



UNIVERSITATEA TEHNICA DE CONSTRUCTII BUCURESTI  
Bd. Lacul Tei 124 \* Sect. 2 \* RO-020396 \* Bucuresti - ROMANIA  
Tel.: +40-21-242.12.08, Tel./Fax: +40-21-242.07.81, www.utcb.ro  
Functionare conform HG nr. 223/2005, cod fiscal R13726642



# **CALCULUL SI COMBATEREA LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI – NORMATIV**

Faza 1 - Redactarea I

Contract nr. 443 din 22.12.2009

Beneficiar: M.D.R.T. ( M.D.R.L.)

Bucuresti, iunie 2010

# CALCULUL SI COMBATERICA LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI – NORMATIV

## 1. Obiect

1.1. Prezentul normativ privește totalitatea acțiunilor ce trebuie întreprinse și a măsurilor care trebuie luate în vederea combaterii sau limitării efectelor negative ale loviturii de berbec la conductele pentru transportul apei, când aceasta introduce solicitări care depășesc capacitatea portantă a subansamblelor mecanice (conducte, armături etc.) și / sau atunci când parametrii de funcționare ai mașinilor hidraulice ies în afara limitelor admise.

1.2. Normativul cuprinde *reguli obligatorii* pentru toate fazele realizării conductei și anume: calcul, proiectare, execuție, punere în funcțiune și exploatare. Obligatorietatea acestor reguli derivă din faptul că fenomenul necontrolat poate produce avarii majore ale conductelor și ale subansamblelor aferente. Pe lângă efectele economice nedorite, aceste avarii sunt de natură să pună în pericol viața oamenilor (în cazul conductelor supraterane, de ex. prin explozia conductelor) sau să afecteze grav mediul înconjurător (în cazul conductelor subterane, de ex. prin afectarea pânzei freatice, fie prin poluarea ei, fie prin ridicarea nivelului acesteia, mergând până la inițierea unor alunecări de teren).

1.3. Normativul mai cuprinde unele *recomandări*, în special la faza de proiectare, în ce privește alegerea măsurilor și mijloacelor de protecție în vederea limitării efectelor negative ale loviturii de berbec. Experiența acumulată până în prezent a dovedit că, pentru fiecare tip de aducțiune există anumite „strategii” de protecție, respectiv combinații de măsuri și mijloace de protecție care s-au dovedit optime atât din punct de vedere tehnic cât și economic. Normativul recomandă alegerea, după caz, a uneia sau alteia din aceste strategii.

## 2. Domeniul de aplicare

2.1. Normativul se aplică la toate conductele care transportă apă sub presiune (apă potabilă sau industrială, inclusiv pentru centrale hidro-electrice, apă de canalizare, apă pentru irigații sau de la desecări etc.), atât la cele în care curgerea se face gravitațional cât și la cele la care curgerea se face prin pompare. Normativul se poate aplica și la conductele care transportă alte lichide (de ex., produse petroliere).

2.2. Normativul se aplică indiferent de „rapiditatea” fenomenului de mișcare nepermanentă, respectiv atât în cazul „loviturii de berbec” care are caracter de mișcare rapid variabilă cât și în cazul „oscilației în masă” care are caracter de mișcare lent variabilă.

## 3. Definiții și terminologie

3.1. *Mișcarea nepermanentă* este aceea la care parametrii locali, care caracterizează starea de mișcare (presiuni, debite, viteze) într-un punct dat, variază în timp. Prin „*lovitură de berbec*” se înțelege fenomenul de mișcare nepermanentă care ia naștere într-o instalație hidraulică sub presiune ce transportă lichide, ca urmare a modificării bruște sau relativ rapide a regimului de funcționare, fiind caracterizată printr-o variație importantă și rapidă a parametrilor locali. Prin „*oscilație în masă*” se înțelege fenomenul de mișcare nepermanentă într-o instalație hidraulică, caracterizat printr-o variație lentă în timp a acestor parametri.

3.2. *Caracterul ondulatoriu* al “loviturii de berbec” rezidă în aceea că perturbațiile (variațiile parametrilor – presiune, debit etc.) se propagă în lungul conductelor cu o viteză finită denumită *viteză de propagare*. În acest caz, *viteza de propagare* se confundă cu *celeritatea* care reprezintă viteza de propagare a sunetului prin lichidul în repaus.

3.3. *Efectele negative* ale fenomenului se manifestă asupra:

- conductelor și armăturilor, fiind provocate de *variațiile de presiune* ce conduc, pe de o parte, la *presiuni maxime* ca urmare a *suprapresiunilor* (presiuni care le depășesc pe cele de regim normal de funcționare) și, pe de altă parte, la *presiuni minime* ca urmare a *subpresiunilor* (presiuni mai mici decât cele din regimul normal de funcționare); *presiunile minime* sunt periculoase doar în cazul în care produc *vacuum* și, eventual, *cavitație*.

- mașinilor hidraulice: la turbine, *ambalarea* acestora (depășirea peste limita admisă a turației); la turbopompe, inversarea sensului de curgere și a sensului de rotație (regim de frână sau de turbină, inclusiv *ambalare*).

3.4. *Modele de calcul*. În acest caz, există două modele de calcul:

- *Modelul fluidului compresibil* reprezintă modelul de calcul exact (care ține seama de compresibilitatea reală a lichidului și de deformabilitatea reală a conductelor); se aplică tuturor mișcărilor nepermanente, atât celor rapid cât și celor lent variabile.

- *Modelul fluidului incompresibil* reprezintă un model de calcul simplificat în care se face ipoteza că lichidul este incompresibil și conductele, perfect rigide; se aplică doar mișcărilor nepermanente lent variabile.

3.5. *Măsură de protecție*: Acțiune sau opțiune ce poate fi aplicată în toate fazele (proiectare, execuție, exploatare) și care are ca efect reducerea efectelor negative ale loviturii de berbec. *Mijloace (dispozitive) de protecție*: Anumite dispozitive sau ansambluri de dispozitive care, amplasate și dimensionate în mod adecvat, reduc amplitudinea oscilațiilor de presiune; principalele mijloace de protecție utilizate sunt: castelul de echilibru, hidroforul de protecție, ventilul de aer și supapa de suprapresiune.

3.6. *Strategie de protecție*: Combinația dintre unele *măsuri de protecție* și unele *mijloace de protecție*, într-o anumită amplasare spațială, care reprezintă, principial, soluția optimă din punct de vedere tehnico-economic pentru un anumit tip de instalație hidraulică, în genere dintre cele mai răspândite în practică (gravitaționale sau cu pompare, cu diferite destinații).

3.6. *Organ perturbator*: Dispozitiv sau ansamblu de dispozitive, plasat oriunde pe conductă sau pe un bransament al acesteia, la care se modifică parametrii de funcționare, producând o *manevră perturbatoare* ce generează *perturbația primară* care, la rândul ei, declanșează fenomenul de lovitură de berbec (de ex., vane, ventile, pompe, turbine; spargerea unei conducte și altele, care, de asemenea, declanșează un fenomen de lovitură de berbec sunt asimilate cu un organ perturbator);

3.7. *Timp de manevră*: Timpul în care *organul perturbator* își modifică parametrii de funcționare (de ex., timpul de închidere / deschidere al vanei, timpul de oprire / pornire al pompei). *Legea de manevră*: arată modul în care variază în timp parametrul care se modifică la *organul perturbator* (de ex., variația, de-a lungul *timpului de manevră*, a coeficientului pierderii de sarcina locale într-o vană care se închide);

3.8. Atunci când *organul perturbator* este o vană care *se închide automat* (de ex., la căderea alimentării cu energie electrică a unei stații de pompare), de regulă, la tipurile de vane fabricate în prezent se poate face o programare a *legii de închidere (de manevră)* astfel încât aceasta să se închidă cu *viteze de închidere* variabile în timp. Pentru cazul stațiilor de pompare, experiența arată că legile de închidere favorabile sunt cele „convexe” în care, la început, viteza de închidere e mare și scade apoi spre închiderea totală. În alte cazuri, forma optimă a *legii de închidere* depinde de la caz la caz. În toate cazurile, forma legii de închidere și timpul de închidere vor face obiectul cercetării pentru obținerea unei soluții optime, cu

efectele negative cele mai reduse. Pentru vanele cu închidere manuală, se va face ipoteza unei *legi de închidere liniare*, cu viteză constantă, aceeași pe toată durata *timpului de închidere*.

3.9. *Presiunile admisibile* reprezintă limitele între care pot să varieze presiunile pe conductă, în timpul regimului nepermanent. Există o *presiune maximă* admisibilă care depinde de capacitatea de rezistență mecanică a conductelor și / sau a armăturilor instalate pe conducte, inclusiv a unor mașini hidraulice, la rupere prin solicitarea de întindere sau forfecare, existând riscul unor explozii. Există și o *presiune minimă* admisibilă, în fapt un *vacuum maxim admis*, care e determinat de capacitatea de rezistență mecanică a conductelor și / sau a armăturilor instalate pe conducte, inclusiv a unor mașini hidraulice, la rupere sau deteriorare prin solicitarea de compresiune, respectiv pierderea stabilității elastice, existând riscul unor implozii (de ex., turtirea conductelor); *vacuumul maxim admis* poate fi determinat și de acțiunea sa asupra sistemelor de etanșare a conductelor, atunci când sunt confecționate din tuburi prefabricate îmbinate pe șantier, ducând la deteriorarea etanșeității conductei în ansamblu.

3.10. *Ambalarea* unei mașini hidraulice reprezintă depășirea *turației maxime admise*. La *turbine*, ambalarea se produce atunci când se anulează momentul rezistent opus de generatorul electric, ca urmare a acționării sistemelor electrice de protecție din stația de transformare. La *turbopompe*, ambalarea se produce atunci când se anulează momentul motor (de ex., atunci când „cade” alimentarea cu energie electrică a motoarelor) și nu există clapete de sens sau vane cu închidere automată sau acestea nu funcționează corect. În acest caz, inițial se inversează sensul de curgere (regim de frână) iar apoi se inversează și sensul de rotație iar turbopompa intră în regim de turbină.

#### 4. Calculul fenomenului

##### Metode de calcul și condiții generale de aplicare

4.1. Din punctul de vedere al calculului, nu se face nici o diferență între „lovitura de berbec” și „oscilația în masă”. Calculele se vor face folosind *doar metode exacte*, având la bază *modelul fluidului compresibil*, sub forma unor *programe de calcul electronic*, construite pe principiul *diferențelor finite*. Prin excepție, doar în faze de fezabilitate și de pre-fezabilitate și în mod justificat, se pot folosi metode aproximative dacă condițiile de aplicare a acestora se apropie de situația analizată în proiect.

4.2. *Programele de calcul electronic* utilizate trebuie să fie „validate” fie prin prestigiul firmei care le-a produs și / sau comercializat, fie prin semnătura privată a unui specialist recunoscut în domeniul hidraulicii.

4.3. Execuția (rularea) programului de calcul electronic precum și pregătirea datelor de intrare ale acestuia și interpretarea rezultatelor vor fi făcute de personal calificat, pregătit prin training de specialitate de către firma furnizoare a programului sau în departamente de hidraulică ale unor universități sau în alte instituții sau firme specializate în studii hidraulice cu experiență în domeniu.

4.4. Persoana sau persoanele care au efectuat calculele și au interpretat rezultatele răspund prin semnătură privată pentru corectitudinea calculelor, pentru concluziile trase și pentru recomandările făcute. Aceste persoane nu sunt însă responsabile pentru concluziile greșite care sunt rezultatul unor date de intrare eronate, furnizate ca atare de către beneficiarul lucrării.

## Scheme si ipoteze de calcul

### Scheme de calcul

4.5. In schema de calcul cu diferențe finite din programele electronice de calcul, la împărțirea conductei într-un număr de tronsoane despărțite prin noduri de calcul vor fi respectate următoarele reguli:

- timpul de propagare a undelor loviturii de berbec va fi aproximativ același pentru toate tronsoanele de calcul și, totodată, aproximativ egal cu pasul de calcul în timp; regula timpilor egali de propagare pentru unde se va respecta cu atât mai strict cu cât fenomenele sunt mai rapide;

- la fixarea numărului de tronsoane și plasarea nodurilor de calcul se va urmări ca punctele caracteristice ale profilului în lung al conductei (schimbări mari de pantă, puncte înalte, puncte joase, puncte de branșament etc.) să coincidă cu nodurile de calcul sau să fie așezate în apropierea lor;

- la rețele de conducte, fiecare nod al rețelei va fi un nod de calcul și, pentru a respecta regula timpilor egali de propagare, se vor plasa noduri de calcul intermediare pe artere;

4.6. *Pasul de calcul în timp* nu va putea fi mai mare decât **o optime** din *timpul de manevră*. Având în vedere că, în schemele cu diferențe finite din programele electronice de calcul, de regulă *pasul de calcul în timp* se alege ca valoare minimă a timpilor de propagare pe tronsoanele de calcul (condiția *Courant*), la nevoie se va mări în mod corespunzător numărul acestor tronsoane și respectiv al nodurilor de calcul.

4.7. Va fi exploatată la maximum oportunitatea pe care o oferă schemele de calcul cu diferențe finite astfel încât modelul de calcul să se apropie cât mai mult de instalația reală, astfel:

- pentru fiecare tronson de calcul se vor introduce valorile reale pentru diametrul interior, rugozitate sau coeficient de rugozitate și celeritate, *preluate din fișele tehnice de prezentare ale furnizorilor*; în mod excepțional, în lipsa unor informații certe, acestea vor fi evaluate cunoscând grosimea peretelui conductei împreună cu natura și modulul de elasticitate al materialului, folosind formulele clasice din literatura de specialitate; la interpretarea rezultatelor calculelor, se va avea în vedere, de asemenea, că fiecare tronson de calcul poate avea valori diferite pentru presiunile extreme (maxime sau minime) admisibile;

- pentru fiecare nod de calcul se vor introduce valorile reale ale cotelor geodezice (de regulă, cotă ax conductă), în conformitate cu profilul longitudinal real al conductei precum și valorile acelor parametri care caracterizează funcționarea unor dispozitive plasate în nodurile respective (vane, ventile, pompe, turbine etc.);

4.8. Dacă în nodul de calcul se află o *vană* sau un alt tip de *armatură*, în mod obligatoriu se va indica *coeficientul pierderii de sarcină*; dacă vana are și rol de *organ perturbator*, se va indica *legea de manevră*.

4.9. Dacă în nodul de calcul se află un *branșament*, în mod obligatoriu se va indica *consumul din nod* sau, după caz, *coeficientul pierderii de sarcină* al vanei de pe branșament; dacă *branșamentul* are și rol de *organ perturbator*, se va indica *legea de manevră*.

4.10. Dacă în nodul de calcul se află o *mașină hidraulică* (turbopompă sau turbină), în mod obligatoriu se va furniza *caracteristica generalizată* de funcționare  $H - Q - n$  (*înălțime - debit - turație*), în toate cadranele reprezentării  $H - Q$ . În mod excepțional, dacă nu se dispune de *caracteristica generalizată* de funcționare a mașinii hidraulice reale, se pot folosi *caracteristici generalizate adimensionale*, preluate din literatura de specialitate. Dacă *mașina hidraulică* are și rol de *organ perturbator* se va indica, în mod obligatoriu, valoarea reală a *momentului de*

*inertie* al tuturor părților rotative aflate în cuplaj (rotorul pompei / turbinei + apa din interiorul pompei / turbinei + rotorul motorului / generatorului electric + cuplaje mecanice).

4.11. Dacă în nodul de calcul se află un *mijloc (dispozitiv) de protecție*, în mod obligatoriu se vor indica valorile reale ale acelor parametri care au un rol determinant în efectul protectiv al acestuia, astfel (pentru mijloacele de protecție cele mai folosite):

- la *castele de echilibru și hidrofoare de protecție*, variația pe verticală a secțiunii orizontale;

- la *hidrofoarele de protecție*, volumul geometric și volumul inițial al pernei de aer;

- în cazul tuturor tipurilor de dispozitive de protecție, *rezistența hidraulică a branșamentului* la conducta protejată;

- în cazul *ventilelor de aer*, modulul rezistenței hidraulice în poziția „deschis” sau diagrama „pierdere de sarcină funcție de debitul de aer”;

- în cazul *supapelor de suprapresiune*, presiunea (calibrată) de deschidere a supapei și modulul rezistenței hidraulice în poziția „deschis” sau diagrama „pierdere de sarcină funcție de debitul de apă”;

4.12. Pentru calcule „de verificare”, toți parametrii menționați pentru tronsoane și noduri sunt cei reali, din situația existentă care face obiectul verificării. Pentru calcule „de dimensionare”, o parte dintre parametrii menționați, în special cei care se referă la mijloacele de protecție, fac obiectul „cercetării”, adică primesc valori, în variante succesive, până când, din aproape în aproape, se ajunge la o soluție de protecție care este optimă atât din punct de vedere tehnic cât și economic (presiunile se încadrează în limitele admise iar costul este minim).

#### Ipoteze de calcul

4.13. În ce privește *manevrele perturbatoare* care declanșează fenomenul de lovitură de berbec, în mod obligatoriu calculul le va lua în considerare pe acelea care au caracter accidental sau imprevizibil, neputând fi controlate și prevenite de personalul de exploatare, astfel:

- la aducțiunile gravitaționale având ca destinație alimentarea cu apă a unor obiective civile sau industriale, în mod obligatoriu se va lua în considerare închiderea vanei de la capătul aval (de la beneficiar); pentru aducțiunile foarte lungi, se va lua în considerare și închiderea vanelor de linie de pe traseul aducțiunii; de regulă, în aceste cazuri, în urma calculului se va recomanda un *timp minim de închidere* al acestor vane astfel încât presiunile să se înscrie în limitele admise, aceasta fiind, în fapt, și singura măsură de protecție recomandată; întrucât, în aceste cazuri, în fapt nu există personal calificat de exploatare și intervenția la vane poate fi făcută de persoane neavizate, proiectantul va lua măsurile specifice prin care încălcarea condiției de *timp minim de închidere* să nu fie posibilă;

- la aducțiunile gravitaționale având ca destinație alimentarea cu apă a turbinelor din centralele hidroelectrice, în mod obligatoriu se va lua în considerare închiderea rapidă (și automată) a vanei de la capătul aval (de la intrarea în turbine), menită să prevină ambalarea turbinelor;

- la aducțiunile cu pompare, în mod obligatoriu se va lua în considerare anularea bruscă a momentului motor primit de la motoarele electrice de antrenare a pompelor, ca urmare a întreruperii accidentale a alimentării cu energie electrică; se va lua în considerare ipoteza cea mai dezavantajoasă, în care toate pompele din stația de pompare erau în funcțiune la momentul căderii alimentării cu energie electrică;

- la aducțiunile cu pompare la care s-au prevăzut ca mijloace de protecție ventilele de aer și / sau hidrofoarele de protecție și la care pernele de aer introdus de către acestea în conducte devin, la rândul lor, mijloace de protecție (acționând ca niște hidrofoare suplimentare), calculul se va face

și în ipoteza opririi parțiale a stației de pompare, inclusiv oprirea unei singure pompe, pentru a evalua astfel situația când tamponul de aer introdus în conductă are un volum mai mic;

- la aducțiunile cu pompare prevăzute cu clapete de sens sau cu vane cu închidere automată la căderea alimentării cu energie electrică, în mod obligatoriu se va lua în considerare prezența acestora cu caracteristicile lor tehnice reale deoarece închiderea lor reprezintă surse suplimentare de perturbații, generatoare a unor fenomene suplimentare de lovitură de berbec;

- la toate tipurile de aducțiuni, în funcție de sensibilitatea mai mare a acestora la suprapresiuni sau la subpresiuni, se va alege combinația cea mai dezavantajoasă între nivelele piezometrice de la capetele aducțiunii (de exemplu, nivelele de aspirație și de refulare, în cazul aducțiunilor cu pompare);

- opțional, la aducțiunile cu pompare la care pompele sunt prevăzute fiecare, pe refulare, cu clapete de sens sau cu vane cu închidere automată și la care există riscul neînchiderii acestora, pentru a vedea care este efectul curgerii inverse, mai ales în cazul pompelor care nu rezistă timp îndelungat la turație inversă, se va examina și cazul când o pompă se oprește accidental, cu organul de închidere în poziție deschisă, iar restul pompelor rămân în stare de funcționare;

- opțional, la aducțiunile cu pompare prevăzute cu clapete de sens la care nu este sigură închiderea odată cu inversarea debitului, se va examina situația care rezultă pentru ansamblul instalației din închiderea bruscă a acestora, cu un decalaj de 0,5... 1 secunde față de momentul inversării debitului;

4.14. *Manevrele perturbatoare* executate în mod curent de personalul calificat de exploatare (pornire / oprire pompe / turbine, manevre de vane pentru reglajul debitului etc.) nu vor fi luate în considerare la calculul loviturii de berbec și alegerea măsurilor și mijloacelor de protecție. În schimb, pentru efectuarea acestor manevre vor fi concepute proceduri prin care să nu se afecteze negativ sistemul hidraulic; aceste proceduri vor fi înscrise în regulamentele de exploatare și vor fi respectate în mod obligatoriu de către personalul de exploatare.

#### Date de bază

4.15. Pentru stabilirea *coeficienților rezistențelor hidraulice* se vor folosi informațiile din fișele tehnice de prezentare ale furnizorilor (pentru conducte și armături); doar în cazul în care asemenea informații nu pot fi obținute, se vor folosi indicațiile conținute în manuale și îndreptare de calcule hidraulice. Pentru instalații importante, în care se folosesc dispozitive noi sau care nu pot fi asimilate cu cele existente în literatură, se vor face determinări experimentale.

4.16. *Presiunea de cavitație* (la care se produce ruperea coloanei de apă) se va lua *0,8 bari* pentru apa rece și altitudini joase (zona de câmpie și de deal). În zona de munte, aceasta se va calcula, ținând seama de variația presiunii cu altitudinea, cu formula:

$$H_{var} = 8,00 - \frac{z}{900} \text{ (m. c. a.)}$$

în care *z* este altitudinea în metri.

4.17. *Presiunile admisibile*, maximă și minimă (vacuumul maxim admis), se preiau din fișele tehnice de prezentare ale furnizorilor (pentru conducte și armături). Ca regulă generală, solicitările suplimentare date de lovitură de berbec vor fi considerate ca sarcini accidentale de scurtă durată.

4.18. Dacă nu se cunoaște presiunea maximă admisă și doar pentru conducte confecționate din material omogen, în special pentru cele cu pereți subțiri cum sunt cele din metal, presiunea maximă admisă poate fi calculată cu aproximație folosind formula cazanelor:

$$p_{max,ad} = 2 \cdot e \cdot \sigma_{ad} / D$$

unde

- $D$  este diametrul interior al conductei;
- $e$  este grosimea peretelui conductei;
- $\sigma_{ad}$  este efortul admisibil la rupere, la solicitarea de întindere, al materialului din care e confecționată conducta.

4.19. La conductele din oțel și din materiale plastice lipite sau sudate, la stabilirea presiunii maxime admisibile printr-un calcul de specialitate (de rezistența materialelor), avându-se în vedere natura accidentală și de scurtă durată a solicitării din lovitură de berbec, se admite o scădere a coeficientului de siguranță cu 5% până 15%, față de cel admis pentru sarcinile fundamentale, în raport de importanța lucrării.

4.20. La evaluarea *vacuumului maxim admis* în conducte și dacă aducțiunea e confecționată din tuburi prefabricate îmbinate pe șantier, se va ține seama de sistemul de etanșare folosit și de posibilitatea ca vacuumul să afecteze etanșeitatea aducțiunii.

4.21. Considerând faptul că, la construcția aducțiunilor, în practică, există riscul unor imperfecțiuni, mai ales atunci când acestea sunt pozate subteran, pentru a se evita deteriorarea calității apei prin aspirarea unor substanțe din exterior, se recomandă să nu se admită un vacuum mai mare de 2...3 m.c.a.

#### Etape de calcul. Corelarea cu fazele de proiectare. Conținutul calculelor.

4.22. Calculul și proiectarea dispozitivelor de protecție contra loviturii de berbec vor fi corelate cu proiectarea întregii instalații. La stabilirea dispoziției generale a instalației se va avea în vedere și comportarea ei în regim nepermanent: se va opta pentru acea dispoziție generală pentru care costul protecției la lovitură de berbec este cel mai redus (un exemplu curent în acest sens îl reprezintă forma profilului în lung al conductei care depinde de traseul ales).

4.23. Culegerea și stabilirea *datelor de bază* este esențială și determinantă pentru corectitudinea calculelor și viabilitatea practică a soluției de protecție; de aceea, trebuie făcută cu maximă rigurozitate. De regulă, datele de bază se vor obține direct de la furnizori (conducte, armături, ventile, mașini hidraulice etc.) care răspund pentru corectitudinea lor. Dacă datele de bază nu pot fi obținute din sursă directă sigură, acestea se pot aprecia din proiecte similare sau din literatura de specialitate dar, în acest caz, se vor alege valorile care conduc la situațiile cele mai dezavantajoase.

4.24. În *prima fază*, se execută *calculul inițial* care se efectuează pentru *instalația neprotejată*. Scopul acestui calcul este să decidă dacă este necesară protecția împotriva loviturii de berbec și, în caz afirmativ, care sunt efectele negative periculoase (suprapresiunile sau subpresiunile sau ambele sau depășirea turației mașinilor hidraulice ș.a.m.d.) și care sunt secțiunile cele mai afectate.

Tot în această fază se va studia posibilitatea luării unor *măsuri de protecție* care, de principiu, nu presupun investiții suplimentare ca în cazul *dispozitivelor de protecție*. De exemplu, în cazul când pe conductă sunt instalate vane cu închidere automată a căror lege de închidere poate fi programată (vane cu *viteza de închidere* variabilă de-a lungul  *timpului de închidere*), tot în această fază se va face un calcul de optimizare a legilor de închidere în sensul găsirii acelor legi care produc efectele negative cele mai reduse.

4.25. În *a doua fază*, se execută *calculul de dimensionare* care se efectuează în scopul alegerii și dimensionării *soluției de protecție* contra loviturii de berbec, constând în instalarea unor *dispozitive de protecție* care presupun investiții suplimentare. *Schemele de protecție* se stabilesc pe baza experienței acumulate și pot fi luate cu titlu informativ din

literatura de specialitate. Câteva recomandări se dau și în normativul de față, la *cap. 5*. Mai multe detalii, recomandări și indicații se găsesc în **ÎNDRUMĂTORUL** anexat prezentului normativ.

În cursul acestei etape, se vor examina una sau mai multe variante de scheme de protecție și se va face, prin încercări succesive, optimizarea lor constând în găsirea acelor parametri care caracterizează dispozitivele de protecție pentru care acestea asigură protecția conductei la un cost minim. După ce s-a stabilit soluția de protecție, dacă e cazul, se vor reconsidera legea și timpul de închidere al vanelor astfel ca să corespundă noilor condiții. Tot de la caz la caz, se vor stabili eventualele restricții în exploatare.

4.26. *Calcululele de verificare* constă în refacerea calcululelor atunci când intervin schimbări în datele de bază, fie în decursul procesului de proiectare fie la execuția lucrărilor, urmare a modificării unor parametri de bază ai instalației (ai conductei și echipamentelor sau ai dispozitivelor de protecție) față de situația inițială sau de cea recomandată. Se vor face calculule de verificare și atunci când rezultatele unor măsurători experimentale indică necesitatea stabilirii mai precise a unor date de bază. Calcululele de verificare se vor face înainte de darea în funcțiune și apoi, pe timpul exploatării, ori de câte ori se fac modificări în instalație, dacă acestea sunt de natură să influențeze fenomenul de lovitură de berbec.

#### Interpretarea și prezentarea rezultatelor calcululelor

4.27. *Interpretarea rezultatelor* calcululelor constă, în principal, în compararea presiunilor obținute prin calcul cu cele admisibile, astfel:

- dacă, în toate nodurile de calcul, presiunile obținute prin calcul sunt mai mici decât cele maxime admisibile atunci, la *calculul inițial* se va trage concluzia că nu sunt necesare măsuri și mijloace suplimentare de protecție iar în *calculul de dimensionare* și în cel de *verificare* se va trage concluzia că măsurile și mijloacele de protecție propuse sau existente sunt satisfăcătoare din punctul de vedere al *protecției la suprapresiuni*; în caz contrar, se va analiza o altă soluție de protecție sau, după caz, se vor modifica parametrii determinanți la soluția propusă sau existentă;

- dacă, în toate nodurile de calcul, presiunile obținute prin calcul sunt mai mari decât cele minime admisibile atunci, la *calculul inițial* se va trage concluzia că nu sunt necesare măsuri și mijloace suplimentare de protecție iar în *calculul de dimensionare* și în cel de *verificare* se va trage concluzia că măsurile și mijloacele de protecție propuse sau existente sunt satisfăcătoare din punctul de vedere al *protecției la subpresiuni*; în caz contrar, se va analiza o altă soluție de protecție sau, după caz, se vor modifica parametrii determinanți la soluția propusă sau existentă.

4.28. Dacă pe sistemul hidraulic sunt instalate mașini hidraulice, *interpretarea rezultatelor* va cuprinde și compararea *turațiilor maxime* obținute prin calcul cu cele admisibile.

4.29. *Prezentarea rezultatelor* calcululelor se va face sub forma unui studiu unitar, destinat acestei probleme și care va cuprinde toate elementele avute în vedere la calculul fenomenului, cu detaliile numerice aferente, astfel:

- *metoda de calcul*, respectiv programul de calcul folosit cu condițiile generale și specifice de aplicare;

- *schema de calcul*; în primul rând, discretizarea conductei în tronsoane de calcul delimitate de noduri de calcul și, apoi, precizările necesare privind „*dispozitivele*” plasate în nodurile de calcul;

- *datele de bază*, atât cele ale tronsoanelor cât și cele ale „*dispozitivelor*” plasate în nodurile de calcul;

- *ipotezele de calcul*, în primul rând cele referitoare la manevrele perturbatoare, generatoare ale fenomenului de lovitură de berbec;

- *conținutul calculelor* pe etape (în calculul inițial și în cel de dimensionare); în mod obligatoriu se vor prezenta numeric (tabelar) presiunile maxime și minime în toate nodurile de calcul, în fiecare dintre ipotezele analizate; opțional se pot face și reprezentări grafice sub forma unor linii piezometrice maxime și minime, pe profilul longitudinal al conductei;

- *interpretarea rezultatelor și prezentarea concluziilor*, care va conține în mod explicit și detaliat soluția de protecție recomandată, constând în măsuri și / sau mijloace de protecție; după caz, odată cu prezentarea soluției de protecție recomandate, se vor face și precizările necesare în ce privește alcătuirea constructivă a mijloacelor de protecție, pentru a obține o funcționare corectă și o eficacitate maximă a acestora; totodată, se vor face precizările necesare și în ce privește anumite prevederi ce trebuie introduse în regulamentul de exploatare pentru a avea, de asemenea, o funcționare corectă și o eficacitate maximă a protecției împotriva loviturii de berbec.

## **5. Alegerea măsurilor și a mijloacelor (dispozitivelor) de protecție**

5.1. Pentru alegerea soluțiilor de protecție și a dispozitivelor aferente nu se dau norme cu caracter obligatoriu. Soluția de protecție, constând în măsuri și mijloace (dispozitive) de protecție, trebuie să rezulte din parcurgerea etapelor indicate la *capitolul 4* și depinde de foarte mulți parametri; ca atare, ea este caracteristică fiecărei instalații concrete, neputându-se face generalizări.

5.2. Schema de protecție va fi corelată cu dispoziția de ansamblu a instalației hidraulice, folosind în mod judicios avantajele oferite de dispoziția generală sau modificând-o în sens convenabil, mai ales în ceea ce privește profilul în lung sau caracteristicile echipamentelor ale căror caracteristici au influență asupra apariției și desfășurării loviturii de berbec. La instalații importante se va da o justificare tehnico-economică a soluției.

5.3. În schemele de protecție vor fi folosite dispozitive cunoscute, alese în funcție de caracteristicile și avantajele fiecăruia; pot fi folosite și dispozitive noi, dar numai după o prealabilă verificare experimentală sau numai prin calcul, dacă există siguranța unui model matematic corect sau acoperitor.

5.4. Folosirea dispozitivelor care introduc aer în conducta protejată este interzisă în următoarele situații:

- dacă există posibilitatea ca aerul să fie evacuat prin turbine;
- dacă nu este asigurată circulația liberă a aerului, după caz către bazinul de refulare sau către rezervorul de alimentare, respectiv dacă pe traseu nu există ventile de aer sau derivații care să permită evacuarea aerului în atmosferă, comandate sau nu de vane.
- dacă evacuarea aerului în atmosferă se face cu dispozitive (vane, ventile etc.) care nu au rezistențe hidraulice suficient de mari pentru a nu produce șocuri hidraulice importante la evacuarea aerului; această condiție se aplică și bransamentelor castelelor de echilibru.

5.5. *Folosirea hidroforului de protecție* trebuie tratată cu deosebită atenție în sensul că între volumul geometric și volumul pernei de aer, pe de o parte, și rezistența hidraulică a bransamentului la conducta protejată, pe de alta parte, există *o singură combinație* care asigură eficacitatea hidroforului ca mijloc de protecție; această combinație se determină cu exactitate doar prin calcul și ea trebuie respectată cu rigurozitate în execuție; este interzisă instalarea hidrofoarelor de protecție fără un calcul prealabil, cu volume (oricât de mari) și rezistențe hidraulice luate la întâmplare întrucât este foarte probabil ca prezența lor, în aceste condiții, să producă mai mult rău decât dacă hidroforul n-ar fi fost instalat deloc.

5.6. Ca regulă generală, *hidroforul de protecție* trebuie să fie plasat în apropierea organului perturbator unde are eficacitatea maximă și unde, de regulă, există condiții pentru supravegherea și întreținerea acestuia (de exemplu, la ieșirea dintr-o stație de pompare sau în imediata apropiere a acesteia, funcție de situația din teren). Instalarea hidroforului în alte amplasamente trebuie să fie foarte bine justificată.

5.7. Experiența arată că, dacă *hidroforul de protecție* este folosit pentru atenuarea *suprapresiunilor*, atunci rezultă ca fiind optime rezistențe hidraulice mari ale bransamentului la conducta protejată și, în consecință, rezultă volume mici de hidrofor; din contră, dacă *hidroforul de protecție* este folosit pentru atenuarea *subpresiunilor*, atunci rezultă ca fiind optime rezistențe hidraulice mici ale bransamentului la conducta protejată și, respectiv, rezultă volume mari de hidrofor; atunci când rolul protector al hidroforului trebuie să se manifeste în ambele sensuri (hidroforul trebuie să asigure protecție atât la suprapresiuni cât și la subpresiuni), apare astfel o incompatibilitate care, tehnic, poate fi rezolvată în mai multe moduri, descrise în literatura de specialitate și care au, fiecare, avantaje și dezavantaje; pentru astfel de situații, *strategia de protecție* recomandată de normativ e descrisă la *art. 5.8.*

5.8. Pe baza cunoașterii din domeniu și, mai ales, în urma acumulării unei vaste experiențe, inclusiv la nivel național, în realizarea de aducțiuni de apă sub presiune, cu cele mai diverse destinații, s-au putut trage o serie de concluzii, *cu caracter de standardizare*, privind schemele de protecție cele mai avantajoase, respectiv cele care asigură un cost total minim al protecției împotriva efectelor negative ale loviturii de berbec. Acestea reprezintă adevărate *strategii de protecție* și constă în anumite combinații de măsuri și / sau dispozitive de protecție care oferă o eficacitate maximă în cazul anumitor tipuri de aducțiuni. Ca urmare, prezentul normativ face următoarele *recomandări*:

- la *aducțiunile gravitaționale* pentru alimentarea cu apă a unor *obiective civile sau industriale*, se recomandă, ca unică măsură de protecție, controlul timpului de închidere și, eventual, a legii de închidere a vanei de la capătul aval; doar în mod excepțional, pentru profile longitudinale ieșite din comun, cu puncte înalte proeminente sau cu zone foarte adânci, se pot adăuga, ca mijloace de protecție, ventilele de aer și, respectiv supapele de suprapresiune; aceeași recomandare se face la *aducțiunile gravitaționale* pentru alimentarea cu apă a unor *micro-hidrocentrale*;

- la *aducțiunile gravitaționale* pentru alimentarea cu apă a unor *hidrocentrale de mare putere* se recomandă schema clasică, descrisă în literatura de specialitate, constând în „aducțiune”, „castel de echilibru” și „conductă forțată” (detalii, în *INDRUMATORUL* anexat);

- la *aducțiunile cu pompare* care au *profile longitudinale convexe*, cu puncte înalte și / sau cu puncte proeminente de schimbare de pantă și care trebuie protejate doar la subpresiuni din cauza vacuumului avansat care se produce doar în aceste puncte, se recomandă, ca mijloace de protecție, doar folosirea ventilelor de aer, plasate în aceste puncte și, eventual, și în câteva puncte intermediare și / sau adiacente;

- la *aducțiunile cu pompare* care au *profile longitudinale concave*, fără puncte înalte și / sau fără puncte proeminente de schimbare de pantă și care trebuie protejate doar la subpresiuni din cauza vacuumului avansat care se produce pe o parte însemnată din lungimea conductei, se recomandă, ca mijloc de protecție, folosirea unui *hidrofor de protecție* plasat la ieșirea din stația de pompare; este posibil, în anumite situații, să fie necesare, în plus, și câteva ventile de aer plasate spre capătul aval al aducțiunii, către bazinul de refulare.

- la *aducțiunile cu pompare* care au *profile longitudinale concave*, cu puncte foarte adânci, care trebuie protejate doar la suprapresiunile care se produc în aceste puncte, se recomandă, ca mijloace de protecție, doar folosirea supapelor de suprapresiune, plasate în aceste puncte și, eventual, și în câteva puncte intermediare și / sau adiacente;

- la *aducțiunile cu pompă* care au *profile longitudinale concave*, fără puncte foarte adânci, care trebuie protejate doar la suprapresiunile care se produc însă pe o parte însemnată din lungimea conductei, se recomandă, ca mijloc de protecție, folosirea unui *hidrofor de protecție* plasat la ieșirea din stația de pompă;

- la *aducțiunile cu pompă* care trebuie protejate atât la suprapresiuni cât și la subpresiuni *strategia de protecție* recomandată este următoarea: a). la ieșirea din stația de pompă se instalează un *hidrofor de protecție* dimensionat ca să protejeze întreaga conductă doar împotriva suprapresiunilor; rezultă astfel un hidrofor de mici dimensiuni cu o rezistență mare de bransament care va atenua însă doar parțial subpresiunile și anume doar în apropierea stației de pompă; b). pentru atenuarea subpresiunilor pe toată lungimea aducțiunii, se instalează suplimentar, de regulă la distanțe mai mari de stația de pompă, un număr de ventile de aer, în puncte și cu caracteristici care se determină prin calcul, concomitent cu caracteristicile hidroforului;

## **6. Probe tehnologice și reguli de exploatare**

### Probe tehnologice

6.1. Probele tehnologice ale instalațiilor de protecție contra loviturii de berbec au drept scop să verifice buna funcționare a schemelor de protecție, înainte de intrarea în exploatare a instalației hidraulice. Operația constă în măsurarea valorilor presiunilor în diferite puncte ale conductelor protejate după efectuarea unor manevre care generează lovitura de berbec și, apoi, compararea lor cu valorile admisibile. Aceste operații se efectuează pe instalația executată, în timpul probelor de punere în funcțiune. Se vor efectua, în primul rând, acele manevre care au reprezentat ipotezele obligatorii luate în considerare la calculul loviturii de berbec.

6.2. Operațiile de verificare prin măsurători se vor efectua pentru toate instalațiile supuse loviturii de berbec; în acest scop, prin proiect, acestea vor fi prevăzute cu ștuțurile necesare pentru bransarea traductorilor de presiune, în conformitate cu procedurile corespunzătoare, concepute odată cu proiectul și făcând parte integrantă din acesta. Rezultatele vor fi consemnate în documentele de încheiere a probelor de punere în funcțiune sau în cele de recepție a lucrărilor.

6.3. Măsurătorile vor fi efectuate cu aparatura adecvată unor fenomene rapid variate, respectiv traductori de presiune cu inerție mică și aparatură electronică pentru achiziția de date în timp real, cu posibilități de stocare și prelucrare pe calculator. De preferință, în acest scop se va avea în vedere angajarea unor firme specializate și acreditate în măsurători hidraulice de acest tip.

6.4. Pentru instalații importante și instalații la care lovitura de berbec ridică probleme speciale (reglaje, dispozitive noi sau modificate), probele tehnologice se vor desfășura după un program special, stabilit de proiectant. Programul special va cuprinde:

- releveul instalației de protecție și al profilului în lungul conductei;
- comparația releveului cu proiectul și efectuarea unor calcule de verificare dacă există deosebiri față de proiect;
- verificarea montării și funcționării corecte a elementelor dispozitivelor de protecție;
- verificarea reglajului dispozitivelor de protecție (vane, supape de suprapresiune etc.);
- efectuarea de manevre generatoare ale loviturii de berbec, măsurarea caracteristicilor și compararea lor cu valorile admisibile și cu prevederile proiectului.

6.5. Manevrelor generatoare de lovitură de berbec se vor efectua după ce în prealabil s-a constatat că instalația este executată în bune condiții, cu respectarea prevederilor proiectului și că dispozitivele sunt reglate corect. Se va începe cu manevre care dau solicitări mici și, după verificarea lor și constatarea că sunt în concordanță cu calculele, se va trece treptat la manevre mai dure.

6.6. Măsurătorile se vor face în diferite puncte ale conductei și anume:

- lângă pompă sau lângă vană;
- lângă bransamentul dispozitivului de protecție;
- în alte puncte caracteristice ale conductei, care se stabilesc pe baza informațiilor furnizate de calculele de dimensionare.

6.7. În cursul manevrelor și măsurătorilor se va urmări vizual și se vor nota aspectele mai deosebite în funcționarea dispozitivelor de protecție (ventile de suprapresiune, hidrofoare, ventile de aer, castele de echilibru etc.), a organelor de reglaj sau de închidere (vane, clapete etc.) și / sau altor dispozitive.

6.8. Constatările și concluziile stabilite pe baza programului special de măsurători vor fi consemnate într-un referat care va cuprinde:

- descrierea instalației hidraulice și a schemei de protecție contra loviturii de berbec;
- descrierea probelor efectuate, cu indicarea rezultatelor măsurătorilor;
- descrierea funcționării instalației, aprecieri asupra comportării ei, recomandări pentru perfecționare (dacă e cazul) și indicații pentru exploatare care se vor înscrie în instrucțiunile de exploatare;
- concluzii asupra recepției, care vor fi afirmative dacă presiunile extreme se încadrează în limitele prevăzute de proiect și dacă în cursul manevrelor nu au apărut defecțiuni; în cazul concluziilor negative, se vor arăta cauzele și modalitatea de remediere.

Un exemplar din actul menționat se va păstra la organul de exploatare.

#### Reguli de exploatare

6.9. La instalațiile hidraulice sub presiune la care există dispozitive de protecție contra loviturii de berbec, în instrucțiunile de exploatare se va introduce un capitol privind protecția contra loviturii de berbec. Acest capitol va cuprinde:

- schița instalației hidraulice în ansamblul sau, inclusiv profilul în lung, cu toate detaliile și datele principale ale acesteia;
- descrierea schemei de protecție contra loviturii de berbec;
- descrierea funcționării schemei de protecție în diferite ipoteze care au fost avute în vedere la proiectare și indicarea defecțiunilor posibile care ar putea deranja funcționarea corectă a instalației de protecție; aici se vor arăta și parametrii la care trebuie să se afle sau să fie reglate diferitele dispozitive componente ale schemei de protecție contra loviturii de berbec;
- instrucțiuni privind controlul periodic, revizia și întreținerea instalației; se va prevedea probarea periodică a dispozitivelor a căror funcționare incorectă poate produce și / sau amplifica efectele negative ale loviturii de berbec.
- instrucțiuni privind procedurile care trebuie urmate și respectate în mod obligatoriu la operarea curentă a instalațiilor (de ex., la închiderea / deschiderea vanelor, oprirea / pornirea pompelor etc.) astfel încât să nu se producă efecte

negative suplimentare ale loviturii de berbec sau să nu fie amplificate cele existente.

6.10. Organele de exploatare au obligația de a face controalele și reviziile periodice indicate în instrucțiuni precum și lucrările de întreținere prevăzute. Ele sunt obligate să remedieze în cel mai scurt timp eventualele defecțiuni constatate în cursul probelor de control și al reviziilor.

## **7. Măsuri administrative**

7.1. Prevederile prezentului normativ sunt obligatorii pentru toate proiectele care au ca finalitate realizarea practică a unor conducte de transport lichide sub presiune, fie că sunt noi sau reabilite și indiferent care e denumirea pe care o poartă sau o va purta în viitor faza de proiectare în conformitate cu prevederile altor normative (proiect tehnic de execuție, detalii de execuție, detalii de proiectare etc.).

7.2. Pentru faze de proiectare de fezabilitate sau pre-fezabilitate, prevederile prezentului normativ sunt opționale dar se recomandă ca ele să fie, de asemenea, respectate deoarece aplicarea lor oferă garanția unor evaluări corecte, atât a soluțiilor tehnice cât și a elementelor de cost din cadrul analizelor cost-beneficiu.

7.3. Respectarea prevederilor prezentului normativ este asigurată de către verificatorii de proiect autorizați. Aceștia au obligația de a verifica existența calculului de lovitură de berbec în *Breviarul de calcule* și, pentru ansamblul proiectului, respectarea tuturor normelor obligatorii stipulate în prezentul normativ. În mod deosebit, se va verifica dacă proiectantul a redactat corect și în conformitate cu *normativul*, procedurile de punere în funcțiune (probele tehnologice) și regulamentele de exploatare. Dacă prevederile *normativului* nu sunt respectate, verificatorul nu va aproba proiectul. Verificatorul de proiect care încalcă prevederile acestui articol își pierde atestatul.



UNIVERSITATEA TEHNICA DE CONSTRUCTII BUCURESTI  
Bd. Lacul Tei 124 \* Sect. 2 \* RO-020396 \* Bucuresti - ROMANIA  
Tel.: +40-21-242.12.08, Tel./Fax: +40-21-242.07.81, www.utcb.ro  
Functionare conform HG nr. 223/2005, cod fiscal R13726642



# **INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC SI ALEGEREA MĂSURILOR OPTIME DE PROTECTIE**

**ANEXĂ LA NORMATIVUL  
„CALCULUL SI COMBATEREA LOVITURII DE BERBEC LA  
CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

Faza 1 - Redactarea I

Contract nr. 443 din 22.12.2009

Beneficiar: M.D.R.T. (M.D.R.L.)

Bucuresti, iunie 2010

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA  
MĂSURILOR OPTIME DE PROTECȚIE**

**CUPRINS**

1	Calculul mișcărilor nepermanente în conducte sub presiune .....	3
1.1	Ecuatii generale .....	3
1.2	Metode de calcul .....	4
1.2.1	Celeritatea .....	4
1.2.2	Unde directe și unde inverse.....	6
1.2.3	Relația lui Jukovski.....	6
1.2.4	Reflexia si refracția undelor .....	7
1.2.5	Metoda undelor fizice .....	8
1.2.6	Metoda undelor de calcul .....	8
2	Aspecte caracteristice ale desfășurării fenomenului .....	17
2.1	Aducțiunile gravitaționale pentru alimentarea cu apă de consum .....	17
2.2	Aducțiunile gravitaționale pentru alimentarea cu apă a centralelor hidroelectrice.....	19
2.3	Aducțiunile cu pompare .....	22
3	Dispozitive de protecție.....	27
3.1	Castelul de echilibru.....	27
3.2	Hidroforul de protecție.....	28
3.3	Ventilul de aer .....	32
3.4	Supapa de suprapresiune .....	33
3.5	Volanta adițională .....	33
3.6	Conducta de ocolire .....	33
4	LISTA NOTAȚIILOR .....	35
5	BIBLIOGRAFIE SELECTIVA .....	37
5.1	Autori străini (în ordine cronologică) .....	37
5.2	Autori români (în ordine cronologică).....	38

## **Introducere**

Prezentul îndrumător a fost elaborat de către Universitatea Tehnică de Construcții din București — Facultatea de Hidrotehnică, prin Catedra de Hidraulică și Protecția Mediului, cu ocazia elaborării Normativului „**Calculul si combaterea loviturii de berbec la conductele pentru transportul apei**” și are ca scop principal să servească drept material ajutător pentru personalul tehnic din proiectare, execuție sau exploatare care este confruntat cu problemele loviturii de berbec și care aplică acest normativ.

Conținutul lucrării este ordonat în trei capitole:

*Capitolul 1* cuprinde generalități privind mișcarea nepermanentă în conducte sub presiune și metode de calcul folosite. In acest capitol se dau, de asemenea, o serie de formule pentru evaluarea celerității în absența informațiilor directe de la furnizori.

*Capitolul 2* cuprinde aspecte caracteristice ale desfășurării fenomenului de lovitură de berbec pentru principalele tipuri de aducțiuni precum și soluțiile (strategiile) de protecție recomandate.

*Capitolul 3* cuprinde descrierea modului de acțiune al principalelor tipuri de dispozitive folosite ca mijloace de protecție împotriva efectelor negative ale loviturii de berbec precum și unele indicații privind calculul, alcătuirea constructivă, instalarea și exploatarea lor.

Întrucât atât metodele de calcul cât și mijloacele de protecție pot fi comune tuturor tipurilor de instalații, acestea s-au descris pe larg în legătură cu acele tipuri de instalații la care metodele sau soluțiile respective se aplică cu precădere, iar în cazul celorlalte tipuri de instalații s-au făcut trimiteri precum și o serie de precizări cu caracter particular.

Îndrumătorul este completat cu o listă de notații recomandabile pentru principalele mărimi care intervin in studiul problemelor de lovitură de berbec, o listă bibliografică cu titluri selectate ce poate fi consultată de către cei ce doresc să-și aprofundeze cunoștințele în acest domeniu, precum și un cuprins detaliat ce permite accesul rapid la paragraful care interesează la un moment dat.

# 1 Calculul mișcărilor nepermanente în conducte sub presiune

## 1.1 Ecuații generale

Regimul nepermanent de mișcare a fluidelor constituie un caz frecvent în funcționarea *instalațiilor hidraulice care transportă lichide sub presiune*. El apare ori de câte ori se schimbă regimul de mișcare, adică ori de câte ori au loc modificări ale condițiilor la limită ale curgerii, cum ar fi închiderea sau deschiderea unei vane, oprirea sau pornirea pompelor, eliminarea aerului, spargerea unei conducte etc.

Regimul nepermanent poate introduce solicitări importante ale sistemului. La mișcarea lichidelor în conducte, pot apărea suprapresiuni care să întrecă de câteva ori sau zeci de ori presiunea de regim și, de asemenea, depresiuni importante, în ambele cazuri putându-se ajunge la distrugerea instalației.

Modelul de calcul al regimului nepermanent în conducte sub presiune este, ca și în cazul regimului normal, permanent, *modelul curgerii unidimensionale* în care se consideră că pe toată secțiunea transversală, în toate punctele acesteia, viteza este aceeași și anume, egală cu viteza medie:

$$V = Q/A$$

unde  $Q$  este debitul iar  $A$  este aria secțiunii transversale.

Proprietatea lichidelor care este determinantă în desfășurarea fenomenelor de mișcare nepermanentă este *compresibilitatea*. Ea determină *caracterul ondulatoriu* al acestor mișcări iar ecuațiile care descriu cel mai exact mișcarea nepermanentă a lichidelor sunt identice cu *ecuațiile coardei vibrante* și anume:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(gH)}{\partial s} = 0$$
$$\frac{\partial(gH)}{\partial t} + c^2 \frac{\partial V}{\partial s} = 0$$

unde  $H$  este *cota piezometrică* iar  $c$  este *celeritatea*, adică viteza de deplasare, în lungul sistemului hidraulic, a perturbațiilor, conform definiției undelor.

Dacă se ține seama și de pierderile de sarcină, atunci ecuațiile capătă forma:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(gH)}{\partial s} = \mp gJ$$
$$\frac{\partial(gH)}{\partial t} + c^2 \frac{\partial V}{\partial s} = 0$$

unde  $J$  este *panta hidraulică*.

Aceste ecuații sunt valabile pentru toate mișcările nepermanente și sunt obligatorii, modelând corect din punct de vedere matematic fenomenele reale, atunci când acestea sunt *rapid variabile în timp*.

Cu cât mișcările sunt mai *lent variabile în timp*, cu atât caracterul ondulatoriu se reduce, mișcarea capătă din ce în ce mai mult un caracter de *oscilație în masă* iar compresibilitatea joacă un rol mai puțin important. La limită, pentru mișcări *foarte lent variabile în timp*, compresibilitatea se poate neglija și se ajunge la *modelul simplificat al*

*fluidului incompresibil* care poate fi, însă, folosit doar în acest caz, al mișcărilor *foarte lent variabile în timp*

Fenomenele de mișcare nepermanentă rapid variabile vor fi denumite în continuare „fenomene de *lovitură de berbec*” iar cele lent variabile vor fi denumite „mișcări de *oscilație în masă*”. Piese, instalațiile sau construcțiile care se prevăd special cu scopul de a controla lovitură de berbec vor fi numite „*dispozitive de protecție*”.

Există mai mulți factori care determină „rapiditatea” fenomenului, în primul rând viteza relativă cu care are loc modificarea condițiilor la limită (de ex., închiderea unei vane) dar și evoluția mișcării în funcție de dispozitivele existente pe conductă (de ex., castelul de echilibru sau hidroforul de protecție schimbă, prin reflexia undelor, caracterul rapid al mișcării într-unul lent).

Întrucât nu se poate stabili o delimitare clară între mișcările *rapid variabile* și cele *lent variabile* și nu se poate decide cu siguranță dacă modelul simplificat poate fi aplicat, se recomandă ca, în toate cazurile să se aplice doar *modelul exact al fluidului compresibil*.

## **1.2 Metode de calcul**

Fenomenele de lovitură de berbec au un caracter ondulatoriu. O modificare a condițiilor la limită, într-un punct oarecare al conductei, provoacă schimbări locale ale debitului și presiunii, schimbări care se transmit din aproape în aproape, cu viteză finită, numită *viteză de propagare*, pe seama elasticității lichidului și a materialului conductei, formând unde plane de debit și respectiv de presiune.

În cazul loviturii de berbec, *viteza de propagare* se confundă practic cu *celeritatea*, adică cu viteza de propagare în lichidul aflat în repaus.

Prin *perturbație* se va înțelege *variația* (creșterea sau descreșterea) de debit sau de presiune care se propagă.

Caracteristica principală a undelor de debit și de presiune este aceea că sunt *unde asociate* deoarece ele se formează și se propagă simultan, formând împreună *unda sonică*; între *unde asociate* există o relație bine determinată, cunoscută sub numele de *relația lui Jukovski*.

### **1.2.1 Celeritatea**

Viteza cu care se propagă undele asociate prin fluidul în repaus se numește *celeritate* și este egală cu viteza sunetului (viteza de propagare a micilor perturbații prin conductă).

Valoarea celerității este esențială pentru corectitudinea calculului de lovitură de berbec; de aceea, este necesar să se cunoască valoarea sa reală sau să se aprecieze o valoare cât mai apropiată de cea reală.

În acest sens, valorile cele mai corecte sunt cele obținute direct de la furnizorii conductelor care, la rândul lor, trebuie să le determine pe cale experimentală, apelând la laboratoare de specialitate.

În cazul când valoarea celerității nu se poate obține în acest fel, direct de la furnizori, aceasta se poate aprecia cu ajutorul formulei de mai jos care este, însă, valabilă doar

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

pentru conducte confecționate dintr-un material omogen (nu se aplică, de ex., la conducte din beton armat, din materiale compozite, stratificate etc.).

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + C_1 \frac{\varepsilon D}{E e}}}$$

Formula ține seama de elasticitatea fluidului dar și a peretelui conductei precum și de condițiile de rezemare ale acesteia.

In această relație, s-au făcut următoarele notații:

-  $\varepsilon$  este modulul de elasticitate al lichidului. Pentru apă  $\varepsilon = 2,1 \cdot 10^4 \text{ kgf/cm}^2 = 2,1 \cdot 9,81 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ ;

-  $\rho$  este densitatea lichidului. Pentru apă  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 = 101,9 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ ;

-  $E$  este modulul de elasticitate al materialului din care este confecționată conducta.

Pentru otel,  $E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2 = 2,1 \cdot 9,81 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$

Pentru fontă,  $E = 1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2 = 1,9,81 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$

Pentru beton,  $E \sim 2 \cdot 10^5 \text{ kgf/cm}^2 = 2,9,81 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Pentru azbociment,  $E = 2 \cdot 10^5 \text{ kgf/cm}^2 = 2,9,81 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

Pentru cauciuc,  $E = 20 \dots 60 \text{ kgf/cm}^2 = (20 \dots 60) \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

-  $D$  este diametrul interior al conductei;

-  $e$  este grosimea peretelui conductei;

-  $C_1$  este un coeficient care ține seama de grosimea peretelui conductei și de condițiile de rezemare ale acesteia, astfel:

- La conducte cu peretele subțire ( $D/e > 25$ ) și dacă sunt permise deplasările longitudinale:

$$C_1 = 1$$

- La conducte cu peretele subțire ( $D/e > 25$ ) la care deplasările longitudinale sunt împiedicate:

$$C_1 = 1 - \mu^2$$

- La conducte cu peretele gros ( $D/e < 25$ ) și dacă sunt permise deplasările longitudinale:

$$C_1 = \frac{2e}{D} (1 + \mu) + \frac{D}{D + e}$$

- La conducte cu peretele gros ( $D/e < 25$ ) și dacă deplasările longitudinale sunt împiedicate:

$$C_1 = \frac{2e}{D} (1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{D + e}$$

### 1.2.2 Unde directe și unde inverse

Clasificarea în „unde directe” și „unde inverse” este convențională și este importantă, mai ales, pentru aplicarea *formulelor de calcul* în cadrul *metodelor de calcul*.

*Criteriul de clasificare* îl constituie un *sens de parcurgere pozitiv* al conductei care se alege în mod *convențional*.

*Undele directe* sunt cele care se deplasează în sensul pozitiv iar *undele inverse* sunt cele care se deplasează în sensul negativ.

### 1.2.3 Relația lui Jukovski

*Relația dintre cele două unde asociate*, unda de presiune  $\Delta p = p_f - p_i$  și unda de debit  $\Delta Q = Q_f - Q_i$  este cunoscută sub numele de *relația lui Jukovski* și este următoarea:

$$\Delta p = \pm z \cdot \Delta Q$$

semnul „plus” fiind valabil pentru undele directe iar semnul „minus”, pentru undele inverse.

Relația lui Jukovski se mai folosește practic și sub forma:

$$\Delta H = \pm m \cdot \Delta Q$$

unde  $\Delta H = H_f - H_i$  este unda de *cotă piezometrică*.

În relațiile de mai sus, indicii  $f$  și  $i$  semnifică valori finale, respectiv, inițiale iar  $z$  și  $m$  se numesc „*rezistență de undă*” (prin analogie cu fenomenele din electricitate) având expresiile de mai jos:

$$z = \frac{\rho c}{A} ; m = \frac{c}{gA}$$

Relația lui Jukovski se mai folosește practic și pentru calculul variației de presiune care se produce la *închiderea bruscă a unei vane*, când poate fi folosită și sub forma

$$\Delta p = \pm \rho \cdot c \cdot \Delta V$$

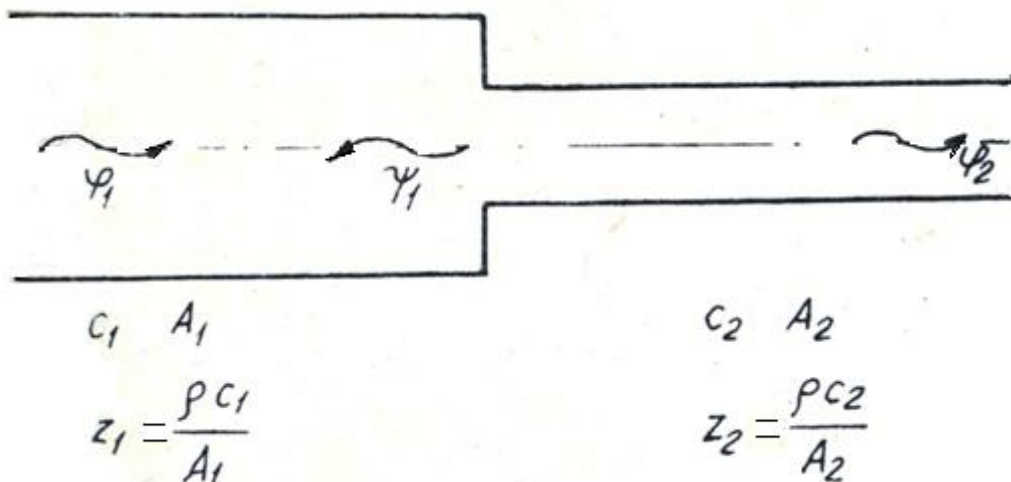
unde  $\Delta V = V_f - V_i$  este variația de viteză care se produce prin închiderea vanei.

În toate aceste relații:

- $\rho$  este densitatea lichidului;
- $c$  este celeritatea;
- $A$  este aria secțiunii transversale a conductei;
- $V$  este viteza medie pe secțiune;
- $Q$  este debitul;
- $p$  este presiunea;
- $H = z + p/\gamma$  este cota piezometrică;
- $z$  este cota ax conductă;
- $\gamma = \rho \cdot g$  este greutatea specifică;
- $g$  este accelerația gravitației.

### 1.2.4 Reflexia și refracția undelor

Ca în orice fenomen ondulatoriu, și în cazul undelor sonice se produc fenomenele de *reflexie* și de *refracție* atunci când se schimbă condițiile de propagare. De exemplu (fig. 1.1), o undă incidentă  $\varphi_1$  care se propagă pe o conductă cu rezistența de undă  $z_1$  și care ajunge într-un punct în care caracteristicile conductei se modifică brusc, rezistența de undă devenind  $z_2$ , suferă fenomenul de reflexie prin care se creează unda reflectată  $\psi_1$  și respectiv fenomenul de refracție prin care se creează unda refractată  $\varphi_2$ .



**Fig. 1.1. Reflexia și refracția undelor:**

$\varphi_1$  — unda incidentă ;  $\varphi_2$  — unda refractată ;  $\psi_1$  — unda reflectată

Fenomenele de reflexie și de refracție se cuantifică cu ajutorul următorilor coeficienți:

- Coeficientul de reflexie al unde de debit:

$$l_Q = \frac{\Delta Q_{\psi_1}}{\Delta Q_{\varphi_1}} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}$$

- Coeficientul de reflexie al unde de presiune:

$$l_p = \frac{\Delta p_{\psi_1}}{\Delta p_{\varphi_1}} = -\frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2}$$

- Coeficientul de refracție al unde de debit:

$$r_Q = \frac{\Delta Q_{\varphi_2}}{\Delta Q_{\varphi_1}} = \frac{2z_1}{z_1 + z_2}$$

- Coeficientul de refracție al unde de presiune

$$r_p = \frac{\Delta p_{\varphi_2}}{\Delta p_{\varphi_1}} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

În cazul când unda incidentă ajunge în dreptul unui rezervor de dimensiuni foarte mari ( $z_2=0$ ) sau în cazul când unda incidentă ajunge în dreptul unui capăt închis de conductă

( $z_2 = \infty$ ), are loc fenomenul de *reflexie totală*, când nu există unde refractate. Din formulele de mai sus, rezultă următorii coeficienți de reflexie totală pentru cele două cazuri frecvent întâlnite la capetele sistemelor hidraulice și anume:

- cazul unui rezervor de mari dimensiuni

$$l_Q = +1; l_p = -1;$$

- cazul unei conducte (vane) închise

$$l_Q = -1; l_p = +1;$$

Coeficientul de reflexie al undei de presiune pentru cazul unui rezervor de mari dimensiuni este, în mod particular, interesant întrucât el explică efectul protector al castelelor de echilibru și al hidrofoarelor de protecție. Valoarea  $l_p = -1$  semnifică faptul că o perturbație de presiune este reflectată cu semn schimbat și, suprapunându-se peste unda incidentă, îi anulează efectul inițial (o creștere de presiune se transformă, prin reflexie, într-o descreștere de presiune care anulează, cel puțin parțial, creșterea inițială, și invers).

### 1.2.5 Metoda undelor fizice

Cunoscând caracterul ondulatoriu al loviturii de berbec, această metodă calculează variația în timp a debitului și a presiunii prin compunerea diferitelor unde care se propagă pe conductă.

Metoda de calcul a undelor fizice constă în suprapunerea efectelor diferitelor unde care au trecut, de-a lungul timpului, printr-o secțiune a conductei. Formulele care dau cota piezometrică și debitul într-o secțiune oarecare sunt:

$$H = H_0 + \sum \Delta H = H_0 + \sum \Delta H_d + \sum \Delta H_i = H_0 + \sum m \cdot \Delta Q_d - \sum m \cdot \Delta Q_i$$

$$Q = Q_0 + \sum \Delta Q = Q_0 + \sum \Delta Q_d + \sum \Delta Q_i$$

în care  $H_0$  și  $Q_0$  sunt valori inițiale, iar  $\Delta H_d$ ,  $\Delta H_i$ ,  $\Delta Q_d$ ,  $\Delta Q_i$  sunt undele directe și inverse, de cotă piezometrică și de debit, care au trecut prin secțiune de la momentul inițial până la momentul de calcul.

Întrucât pe conductă se propagă atât undele produse direct de către schimbarea condițiilor la limită cât și cele reflectate sau refractate, numărul de unde care trebuie compuse este atât de mare încât metoda nu poate fi aplicată practic decât în cazuri extrem de simple; la instalații mai complicate, în fapt la cele reale, metoda poate fi folosită, eventual, numai pentru a studia primele momente de desfășurare ale fenomenului.

În concluzie, metoda undelor fizice poate fi folosită doar pentru calcule extrem de simple precum și în scop didactic, pentru înțelegerea desfășurării fenomenului de lovitură de berbec și a modului în care diferite dispozitive modifică caracterul loviturii de berbec.

### 1.2.6 Metoda undelor de calcul

Pornind de la metoda undelor fizice:

$$H = H_0 + \sum m \cdot \Delta Q_d - \sum m \cdot \Delta Q_i$$

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

$$Q = Q_0 + \sum \Delta Q_d + \sum \Delta Q_i$$

printr-un artificiu simplu (înmulțind a doua relație cu  $m$  și apoi, adunând-o și scăzând-o din prima, rezultă:

$$H + mQ = H_0 + mQ_0 + 2\sum m \cdot \Delta Q_d = f_a(s - ct)$$

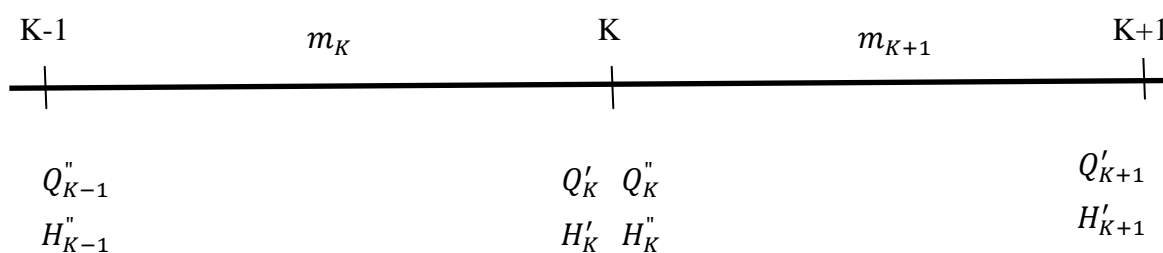
$$H - mQ = H_0 - mQ_0 - 2\sum m \cdot \Delta Q_i = f_i(s + ct)$$

Din aceste relații rezultă că:

- expresia  $H+mQ$  are caracter de undă directă în sensul că ea păstrează o valoare constantă pentru un „observator” care se deplasează în sensul pozitiv cu viteza  $c$  (celeritatea); din acest motiv, această expresie poartă numele de „undă de calcul directă” sau „invariant Riemann direct”;
- expresia  $H-mQ$  are caracter de undă inversă în sensul că ea păstrează o valoare constantă pentru un „observator” care se deplasează în sensul negativ cu viteza  $c$  (celeritatea); din acest motiv, această expresie poartă numele de „undă de calcul inversă” sau „invariant Riemann invers”;

Se precizează că aceste relații sunt valabile în lipsa pierderilor de sarcină (pe modelul de fluid ideal, lipsit de vîscozitate); pentru a suplini această deficiență a modelului de calcul, toate pierderile de sarcină (inclusiv cele liniare) se introduc concentrat, sub forma unor pierderi de sarcină locale, respectiv a unor „dispozitive” (diafragme fictive) plasate în nodurile de calcul.

Faptul că metoda undelor de calcul operează cu valori globale ale parametrilor și nu cu variații ale acestora face ca această metodă să fie mult mai practică. În plus, pentru că diferitele condiții la limită se exprimă, de cele mai multe ori, ca niște relații tot între valorile globale ale parametrilor, această metodă poate fi folosită și în cazurile când pe conductă există condiții la limită complicate, cum sunt cele impuse de pompe, hidrofoare, castele, vane simple sau cu închidere programată etc.



**Fig. 1.2. Metoda undelor de calcul - problema elementară (nod simplu)**

De aceea, aceasta este metoda aplicată practic pentru calculul loviturii de berbec la instalații reale și ea stă la baza unor algoritmi foarte eficienți și a unor programe de calcul electronic automat, folosind principiul diferențelor finite.

Existența undelor de calcul permite scrierea de sisteme de ecuații formate dintr-un număr de relații egal cu numărul necunoscutelor.

Metoda undelor de calcul a fost elaborată de Riemann (1860) în cazul general și aplicată pentru cazul loviturii de berbec de Schnyder (1929) și apoi de Bergeron (1935) care a făcut o prezentare generală și sistematică a ei.

Expresiile constante  $H+mQ$  și  $H-mQ$  poartă numele de *invarianți Riemann*, după numele celui care a descoperit condițiile în care aceste expresii se mențin constante. Expresiile respective au fost notate de Riemann respectiv cu  $R$  și  $S$ , notație care s-a folosit și în continuare.

Posibilitățile metodei sunt valorificate la maximum prin folosirea diferențelor finite aplicate în formă numerică. În trecut, când nu existau posibilitățile de calcul oferite de calculatoarele actuale, s-au folosit și metode grafice sau hibride care actualmente sunt total depășite.

Folosirea diferențelor finite aplicate în formă numerică este explicată pe scurt cu notațiile din *figura 1.2*. Conducta se împarte în *tronsoane de calcul* delimitate de *noduri de calcul* iar în figură sunt desenate trei noduri succesive ( $K-1, K, K+1$ ). Tronsoanele pot avea rezistențe de undă diferite, identificate cu indicele nodului mai mare iar în nodurile de calcul, valorile debitului și cotei piezometrice pot fi diferite de o parte și de alta a nodului.

Considerând că timpii de parcurs ai tronsoanelor sunt egali între ei și egali, la rândul lor, cu pasul de calcul în timp din metoda diferențelor finite  $\Delta t_K = \Delta t_{K+1} = \Delta t$ , proprietatea undelor de calcul conduce la următoarele *relații de undă*:

$$\begin{aligned} H'_{k,j+1} + m_k Q'_{k,j+1} &= H''_{k-1,j} + m_k Q''_{k-1,j} = R''_{k-1,j} \\ H''_{k,j+1} - m_{k+1} Q''_{k,j+1} &= H'_{k+1,j} - m_{k+1} Q'_{k+1,j} = S'_{k+1,j} \end{aligned}$$

unde  $j$  și  $j+1$  reprezintă două momente succesive:  $t_{j+1} = t_j + \Delta t$ .

Simplificând notațiile, aceste relații se scriu:

$$\begin{aligned} H'_k + m_k Q'_k &= R''_{k-1} \\ H''_k - m_{k+1} Q''_k &= S'_{k+1} \end{aligned}$$

Cunoscând debitele și cotele piezometrice de la „momentul inițial”  $j$  (adică, valoarea *invarianților Riemann*) se obțin astfel două relații între valorile debitelor și cotelor piezometrice de la „momentul final”  $j+1$ . Necunoscutele (valorile debitelor și cotelor piezometrice de la momentul final) fiind în număr de patru ( $Q'_k, Q''_k, H'_k, H''_k$ ), pentru „închiderea” sistemului de ecuații mai trebuie adăugate încă două relații.

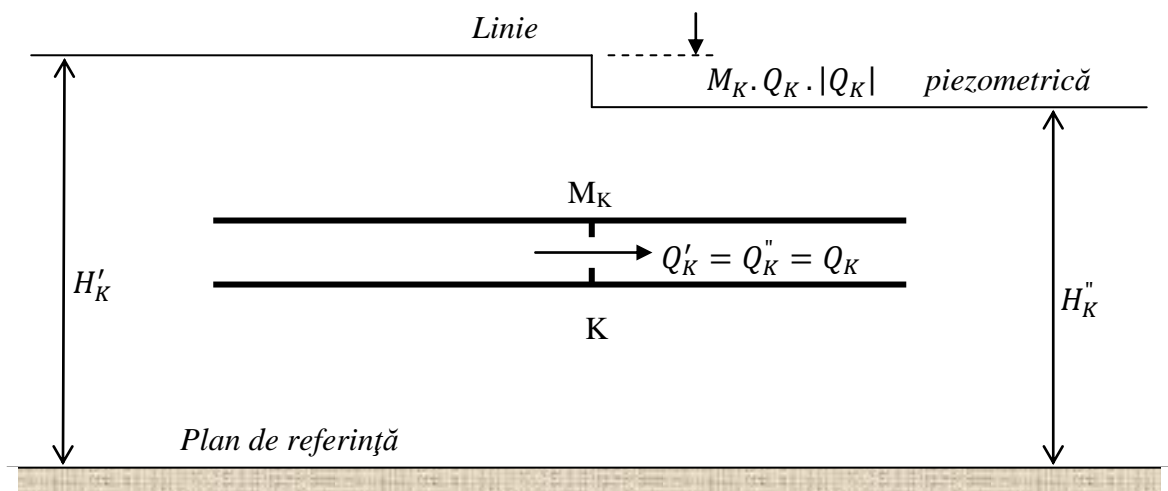
În cazul „*nodului simplu*” (*figura 1.2*), aceste relații sunt:

$$\begin{aligned} Q'_k &= Q''_k \\ H''_k &= H'_k \end{aligned}$$

În cazul „*nodului cu diafragmă*”, adică o pierdere de sarcină locală cu modulul de rezistență hidraulică  $M_k$  (*figura 1.3*), aceste relații sunt:

$$\begin{aligned} Q'_k &= Q''_k = Q_k \\ H''_k &= H'_k - M_k Q_k |Q_k| \end{aligned}$$

Acest tip de nod se folosește în mod curent pentru a prinde în calcule efectul pierderilor de sarcină liniare, dar ecuațiile respective pot fi folosite și în cazul când pe conductă se află o rezistență locală așa cum este cazul vanelor cu sau fără închidere programată, clapete de sens (de reținere) ș.a. De la caz la caz,  $M_k$  poate fi constant sau variabil după o lege cunoscută.



**Fig. 1.3. Nod interior cu diafragma (cu modulul de rezistență  $M_k$ )**

În cazul nodului cu hidrofor sau cu castel de echilibru (figura 1.4), existând un brașament (o ramificație), notând cu  $Q_d$  debitul pe brașament și alegând ca pozitiv sensul de intrare în nod, se poate scrie relația de continuitate:

$$Q_k'' = Q_k' + Q_d$$

Notând cu  $M_d$  modulul de rezistență al conductei de brașament, se poate scrie pierderea de sarcină pe conducta de brașament, ca diferență între cota piezometrică  $H_d$  în dispozitiv și cota piezometrică din conductă. Considerând, pentru a nu complica ecuațiile, că în nodul cu asemenea dispozitive nu există „diafragmă” se poate scrie:

$$H_k' = H_k'' = H_k$$

$$H_k = H_d - M_d Q_d |Q_d|$$

S-au scris, deci, încă trei ecuații, dar au apărut încă două necunoscute. În continuare ecuațiile diferă cu natura dispozitivului.

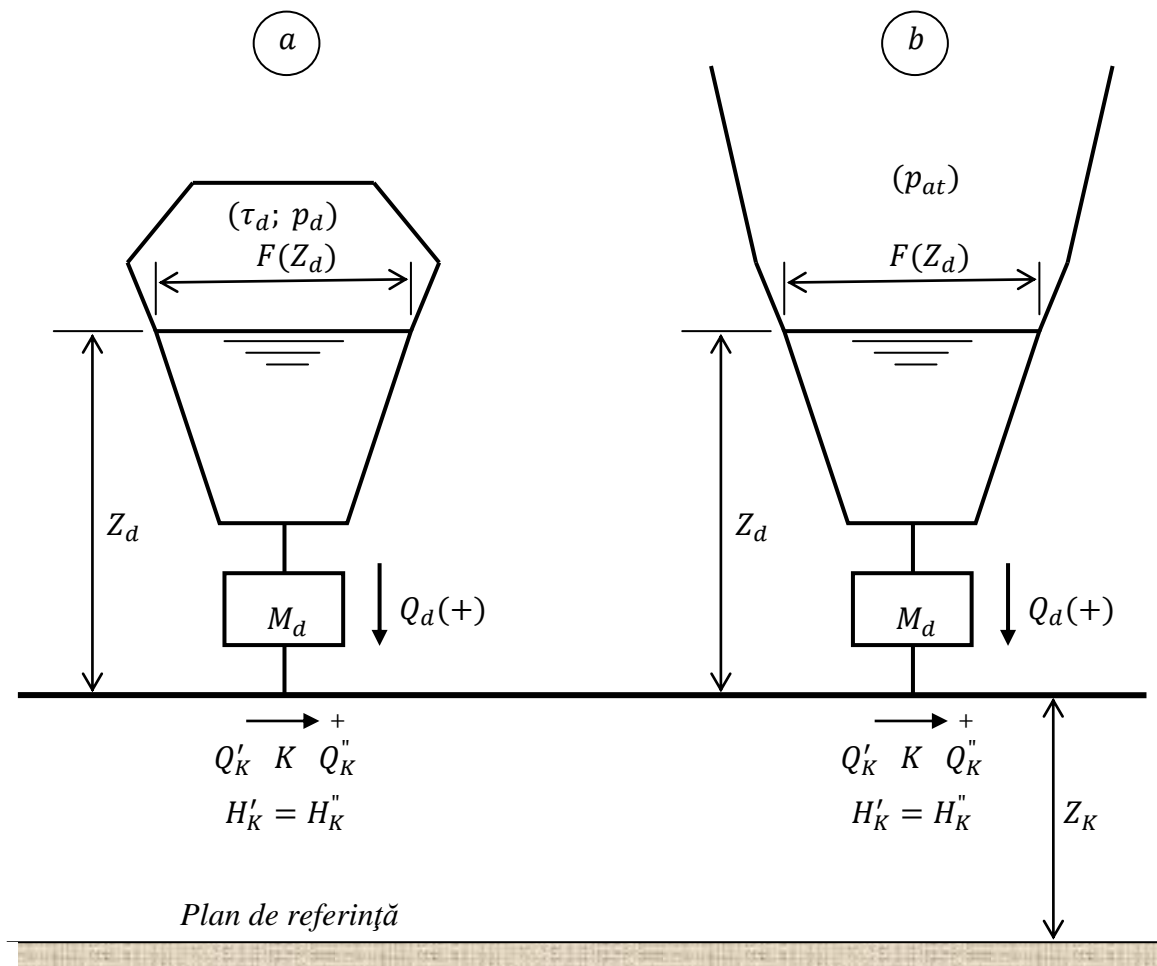
În cazul castelului (figura 1.3 b), cota piezometrică în castel  $H_d$  se confundă cu cota apei în castel  $Z_d$  adică:

$$H_d = Z_d$$

Cunoscând forma castelului, adică secțiunea orizontală a castelului  $F$  în funcție cota apei  $Z_d$ ,  $F=F(Z_d)$ , se poate calcula cota apei la momentul final  $j+1$  (pentru simplificarea notațiilor, acest indice nu s-a mai scris) pe baza cotei la momentul inițial  $j$  și a volumului de apă ce se transferă între castel și conductă, din relația:

$$\frac{F(Z_d) + F(Z_{d,j})}{2} (Z_d - Z_{d,j}) = \frac{Q_d + Q_{d,j}}{2} \cdot \Delta t$$

S-a obținut un număr de ecuații egal cu numărul necunoscutelor.



**Fig. 1.4. Nod interior cu castel sau hidrofor:**

**a — hidrofor; b — castel**

În cazul hidroforului (figura 1.4 a), în mod asemănător

$$H_d = Z_d + \frac{p_d}{\gamma}$$

unde  $p_d$  reprezintă presiunea în perna de gaz a dispozitivului care poate fi pusă în relație cu presiunea la momentul inițial  $j$  prin relația de stare a gazului. Se poate folosi transformarea politropică:

$$p_d \cdot \tau_d^n = p_{d,j} \cdot \tau_{d,j}^n$$

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

unde  $\tau_d$  reprezintă volumul pernei de gaz iar  $n$  este coeficientul de transformare politropică ( $n = 1,0.. .1,4$ ) pentru care se poate lua valoarea medie  $n = 1,25$ .

Volumul de aer la momentul final  $j+1$  poate fi calculat pe baza celui de la momentul inițial  $j$  și a debitului pe branșament:

$$\tau_d = \tau_{d,j} + \frac{Q_d + Q_{d,j}}{2} \cdot \Delta t$$

Pe de altă parte, cunoscând forma hidroforului, volumul pernei de gaz este cunoscut în funcție de cota apei în hidrofor:

$$\tau_d = f(Z_d)$$

Și în acest caz se obține un număr de ecuații egal cu cel al necunoscutelor.

În cazul apariției *cavitației*, conform cu schema de diferențe finite adoptată, atât controlul apariției cât și calculul efectiv al *cavitației* se pot face numai în ipoteza *cavitației concentrate* în nodurile schemei de calcul. De aici rezultă două neajunsuri:

- primul și cel mai important este acela că schema nu reflectă corect realitatea, deoarece, practic, *cavitația* se produce concentrat numai în anumite cazuri (puncte înalte sau în care panta profilului longitudinal convex suferă o puternică modificare);
- al doilea neajuns rezultă din faptul că rezultatele calculului depind de numărul de tronsoane în care s-a împărțit conducta (de aici decurgând numărul de coloane care se separă la apariția *cavitației* precum și numărul și succesiunea ciocnirii lor).

Ambele neajunsuri se pot remedia, însă numai parțial, printr-o alegere corespunzătoare a poziției și numărului de noduri precum și prin calculul diferențiat al *cavitației* după cum în nodul respectiv poate sau nu să apară ruperea coloanei.

Calculul nodului în *cavitație* se face în două etape:

- *Verificarea apariției cavitației*: se tratează nodul ca un nod obișnuit (fără *cavitație*) și apoi se verifică dacă a apărut *cavitația*. Dacă

$$H_k < Z_k - h_{cav}$$

unde  $h_{cav}$  este înălțimea vacuumetrică de producere a *cavitației*, atunci nodul respectiv intră în *cavitație* și calculul trebuie refăcut. În caz contrar, rezultatele calculului (pentru nod fără *cavitație*) sunt corecte.

- *Calculul cavitației* folosește relațiile de undă:

$$H'_k + m_k Q'_k = R''_{k-1}$$

$$H''_k - m_{k+1} Q''_k = S'_{k+1}$$

la care se adaugă condiția suplimentară:

$$H'_k = H''_k = Z_k - h_{cav}$$

De aici rezultă:

$$Q'_k = \frac{R''_{k-1} - (Z_k - h_{cav})}{m_k}$$

$$Q_k'' = \frac{(Z_k - h_{cav}) - S'_{k+1}}{m_{k+1}}$$

Prin ruperea coloanei se produce o pungă de vapori al cărui volum poate fi calculat:

$$\tau = \tau_j + \Delta t \cdot \left( \frac{Q_{k,j}'' + Q_k''}{2} - \frac{Q'_{k,j} + Q'_k}{2} \right)$$

În timp, punga de vapori evoluează având perioade de creștere sau de descreștere a volumului. La fiecare timp de calcul trebuie verificat dacă volumul pungii de vapori s-a anulat, caz în care, nodul devine un nod obișnuit (fără cavitație).

Ecuțiile de mai sus sunt valabile numai pentru cazul nodurilor interioare simple; pentru alte tipuri de noduri, sistemul de ecuații trebuie scris de la caz la caz, ținând seama de condițiile la limită sau de dispozitivele din nodul respectiv.

În cazul *nodurilor de capăt* se dispune de o singură relație de undă, inversă sau directă, după cum nodul este situat la începutul sau la sfârșitul conductei (începutul și sfârșitul se definesc în conformitate cu sensul pozitiv ales).

Restul relațiilor, necesare pentru a închide sistemul, se obțin din condițiile la limită, care variază de la caz la caz. De exemplu:

- *Rezervor cu nivel constant egal cu  $H_0$* : la orice moment  $H_k = H_0$ ;
- *Vana cu închidere bruscă*: la orice moment  $Q_k = 0$ ;
- *Orificiu cu debușare în atmosferă*: la orice moment  $H_k = Z_k$  ( $Z_k$  este cota geodezică a axului orificiului).

Cazul nodului cu *turbo-mașini* este uzual la conductele de alimentare cu apă și poate fi cauza loviturii de berbec atunci când se întrerupe accidental alimentarea cu energie a motoarelor de antrenare (la pompe) sau la închiderea aparatului director (pentru turbine). Nu se recomandă ca, în calcule, să se înlocuiască turbo-mașina cu alt dispozitiv mai simplu pentru că e necesar să se țină seama de efectul inerției părților rotative și a întregii caracteristici de funcționare a mașinii care, de exemplu în cazul pompelor, pot contribui în mod substanțial la ameliorarea situației de pe conductă.

În continuare se dau relațiile de calcul în ipoteza că în nod se află o turbo-pompă și aceasta se găsește în ultimul nod, deci se va folosi relația dată de unda directă.

Se presupune ca turbo-pompa are nivelul inferior (de aspirație)  $H_a$ , că înălțimea sa de pompare, respectiv căderea în regim de turbină, este  $H_p$  care e funcție de debitul  $Q_p$  și turația  $n$  și că părțile rotative au un moment de inerție total  $J = GD^2/4g$ .

În aceste condiții, se pot scrie relațiile:

$$H_k + m_k Q_k = R_{k-1}''$$

$$H_k = H_a + H_p$$

$$Q_k = Q_p,$$

unde  $H_p$ ,  $Q_p$  și  $n$  sunt legate între ele prin caracteristica generală a pompei:

$$H_p = f(Q_p, n)$$

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

Turația la momentul final  $j+1$  poate fi pusă în legătură cu turația la momentul inițial  $j$  prin ecuația de mișcare a părților rotative:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_r$$

unde:

- $J = \frac{GD^2}{4g}$  este momentul de inerție al părților rotative ( $GD^2$  fiind o valoare uzuală indicată de furnizori);
- $\omega$  este viteza unghiulară (radiani/secundă);
- $M_m$  este momentul motor (se anulează dacă se întrerupe alimentarea cu energie electrică);
- $M_r$  este momentul hidraulic rezistent ( $M_r$  este egal cu  $M_m$  atât timp cât mișcarea este permanentă);

Scriind această relație în diferențe finite rezultă:

$$n = n_j + \frac{60g \cdot \Delta t}{\pi \cdot GD^2} [(M_{m,j} + M_m) - (M_{r,j} + M_r)]$$

Momentul hidraulic (rezistent) este, de asemenea, o funcție de debit și de turație:

$$M_r = f(Q_p, n)$$

Se obține un număr de ecuații egal cu numărul necunoscutelor.

Pentru calcule foarte exacte este necesar să se dispună de caracteristica generală a turbo-pompelor instalate, atât în ceea ce privește înălțimea de pompare cât și momentul rezistent, ca funcții de debit și turație.

Aceste caracteristici se dau, de regulă, sub formă tabelară și diferă, în principal, în funcție de turația specifică; ele sunt întocmite în mărimi adimensionale iar mărimile de referință pentru debite, înălțimi de pompare, turații și momente rezistente sunt respectiv:

- $Q_R$  care este debitul nominal pompei (la randament maxim);
- $H_R$  care este înălțimea nominală de pompare (la randament maxim);
- $n_R$  care este turația nominală a pompei;
- $M_{r,R}$  care este momentul rezistent corespunzător lui  $Q_R, H_R, n_R$ ;

Când pe aceeași conductă sunt racordate mai multe turbo-pompe, se poate proceda în două feluri:

- fie se scriu relațiile respective pentru fiecare pompă în parte, ceea ce conduce la ecuații și respectiv algoritmi complicați;
- fie se înlocuiește grupul cu o singură turbo-pompă *echivalentă*,

La grupuri de turbo-pompe identice montate în paralel, turbo-pompa echivalentă va avea aceeași turație și aceeași înălțime de pompare ca și fiecare turbo-pompă în parte în timp ce debitul și momentul de inerție se vor găsi prin însumarea debitelor și respectiv momentelor de inerție ale turbo-pompelor din grup. La grupuri de turbo-pompe în serie, debitul și turația rămân neschimbate, iar înălțimile și momentele de inerție se adună.

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATERICA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

Pornind de la aceste principii generale, în diferite departamente de specialitate (catedre de hidraulică) de la mai multe universități tehnice din țară și din străinătate precum și de către laboratoare și firme de prestigiu din lume s-au elaborat *programe de calcul automat* al loviturii de berbec care beneficiază de toate facilitățile de pre- și post-procesare a datelor, de reprezentare grafică a rezultatelor precum și toate celelalte facilități pe care le oferă tehnica de calcul actuală. Astfel de programe se comercializează pe piața liberă la prețuri accesibile, împreună cu instrucțiunile de folosire și, uneori, cu asigurarea unui training corespunzător. Dacă există certitudinea că aceste programe asigură corectitudinea calculului, ele pot fi folosite la analiza fenomenului în cadrul proiectelor de execuție, inclusiv pentru alegerea măsurilor și mijloacelor de protecție.

## 2 Aspecte caracteristice ale desfășurării fenomenului

Pentru a alege și proiecta cele mai potrivite soluții de protecție contra loviturii de berbec, pentru a asigura exploatarea corectă a acestora și pentru a evita producerea unor situații generatoare de șocuri hidraulice, este necesar ca aspectele generale ale fenomenului de lovitură de berbec să fie cunoscute atât de cei care proiectează cât și de cei care execută sau, mai ales, exploatează instalațiile hidraulice prevăzute sau nu cu dispozitive de protecție.

În ceea ce privește valorile parametrilor (în speță, a presiunilor) și variația lor în timp, respectiv desfășurarea fenomenului de lovitură de berbec, acestea sunt proprii fiecărei instalații concrete și, practic, *nu pot fi făcute generalizări*. Unele particularități ale schemei generale, care aparent sunt ne semnificative, pot fi cauza unor deosebiri importante în mersul fenomenelor. Se pot distinge totuși trei categorii de instalații la care fenomenul de mișcare nepermanentă are anumite trăsături tipice. Acestea sunt: conductele unifilare (aducțiunile) gravitaționale pentru alimentarea cu apă de consum (a unor obiective civile sau industriale), conductele unifilare (aducțiunile) gravitaționale pentru alimentarea cu apă a unor centrale hidroelectrice mari și conductele unifilare (aducțiunile) cu pompare. Pentru aceste trei categorii de instalații, mai jos se trec în revistă aspectele și problemele specifice, *cu caracter de generalitate*, privind lovitură de berbec.

### 2.1 Aducțiunile gravitaționale pentru alimentarea cu apă de consum

Alcătuirea unei aducțiuni gravitaționale pentru alimentarea cu apă a unui obiectiv civil sau industrial e dată, în formă simplificată-schematizată, în *figura 2.1*, unde se află, de asemenea, elementele explicative ale desfășurării fenomenului de lovitură de berbec.

Se presupune că aducțiunea, cu lungimea totală  $L$  are, pe toată lungimea, aceeași valoare a celerității  $c$ . Manevra care produce lovitură de berbec în astfel de cazuri, obligatoriu a fi luată în considerație conform *Normativului*, este închiderea vanei de la capătul aval, manevrată de beneficiarul apei furnizate. Parametrul principal care determină valoarea variațiilor de presiune îl reprezintă timpul  $T_i$  de închidere al vanei. O anumită influență o are și forma legii de închidere. Întrucât descrierea de față are doar o valoare calitativă, se va prezenta numai influența lui  $T_i$ , cu mențiunea că și reprezentarea grafică a liniilor piezometrice din figură este, de asemenea, orientativă.

Prin închiderea vanei, se produce mai întâi *faza suprapresiunilor*, adică o creștere a presiunilor peste cele inițiale iar înfășurătoarea presiunilor maxime e reprezentată în figură sub forma *liniei piezometrice maxime*, notată  $L.p.max$  care se află deasupra *liniei piezometrice de regim*, notată cu  $L.p.0$ .

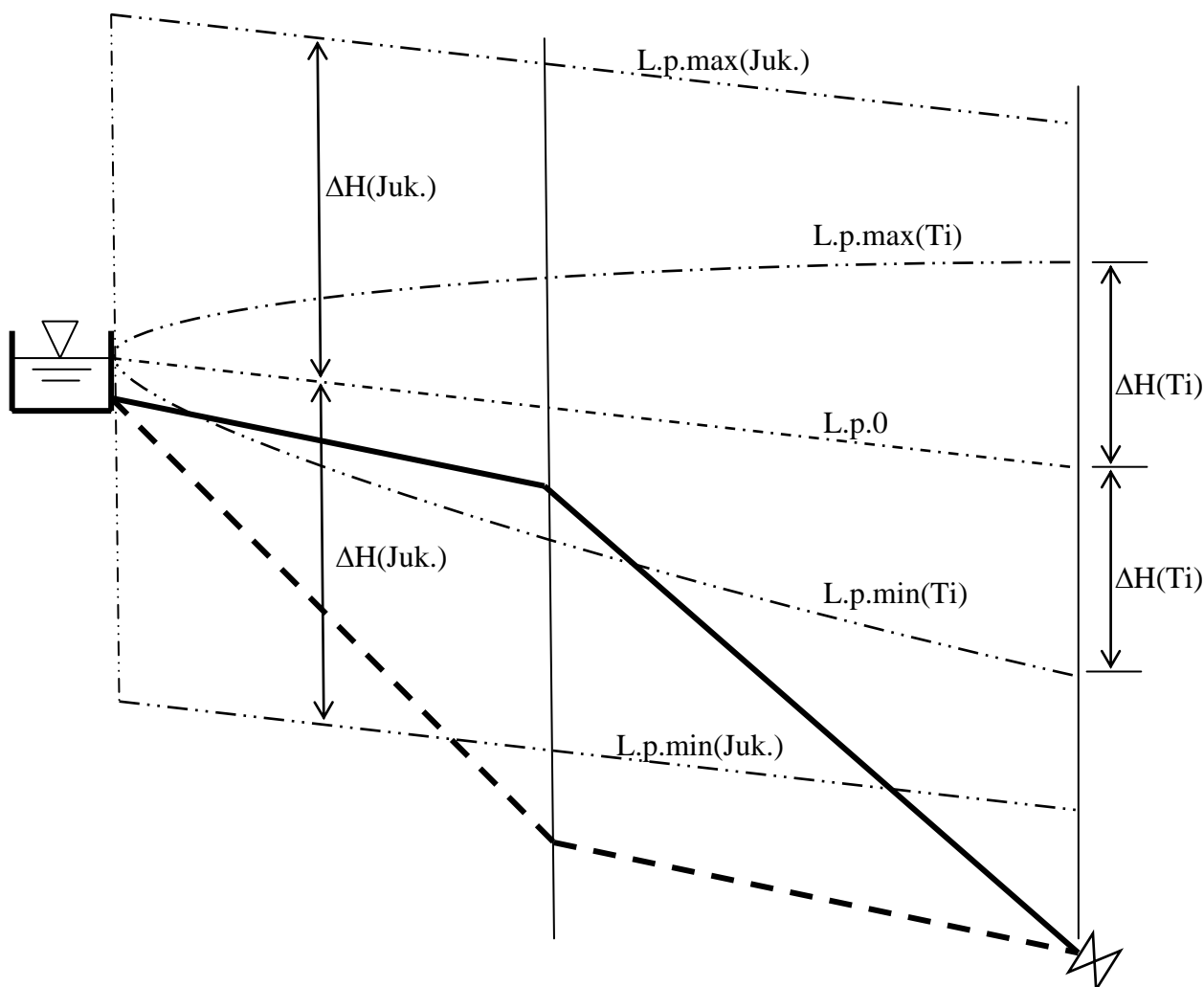
În faza a doua, urmare a reflexiei cu semn schimbat a undelor de presiune la rezervorul de la capătul amonte, se produce *faza subpresiunilor*, adică o descreștere a presiunilor sub cele inițiale iar înfășurătoarea presiunilor minime e reprezentată în figură sub forma *liniei piezometrice minime*, notată  $L.p.min$  care se află dedesubtul *liniei piezometrice de regim*, notată cu  $L.p.0$ .

Amplitudinea variațiilor de presiune, notată, în dreptul vanei, cu  $\Delta H$  precum și forma liniilor piezometrice maximală și minimală  $L.p.max$  și  $L.p.min$  depinde în primul rând de valoarea timpului de închidere  $T_i$ .

Astfel, dacă  $T_i < 2L/c$  (timpul de închidere e mai mic decât dublul *timpului de parcurs* al conductei de către undele sonice, denumit și *timp de reflexie*), atunci  $\Delta H$  are valoarea care s-ar obține dacă vana s-ar închide brusc, adică valoarea dată de formula lui Jukovski, notată cu  $\Delta H(Juk.)$  – vezi *figura 2.2*. Totodată, forma liniilor piezometrice maximală și minimală este cea din *figura 2.1*, unde acestea sunt notate cu  $L.p.max(Juk.)$  și  $L.p.min(Juk.)$ .

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATEREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

Dacă  $T_i > 2L/c$  (timpul de închidere e mai mare decât *timpul de reflexie*), atunci  $\Delta H$  are o valoare mai mică decât  $\Delta H(Juk.)$ , notată cu  $\Delta H(Ti)$ , valoare cu atât mai mică cu cât  $T_i$  este mai mare – vezi *figura 2.2*. Totodată, forma liniilor piezometrice maximală și minimală este cea din *figura 2.1*, unde acestea sunt notate cu  $L.p.max(Ti)$  și  $L.p.min(Ti)$ .



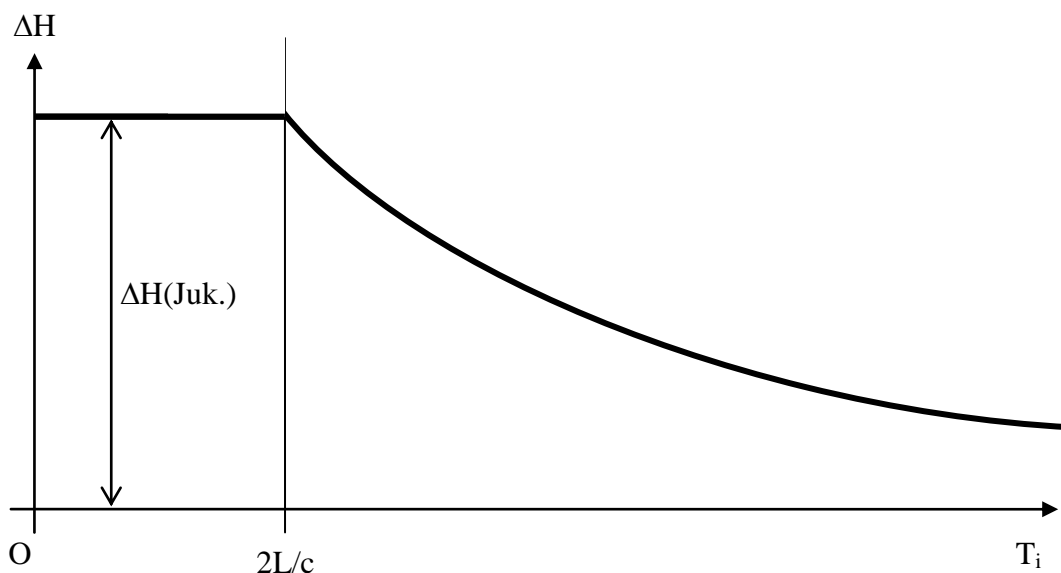
**Figura 2.1 - Aducțiunea gravitațională pentru alimentarea cu apă de consum**

*Figura 2.1* pune în evidență și importanța majoră pe care o are forma profilului longitudinal asupra regimului presiunilor. Profilul „convex”, cu puncte înalte (desenat cu linie continuă), este favorabil în regim normal (permanent) de funcționare când presiunile sunt reduse; în schimb, în regim nepermanent, el este foarte sensibil la subpresiuni, linia piezometrică (minimală) putând ajunge cu ușurință sub axul conductei, producându-se vacuum sau chiar cavitație. Din punctul de vedere al loviturii de berbec, profilul „concav” (desenat în figură cu linie întreruptă) este mai avantajos.

Așa cum se precizează și în *Normativ*, valoarea exactă atât a presiunilor maxime cât și a celor minime se determină prin calcul dar din cele de mai sus rezultă clar că, în aceste cazuri, e posibil ca singura măsură de protecție contra loviturii de berbec să o reprezinte impunerea unui *timp minim de închidere* al vanei.

## 2.2 Aducciunile gravitaționale pentru alimentarea cu apă a centralelor hidroelectrice

Aducciunile gravitaționale pentru alimentarea cu apă a centralelor hidroelectrice, în special cele de mare putere, reprezintă amenajări de mare complexitate. Din punctul de vedere strict al loviturii de berbec, principala deosebire față de cele care alimentează consumatori civili sau industriali obișnuiți o constituie faptul că vana din aval trebuie să se închidă foarte rapid pentru a preveni ambalarea turbinelor la anularea momentului rezistent al generatorului electric, situație care intervine brusc și imprezvizibil atunci când acționează sistemele de protecție din stațiile electrice de transformare.



**Figura 2.2 – Dependența variațiilor de presiune în funcție de timpul de închidere al vanei la o aducțiune gravitațională**

Forma și alcătuirea unei aducțiuni gravitaționale pentru alimentarea cu apă a centralelor hidroelectrice este destul de bine definită în urma unei experiențe îndelungate; în formă simplificată-schematizată, ea e dată în *figura 2.3*, unde se află, de asemenea, elementele explicative ale desfășurării fenomenului de lovitură de berbec.

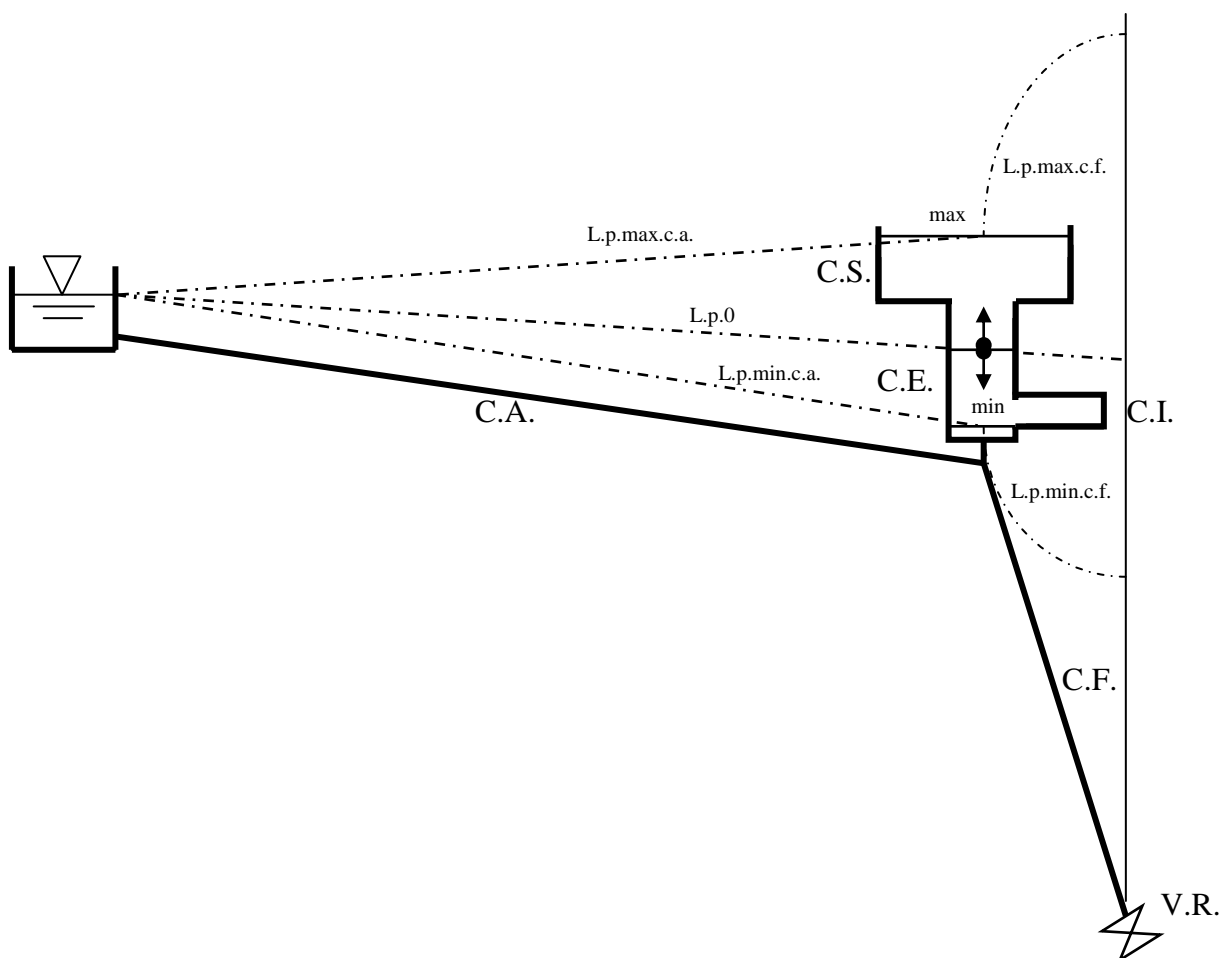
Linia piezometrică din regimul permanent, notată cu *L.p.O*, arată avantajele acestei forme în primul rând în regim normal de funcționare, mai precis faptul că aceasta e soluția cea mai ieftină în ce privește costul total al aducțiunii, astfel:

- Conducta de aducțiune *C.A.*, reprezentând cea mai mare parte din lungimea totală a aducțiunii, e plasată la cote ridicate, având practic doar o pantă mică, din considerente tehnologice – constructive; în acest fel, presiunile sunt reduse și costul, de asemenea.

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATERICA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

- Conducta forțată *C.F.*, de lungime mică, „consumă” practic întreaga cădere a amenajării; ea e supusă unor presiuni mari dar, având o lungime mică, nu afectează foarte mult costul total.

Lovitura de berbec e declanșată de închiderea rapidă a vanei *V.R.* de la intrarea în centrală. În condițiile unui timp de închidere  $T_i$  care este foarte mic în raport cu timpul de reflexie  $2L/c$ , corespunzător unor lungimi mari ale aducțiunii și în absența unor mijloace de protecție, variațiile de presiune ar fi extrem de mari și ar afecta întreaga aducțiune, inclusiv conducta de aducțiune *C.A.* (vezi figura 2.1).



**Figura 2.3 - Aducțiunea gravitațională pentru alimentarea cu apă a unei centrale hidroelectrice**

Pentru protecție se folosește *castelul de echilibru C.E.*, plasat în punctul de schimbare de pantă al profilului longitudinal. Poziția optimă a castelului ar fi fost chiar lângă „sursa” loviturii de berbec – vana *V.R.* dar, în acest caz, ar fi rezultat un castel cu o înălțime extrem de mare, foarte scump și, în concluzie, imposibil de realizat practic. În poziția din figură, reflectând undele sonice care vin de la vana *V.R.*, castelul reduce în mod semnificativ variațiile de presiune de pe conducta de aducțiune *C.A.* dar și pe cele de pe conducta forțată *C.F.*

Castelul împarte astfel aducțiunea în două părți distincte:

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATERICA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

- Conducta de aducțiune *C.A.*, reprezentând cea mai mare parte din lungimea totală a aducțiunii, care e supusă unor variații de presiune relativ mici și cu caracter lent variabil; în acest fel, costul conductei de aducțiune *C.A.* rămâne redus și pentru a face față regimului nepermanent;
- Conducta forțată *C.F.*, de lungime mică, e supusă unor variații mari de presiune (dar, totuși, mai mici decât în absența castelului) și cu caracter rapid variabil – de șoc; ea trebuie să fie dimensionată să reziste acestor solicitări dar, având o lungime mică, acest lucru nu afectează foarte mult costul total.

Practic, castelul de echilibru „transformă” fenomenul de lovitură de berbec (rapid variabil în timp), declanșat de închiderea rapidă a vanei *V.R.*, într-un fenomen de „oscilație în masă”; acesta are loc pe conducta de aducțiune *C.A.*, între bazinul din amonte (lacul de acumulare) unde nivelul e constant și castel, în care (acesta având o secțiune limitată) au loc variații ale nivelului apei între un nivel maxim și unul minim. Acest fenomen poartă numele de „*salt în castel*” și el determină înălțimea (și, în ultimă instanță costul) acestuia.

Pentru reducerea înălțimii castelului precum și pentru prevenirea intrării aerului în aducțiune (cu riscul de a ajunge în turbine), castelele de echilibru pot fi prevăzute cu camere superioare *C.S.* și cu camere inferioare *C.I.*

Liniile piezometrice din *figura 2.3* sugerează fenomenele descrise mai sus, astfel:

- *L.p.max.c.a.* reprezintă linia piezometrică maximală pe conducta de aducțiune *C.A.*
- *L.p.min.c.a.* reprezintă linia piezometrică minimală pe conducta de aducțiune *C.A.*
- *L.p.max.c.f.* reprezintă linia piezometrică maximală pe conducta forțată *C.F.*
- *L.p.min.c.f.* reprezintă linia piezometrică minimală pe conducta forțată *C.F.*

Schema de protecție fiind practic pre-stabilită, în acest caz calculele de lovitură de berbec reprezintă de fapt o încercare de găsire a unui optimum tehnico-economic, având ca obiectiv-țintă costul total al aducțiunii. „*Cheia*” problemei o reprezintă, în ultimă instanță, rezistența hidraulică a bransamentului dintre castel și aducțiune de care depind atât variațiile de presiune care „trec mai departe” pe conducta de aducțiune *C.A.*, cât și cele care „se întorc înapoi” pe conducta forțată *C.F.*, precum și volumul castelului. Toate acestea, convertite în costuri și cumulate trebuie să fie minime.

La aducțiunile centralelor hidroelectrice de mică putere (micro-hidrocentrale), schema de protecție de mai sus nu se aplică, fiind total ne-economică, în fapt ne-fezabilă din punct de vedere practic. În aceste cazuri, profilul longitudinal al aducțiunii e determinat de traseul ales, conducta urmărind, la fel ca la majoritatea aducțiunilor, profilul terenului. Din acest motiv, cazul acesta se apropie mai mult de cel al aducțiunilor gravitaționale pentru obiective civile sau industriale tratat în *capitolul 1*, unde singura măsură de protecție o reprezintă impunerea unui timp minim de închidere a vanei de acces la turbine. În aceste cazuri, de regulă, riscul de ambalare a turbinelor e mai redus și, dacă totuși el există, se recomandă să se ia alte măsuri (de ex., folosirea unor frâne mecanice sau a unor „vane sincron”, adică vane de by-pass care se deschid simultan cu închiderea vanei de acces la turbine).

### 2.3 Aducțiunile cu pompare

Aducțiunile cu pompare au în componere cel puțin o stație de pompare.

O stație de pompare poate fi plasată la capătul amonte al aducțiunii - cazul cel mai frecvent, preluând apa direct de la sursă (care se prezintă, cel mai des, sub forma unui bazin de aspirație) sau poate fi plasată undeva pe traseul acesteia, caz în care avem o „stație de pompare cu conductă lungă de aspirație”, când apa e preluată direct din conductă. Există și situații când pe traseul aducțiunii se află mai multe stații de pompare care aspiră din conductă, așa numitele „stații de re-pompare”.

Alcătuirea constructivă și echiparea stațiilor de pompare este extrem de diversă.

Există stații de pompare cu „cuvă umedă”, echipate cu pompe cu ax vertical și stații de pompare cu „cuvă uscată”, echipate cu pompe cu ax orizontal. Există stații de pompare auto-amorsante sau nu. Există stații de pompare în care grupul de pompe este montat „în paralel” și stații de pompare în care grupul de pompe este montat „în serie”.

Dotarea cu „armături” a stațiilor de pompare este și ea extrem de diversă. Pe aspirația și pe refularea fiecărei pompe din stație ca și pe aspirația și pe refularea întregii stații se pot afla vane, clapete de sens ș.a. iar caracteristicile constructive și funcționale ale acestora sunt extrem de diverse, depinzând de necesitățile tehnologice ale proiectului și de gama de produse oferită de furnizori.

Așa cum prevede *Normativul*, calculele de lovitură de berbec vor ține seama de absolut toate detaliile proiectului pentru că toate pot avea un impact asupra desfășurării fenomenului și influențează alegerea corectă a măsurilor și mijloacelor de protecție.

Pentru expunerea de față, s-a ales una din formele cele mai răspândite ale aducțiunilor cu pompare și pe care, pe de altă parte, se pot explica principalele efecte și particularități ale desfășurării fenomenului de lovitură de berbec. Pentru explicații se face referire la *figura 2.4*.

În această figură, grupul de pompe din stația de pompare este înlocuit de „pompa echivalentă”  $P$  ale cărei caracteristici se determină după regulile cunoscute, după cum pompele sunt montate în paralel sau în serie.

Pe refularea pompei (echivalente)  $P$  se află clapeta de sens  $C$  și vana  $V$  care sunt, la rândul lor, „echivalentele” clapetelor și respectiv vanelor care se găsesc în mod real pe refulările pompelor. Mai rar, există clapetă de sens și vană chiar pe conducta de refulare (pe aducțiune), la ieșirea din stația de pompare și, atunci, clapeta  $C$  și vana  $V$  sunt reale.

Pentru conducta de refulare (aducțiunea propriu-zisă) s-a desenat un profil longitudinal „convex” cu două *puncte proeminente (vârfuri de deal)*, *punctele de inflexiune*  $PI_1$  și  $PI_2$ , unde au loc schimbări importante de pantă. Conducta de refulare debușează în bazinul de refulare  $BR$ .

Clapeta de sens (de reținere)  $C$  are rolul de a împiedica curgerea inversă prin pompă, atât pentru a nu irosi apa pompată cât, mai ales, pentru a împiedica ambalarea pompei, funcționând în regim de turbină, atunci când momentul motor devine zero (ca urmare a întreruperii alimentării cu energie electrică a motoarelor de antrenare a pompelor). În cazuri mai speciale, în locul clapetei de sens există o vană programată, cu închidere automată, declanșată în momentul întreruperii alimentării cu energie electrică a motoarelor de antrenare.

Vana  $V$  are doar rolul de izolare a pompei pentru intervenții, inclusiv la clapeta  $C$  și la celelalte armături de pe refulare sau de pe aspirație. De aceea, această vană nu va fi manevrată în timpul funcționării pompei și nu este luată în considerație în studiul loviturii de berbec. În instrucțiunile de exploatare ale stației de pompare se vor face precizări în acest sens.

INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA  
NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATEREA LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”

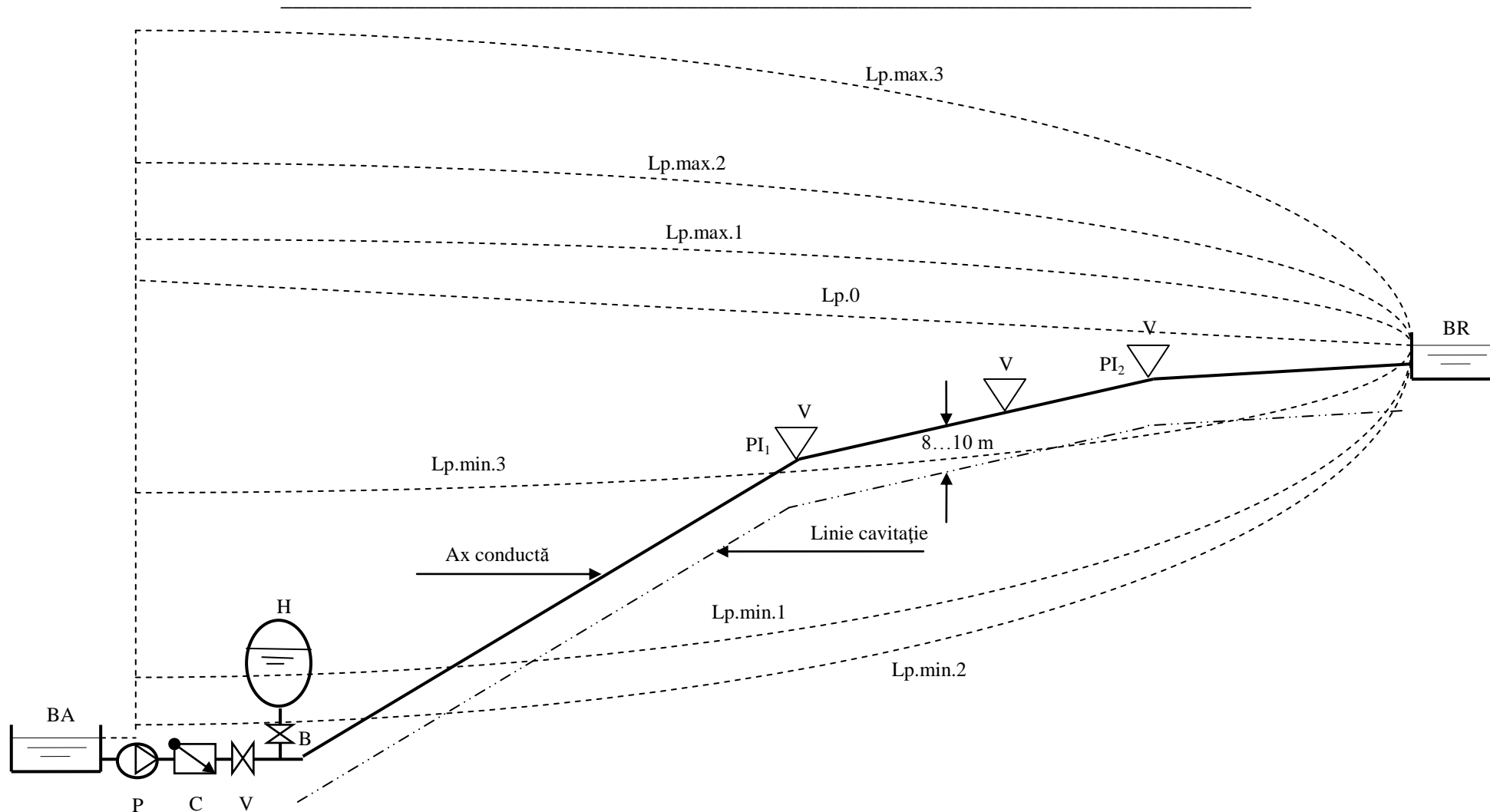


Figura 2.4 – Aducțiunea cu pompă

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

Manevra care declanșează fenomenul de lovitură de berbec, obligatoriu a fi luată în considerare conform *Normativului*, este întreruperea bruscă și intempestivă a alimentării cu energie electrică a stației care conduce la anularea instantanee a momentului motor la axul pompelor și oprirea concomitentă a tuturor pompelor în funcțiune la acel moment, fără să existe posibilitatea intervenției umane și, cu atât mai mult, respectarea procedurilor normale de oprire.

În funcție de tipul și de caracteristicile pompelor, în interacțiune cu sistemul hidraulic, dar mai ales în funcție de mărimea *momentului de inerție al tuturor părților rotative aflate în cuplaj* (motorul + pompa + cuplajul mecanic dintre ele + apa din pompă), pompa se oprește mai repede sau mai încet dar, oricum, într-un timp de ordinul secundelor, adică foarte repede. În acest timp scurt, debitul și înălțimea de pompare „furnizate” de pompă scad la zero, odată cu turația. Dacă curgerea inversă nu este blocată, atunci se poate ajunge la inversarea turației și transformarea turbopompei în turbină, după ce, în prealabil, aceasta a trecut și prin regimul de „frână”.

Odată cu scăderea la zero a debitului pompat și a înălțimii de pompare, se produce prima fază a loviturii de berbec, o fază de „subpresiuni” în care presiunile scad, înfășurătoarea presiunilor minime, notată cu *Lp.min.1*, aflându-se mult sub linia piezometrică de regim *Lp.0*.

Așa cum s-a mai arătat, prin reflexie la bazinul de refulare, undele de scădere a presiunii din prima fază se transformă în unde de creștere a acesteia și urmează faza a doua a loviturii de berbec, o fază de „suprapresiuni” în care presiunile cresc, înfășurătoarea presiunilor maxime, notată cu *Lp.max*, aflându-se deasupra liniei piezometrice de regim *Lp.0*.

Dacă curgerea inversă e permisă (clapeta *C* nu există sau nu se închide), atunci suprapresiunile sunt reduse (linia piezometrică *Lp.max.1*). În schimb, există riscul ambalării turbopompelor, în regim de turbină, până la valori care să ducă la distrugerea acestora. Există și pompe care nu admit deloc rotirea în sens invers (din cauza lagărelor care permit rotirea într-un singur sens). Dacă la aceasta se adaugă pierderile de apă, e evident faptul că organe de blocare automată a curgerii inverse de tipul clapetelor de reținere sau a vanelor cu închidere automată sunt obligatorii în schema unei stații de pompare.

Clapetele ideale din punctul de vedere al loviturii de berbec sunt acelea care se închid în momentul inversării curgerii sau chiar cu puțin înainte, fiind prevăzute, în acest scop, cu dispozitive de rapel (resorturi, contra-greutăți). În acest caz, suprapresiunile care se produc în *faza a doua* sunt moderate (linia piezometrică *Lp.max.2*).

Folosirea clapetelor la care închiderea este întârziată cu ajutorul unor frâne sau amortizoare nu se recomandă. Explicația acestei recomandări e dată mai jos, cu referire la *figura 2.5*.

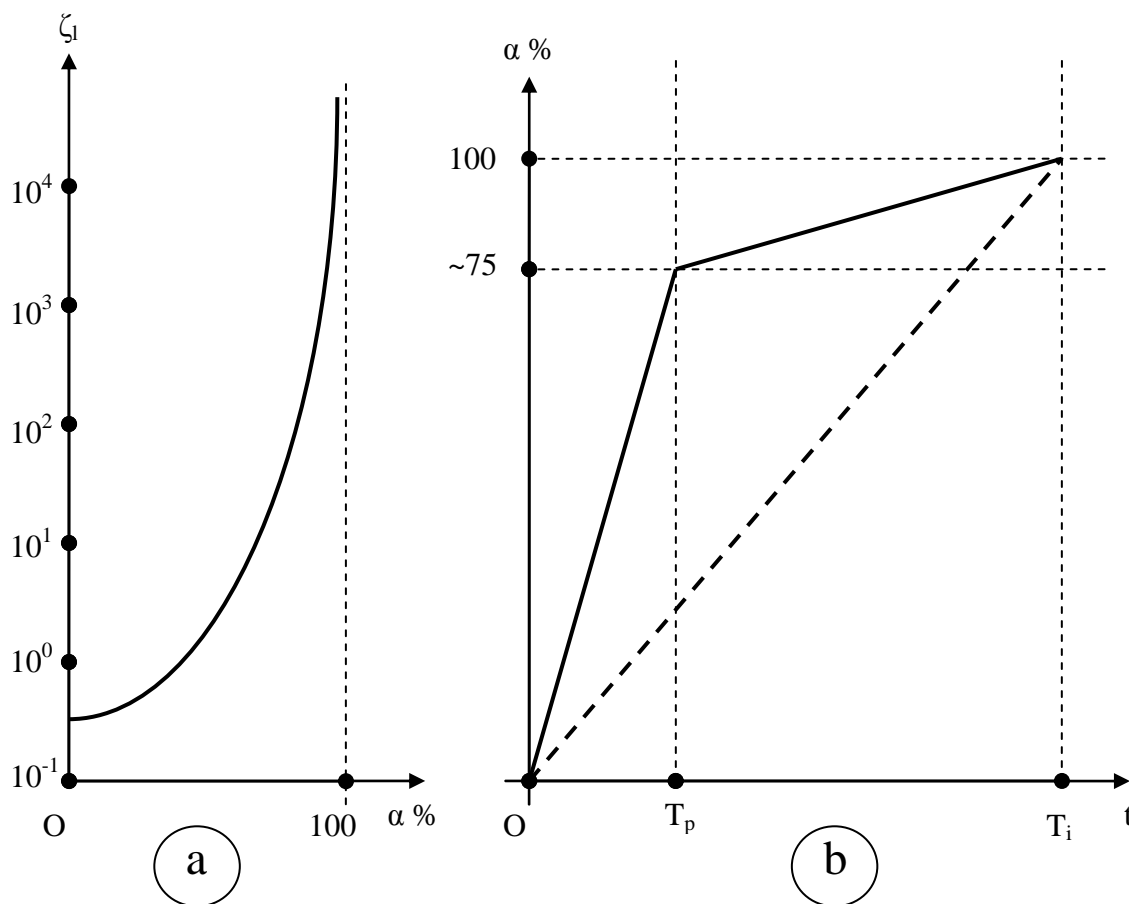
Variația coeficientului de pierdere de sarcină locală  $\zeta_l$  al unei vane (clapete) în funcție de gradul de închidere  $\alpha$  are alura din *figura 2.5.a*. Mai precis, până la un grad de închidere de 70...80%, pierderea de sarcină rămâne destul de mică și ea crește puternic doar pe ultimii 20...30%, până la închiderea totală. Se poate spune că, de fapt, închiderea efectivă a vanei se produce doar pe ultimii 20...30% ai gradului de închidere. Dacă închiderea se face cu întârziere față de momentul inversării debitului, presupunând ca legea de închidere este liniară (viteza de închidere e constantă pe toată durata acesteia – linia întreruptă din *figura 2.5.b*), atunci în cea mai mare parte a timpului rezistența hidraulică a vanei este redusă și curentul de apă se accelerează, în sens invers, până la valori foarte mari; atunci intervine practic închiderea vanei, cu valorile foarte mari ale pierderii de sarcină de pe ultima parte a gradului de închidere. Se produce, practic, o închidere bruscă a vanei, în momentul în care viteza apei este foarte mare, care se soldează cu suprapresiuni extrem de mari (conform cu relația lui Jukovski - linia piezometrică *Lp.max.3*). Reflexia la bazinul de refulare *BR* a acestor

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATEREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

suprapresiuni foarte mari poate produce o nouă fază de subpresiuni, când linia piezometrică poate să coboare chiar sub cea din prima fază - linia piezometrică  $Lp.min.2$ .

Probleme asemănătoare apar și în cazul când în locul clapetei de reținere există o vană cu închidere automată, comandată de dispariția tensiunii electrice (pentru a se închide, ca și clapetele, în momentul opririi pompelor). Pentru a se evita fenomenele periculoase descrise mai sus, aceste vane trebuie programate să se închidă cu două viteze și anume (vezi figura 2.5.b):

- o viteză foarte mare la început, în timpul  $T_p$ , care e de ordinul de mărime al timpului în care se inversează curgerea; în acest timp, vana ajunge la un grad de închidere de 70...80%, având însă o rezistență hidraulică suficient de mică pentru ca să nu accentueze subpresiunile din prima fază;
- o viteză foarte mică apoi, până la închiderea totală, la momentul  $T_i$  (timpul total de închidere); viteza mică de închidere, atunci când rezistența hidraulică a vanei a devenit foarte mare și când are loc, de fapt, închiderea efectivă a acesteia, asigură, pe de o parte, o limitare a debitului și vitezei în sens invers (cu eliminarea riscului de ambalare a pompei) și, pe de altă parte, o limitare a suprapresiunilor;



**Figura 2.5 – Legea de închidere a vanei**

**a – variația coeficientului de pierdere de sarcină funcție de gradul de închidere**

**b – variația gradului de închidere funcție de timp**

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

Referitor la liniile piezometrice  $L_{p.min}$  se face mențiunea că în figură nu s-a luat în considerare faptul că atunci când vacuumul ajunge la limita de cavitație, prin vaporizarea instantanee a lichidului și formarea pungilor de vapori, presiunea e limitată la această valoare (cca.  $-1 \text{ bar}$ ) iar linia piezometrică (minimă) se confundă cu *linia de cavitație* (aflată la  $8...10 \text{ m}$  sub axul conductei și paralelă cu acesta).

Acest mod de reprezentare are însă avantajul că scoate bine în evidență rolul hotărâtor pe care îl are forma profilului longitudinal pentru valoarea presiunilor minime. Pentru forma de profil din figură, la manevrele discutate mai sus (fără protecție), practic întreaga aducțiune e supusă unui vacuum avansat sau cavitației. Dacă profilul longitudinal ar fi avut o formă „concavă” iar punctele de inflexiune  $PI_1$  și  $PI_2$  ar fi fost plasate mult mai jos, vacuumul ar fi fost mai redus și s-ar produs pe porțiuni mult mai restrânse din lungimea aducțiunii.

În urma calculului presiunilor pot exista, practic și în principal, trei situații care se descriu pe larg mai jos.

Dacă singura problemă o constituie apariția vacuumului și a cavitației, protecția poate fi rezolvată și se recomandă a fi rezolvată doar prin instalarea unor ventile de introducere a aerului (notate cu  $V$  pe figură). Amplasarea și tipo-dimensiunea acestor ventile va rezulta din calculul de lovitură de berbec în care se va căuta, prin încercări succesive, varianta care asigură un cost total minim. Întrucât, în multe situații va trebui să se instaleze astfel de ventile în punctele „înalte” ale profilului, acestea vor fi de tipul „aerisire - deaerisire”, capabile să și evacueze aerul care se acumulează în timp. Folosirea hidroforului de protecție  $H$  nu se recomandă deoarece, pentru a proteja întreaga conductă, rezultă volume de hidrofor extrem de mari, prohibitive ca preț. La volume și costuri rezonabile ale hidroforului, rămân de regulă zone ne-acoperite, în care vacuumul se menține și unde vor trebui totuși instalate și ventile de aer (vezi linia piezometrică  $L_{p.min.3}$ ).

Dacă singura problemă o constituie presiunile maxime care sunt depășite, atunci protecția poate fi rezolvată și se recomandă a fi rezolvată doar prin instalarea unui hidrofor  $H$  la ieșirea din stația de pompare. Calculul conduce, de regulă, la hidrofoare cu volume mici și rezistențe mari de branșament, convenabile din punct de vedere economic.

Dacă e necesară protecția atât la subpresiuni cât și la suprapresiuni, se recomandă o soluție de protecție „hibridă”, astfel:

- la ieșirea din stația de pompare se recomandă instalarea unui hidrofor de protecție  $H$  cu volum mic și rezistență mare de branșament, dimensionat să asigure doar protecția la suprapresiuni;
- hidroforul, astfel dimensionat, va avea o capacitate limitată de reducere a vacuumului și, de regulă, din acest punct de vedere vor rămâne zone ne-acoperite; pentru eliminarea totală a vacuumului sau aducerea lui în limite admisibile se vor instala și un număr de ventile de aer al căror amplasament și tipo-dimensiune se determină prin calcul pentru a avea, împreună cu hidroforul, soluția cea mai ieftină.

### 3 Dispozitive de protecție

Acest capitol descrie succint alcătuirea constructivă a principalelor dispozitive folosite ca mijloace de protecție împotriva efectelor negative ale loviturii de berbec; se descrie, de asemenea, modul în care acestea realizează protecția respectivă (modul lor de acțiune) și se fac o serie de recomandări practice privind instalarea și exploatarea lor.

#### 3.1 Castelul de echilibru

Castelul de echilibru este o construcție verticală înaltă, deschisă în atmosferă la partea superioară, a cărei secțiune orizontală  $F_d$  poate fi constantă sau variabilă (figura 3.1).

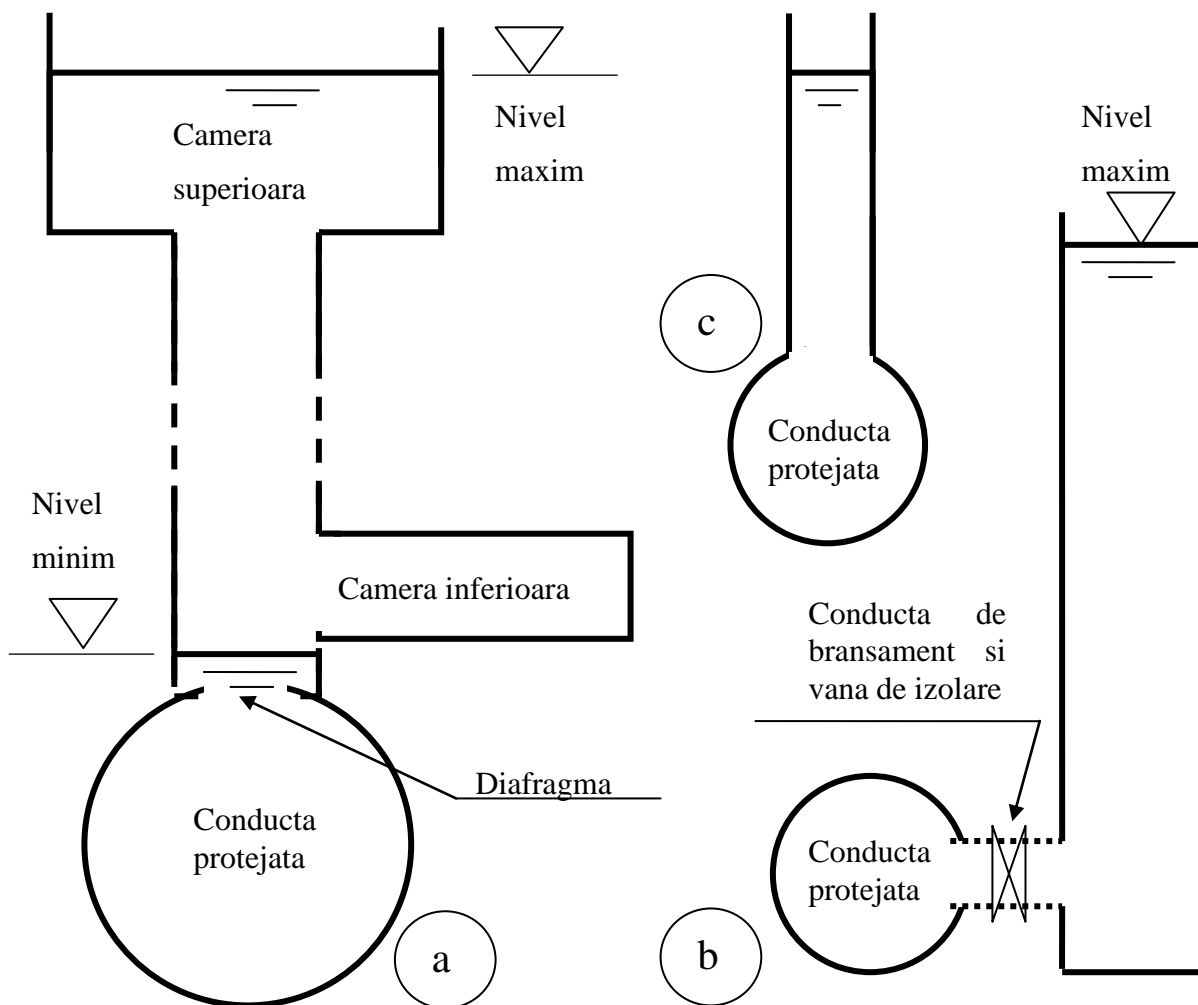


Figura 3.1 – Castelul de echilibru

a – la CHE; b – la SP; c – cu rol de ventil de aer;

Castelul de echilibru acționează ca un „rezervor tampon” care suplinește „deficitul” de apă din conducta protejată atunci când presiunea scade și preia „surplusul” de apă din conducta protejată atunci când presiunea crește.

Mai precis, atunci când presiunea din conducta protejată scade, apa curge din castel în conductă și nivelul în castel scade iar atunci când presiunea din conducta protejată crește, apa curge din conductă în castel și nivelul în castel crește. Această curgere, dinspre și înspre castel, începe imediat ce la castel ajunge prima variație de presiune (oricât de mică) și asta explică faptul că efectul protector al castelului se extinde pe o foarte mare parte din lungimea aducțiunii aflată în „spatele” acestuia (în sensul de propagare al perturbațiilor primare).

Înălțimea castelului, dată de diferența dintre nivelul maxim și cel minim, depinde de amploarea fenomenului de lovitură de berbec dar și de valoarea rezistenței hidraulice a bransamentului dintre castel și conducta protejată.

Rezistența hidraulică a bransamentului, dată de dimensiunea diafragmei (ca în cazul din *figura 3.1.a*) sau de diametrul conductei de legătură (ca în cazul din *figura 3.1.b*) influențează însă și valoarea variațiilor de presiune care „trec” de castel și afectează aducțiunea, astfel: o rezistență mare de bransament conduce la o înălțime mică a castelului dar produce variații mari de presiune pe conducta protejată (și invers). Calculul va stabili un optimum care va ține seama de toți parametrii implicați (inclusiv de capacitatea de rezistență mecanică a conductelor) și care va urmări ca, pe ansamblu, costul lucrărilor să fie minim.

*In cazul aducțiunilor centralelor hidroelectrice (CHE - figura 3.1.a),* volumele de apă schimbate cu castelul de echilibru sunt, de regulă, foarte mari și rezultă castele cu înălțimi mari. Execuția lor este, însă, facilitată de faptul că pot fi realizate sub forma unor „puțuri” săpate în roca munților unde se realizează astfel de amenajări.

Pentru reducerea înălțimii castelului, fiind posibil și din punct de vedere tehnic, în aceste cazuri se obișnuiește să se realizeze lărgiri ale secțiunii transversale: la partea superioară (*camera superioară*) pentru limitarea nivelului maxim precum și la partea inferioară (*camera inferioară*) pentru limitarea nivelului minim.

Limitarea nivelului minim prin *camera inferioară* mai are și rolul de a elimina riscul de pătrundere a aerului în aducțiune care, în cazul CHE, este interzisă întrucât poate afecta grav turbinele.

*In cazul conductelor de refulare ale stațiilor de pompare (SP - figura 3.1.b),* castelul de echilibru trebuie să fie realizat ca o construcție foarte înaltă, supraterană, cu toate dezavantajele care decurg de aici. Din acest motiv, pe o parte, aplicarea acestui tip de soluție este extrem de limitată iar, pe de altă parte, forma lor constructivă este mult mai simplă (de regulă se adoptă forma cilindrică realizată din metal sau beton armat).

În acest caz, pătrunderea aerului în aducțiune nu prezintă pericol. Aerul nu afectează cu nimic stația de pompare. Dimpotrivă, accesul aerului în conductă, ca și pătrunderea apei, poate fi benefică pentru protejarea acesteia la sub-presiuni, permițând să se reducă volumul (și costul) castelului de echilibru. De aceea, e posibil și chiar recomandabil (ca fiind o soluție economică), să se folosească acest dispozitiv, sub forma unui tub vertical cu diametru redus, în punctele înalte ale profilului longitudinal, cu rolul de ventil de aer (*figura 3.1.c*).

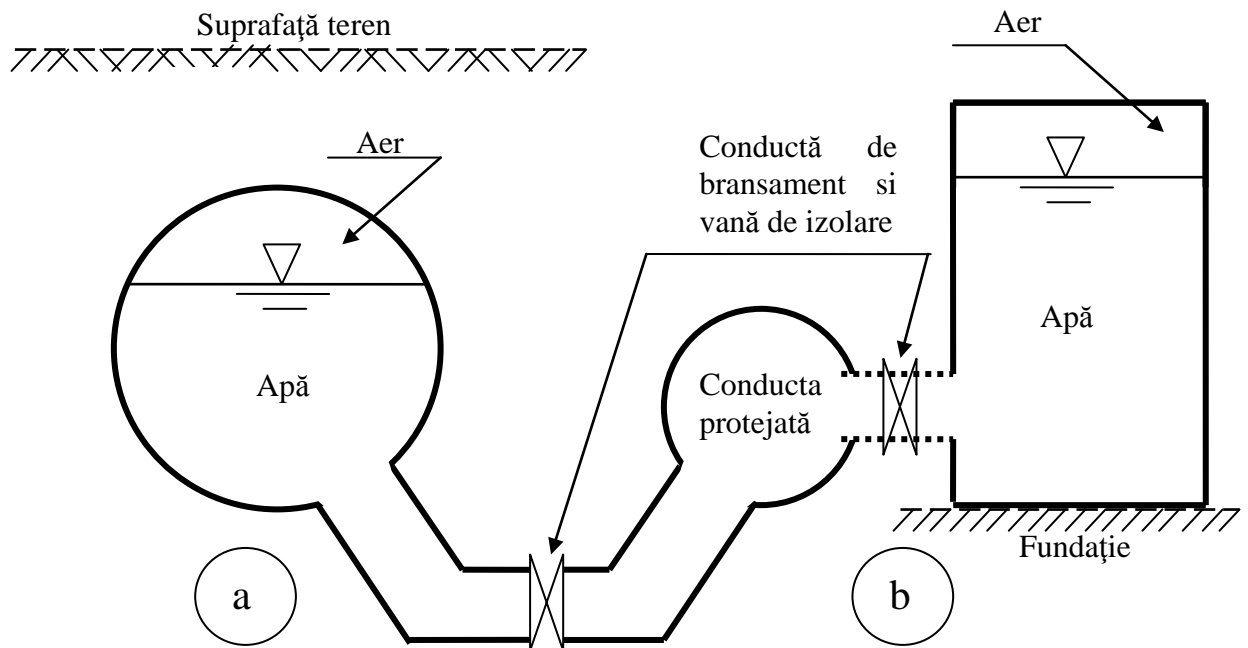
### **3.2 Hidroforul de protecție**

Hidroforul de protecție suplinește (elimină) principalul dezavantaj pe care îl prezintă castelul de echilibru (înălțimea mare), fiind un obiect compact și mult mai avantajos din punct de vedere constructiv (*figura 3.2*). Este dispozitivul preferat la protecția conductelor de refulare ale stațiilor de

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

pompare, unde castelul de echilibru ar avea o înălțime prea mare pentru a putea fi o soluție economică.

Ca și castelul de echilibru, hidroforul acționează ca un „rezervor tampon” care suplinește „deficitul” de apă din conducta protejată atunci când presiunea scade și preia „surplusul” de apă din conducta protejată atunci când presiunea crește. Rolul de „motor” și respectiv de „acumulator” pentru schimbul de apă dintre hidrofor și conductă este jucat, în acest caz, din punct de vedere energetic, de către perna de aer sub presiune a acestuia.



**Figura 3.2 – Hidroforul de protecție**

**a – Hidrofor orizontal (subteran); b – Hidrofor vertical (suprateran);**

Mai precis, atunci când presiunea din conducta protejată scade, apa curge din hidrofor în conductă, fiind împinsă de către presiunea aerului care scade odată cu coborârea nivelului apei din hidrofor; atunci când presiunea din conducta protejată crește, apa curge din conductă în hidrofor, nivelul apei în hidrofor crește și, de asemenea, presiunea din perna de aer. Această curgere, dinspre și înspre hidrofor, începe imediat ce la hidrofor ajunge prima variație de presiune (oricât de mică) și asta explică faptul că efectul protector al hidroforului se extinde pe o foarte mare parte din lungimea aducțiunii aflată în „spatele” acestuia (în sensul de propagare al perturbațiilor primare).

Ca urmare, înălțimea hidroforului, dată de diferența dintre nivelul maxim și cel minim, este, în acest caz, foarte mică iar realizarea sa practică este mult mai convenabilă din punct de vedere tehnic și economic.

Atunci când volumul hidroforului este relativ mic, el poate fi realizat sub forma unui recipient (cazan) vertical, așezat suprateran pe o fundație corespunzătoare (figura 3.2.b). Această dispoziție are avantajul că dă posibilitatea unei supravegheri și inspecții permanente și complete dar și mai multe dezavantaje, între care:

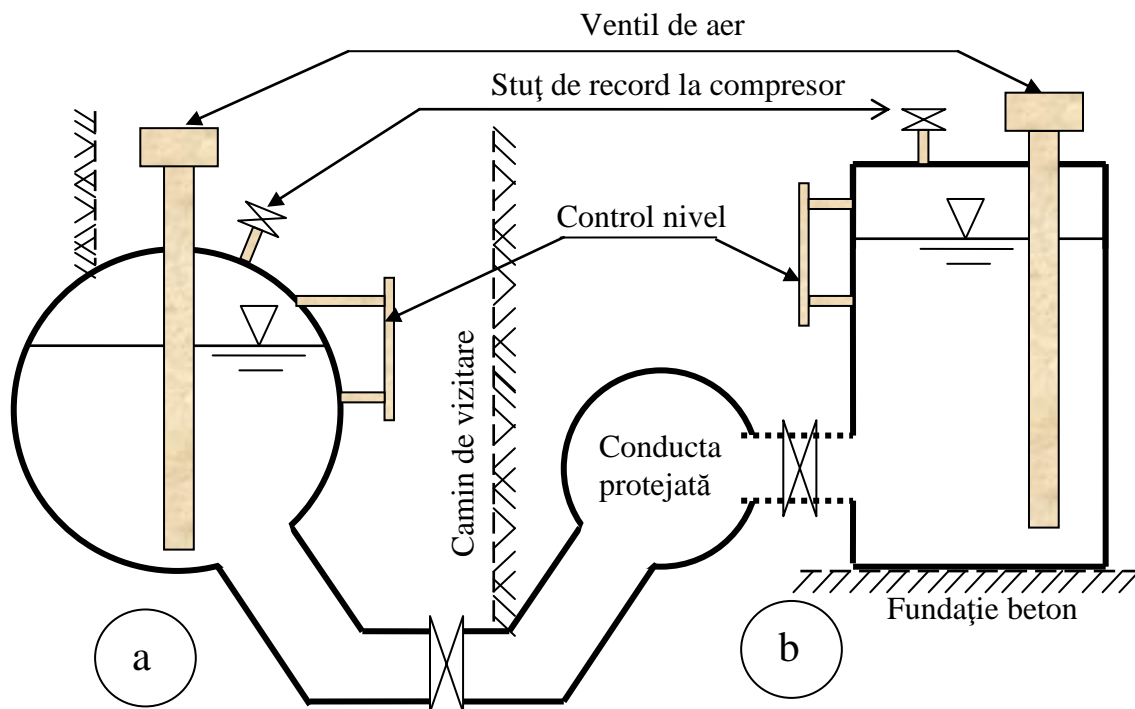
**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATEREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

- necesitatea de a corespunde tuturor normelor de securitate pentru recipientii sub presiune;
- necesitatea de a fi izolat din punct de vedere termic pentru a preveni înghețul.

Atunci când volumul hidroforului este mare, *hidroforul vertical* devine ne-economic și se recomandă *hidroforul orizontal* (figura 3.2.a). Acesta poate avea volume oricât de mari fără a deveni o construcție înaltă și poate fi îngropat ceea ce îi conferă mai multe avantaje, astfel:

- nu ocupă teren constructibil;
- nu necesită măsuri pentru a preveni înghețul;
- nu se supune reglementărilor pentru recipientii sub presiune;

Dispoziția orizontală, îngropată, a hidroforului are însă toate dezavantajele unei lucrări ascunse: nu poate fi supravegheată, nici inspectată (decât parțial) iar în cazul unor defecțiuni / avarii / lucrări de întreținere, acestea sunt dificil de remediat / realizat.



**Figura 3.3 – Dotări speciale pentru hidroforul de protecție**

**a – Hidrofor orizontal (subteran); b – Hidrofor vertical (suprateran);**

Rezistența hidraulică a bransamentului, dată în principal de diametrul conductei de legătură are, la hidrofoare, un rol covârșitor pentru comportarea acestora ca mijloace de protecție împotriva loviturii de berbec.

O rezistență mare de bransament lasă să „treacă” variațiile de presiune primare, produse în stația de pompare. De aceea, pentru prevenirea vacuumului și cavitației, în prima fază, a scăderii presiunilor, este necesar ca hidroforul să aibă o rezistență mică de bransament. Rezistența mică de

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATAREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

branșament conduce la debite mari care intră din hidrofor în conductă și, în consecință, la volume mari ale recipientului.

Rezistența mică de branșament este, însă, dezavantajoasă pentru faza a doua, de creștere a presiunilor, când curgerea se inversează și când apa intră din conductă în hidrofor. În această fază, rezistența mică de branșament favorizează accelerarea curgerii în sens invers, având ca efect comprimarea puternică a pernei de aer din hidrofor și creșterea, pe măsură, a presiunilor. Este posibil, în această situație, ca presiunile maxime care se produc în prezența hidroforului să le depășească pe cele care se produc în absența acestuia ceea ce, evident, reprezintă un non-sens din punctul de vedere al protecției propriu-zise.

Avem de a face, aparent, cu un paradox și, în realitate, cu o incompatibilitate între valoarea optimă a rezistenței de branșament pentru cele două faze ale loviturii de berbec.

Pentru „soluționarea” acestei incompatibilități, recomandarea are în vedere un cost minim al hidroforului, care corespunde rezistenței maxime de branșament (când volumul hidroforului este minim). Mai precis, se alege rezistența de branșament (mare) și volumul de hidrofor (mic) care asigură protecția la presiuni maxime. În aceste condiții, hidroforul va asigura doar o protecție parțială la sub-presiuni și, pentru asigurarea totală a acestei protecții, se folosesc suplimentar ventilele de aer plasate în număr și poziții determinate prin calcul.

Există, desigur, și soluții mai sofisticate, cum ar fi branșamentele „asimetrice”, cu rezistența hidraulică diferită în funcție de sensul de curgere, dar acestea nu sunt fiabile și trebuie aplicate cu multă precauție și cu condiția luării unor măsuri suplimentare care să le asigure o funcționare corectă.

Față de castelul de echilibru, care nu necesită, practic, nici un fel de supraveghere, hidroforul are dezavantajul că impune o serie de exigențe în exploatare și, ca atare, trebuie să fie dotat cu o serie de instalații speciale (vezi *figura 3.3*).

În primul rând, volumul pernei de aer (care se determină prin calcul, fiind coroborat cu volumul geometric și cu rezistența hidraulică a branșamentului) trebuie să fie respectat cu strictețe. De regulă, acest volum, destinat la presiunea atmosferică, depășește, uneori cu mult, volumul geometric al hidroforului și ca urmare, la punerea în funcțiune el trebuie creat. De aici rezultă necesitatea ca hidroforul să fie prevăzut cu un ștuț de racord la un compresor de aer și, evident, ca acest compresor să existe și să fie funcțional.

Din diferite motive (prin dizolvare în apă în primul rând dar și prin unele ne-etanșeități) e posibil ca, în timp, volumul pernei de aer să se micșoreze. De aici rezultă și necesitatea ca hidroforul să fie prevăzut cu un sistem de control al nivelului apei prin care se verifică, de fapt, volumul pernei de aer. Compresorul de aer va fi folosit și atunci când se constată scăderea volumului pernei de aer sub valoarea prescrisă.

În sfârșit, ca măsură de siguranță, se recomandă ca pe hidrofor să fie montat un ventil de aer care să introducă aer și să prevină turtirea cazanului atunci când se produce vacuum. Întrucât, de regulă, ventilele de aer comercializate sunt de tipul „aerisire–dezaerisire”, pentru a se preveni evacuarea aerului la faza de creștere a presiunilor precum și în regim normal de funcționare, se recomandă ca aceste ventile să fie montate pe conducte verticale care să coboare până la fundul hidroforului.

Se reamintește că în cazul stațiilor de pompare, unde se aplică cu precădere soluția de protecție cu hidrofor, pătrunderea aerului în aducțiune nu prezintă un pericol. Aerul nu afectează cu nimic stația de pompare. Dimpotrivă, accesul aerului în conductă, ca și pătrunderea apei, poate fi benefică pentru protejarea acesteia la sub-presiuni, permițând să se reducă volumul (și costul) hidroforului.

Atunci când hidroforul este îngropat, accesul liber la toate aceste instalații speciale va fi asigurat prin cămine de vizitare concepute astfel ca funcționarea și supravegherea lor să se facă în cele mai bune condițiuni.

Tot atunci când hidroforul este îngropat, forma conductei de branșament poate favoriza colmatarea cu material aluvionar deoarece în cea mai mare parte a timpului apa din branșament stagnează. Colmatarea branșamentului este periculoasă întrucât modifică rezistența hidraulică a acestuia. În consecință, instrucțiunile de exploatare trebuie să prevadă măsuri de inspecție și de remediere corespunzătoare.

### **3.3 Ventilul de aer**

Din punctul de vedere al protecției la lovitură de berbec, prin ventil de aer se înțelege acel dispozitiv care **introduce aer** în conductă imediat ce presiunea devine negativă (mai mică decât presiunea atmosferică, respectiv dacă se produce vacuum). De regulă, ventilele de aer comercializate sunt de tipul aerisire – deaerisire, adică au, pe lângă această funcție și pe aceea de a evacua aerul sub presiune care se poate acumula în anumite puncte (așa-zis „înalte”) ale profilului longitudinal al aducțiunii. Pentru protecția la lovitură de berbec, ventilele (pentru introducerea aerului) pot fi însă plasate și în alte puncte decât cele „înalte” (unde ele se montează independent de problema loviturii de berbec, pentru funcția lor de deaerisire).

Ventilul de aer este un dispozitiv extrem de ieftin în raport cu hidroforul sau castelul. Principalul său dezavantaj îl constituie faptul că protecția (pentru reducerea vacuumului) e realizată doar pe o lungime redusă de conductă și anume în vecinătatea imediată a punctului unde se instalează ventilul. Ca urmare, pentru a se proteja o lungime mai mare de conductă e necesar să se instaleze mai multe asemenea dispozitive. Tot un dezavantaj îl constituie, ca și în cazul hidroforului, faptul că sunt necesare măsuri atente de montaj și întreținere care să le confere o funcționare sigură și corectă.

Efectul protector limitat al ventilului de aer se datorează faptului că acesta „intră în acțiune” cu mare întârziere față de momentul în care în punctul respectiv ajung primele variații de presiune. E necesar ca presiunea să scadă **în punctul respectiv** sub zero pentru ca ventilul să se deschidă. În acest timp, pe restul aducțiunii, efectul propagării variațiilor de presiune și-a produs deja efectul negativ.

În plus, prin deschiderea ventilului de aer, doar în punctul respectiv se asigură o presiune egală cu zero (presiunea atmosferică). În fapt, presiunea asigurată prin deschiderea ventilului este puțin sub zero întrucât intervine și pierderea de sarcină la curgerea aerului care intră prin ventil în conductă. În aceste condiții, presiunile din vecinătatea ventilului vor fi, inevitabil, mai mici decât zero și, chiar prin montarea mai multor ventile relativ apropiate unul de altul, vacuumul nu poate fi eliminat în totalitate. Acesta este motivul pentru care, în *Normativ*, se acceptă un vacuum limitat, de 2...3 m.c.a., care de regulă poate fi suportat de conductele obișnuite. Dacă acest vacuum limitat nu ar fi acceptat, soluția protecției cu ventile de aer ar fi, practic, imposibil de aplicat.

În ce privește instalarea practică a ventilelor pe profilul longitudinal al aducțiunii, numărul, poziția și tipo-dimensiunea acestora vor rezulta în urma calculului detaliat al loviturii de berbec care va avea ca rezultat, pe lângă valoarea presiunilor extreme, și debitul de aer pe care îl introduce în conductă fiecare ventil.

### 3.4 *Supapa de suprapresiune*

Supapa de suprapresiune este acel dispozitiv care se deschide imediat ce presiunea depășește o anumită valoare (maximă) care, de regulă, poate fi reglată în prealabil. În acest fel, în punctul respectiv, presiunea maximă e limitată la valoarea calibrată de deschidere a supapei. În fapt, presiunea asigurată prin deschiderea supapei este puțin mai mare decât valoarea calibrată de deschidere întrucât intervine și pierderea de sarcină la curgerea apei prin supapă.

Supapa de suprapresiune este un dispozitiv extrem de ieftin în raport cu hidroforul sau castelul. Principalul său dezavantaj îl constituie faptul că protecția (pentru reducerea suprapresiunilor) e realizată doar pe o lungime redusă de conductă și anume în vecinătatea imediată a punctului unde se instalează supapa. Ca urmare, pentru a se proteja o lungime mai mare de conductă e necesar să se instaleze mai multe asemenea dispozitive. Tot un dezavantaj îl constituie, ca și în cazul hidroforului, faptul că sunt necesare măsuri atente de montaj și întreținere care să le confere o funcționare sigură și corectă.

Efectul protector limitat al supapei de suprapresiune se datorează faptului că aceasta „intră în acțiune” cu mare întârziere față de momentul în care în punctul respectiv ajung primele variații de presiune. E necesar ca presiunea să crească **în punctul respectiv** până la valoarea de calibrare pentru ca supapa să se deschidă. În acest timp, pe restul aducțiunii, efectul propagării variațiilor de presiune și-a produs deja efectul negativ.

În ce privește instalarea practică a supapelor pe profilul longitudinal al aducțiunii, numărul, poziția și tipo-dimensiunea acestora vor rezulta în urma calculului detaliat al loviturii de berbec care va avea ca rezultat, pe lângă valoarea presiunilor extreme, și debitul de apă pe care îl evacuează din conductă fiecare supapă.

### 3.5 *Volanta adițională*

La stațiile de pompare, principala cauză a loviturii de berbec, obligatoriu a fi luată în considerare în calcul conform *Normativului*, o constituie întreruperea alimentării cu energie a motoarelor de antrenare ale pompelor. În această situație, momentul de inerție al tuturor părților rotative aflate în cuplaj (pompa împreună cu apa, cuplajul mecanic și motorul) joacă un rol important întrucât de el depinde timpul real de oprire al pompelor și, astfel, „duritatea” perturbației primare care generează apoi lovitura de berbec pe întreaga aducțiune.

Mărirea momentului de inerție prin adăugarea unei volante suplimentare poate fi o soluție pentru reducerea variațiilor de presiune însă, practic, aplicarea acestui tip de soluție de protecție este dificil de aplicat. Totuși, efectul benefic al inerției trebuie avut în vedere și, atunci când există posibilitatea de a alege între mai multe tipuri de grupuri de pompare (ansambluri motor + pompă), se va alege acela care să aibă cel mai mare moment de inerție.

### 3.6 *Conducta de ocolire*

La stațiile de pompare, de regulă, pe refularea fiecărei pompe se găsește câte o clapetă de reținere (clapetă de sens) care permite curgerea doar către bazinul de refulare și nu permite curgerea inversă. La *cap. 2.3* s-a explicat că este optim ca aceste clapete să se închidă în momentul inversării debitului (sau chiar cu puțin înainte) și că orice decalaj la închidere este generator de noi perturbații generatoare de fenomene suplimentare de lovitură de berbec. Tot acolo s-a arătat că dacă s-ar permite curgerea în sens invers, atunci suprapresiunile care s-ar produce ar fi mult diminuate, în

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATEREA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

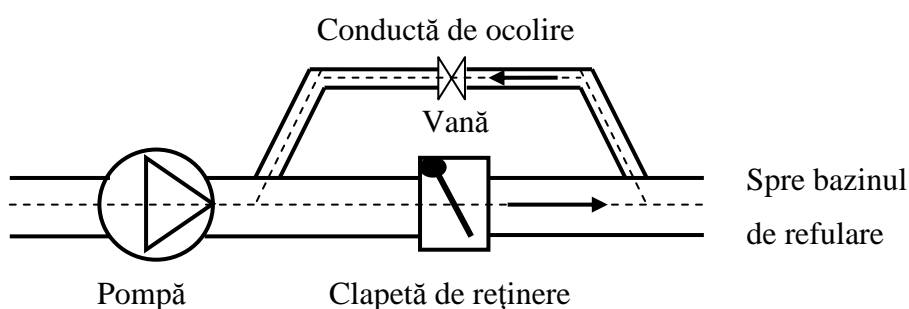
---

schimb ar exista pericolul ambalării pompei în regim de turbină și s-ar irosi apa care a fost deja pompată.

Pornind de la aceste constatări, o soluție pentru reducerea suprapresiunilor o constituie montarea unei *conducte de ocolire* (de *by-pass*) a clapetei de reținere, ilustrată în *figura 3.4*.

*Conducta de ocolire* are un diametru cu mult mai mic decât conducta de refulare și pe ea este montată o vană.

În regim normal de funcționare vana trebuie să fie deschisă și apa curge către bazinul de refulare, în principal prin conducta de refulare și prin clapeta de reținere și, într-o măsură mult mai mică, prin conducta de ocolire și prin vana deschisă.



**Figura 3.4 – Conducta de ocolire (by-pass)**

La oprirea pompei și inversarea curgerii, clapeta de reținere se închide și apa e lăsată să curgă în sens invers numai prin conducta de ocolire și prin vana deschisă. Datorită diametrului redus, determinat riguros prin calcul, această curgere în sens invers poate fi controlată astfel încât să aibă un debit mic și pompa să nu aibă de suferit din cauza ambalării, obținându-se în schimb o reducere importantă a suprapresiunilor. Personalul din stația de pompare va închide apoi lent această vană dar, debitul în sens invers fiind foarte mic, volumul de apă pierdut este redus.

## 4 LISTA NOTAȚIILOR

- A - secțiunea conductei  
D - diametrul conductei  
E - modului de elasticitate al materialului din care este confecționată conducta.  
e - grosimea peretelui conductei  
 $F_d$  – secțiunea orizontală a dispozitivului (castel, hidrofor)  
H - cota piezometrică  
 $H_o$  - înălțimea piezometrică inițială sau cotă în bazinul de refulare  
 $H_g$  - înălțimea geodezică  
 $H_v$  - înălțimea piezometrică a presiunii de vaporizare (scara manometrică:  $H_v = -6 \dots -8$   
...min. -10 m.c.a).  
 $H_p$  - înălțimea de pompare  
J - pantă hidraulică sau moment de inerție exprimat în  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$   
 $GD^2$  - moment de inerție exprimat în  $\text{kgf} \cdot \text{m}^2$   
L - lungimea (la conducte)  
 $M_m$  - moment motor  
 $M_r$  - moment rezistent  
N - puterea  
Q - debitul  
 $R''$ ,  $S'$  - invariantii Riemann  
 $T_i$  - timp de închidere  
 $T_p$  - timp parțial de închidere  
 $T_m$  - timp de manevră  
V - viteza medie într-o secțiune  
Z, z - cota axului conductei  
c - celeritate (viteza de propagare a undelor elastice)  
d - indice; indică faptul că anumiți parametri se referă la un dispozitiv.  
 $d_i$  - indici pentru unde *directe* și respectiv *inverse*  
 $i, f$  – indici pentru valori *inițiale*, respectiv *finale*;  
 $f_d$  - funcție directă de propagare a loviturii de berbec  
 $f_i$  - funcție inversă de propagare a loviturii de berbec  
g - accelerație gravitațională  
h - undă de presiune exprimată în unități de coloană de lichid  
 $h_v$  - înălțimea vacuummetrică a presiunii de vaporizare ( $h_v = 6 \dots 8$  m.c.a).  
 $h_r$  - pierdere de sarcină  
j - indice; reprezintă un pas de calcul în timp  
k - indice; reprezintă numărul unui nod curent și de asemenea al tronsonului dinaintea nodului  
l - coeficient de reflexie  
m, z - rezistență de undă  
n - turația pompelor sau coeficientul transformării politropice  
 $n_s$  - turația specifică a pompei  
o - indice; indică regimul permanent (inițial)(dacă nu se specifică altfel)  
r - coeficient de refracție  
s - coordonata de spațiu  
t - coordonata de timp

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATERICA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

- $\Delta H$  - undă (variație) de cotă piezometrică  
 $\Delta p$  - undă (variație) de presiune  
 $\Delta Q$  - undă (variație) de debit  
 $\Delta t$  - interval de timp în care unda parcurge un tronson de calcul (se mai numește  *timp de parcurs*); valoarea minima dintre toți timpii parcurs se ia, de regulă, ca pas de calcul în timp în calculul cu diferențe finite  
 $\alpha$  – grad de închidere al vanei sau coeficientul lui Coriolis (coeficient de corecție al termenului cinetic din relația lui Bernoulli, în modelul curgerii unidimensionale)  
 $\beta$  - coeficient de corecție în modelul curgerii unidimensionale (de ex., în expresia forței de impuls)  
 $\gamma$  - greutatea specifică a lichidului  
 $\varepsilon$  - modulul de elasticitate al lichidului  
 $\eta$  - randament  
 $\lambda$  - coeficientul lui Darcy-Weissbach al pierderilor de sarcină liniare  
 $\varphi$  - unde incidente și refractate  
 $\mu$  - coeficientul Poisson  
 $\psi$  - unde reflectate  
 $\rho$  - densitatea lichidului  
 $\tau$  - volum (de aer sau de vapori)  
 $\zeta$  - coeficientul pierderilor de sarcină locale  
 $\omega$  - viteză unghiulară

## 5 BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

### 5.1 Autori străini (în ordine cronologică)

**Jukovski, N.E.**, *O ghidravliscescom udare v vodoprovodnîh trubah*, Biul. Poltihn. Obșcestvo, nr.5, **1899** pp. 255-290

**Allievi L.**, *Teoria generale del moto perturbato dell'acqua nei tubi in pressione*, Ann. Ing. Arch. Italiani, Milano, **1903**

**Schnyder, O.**, *Druckstösse in Pumpensteigleitungen*, Schweiz. Bauztg.94, nr.22 ,23, **1929**

**Jaeger, Ch.**, *Note sur les phénomènes périodiques dans les conduites forcées à caractéristiques multiples*, La Houille Blanche, vol.35, Mai, Juin, Juillet, Aout, **1936**

**Knapp, R.T.**, *Complete Characteristics of Centrifugal Pumps and Their Use in the Prediction of Transient Behaviour*, Trans. ASME, 59, **1937**

**Evangelisti, G.**, *Il colpo d'ariete nelle condotte elevatorie munite di camera d'aria*, L'Energia Elettrica, sept. **1938**

**Jaeger, Ch.**, *Schäden durch Wasserstösse und Pulsationen in Druckleitungen*, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, vol. 33, no. 33, martie **1943**

**Gandenberger, W.** *Windkessel in Pumpendruckleitungen*, GWF 86, **1943**

**Jaeger, Ch.**, *Waterhammer Effects in Power Conduits*, Civil Engineering and Public Works Review, London, Febr, Mart, Apr., Mai, **1948**

**Stepanoff, A.I.**, *Centrifugal and axial pumps*, New York, **1948**

**Gandenberger, W.** *Grundlagen der Graphischen Ermittlung der Druckschwankungen in Wasserversorgungsleitungen*, Munchen, **1950**

**Bergeron L.**, *Du coup de bélier en hydraulique au coup de foudre en électricité*, Paris, Dunod, **1950**

**Kiselef, P.G.**, *Îndreptar pentru calcule hidraulice*, Trad. din l. rusa, Editura Energetica de Stat, **1953**

**Parmakian, J.**, *Pressure Surges at Large Pump Installations*, Trans. ASME, vol. 75, **1953**, p. 995

**Evans, W. E., Crawford, C.C.**, *Design Charts for Air Chambers on Pump Lines*, Trans. ASCE, Paper nr. 2710, vol 119, pp. 1025, **1954**

**Mostkov, M.A.**, *Ghidravlisceskii spravocinic*, Moscova, **1954**

**Parmakian, J.**, *Water Hammer Analysis*, New York. **1955**

**Lugwig, K, Stack, H**, *Berechnung der Grösse der Drückwindkessel in Wasserwerken*, Hrsbg. Von F.Tolke, 2 Heft, Springer Verlag, Berlin, **1956**

**Frank, J.**, *Nichtstationäre Vorgänge in den Zuleitungs und Ableitungskanalen von Wasserkraftwerken*, Springer Verlag, Berlin, **1957**

**Jaeger, Ch.**, *Water Hammer caused by Pumps*, Water Power, **1959**

**Ludewig, D.**, *Massnahmen zur Minderung des Druckstosse in Pumpleitungen*, Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 12, **1962**

**Lupton, H.R.**, *Surge Control in Pipelines*, Journ. of the Institution of Water Engineers, vol.19, No. I, **1965**

**Ludewig, D.**, *Beiträge zur Drückstossicherung von Pumpanlagen*, Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Heft, 25, **1966**

**Streeter, V.L., Wylie, E.B.**, *Hydraulic Transients*, Mc. Graw-Hill, New York, **1967**

**Haindl, K.**, *Vetrnik a jeho upravy jako protirázová ochrana*, Praga, **1968**

**Blohin, V.I.**, *Cercetări experimentale ale loviturii de berbec însoțită de ruperea continuității curentului* (l. rusa), Vodosnabjenie i canaliz. tehnica, nr.3 **1970**

**Chaudhry H.**, *Resonance in Pipe Systems*, Water Power and Dam Construction, England, no. 7, **1970**.

**Alexandrov, V.S.**, *Despre construcția caracteristicilor complete ale pompelor centrifuge în coordonate generalizate*. Culegerea „Nefti i gaz”, **1971** (l. rusa)

**Kranenburg C.**, *The Effect of Free Gas on Cavitation in Pipelines Induced by Waterhammer*, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Pressure Surges, Canterbury, England, **1972**.

**Kalwijk C**, *Investigation into Cavitation in Long Horizontal Pipelines Caused by Waterhammer*, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands, Publ. No. 115, **1974**.

**Fanelli M.**, *Les Phénomènes de Résonance en Hydraulique*, La Houille Blanche, France, no. 4, **1975**.

**Tullis J., Streeter V.**, *Waterhammer Analysis with Air Release*, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Pressure Surges, London, England, **1976**.

**Wylie E.**, *Free Air in Liquid Transient Flow*, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Pressure Surges, Canterbury, England, **1980**.

**Parmakian J.**, *Waterhammer Analysis*, Longman, London, **1985**.

**Chaudhry, H.**, *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, **1987**.

**Wylie E., Streeter V.**, *Fluid Transients in Hydraulic Systems*, Library Technical University of Nova Scotia, Canada, **1993**.

## **5.2 Autori români (în ordine cronologică)**

**Cioc, D.**, *Hidraulică și elemente de mecanica fluidelor*. Vol. II, ESDP, **1960**

**Stoianovici, S. Faibiș, O.**, *Lovitura de berbec în instalații de pompare*, Hidrotehnica, august **1961**

**Mateescu, C.**, *Hidraulica*, Editura Didactică și Pedagogică, București, **1963**.

**Cioc, D.**, *O metodă simplă și intuitivă pentru fundamentarea procedeelelor grafice și numerice de calcul ale mișcării nepermanente a lichidelor în conducte sub presiune*. Hidrotehnica, nr. 11, **1964**

**Stoianovici, S.**, *Considerațiuni asupra calculului loviturii de berbec prin metode expeditivă*, Hidrotehnica, sept. **1964**

**Stoianovici, S.**, *O metodă expeditivă pentru calculul suprapresiunilor datorită loviturii de berbec la instalațiile prin pompare*, Hidrotehnica, Gospodărirea Apelor, Meteorologia, nr.6, iunie **1966**

**INDRUMATOR PRIVIND CALCULUL LOVITURII DE BERBEC ȘI ALEGEREA MĂSURILOR  
OPTIME DE PROTECȚIE – ANEXĂ LA NORMATIVUL „CALCULUL ȘI COMBATERICA  
LOVITURII DE BERBEC LA CONDUCTELE PENTRU TRANSPORTUL APEI”**

---

**Cioc, D.**, *Contribuții la calculul mișcărilor nepermanente în conducte și la teoria sonicității cu aplicare la pompajul sonic*, Studii de Hidraulică, XVIII, București, **1968**

**Dumitrescu, D., Iamandi, C.**, *Manualul inginerului hidrotehnician*, Vol I, Secțiunea III, Hidraulică, Editura Tehnică, București, **1969**.

**Cioc, D., Tatu, G.**, *Asupra unui program general de calcul numeric al loviturii de berbec în rețele de conducte*, Buletinul științific al ICB, nr. 4, **1971**

**Arsenie, D.**, *Studiul oscilațiilor în masă ce apar în sistemul galerie de aducțiune-castel de echilibru la schimbarea bruscă a puterii centralei hidroelectrice*, Studii și Cercetări de Mecanică Aplicată, București, Nr. 4, **1973**.

**Stoianovici, S.**, *Tabele pentru calculul suprapresiunilor la instalații cu pompare*, Note elaborate pentru a fi introduse în instrucțiunile tehnice pentru calculul loviturii de berbec, iunie **1974**

**Arsenie, D.**, *Contribuții la calculul hidraulic al castelelor de echilibru*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Timișoara, **1974**.

**Cioc, D., Tatu, G., Runceanu, M.** - *Instalație de protecție pentru conducte sub presiune*, Brevet de invenție nr. 58038 din **1974**.

**Cioc, D.**, *Hidraulica*, EDP, **1975**

**Arsenie, D.**, *Un criterium de stabilité et quelques inegalités nouvelles par la méthode de la fonction de Liapunov dans le cas de moyennes oscillations dans les Cheminées d'Equilibre*, Proceedings of IAHR Symposium: Fluid Motion Stability in Hydraulic Systems with Automatic Regulators, Bucharest, September 26-29, **1976**.

**Cioc, D., Tatu G., Anton A.**, *A complex Air Chamber used in Protecting the Discharge Lines against Waterhammer*, Second International Conference on Pressure Surges, London, England, September 22-24, **1976**.

**Cristidis, V.**, *Contribuții la studiul mișcării nepermanente mixte cu aplicații la funcționarea uzinelor hidroelectrice*, Teză de doctorat, Institutul de Construcții București, **1978**.

**Hancu, S., Popescu, M., Jeleu, I., Constantinescu G.**, *Unele aspecte privind calculul loviturii de berbec din instalațiile de pompare*, Hidrotehnica, Nr. 2, **1978**.

**Isbășoiu, E., Echisli, E.**, *Analiza regimurilor tranzitorii de pornire a unor stații de pompare*, Hidrotehnica, nr. 6, **1978**.

**Isbășoiu, E., Nistreanu, V.**, *On the transitory phenomena from the vat of irrigation pumping plants with syphon feed-pipes*, 6<sup>th</sup> Conference on Fluid Machinery, Budapesta, **1979**.

**Popescu, M., Constantinescu, G., Jeleu, I.**, *Asupra soluțiilor de protecție la lovitura de berbec de la 30 de stații de pompare din țara noastră*, Studii și Cercetări de Hidraulică, I.S.C.H., Vol. XXVIII, București, **1980**.

**Tatu, G.**, *Contribuții la studiul fenomenelor de rezonanță în sistemele hidraulice sub presiune*, Teză de doctorat, Institutul de Construcții, București, **1980**.

**Marinovici, D.**, *Dispozitive și instalații pentru protecția stațiilor de pompare la lovitura de berbec*, Teză de doctorat, Institutul de Construcții București, **1981**.

**Cioc, D., Tatu, G., Anton, A.**, *Rezultate practice obținute prin utilizarea hidroforului complex la protecția la lovitura de berbec*, Hidrotehnica, nr. 10, **1982**.

**Popescu, M.**, *Computation of Hydraulic Transients in Complex Hydro Schemas*, Water Power and Dam Construction, England, no. 9, **1986**.

**Tatu, G., Cioc, D.** - *Studiul regimurilor nepermanente în circuitele hidraulice de răcire și de apă tehnică de la Centrala Nuclearo-Electrică Cernavoda*, Cercetare-Proiectare 1987, ICB, **1988**.

**Tatu, G.**, *Unele rezultate privind folosirea hidrofoarelor pentru protecția instalațiilor gravitaționale contra loviturii de berbec*, Hidrotehnica, nr. 10, **1992**.

**Tatu, G.** – *Hydraulic Transients, Lecture Notes*, Civil Engineering Institute of Bucharest, Dept. of Engineering Sciences, **1994**

**Popescu, M., Arsenie, D.**, *Problemes dynamiques dans le projet et le fonctionnement des usines hydroelectriques et des stations de pompage*, Proceedings of the IAHR Congress, London, England, Voi. I, **1995**, p. 613-615.

**Florea, M.**, *Contribuții la studiul mișcărilor nepermanente din sistemele hidraulice sub presiune*, Teză de doctorat, Universitatea Ovidius Constanța, **1998**.

**Constantinescu, G., Florea, M.**, *Cercetări experimentale privind mișcările nepermanente în sisteme hidraulice sub presiune la curgeri bifazice apă-aer*, Analele Universității Ovidius Constanța, Seria Inginerie Civilă, **2000**.

**Marinovici, D.**, *Hydraulic Transients for Pipes*, Editura BREN, București, **2000**.

**Omer, I.**, *Contribuții la calculul sistemelor hidraulice sub presiune funcționând în regim nepermanent*, Teză de doctorat, Universitatea Ovidius Constanța, **2002**.

**Tatu, G., Schneider, E.** - *Instationäre Fliessvorgänge in Drückstollen von Wasserkraftwerken hervorgerufen durch Entweichen von Luftblasen*, Internationales Symposium “Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau”, 7-9 Oktober **2002**, Technische Hochschule Zurich, pp.355-364.

**Popescu, M., Arsenie, D., Vlase, P.**, *Applied Hydraulic Transients for Hydropower Plants and Pumping Stations*, Balkema Publishers, Lisse, Abingdon, Tokyo, **2004**.

**Tatu, G.**, *Some Problems when using Finite Differentials in Cavitation Calculation*, Technical University for Civil Engineering of Bucharest, Scientific Bulletin, Series: Mathematical Modelling in Civil Engineering, Year XLXVIII, no. 1, December, **2005**.

**Tatu, G.** – *Unsteadiness of Hydro-Power Supplying Lines Generated by Air Cushions*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IAHR International Meeting of the Workshop on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 24-26, **2007**, Tom 52(66), Fascicola 6 ISSN 1224-6077.

**Popescu, M.**, *Uzine hidroelectrice și stații de pompare. Funcționarea hidraulică la regimuri tranzitorii*, Editura Universitară, București, **2008**.