

DEZVOLTAREA CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ A POMPELOR CENTRIFUGE PRIN OPTIMIZAREA MULTIPARAMETRICĂ ȘI SIMULĂRILE CFD

Andrei PETCO

Universitatea Tehnică a Moldovei

Abstract: În lucrare este descrisă situația actuală a industriei de producere a pompelor în Republica Moldova, precum și căile de creștere a eficienței energetice - condiție primordială a sporirii competitivității pompelor centrifuge autohtone. Direcția de soluționarea acestei probleme este combinarea proiectării asistate de calculator cu aplicarea optimizării multiparametrice și a simulărilor CFD.

Cuvinte cheie: pompe centrifuge, eficiență energetică, optimizare multiparametrică, turbulență, procese cavitaționale, CFD.

Introducere

Formarea sectorului industrial modern al Republicii Moldova a demarat în perioada postbelică și s-a caracterizat prin integrarea totală a industriei locale în complexul unitar al economiei fostei URSS [1]. În anii 50 a fost luată decizia de creare a unui centru de producere a pompelor pe teritoriul RSSM. În 1958 a început producția pompelor centrifuge submersibile[6], iar din 1961 a început producția pompelor centrifuge ermetice[4] la Uzina de pompe din Chișinău.

În prezent pe teritoriul Republicii Moldova activează 6 întreprinderi care produc pompe centrifuge, printre care: CRIS Hermetic Pumps, MoldovaHidromas, Hidrotehnica, Hidropompa ș.a., iar pompele produse de aceste întreprinderi cu un nomenclator de aproximativ 150 de modele sunt exportate în peste 60 de țări.

Totodată trebuie de menționat ca spectrul de pompe proiectate și produse în RM este suficient de larg, incluzând:

- pompe ermetice care permit ermetizarea hidraulică garantată a sistemelor în care sunt instalate, destinate pompării lichidelor chimic active (agresive, toxice, poluante), vaporii cărora pot forma amestecuri nocive sau explozive, fiind utilizate în industria chimică, petrolieră, atomică, farmaceutică, alimentară, militară etc.;
- pompe submersibile destinate pentru sistemele de alimentare cu apă;
- pompe centrifuge specializate pentru sistemele de canalizare;
- pompe centrifuge pentru pomparea uleiurilor în transformatoare electrice;
- pompe centrifuge pentru cu destinația specială (de exemplu din domeniu militar) ș.a.

Structura exportului pe parcursul anilor nu s-a schimbat semnificativ, majoritatea exportului revenind țărilor din cadrul Comunității Statelor Independente (CSI) datorita faptului ca pompele autohtone au următoarele avantaje:

- sunt tradițional binecunoscute de piața CSI;
- satisfac consumatorii atât din punct de vedere al parametrilor de calitate, cât și al raportului ”preț-calitate”.

În ultimul deceniu s-a produs o scădere a exportului datorită următorilor factori:

- criză economică globală din 2008-2009;
- recesia economică (2014-prezent) din Rusia (și din alte țări ale CSI);
- creșterii prețului energiei electrice pe teritoriul CSI [2].

Din fig.1 putem observa că, o cădere bruscă a producerii pompelor în anii 2008-2009 și micșorarea producerii din anii 2013-2015 (minim fiind atins în anul 2015) grație factorilor menționați mai sus .

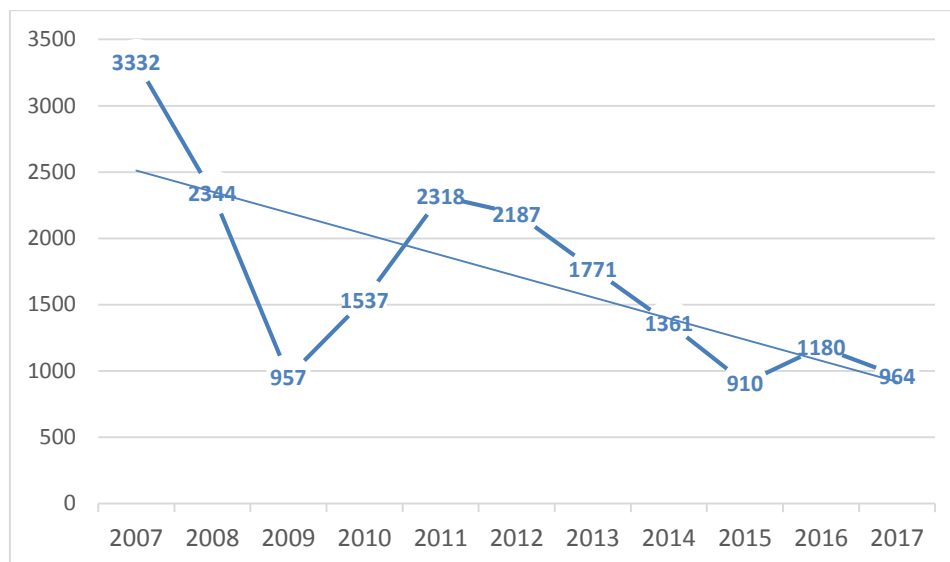


Fig.1. Producerea pompelor centrifuge, a altor pompe pentru lichide sau elevatoare de lichide în Republica Moldova, buc. [3]

1. Starea actuală a cercetării-dezvoltării pompelor centrifuge

În a doua jumătate a secolului trecut ingineri-proiectanți recurgeau la metode intuitive de optimizare, bazate pe modele matematice simplificate și pe experiența proprie, proiectarea fiind redusă la un număr mare de iterații experimentale cu erori și influențe legate de factorul uman, precum și cu dificultăți de optimizare multicriterială.

În ultimul deceniu se atestă o tendință clară de reducere a volumului producerii și vânzării pompelor. Situația poate fi redresată prin modernizarea constructiv-funcțională a pompelor proiectate și produse în RM ținând cont de îmbunătățirea următorilor factori:

- majorarea eficienței energetice a pompelor, inclusiv mărirea randamentului lor, acest factor fiind foarte important pentru pătrunderea pe piața UE (Strategia 2020 a Uniunii Europene stipulează creșterea cu 20% a eficienței energetice până în anul 2020 - obiectivul 20/20/20) [5];
- extinderea intervalului de lucru (curbelor de performanță Q-H);
- micșorarea presiunii minime necesare în aspirație pentru evitarea cavității (NPSHr);
- micșorarea uzurii hidraulice provocate de efectele cavității;
- micșorarea uzurii abrazive ca urmare a acțiunii impurităților din lichidul pompat;
- echilibrarea eficientă a forțelor axiale;
- micșorarea gradului de solicitare a motorului electric;
- creșterea fiabilității;
- creșterea duratei de exploatare etc.

Procesul de optimizare a geometriei organelor de lucru a pompei centrifuge, poate fi convențional divizat în două aspecte – moduri de rezolvare:

- crearea geometriei optimizate a organelor de lucru: rotorului (impelerului), corpului pompei, inducerului etc.;
- alegerea geometriei optimale din mai multe geometrii supuse încercărilor.

Cercetările în domeniul privind modernizarea constructiv-funcțională ale pompelor centrifuge sunt actuale, reprezintă interes pentru economia națională, deoarece ponderea lor reprezintă aproximativ 20% din fabricarea de mașini și echipamente în Republica Moldova [1], iar factorul primordial pentru asigurarea competitivității pompelor pe piețele de desfacere a fost și rămâne majorarea eficienței energetice.

Progresul considerabil în domeniul tehnologiilor informaționale și a puterii de calcul din ultimii 30-40 ani a deschis noi posibilități în studiul fenomenelor fizice din sistemele complexe prin modelarea la calculator cu sisteme de calcul corespunzătoare. Capacitatea înaltă a sistemelor de calcul moderne de operare rapidă cu un volum mare de date permite simularea comportării sistemelor fizico-tehnice complexe la diferite scări de mărime și de timp, precum și repetarea simulărilor pentru mai multe valori ale parametrilor de intrare cu scopul identificării soluțiilor tehnice optime din punct de vedere inclusiv al eficienței [9].

Pe parcursul anilor, la bază cercetărilor în domeniul științelor aplicative și a celor fundamentale au stat două abordări: teoretică și experimentală, actualmente, datorită dezvoltării progresului tehnico-științific își ia amploare încă o abordare, cea computațională. Un exemplu convingător este cel al companiei aeronautice Boeing din SUA. Produsele Boeing se caracteriză printr-o durată întinsă a ciclului de cercetare - proiectare, conținând la fel și mai multe etape de elaborare și proiectare testări extensive în tunelul aerodinamic ceea ce a dus concomitent și la un cost ridicat a ciclului. Integrarea modelării, proiectării și a experimentului computațional i-a permis companiei Boeing să reducă esențial testările costisitoare, ceea ce a condus la economii în costuri și în timp [9]. Schimbarea raportului dintre cercetarea experimentală și cea computațională la compania BOEING este reprezentată în fig.2.

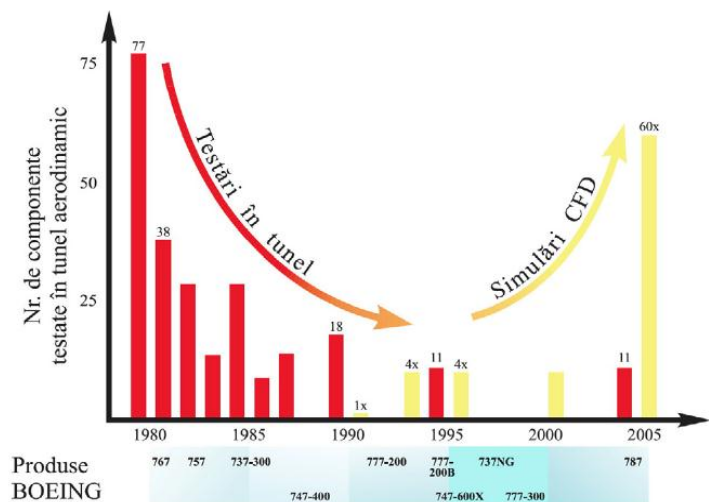


Fig.2. Evoluția simulărilor numerice CFD și a testărilor în tunelul aerodinamic efectuate de compania BOEING în perioada 1980 – 2005 [9]

Actualmente, rezolvarea problemei majorării eficienței energetice poate fi efectuată prin cuplarea metodelor de simulare la calculator din cadrul Dinamicii Computaționale a Fluidului (Computational Fluid Dynamics – CFD) și a optimizării multiparametrice. Simularea matematică a curgerii fluidului în cazul pompelor centrifuge reprezintă o problemă științifică complexă de hidromecanică, bazată de obicei pe ecuațiile Navier-Stokes. Utilizarea modelelor matematice moderne și a simulărilor complexe CFD (fig.3) pentru fenomenele de curgere turbulentă la fluidului cu efecte de cavitație permit o reducere substanțială a timpului ciclului de cercetare - proiectare – fabricație. O bună parte a cercetărilor experimentale poate fi înlocuită cu simulări computerizate ale proceselor pentru determinarea intervalului de parametri cu impact negativ asupra eficienței energetice.

Procesul de optimizare poate fi descris sub forma unui algoritmul (fig.3):

1. Formularea problemei, selectarea parametrilor (criteriilor) de optimizare (cum ar fi: sporirea randamentul, micșorarea NSPH, reducerea nivelului vibrațiile și zgomot sau de exemplu micșorarea gradului de solicitare a motorului electric etc.),
2. Aplicarea algoritmului de optimizare.
3. Crearea modelului 3D.
4. Generarea rețelei de elemente finite, în baza căreia va fi efectuată simularea CFD.
5. Efectuarea experimentului computațional în baza Dinamicii Computaționale a Fluidului (CFD), menit pentru simularea proceselor de curgere în organele de lucru a pompei centrifuge.
6. Efectuarea postprocesării, analiza datelor primite.

În cazul atingerii criteriilor de optimizare modelul este selectat și examinat la satisfacerea condițiilor constructive și tehnologice (posibilitatea fabricării, satisfacerea condițiilor de rezistență și rigiditate), în caz contrar se recurge la o nouă iterație a ciclului.

La finele procesului de optimizare se execută o mostră sau un prototip în baza căreia se execută cercetările experimentale pentru validarea rezultatelor optimizării, după care se efectuează implementarea în serie a pompei modernizate.

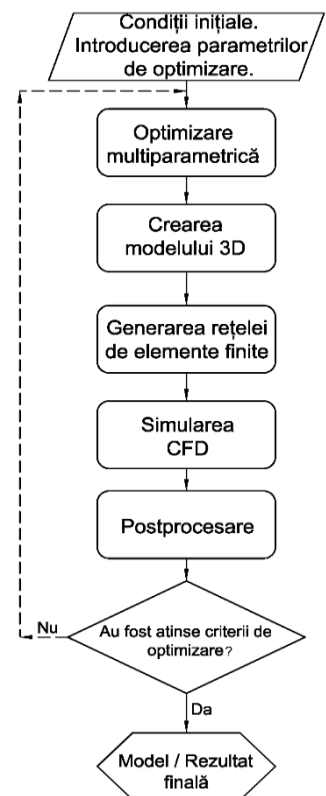


Fig.3. Schema optimizării

2. Căile de majorare a eficienței energetice a pompelor centrifuge

În prezent o răspândire largă au obținut diverse sisteme CAD de Proiectarea Asistată de Calculator (Computer-aided Design - CAD) destinate proiectării/optimizării organelor de lucru, cum ar fi, de exemplu:

BladeGen-ANSYS, BladeModeler, CFTurbo, Numeca, CAESES etc. De asemenea, se atestă o implicare tot mai largă a metodelor bazate pe Rețele Neuronale Artificiale (Artificial Neural Network - ANN) [7].

Cele mai frecvent folosite metode pentru optimizarea geometriei organelor de lucru a pompelor sunt [7]:

- ✓ Algoritmul genetic - Genetic Algorithm (GA),
- ✓ Algoritmul evoluționar - Evolutionary Algorithm (EA),
- ✓ Fuzzy Logic,
- ✓ Kriging Model,
- ✓ Artificial Bee Colony Algorithm (ABC),
- ✓ Simulările Monte-Carlo etc.

Pentru selectarea geometriei optimale a suprafețelor organelor de lucru ale pompelor tot mai des se folosește Dinamica Computațională a Fluidului (Computational Fluid Dynamics – CFD) [7].

Trebuie menționate patru modele matematice pentru calculul numeric a curgerii fluidelor în pompe [8]:

1. Ecuația Laplace
2. Ecuațiile Euler
3. Ecuațiile Navier-Stokes
4. Ecuația Rayleigh-Plesset

Ecuația Laplace descrie fluxurile nevâscoase (potențiale) irotaționale:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} &= 0 \end{aligned}$$

Putem înlocui relația dintre potențial și viteză și ajungem la ecuația Laplace, care va avea forma:

$$\nabla^2 \cdot \varphi = 0 \quad (1)$$

Ecuațiile Euler descriu fluxurile nevâscoase rotaționale:

Ecuațiile lui Euler constituie un sistem de ecuații ce descriu mișcarea fluidelor fără viscozitate și reprezintă o consecință a conservării masei, momentului și energiei în cadrul *ecuațiilor Navier-Stokes*.

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \Delta u = -\nabla w + g \\ \nabla \cdot u = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Ecuațiile Navier-Stokes tratează fluxurile vâscoase rotative:

Ecuațiilor Navier-Stokes au luat naștere prin aplicarea legii a doua a lui Newton la mișcarea fluidelor împreună cu ipoteza că tensiunea fluidului este proporțională cu gradientul vitezei (fluid Newtonian), la care se adaugă gradientul presiunii.

Principiul de conservare a masei afirmă că în orice proces viteza de variație a masei, i.e. debitul masic, care intră într-un sistem dat este egală cu viteza de variație a masei care părăsește sistemul. Forma diferențială a ecuației de continuitate este:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \nabla(\rho u) = 0$$

unde: ρ este densitatea fluidului, u -viteza fluidului și t -denotă timpul. În cazul fluidelor incompresibile, ecuația va avea formă:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (3)$$

Din principiul conservării impulsului rezultă ecuațiile de mișcare incompresibile pentru un fluid newtonian, care în forma diferențială sunt:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + u \cdot \nabla u = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \cdot \Delta u \quad (4)$$

unde: p – presiunea, f – forța masică unitară, raportată la masă, τ – tensorul tensiunilor vâscoase, definit prin ecuația constructivă a fluidului newtonian:

$$\tau = 2\nu(S - \frac{1}{3}(\nabla \cdot u)I)$$

ν – viscozitatea cinematică, I - tensorul unitar de ordin doi, iar S este tensorul vitezelor de deformație:

$$S = 2\nu(\nabla u + \nabla u^T) \quad (5)$$

Partea stângă a ecuației (4) reprezintă forțele de inerție unitare, iar termenii din partea dreaptă reprezintă forțele masice, forțele de presiune și, respectiv, forțele de frecare vâscoase.

Sistemul de ecuații Navier-Stokes (3) și (4) reprezintă un sistemul nelinier de ecuații cu derivate parțiale, faptul care se datorează termenul de inerție $u \cdot \nabla u$. Acest termen nelinier introduce interacțiuni complexe între structurile de diferite scări din mișcarea fluidului, fiind considerat sursa primordială a turbulenței. Neliniaritatea poate deveni relativ slabă, dacă forțele de inerție, care au rol destabilizator, sunt mici în raport cu forțele de frecare. În acest caz, ecuațiile Navier-Stokes pot fi rezolvate exact sau integrate numeric fără ipoteze simplificatoare suplimentare. În cazul general, soluționarea ecuațiilor Navier-Stokes este extrem de dificilă. La momentul actual, a fost demonstrată doar existența soluțiilor slabe, iar prezența soluțiilor tari fiind valabilă doar pentru intervale de timp mici. Prin urmare, diverse simplificări sunt considerate pentru a facilita găsirea soluțiilor, dacă nu exacte, cel puțin aproximative. Trebuie de menționat că în cazul simulării curgerii fluidelor prin organele de lucru ale pompei, ecuațiile Navier-Stokes sunt simplificate prin adoptarea unei serii de ipoteze simplificatoare: tratarea fluidului ca fluid newtonian, la o curgere incompresibilă, izotermă cu o viscozitate dinamică a fluidului constantă. [9]

Modelul ecuațiilor Navier-Stokes mediate după Reynolds (RANS) reprezintă, principalul model de calcul al curgerilor turbulente. Aplicarea medierii ecuațiilor Navier-Stokes necesită introducerea unor termeni suplimentari care sunt interpretați ca tensiuni aparente și fluxuri termice aparente asociate cu mișcarea turbulentă, fiind formulați în dependență de parametrii medii prin intermediul modelelor de turbulență care sunt necesare pentru închiderea sistemului de ecuații mediate Reynolds. [9]

Modelele de turbulență introduc ipoteze suplimentare, care, de regula, nu mai constituie o reflectare strictă a principiilor generale de conservare. Una din aceste ipoteze fiind: aproximația liniară Boussinesq $\tau_{ij}^R = \nu_T \cdot S_i$, care descrie dependența liniară a tensorului Reynolds τ_{ij}^R și a tensorului vitezelor de deformație S_i , atunci ecuațiile (3) și (4), pot fi reformulate ca :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu - \nu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

Modelele de turbulență folosite cel mai frecvent la simularea curgerii fluidelor în organele de lucru a pompei sunt [9]:

- *modelul k-ε*, format din două ecuații: ecuația pentru energia cinetică turbulentă k și ecuația ratei de disipare a energiei cinetice turbulente ϵ .
- *modelul k-ω*, ce implică rezolvarea ecuațiilor de transport al energiei cinetice turbulente k și al ratei specifice de disipare ω .
- *modelul k-ω SST (Shear Stress Transport)*, fiind o combinație a modelului $k-\omega$ cu modelul $k-\epsilon$.

Modelul *SST* este cel mai frecvent folosit model de simulare a turbulenței datorită îmbinării concomitente ale punctelor forte ale modelelor $k-\omega$ (descrierea curgerii în apropierea pereților) și $k-\epsilon$ (descrierea fluxul liber ale fluidelor).

Se poate menționat că modelul RANS nu este unicul model folosit pentru simularea fenomenului de turbulență, putem indica : *Simularea Vârtejurilor Mari (Large Eddy Simulation – LES)* care descrie fenomenul turbulenței ca suma a vârtejurilor mari descriși la nivel de rețea de discretizare și a vârtejurilor mici descrise de modele de turbulență semiempirice, *Simularea Vârtejurilor Detașate (Detached Eddy Simulation – DES)*, metoda hibridă dintre RANS și LES și *Simularea Numerică Directă (Direct Numerical Simulation – DNS)* care calculează direct toate aspectele ale turbulenței, fără a face nici o ipoteză empirică. În simularea curgerii în organele de lucru a pompelor centrifuge cel mai des se folosește metoda RANS, fiind optimal din punct de vedere a efortului computațional și adecvată scopurilor din industria producerii pompelor, cum ar fi argumentarea și optimizarea parametrilor geometrici și funcționali ai pompelor.

Ecuația Rayleigh–Plesset se folosește pentru modelarea procesului de cavitație:

Ecuația Rayleigh-Plesset derivă din ecuațiile lui Navier-Stokes, reprezintă o ecuație diferențială care guvernează dinamica unui bule sferice (formate în urma procesului de cavitație în interiorul pompei) într-un fluid incompresibil.

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4\nu}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\gamma}{\rho_L R} + \frac{\Delta P(t)}{\rho_L} = 0 \quad (8)$$

unde: ρ_L este densitatea lichidului, $R(t)$ - raza bulei, ν - vâscozitate cinematică a lichidului, γ fiind tensiunea superficială dintre bulă și lichid, $\Delta P(t) = P_\infty(t) - P_B(t)$, unde $P_B(t)$ - presiunea în bulă, iar $P_\infty(t)$ - presiunea lichidului.

Curgerea fluidului este descrisă prin ecuații diferențiale în derivate parțiale care nu pot fi rezolvate analitic în cazul general. Prin divizarea unui domeniu de flux complex într-o multitudine de celule mici (elemente finite - în cazul Metodei Elementelor Finite (Finite Element Method – FEM), volume de control (finite) - în cazul Metodei Volumelor Finite (Finite Volume Method – FVM), aceste ecuații pot fi rezolvate într-un mod aproximativ prin metode numerice. În simularea numerică a proceselor de curgere a fluidelor în organele de lucru a pompei, de obicei, ca metodă se utilizează Metoda Elementelor Finite sau o combinație dintre Metoda Elementelor Finite și Metoda Volumelor Finite.

Programele CFD (Ansys CFX, Ansys Fluent, STAR-CCM+, Solidworks Simulation, Autodesk CFD, Numeca, NX Flow, Comsol, OpenFOAM) pot fi aplicate pentru:

1. simularea și vizualizarea proceselor de turbulență, utilizând ecuațiile Navier-Stokes;
2. calculul forțelor hidraulice;
3. optimizarea în timp real a geometriei în baza calculului efectuat;
4. calculul curgerii fluidului multifazic;
5. simularea și vizualizarea proceselor de cavitație;
6. integrarea modulelor CFD cu alte module pentru, de exemplu, optimizarea topologică în funcție de rezistența și rigiditatea pieselor componente ale pompelor, cu scopul micșorării consumului specific a materialelor, care la fel reprezintă o caracteristică de eficiență energetică etc.

Concluzii

Curgerea fluidului în pompele centrifuge reprezintă un fenomen complex, fapt ce sporește dificultatea proiectării organelor de lucru, astfel încât în varianta clasică s-a recurs preponderent la proiectarea în baza datelor empirice obținute din cercetările experimentale complexe.

În prezent utilizarea proiectării asistate de calculator cu optimizarea multiparametrică și a metodologiei Dinamicii Computaționale a Fluidului (Computational Fluid Dynamics – CFD) permite proiectarea geometriei optime a organelor de lucru, micșorarea cheltuielilor pentru cercetarea experimentală și reducerea timpului ciclului de cercetare - proiectare – fabricare.

Modernizarea pompelor centrifuge va duce la creșterea competitivității pompelor și ca rezultat la o creștere economică durabilă în ramură, la fel ca și la extinderea piețelor de desfacere a pompelor autohtone în conformitate cu obiectivul de bază al Strategiei de dezvoltare a industriei [1] - crearea unui sector industrial al economiei tehnologic avansat, scientointensiv, eficient și competitiv.

Bibliografie:

1. Hotărârea Nr. 1149 din 05.10.2006 cu privire la „Strategia de dezvoltare a industriei pe perioada până în anul 2015”. Monitorul Oficial Nr. 164-167, art Nr : 1243
2. Петров А.И., Ломакин В.О., Семенов С.Е. „Пути повышения энергоэффективности динамических насосов на основе современных компьютерных технологий.” Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 4. Disponibil: <http://engjournal.ru/catalog/machin/hydro/689.html>
3. Productia principalelor produse industriale pe Tipuri de produse și Ani. Disponibil: http://statbank.statistica.md/pxweb/pxweb/ro/40%20Statistica%20economica/40%20Statistica%20economica__14%20IND__IND030/IND030100.px/table/tableViewLayout1/?rxid=6077cf2e-0f7d-4717-a3c7-0724ec1b52b1
4. CRIS Hermetic Pumps Company Presentation, Product Overview Canned Motor Pumps. Disponibil: https://www.crispumps.com/sites/default/files/field/files/company_presentati_cris_hermetic_pumps_eng.pdf
5. Comunicare a Comisiei Europa 2020. O strategie europeană pentru o creștere inteligentă, ecologică și favorabilă incluziunii. Comisia Europeană, Bruxelles, 3.3.2010 COM(2010) 2020 final.
6. Hidropompa: Despre noi. Disponibil: <http://hidropompa.md/about-company?lang=ro>
7. Burak Koseoglu, Onur Yüksel „Energy Efficiency Optimization on Centrifugal Pumps: A Content Analysis.” Conference Paper: 1st International Congress on Ship and Marine Technology.
8. Johann F. Gülich. „Centrifugal Pumps.” Springer Heidelberg Dordrecht London New York DOI 10.1007/978-3-642-12824-0
9. Bostan V., Modele matematice în inginerie: Probleme de contact; Modelări și simulări numerice în aero-hidrodinamică, BonsOffices, Chișinău, 2014, 470p. ISBN 978-9975-80-831-6