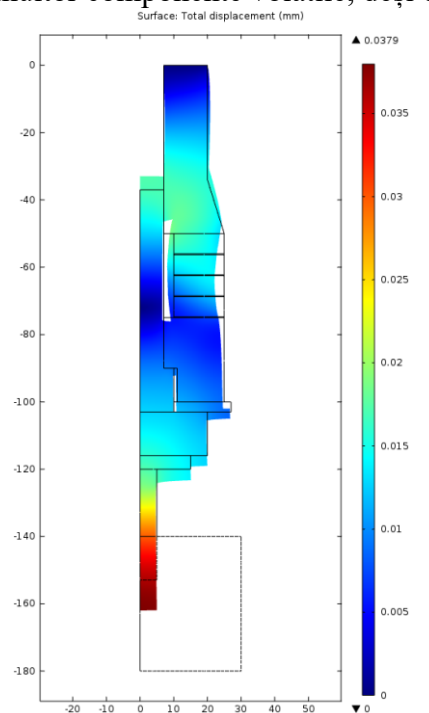


Fig. 1. Deformarea motorului PZE de US pentru frecvența de rezonanță,
 $f_{r3} = 28,520$ kHz.

În Fig. 2 se reprezintă liniile câmpului de viteze, din interiorul vasului de lucru, pentru diferite momente de timp, la $t = 15$ s, respectiv $t = 90$ s.

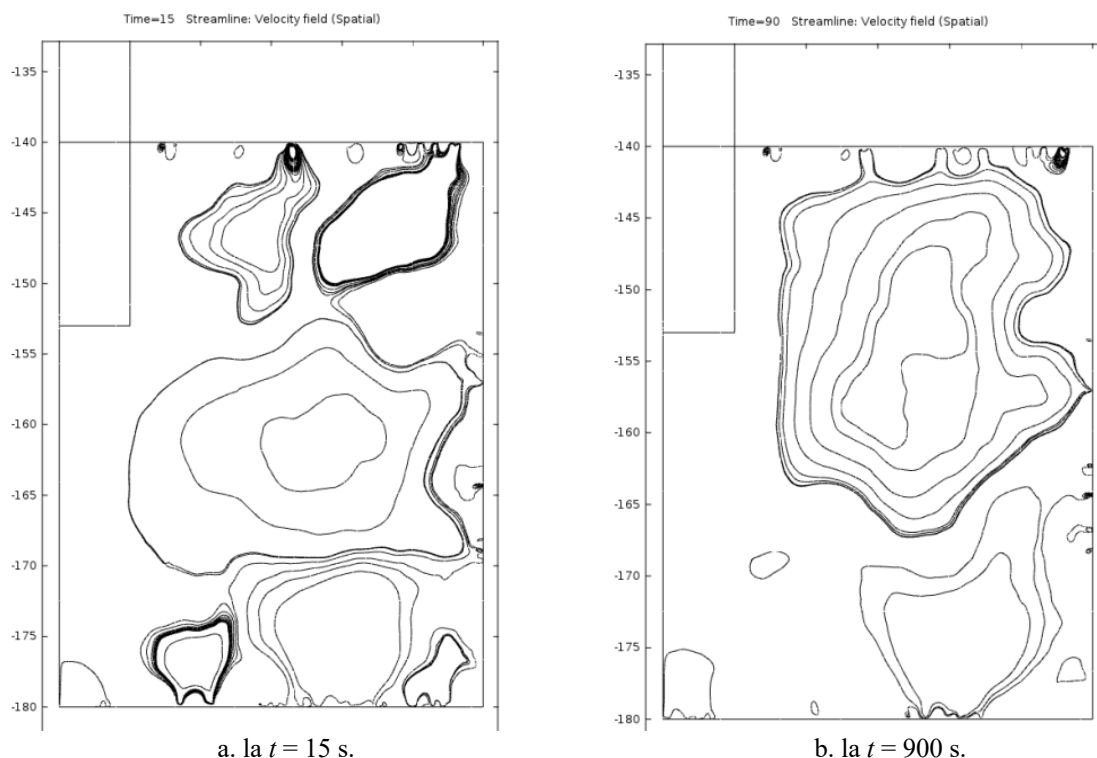


Fig. 2. Liniile câmpului de viteze a fluidului din vasul de lucru, la diferite momente de timp.

Se observă că valoarea timpului final al procesului de extracție nu este suficient de mare pentru a permite stabilizarea și atingerea regimului staționar pentru problema de curgere Navier-Stokes a fluidului din vasul de lucru.

5. CONCLUZII

Se analizează numeric un motor liniar piezoelectric de ultrasunet, cu simetrie axială, având o carcasă de amplificare a undei de US, respectiv un sonotrod pentru focalizarea acesteia. Se consideră un vas de lucru, conținând un amestec de apă, solvent și suspensie de frunze de lavandă, în care se imersează dispozitivul. Sunt considerate două probleme – problema interacțiunii câmp acustic – câmp piezoelectric, rezolvată în regim armonic permanent, respectiv problema de curgere Navier-Stokes, în regim dinamic. Mișcarea fluidului din vasul de lucru este dată de intensitatea sunetului US.

Se constată că stabilizarea fluidului din vas nu este atinsă pentru timpul considerat. Astfel, timpul de extracție trebuie mărit. De asemenea, extracția propriu-zisă a uleiului esențial nu este considerată în această lucrare.

Confirmați

Simulările numerice s-au realizat în Laboratorul de Conversia Energiei și Surse din cadrul Facultății de Inginerie Electrică a Universității Naționale de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București. Primul autor mulțumește sprijinului oferit de grantul de cercetare din Programul Național de Cercetare al Asociației Naționale a Universităților Tehnice – GNAC ARUT 2023.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

BIBLIOGRAFIE

1. Y. Veli, F. Săftoiu, A.M. Morega, *Interaction of ultrasonic and heat flow in essential oil extraction – a Constructal Glimpse*, CONSTRUCTAL LAW CONFERENCE | DESIGN IN NATURE AND EVOLUTION, **2024**, *1*, pp. 175-178, 2024.
2. Y. Veli, F. Săftoiu, A.M. Morega, *ANALIZA NUMERICĂ A UNUI TRADUCTOR PIEZOELECTRIC DE ULTRASUNET*, APME, **19**, *1*, 2023.
3. F. Turrini, M. Beruto, L. Mela, P. Curir, G. Triglia, R. Boggia, P. Zunin, F. Monroy, *Ultrasound-Assisted Extraction of Lavender (*Lavandula angustifolia* Miller, Cultivar Rosa) Solid By-Products Remaining after the Distillation of the Essential Oil*, Appl. Sci., **11**, *12*, 5495, 2021.
4. R. Kowalski, M. Gagoś, G. Kowalska, U. Pankiewicz, M. Sujka, A. Mazurek, A. Nawrocka, *Effects of Ultrasound Technique on the Composition of Different Essential Oils.*, J Anal Methods Chem., 2019.
5. Adam Brotchie, Franz Grieser, Muthupandian Ashokkumar, *Effect of Power and Frequency on Bubble-Size Distributions in Acoustic Cavitation*, Physical Review Letters, **102**, *8*, PubMed, 2009.
6. ***Comsol Multiphysics, v.4.2a.