

Zrak u vodovodnim cijevima

Marijan Habajec

Ključne riječi

vodovod,
cjevovod,
crpni sustav,
zrak, zračni jastuk,
odstranjenje zraka,
zaštita

Key words

water supply line,
pipeline,
water supply system,
air, air pocket,
air removal,
protection

Mots clés

conduite d'eau,
tuyauterie,
système de pompage,
air, amas d'air,
purge d'air,
protection

Schlüsselworte:

Wasserleitung,
Rohrleitung,
Pumpsystem,
Luftkissen,
Luftbeseitigung,
Schutz

M. Habajec

Pregledni rad

Zrak u vodovodnim cjevovodima

U osnovnim se elementima analizira štetno djelovanje zračnih jastuka u vodovodnim cijevima. Prikazane su mogućnosti smanjenja štetnih djelovanja zraka u cjevovodima i vodoopskrbnim sustavima. Razmatra se odstranjenje zraka u ovisnosti o promjeru cjevovoda, brzinama punjenja cjevovoda vodom, uz prikaz mjera zaštite na osnovu provedenih praktičnih istraživanja i iskustava. Navedene su mjere kontrole i održavanja cjevovoda i crpnih sustava da bi se izbjegle pojave kavitacije.

M. Habajec

Subject review

Air in water supply pipelines

Harmful action of air pockets in water supply pipelines is analyzed in broad terms. Possibilities for reducing harmful air activity in pipelines and water supply systems are presented. The removal of air in terms of pipeline diameter and speed by which pipes are filled with water is considered, and protection measures based on practical research and past experience are presented. Measures against cavitation, as used in the inspection and maintenance of pipeline and water supply systems, are formulated.

M. Habajec

Ouvrage de syntèse

L'air dans les canalisations d'eau

L'article analyse les éléments essentiels de l'action néfaste des amas d'air dans les canalisations d'eau. On présente les possibilités de réduction de l'action néfaste dans les tuyauteries et dans les systèmes d'alimentation en eau. On étudie les moyens de purge d'air en fonction du diamètre de la canalisation, des vitesses de remplissage d'eau des canalisations, avec les mesures de protection issues des essais pratiques et de l'expérience. On indique les mesures de contrôle et de maintenance des tuyauteries et des systèmes de pompage afin d'éviter le phénomène de cavitation.

M. Habajec

Übersichtsarbeit

Luft in Wasserrohrleitungen

In Grundelementen analysiert man die schädliche Wirkung von Luftkissen in Wasserleitungsrohren. Dargestellt sind Möglichkeiten der Minderung der schädlichen Wirkungen der Luft in Rohrleitungen und Wasserversorgungssystemen. Es wird die Beseitigung der Luft abhängig vom Rohrdurchmesser und der Füllgeschwindigkeit betrachtet und Schutzmassnahmen auf Grund von durchgeführten Forschungen und Erfahrungen dargestellt. Angeführt sind Massnahmen für die Kontrolle und Wartung von Rohrleitungen und Pumpsystemen, mit dem Ziel Kavitationserscheinungen zu verhüten.

Autori: Mr. sc. **Marijan Habajec**, dipl. ing. grad., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Kačićeva 26

1 Uvod

Osim zraka koji ispunjava prazni cjevovod i koji se mora ispustiti kako bi se omogućilo punjenje cjevovoda vodom, zrak dospijeva u cjevovod djelovanjem crpnih sustava i oslobađanjem zraka otopljenog u vodi poradi pada tlaka.

U normalnim uvjetima voda sadrži oko 2% obujma otopljenog zraka. Zbog specifičnih fizičkih svojstava zraka u odnosu prema vodi očito je da će se određena količina zraka pomicati cjevovodom i skupljati na najvišim točkama cjevovoda što uzrokuje promjenu hidrauličkih uvjeta toka, ali koji ne uvjetuje i pomicanje zraka. Pojava se posebno očituje na dionicama cjevovoda u padu, duž kojih se zatečeni (zarobljeni) zrak zadržava po površini vode u obliku malih i velikih mjehura s tendencijom njihova pomicanja prema višim točkama dionice cjevovoda.

U kontekstu navedene problematike u pregledu se analitički obrađuje pojava i razvoj zračnog mjehura u cjevovodu, pojava kavitacije te se upozorava na mjere zaštite odnosno na uređaje za evakuaciju zraka.

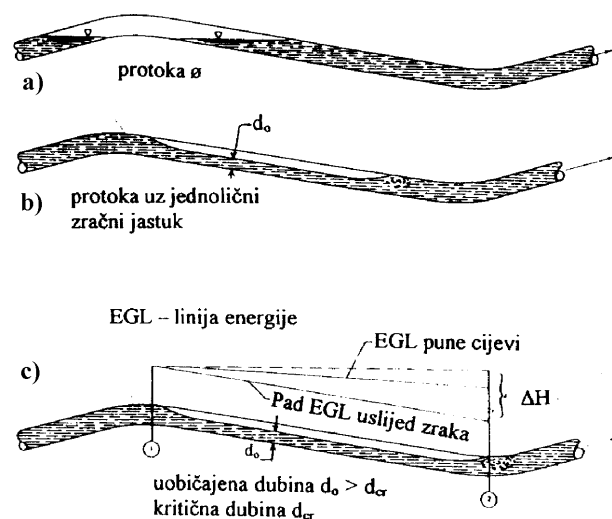
Pojava vodnog udara nije predmet ove analize.

2 Zrak (zarobljen) u cijevnom vodu

U analizi se razmatraju dva slučaja fenomena istaknuta u uvodu – cjevovod s blagim i velikim uzdužnim padom (nagibom).

2.1 Cjevovod s blagim uzdužnim padom

Prema slici 1.a razmatra se fenomen zaostalog (zarobljenog) zraka u cjevovodu s blagim padom. S pojavom toka (slika 1.b) u cjevovodu se uspostavlja dubina vode (d_o) koja uvjetuje laminarni tok i koja je veća od kritične dubine (d_{cr}).



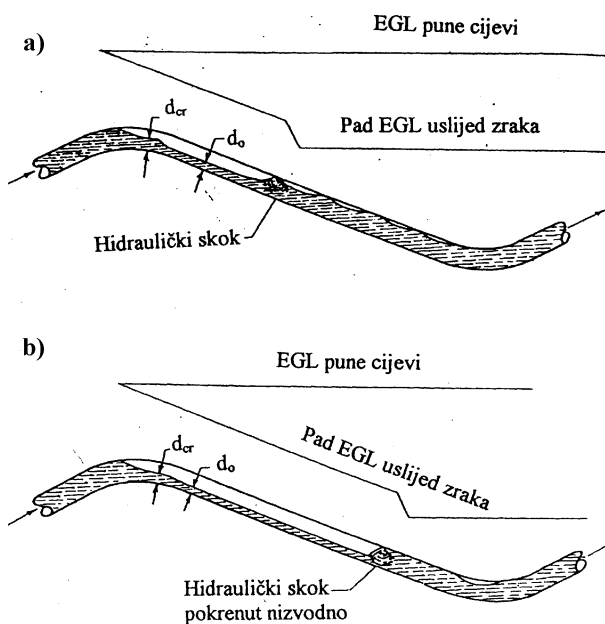
Slika 1. Shematski prikaz pojave i razvoja zračnog mjehura u cjevovodu s blagim padom

Ako obujam stagnirajućega zračnog mjehura nedostaje za ispunjavanje dionice cjevovoda u padu, novopripjeli zrak duž dionice pridonosi bujanju nizvodnog mjehura, zadržavajući istu dubinu vode (d_o) uvjetovanu obilježjem toka. Zarobljeni zrak (zračni mjehur) može se hidraulički pokrenuti razvojem malih mjehura na turbulentnom kraju mjehura koji se stapaju s vodom i koji s vodom otječu (slika 1.c).

Iz opće jednadžbe energije za dva presjeka cjevovoda (početak i kraj zračnog mjehura) proizlazi da gubitak tlaka zbog zarobljenog zraka odgovara vertikalnoj komponenti protezanja (duljine) mjehura.

2.2 Cjevovod s velikim uzdužnim padom

Na slici 2. shematski je prikazan slučaj cjevovoda s velikim padom (nagibom). Iz slike 2.a vidi se da je dubina vode (d_o) manja od kritične dubine (d_{cr}) što omogućuje razvoj hidrauličkog skoka koji predstavlja granicu između više i niže ležeće krivulje vodnog lica. Ako hidraulički skok prekine liniju toka zraka, pojavljuje se efekt potiskivanja (pumpanja) zraka u dionicu nizvodno od skoka.



Slika 2. Zračni džep u cijevima s većim padom

Kod malih protoka hidrauličko pomicanje mjehura ovisi o uvjetima toka nizvodno od skoka. Pri određenom protoku zarobljeni zrak ne slijedi nizvodni tok vode, već povremeno "eksplođira" i rasprši se duž skoka, čime omogućuje njegovo bujanje i pomak.

Kod velikih protoka zrak se lako pomiče ispod skoka, a količina pokrenutog zraka ovisi o sposobnosti skoka da usiše zrak iz gornjeg džepa.

Za bolje razumijevanje fenomena Kennison [7] je razvio dijagram (slika 3.) odnosa nagiba cjevovoda, srednjega protoka, kritičnoga protoka i dubine ispune d/D

na apscise:

- padove cjevovoda kao funkcije sinusa kuta nagiba α i protoke za ma koju vrijednost brzine v prema formuli Chezya za $C = 100$ i $C = 120$,

na ordinatu:

- kritični protoci $Q/D^{5/2}$ ili odnos između protoka i Froudeova broja (F) izražen u obliku $Q/F \cdot D^{5/2}$ i dubine ispune cijevi u odnosu d/D (ordinata 1 i 4).

Sljedeći tok operacija označenih s 2, 3 i 5 iz dijagrama se očitava:

- *kritični protok* u odnosu prema nagibu dionice cjevovoda i dubini ispune cjevovoda vodom (2)
- *odnos između protoka i Froudeova broja* $Q/F \cdot D^{5/2}$ ovisno o dubini ispune cjevovoda vodom i njegova pada ($\sin \alpha$) (3)
- *granični protok skoka* kod kojega je moguće punjenje cijevi uz dani pad i određeni Froudeov broj. Za $F \geq 1$ hidraulički je skok moguć.

Problematika kretanja zračnog mjehura u cjevovodu bila je predmet analiza i istraživanja mnogih znanstvenika:

- Kalinske i Robertson [4] razvili su jednadžbu za protok zraka (1) u funkciji protoka i Froudeova broja:

$$Q_a = Q_w 0,006 (F-1)^{1,4} \tag{1}$$

gdje je:

Q_a – količina zraka

Q_w – protoka vode

F – Froudeov broj definiran izrazom

$$F = v / \sqrt{g \cdot y_e} \tag{2}$$

ovdje su:

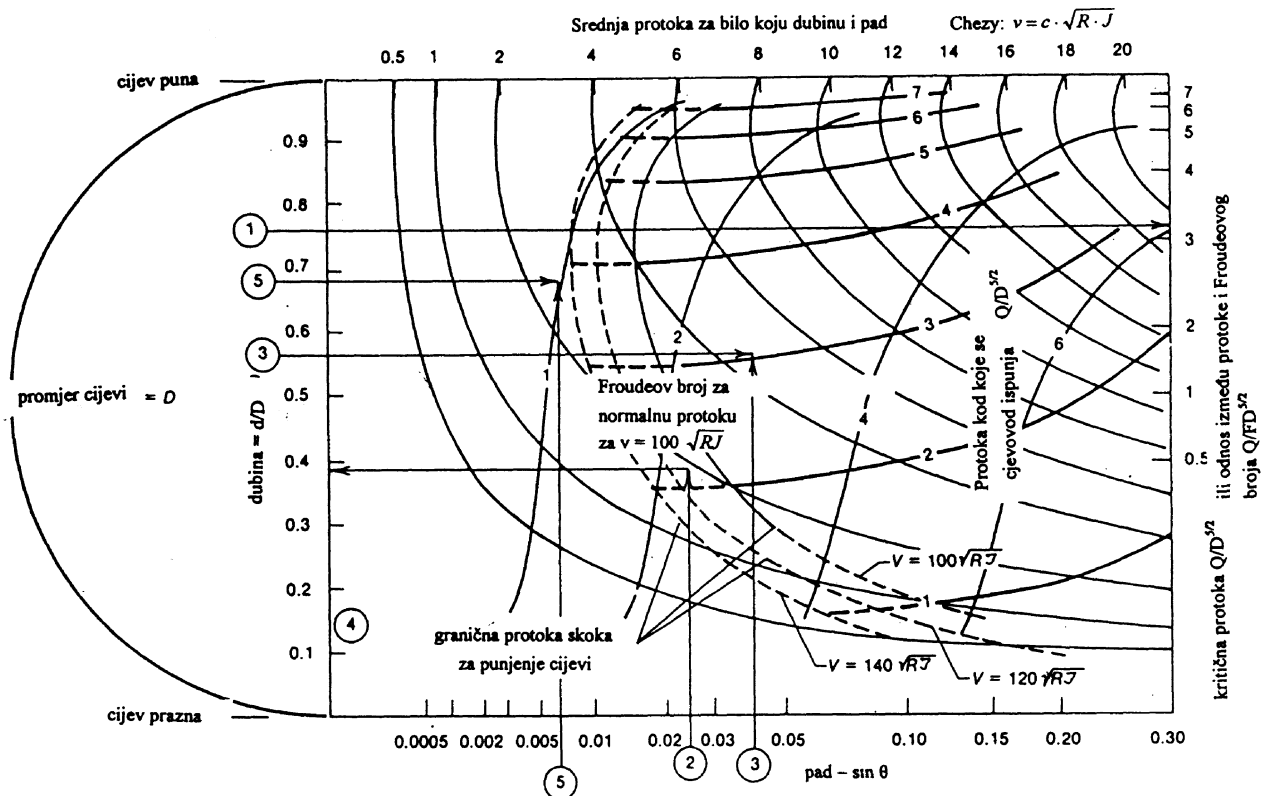
v – srednja brzina tečenja

g – akceleracija gravitacije

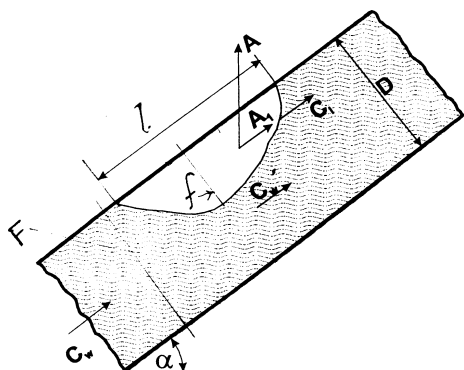
y_e – efektivna dubina (površina poprečnog presjeka uzvodno od skoka podijeljena sa širinom površine).

Jednadžba vrijedi za uvjete kod kojih voda odnosi sav zrak zadržan hidrauličkim skokom.

- Ganderberg [2] je svestrano analizirao stabilnost zračnog mjehura u cijevnim vodovima malih profila od stakla. U nastavku se donose osnove postavki teoretskog razmatranja prema slici 4.



Slika 3. Pojava hidrauličkog skoka unutar cjevovoda (prema Kennisonu)



Slika 4. Element cijevi sa zračnim mjehurinom

Objašnjenje oznaka:

C_w - brzina toka vode u punom presjeku cjevovoda (m/s)

C_w' - brzina toka vode u reduciranom presjeku cjevovoda (m/s)

C_l - brzina protjecanja zračnog mjehura (m/s)

D - promjer cijevi (m)

F - površina poprečnog presjeka cjevovoda (m^2)

f - površina poprečnog presjeka zračnog mjehura (m^2)

α - kut nagiba cjevovoda

A_l - komponenta uzgona u smjeru osi cijevi (kN)

l - duljina zračnog mjehura (m).

P_1, P_2 - sile koje djeluju na zračni mjehur (kN)

γ_w - specifična težina vode (kN/m^3)

Analiza brzine protjecanja zračnog mjehura provodi se jednačbom kontinuiteta toka u cjevovodu na dionici sa zračnim mjehurinom i bez njega.

Jednačba kontinuiteta glasi:

$$C_w \cdot F = C_l \cdot f + C_w' (F - f) \quad (3)$$

Oдавde slijedi izraz za brzinu vode u presjeku sa zračnim mjehurinom (C_w):

$$C_w' = \frac{C_w \cdot F - C_l \cdot f}{F - f} \quad (4)$$

i izraz za brzinu zračnog mjehura (C_l):

$$C_l = \frac{F}{f} \cdot C_w - C_w' \frac{F - f}{f} \quad (5)$$

Na osnovi slike 4. očito je da na promatranoj dionici cjevovoda djeluje sustav sila:

uzgona:

$$A_l = F \cdot \gamma_w \cdot l \cdot \sin \alpha \quad (6)$$

i rezultanta sile otpora ispred (P_1) i iza mjehura (P_2) koju predočuje izraz:

$$P_1 - P_2 = \gamma_w \cdot f \quad (7)$$

gdje je:

γ_w - specifična težina vode (kN/m^3)

$P_1 - P_2$ - razlika tlakova ispred i iza zračnog mjehura i predočuju hidrauličke otpore kretanju mjehura zraka između stijenki cijevi i vode i obilježavaju se sa H_v , pa je:

$$H_v = P_1 - P_2 = \gamma_w \cdot f \quad (8)$$

Na temelju provedene analize stanja u cjevovodu "opterećenim" zračnim mjehurinom jednačba (3) poprima oblik:

$$l \cdot F \cdot \sin \alpha = f \left(\frac{C_w'^2}{2g} + H_v - l' \sin \alpha \right) \quad (9)$$

Iz sustava jednačbi proračunava se brzina protjecanja zračnog mjehura (C_l) u obliku:

$$C_l = \frac{F}{f} \cdot C_w \pm \left(\frac{F - f}{f} \right) \cdot \sqrt{2g \left(\frac{l \cdot F}{f} \sin \alpha - H_v + l \cdot \sin \alpha \right)} \quad (10)$$

Za velike mjehure može se pisati $l'f = lF$ pa slijedi:

$$C_l = \frac{F}{f} \cdot C_w \pm \left(\frac{F - f}{f} \right) \cdot \sqrt{2g \left(2 \frac{l \cdot F}{f} \sin \alpha - H_v \right)} \quad (11)$$

Kod velikih i dugih mjehura zanemaruje se vrijednost H_v , pa brzina zračnog mjehura predočuje izraz:

$$C_{l0} = \frac{F - f}{f} \sqrt{4g \frac{l \cdot F}{f} \cdot \sin \alpha} \quad (12)$$

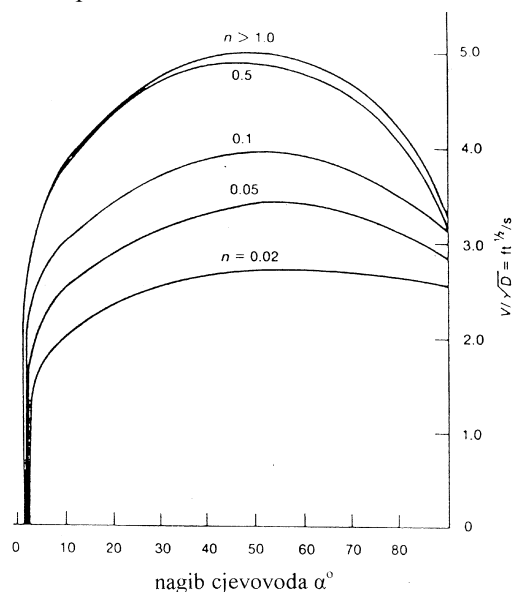
Osvrt na rezultate analiza:

- kod malih mjehura vrijednost H_v jest značajna, što uzrokuje smanjenje brzine zračnog mjehura,
- kod kuta nagiba cjevovoda $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ veličina mjehura je odlučujuća za brzinu zračnog mjehura (C_{l0}). Izraz (12) vrijedi za $f = 0,5-0,8 F$, kad je $\alpha = 0^\circ$, te za $f = 0,8-0,9 F$ kad je $\alpha = 90^\circ$.
- Veličina " f " i " H_v " u jednačbi (12) određuju se na osnovi rezultata istraživačkih radova i tako dobivenih dijagrama koji upućuju na sljedeće:
 - zračne mjehure volumena većeg od $V = 0,5 D^3 \cdot \pi/4$ obilježava konstantna brzina

- kod većih kutova nagiba cjevovoda (α) brzina manjih mjehura je konstantna, za $\alpha = 90^\circ$ brzina i najmanjih mjehura je konstantna.

Iz odnosa nagiba cjevovoda i veličine zračnih mjehura (slika 5.) konstatira se:

- porastom nagiba cjevovoda zračni mjehuri postaju "loptasti" (deblji) i kraći,
- kod kuta nagiba $\alpha = 90^\circ$ mali zračni mjehuri poprimaju tanjurasti oblik, a veći mjehuri poprimaju oblik klipa.



Slika 5. Minimalna brzina pokretanja zraka s visokih točaka (pozicija) cjevovoda – prema Gandenbergeru

gdje je:

$$n - \text{obujam zračnih mjehura podijeljen sa } \frac{D^3 \cdot \pi}{4}$$

D - promjer cijevi $D > 100$ mm

$$ft/s = 0,3048 \text{ m/s}$$

3 Negativne posljedice zraka u cjevovodima

Prisutnost zraka u cijevnim vodovima očituje se nekim negativnim pojavama kao što su razvoj kavitacije i vodni udar.

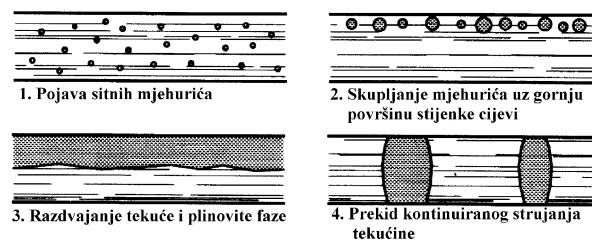
Kavitacija se pojavljuje kao posljedica energijskih promjena. Molekula vode je stabilna kemijska veza između atoma kisika i vodika. Ovisno o energiji koju sadrži, voda se pojavljuje u tri stanja: čvrstom, tekućem i plinovitom. Za promjenu iz jednog stanja u drugo određena količina energije mora biti dodana ili oduzeta vodi. U slučaju kad više molekula napušta vodu nego što ih ulazi, pojavljuje se fenomen evaporacije i obratno, kad više molekula ulazi nego napušta tekućinu, pojavu obilježava kondenzacija.

Stalni sraz molekula pare po površini tekućine uzrokuje tlak poznat kao tlak isparavanja.

Porastom temperature tekućine raste njezina molekularna energija poradi čega se mnoge molekule ispuštaju iz tekućine. Pojava uzrokuje povećanje tlaka isparavanja. S daljim porastom temperature doseže se točka kod koje se tlak isparavanja izjednačuje s atmosferskim tlakom okoliša i kod kojeg se javlja fenomen ključanja vode. U zatvorenom sustavu cjevovoda ili crpnom sustavu, voda brzo ishlapi, i to ponajprije u područjima u kojima tlak padne ispod tlaka isparavanja. Fenomen obilježava pojavu kavitacije.

Vodeni mjehuri koji se razvijaju u toku isparavanja redovito kolabiraju naglo i silovito, što uzrokuje značajna oštećenja (kavitaciju) na sustavu.

Na slici 6.(1-4) prikazana su stanja razvoja isparavanja u cijevnom vodu.



Slika 6. Faze isparavanja u tijeku protjecanja tekućine cjevovodom u uvjetima podtlaka

Pojavi razvoja isparavanja tekućine i kavitacije u zatvorenim sustavima posebno su izložene dionice suženja profila kao što su redukcijски komadi, blende, kućišta crpki, mjernih venturi cijevi i dr. gdje dolazi do naglih promjena brzina protjecanja i turbulencija tokova [3].

4 Konstatacije i preporuke

Na osnovi provedenih analiza pojave i posljedica zraka u cijevnim vodovima i crpnim sustavima, mogu se za potrebe projektiranja, izvedbu i održavanje (pogon) dati sljedeće preporuke:

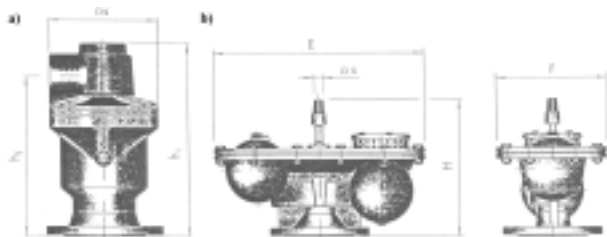
- Vođenje trasa cjevovoda valja prilagoditi terenskim uvjetima u odnosu prema vertikalnim i horizontalnim lomovima, koje s hidrauličkog stajališta utvrđuje tok energetske linije cjevovoda.
- Prvi korak evakuacije zraka iz cjevovoda obilježava postupak punjenja cjevovoda tekućinom (vodom). Zahtjevnost postupka odraz je specifičnih svojstava dviju sredina: zrak i voda u odnosu prema njihovoj stlačivosti i nestlačivosti. Na temelju rezultata istraživačkih radova proizvođača cijevi [6], preporučuje se ove radove provesti prema podacima iz tablice 1.

Tablica 1. Obrok punjenja cjevovoda

Promjer cijevi D [mm]	100	150	200	400	600	800	1000
Količina vode Q [l/s]	0,3	0,7	1,5	6,0	14,0	25,0	40,0

Za punjenja vodom svi hidranti i zatvarači duž dionice trebaju biti otvoreni, a zatvaraju se prema slijedu prestanka istjecanja zraka.

- Kod dugih dionica magistralnih cjevovoda na osnovi praktičnih zapažanja preporučuje se punjenje cjevovoda provesti u dionicama duljine 1,0 - 1,5 km, uz prekide punjenja u trajanju od jednog sata.
- Evakuacija zraka iz cjevovoda, kako je već navedeno, obavlja se sa najviših točaka trase putem nizom uređaja najčešće automatskim odzračno-usisnim ventilima s jednom ili dvije kugle (plovka) na glavnim cjevovodima te protupožarnim hidrantima na gradskim cirkulacijskim sustavima cjevovoda. Na slici 7. prikazani su automatski odzračno-usisni ventilni koji se primjenjuju na glavnim dovodnim cjevovodima, prema katalogu tvrtke *Halberg* [6].

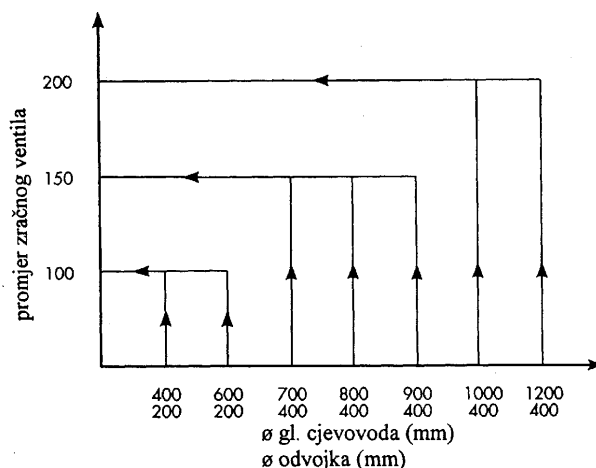


Slika 7. Zračni ventil: a) s jednom kuglom; b) s dvije kugle

- Zračni ventilni djeluju tako da se:
 - ispuštaju velike količine zraka tijekom punjenja cjevovoda,
 - ispuštaju povremeno male količine zraka tijekom rada cjevovoda,
 - upuštaju (omogućuju ulaz zraka) u slučajevima (potrebama) pražnjenja cjevovoda kod lomova i kvarova.

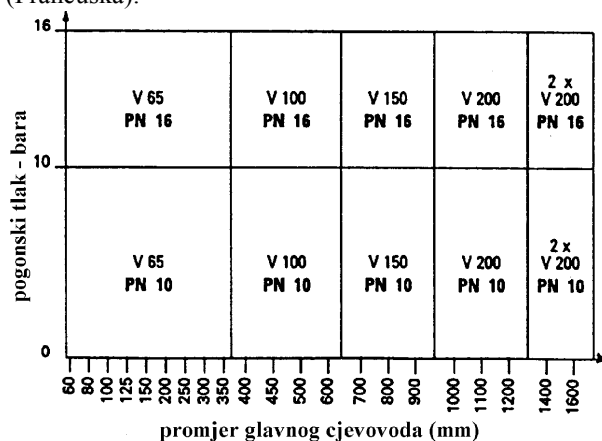
Na slici 8. prikazani su dijagrami za izbor veličine i vrste zračnih ventila u funkciji promjera cjevovoda prema ispitivanjima provedenim u laboratorijima proizvođača cijevi tvrtke *Halberg*. [6]

Iz priloženog se dijagrama vidi da se primjena zračnih ventila s jednim plovkom odnosi na cjevovode manjih promjera, a za odzračivanje i dozračivanje (usisavanje) velikih profila cjevovoda upotrebljavaju se zračni ventilni s dvije kugle (plovka).



Slika 8. Dijagram odnosa dimenzija (profila) cjevovoda i odvojka za odzračivanje i veličine zračnog ventila

Veličina zračnih ventila određuje se i prema veličini radnog (pogonskog) tlaka u cjevovodu. Na slici 9. prikazan je način izbora vrste zračnog ventila u ovisnosti promjera cjevovoda D i pogonskog tlaka. Na temelju ispitivanja proizvođača cijevi i fazona tvrtke *Pount A Mousson* [5] (Francuska).



Slika 9. Izbor veličine i pogonskog tlaka zračnih ventila u ovisnosti promjera cjevovoda

- Sprječavanje kavitacije u sustavu crpnih agregata može se postići ugradbom crpnih agregata na razinu (visinu) koja osigurava da ukupna usisna visina uključujući i NSPH bude manja od razlike između atmosferskog tlaka i tlaka isparavanja vode, odnosno:

$$\left(\frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{isp}}{\gamma} \right) - H_{man.us} > 0 \quad (13)$$

gdje je:

P_{atm} - odgovarajući atmosferski tlak

P_{isp} - tlak isparavanja vode kod dane temperature

$H_{man.us}$ - manometarska usisna visina NSPH (*Neto Positive Suction Head*) – dodatna usisna visina

- Odnosi protoka, dimenzija cjevovoda (profila) i protočnih brzina moraju biti određeni i usklađeni s obzirom na spoznaje o nepogodnosti koje uzrokuju prevelike i premale protočne brzine od pojave zračnih mjehura, “bijeće” vode, podtlaka na pojedinim dionicama cjevovoda do mogućnosti razvoja prezasićene vode.
- Posebnu pažnju treba posvetiti izboru i vrsti materijala cijevi, njihovoj unutarnjoj obradi (glatkoća) te izboru vrsta zračnih ventila i njihovoj izvedbi.
- Suvremeni sustavi dovoda i opskrbe vodom osim ugradbe svih navedenih zaštitnih i kontrolnih uređaja zahtijevaju stalni nadzor i održavanje, uz trenutnu intervenciju u svakom pojedinom slučaju.
- Osobito su važne istodobne kontrole i zamjene dotrajalih elemenata zatvarača, odzračivača i drugog.
- Suradnja i uzajamnost u djelovanju sa suradnicima strojarske i elektrostruke na zajedničkom održavanju svih vodoopskrbnih sustava.

LITERATURA

- [1] Edmunds, R. C.: *Air Binding in Pipes Jour.* AWWA May, 1979.
- [2] Ganderberger, W.: *Desing of Overland Water Supply Pipe Lines for Economy and Operational Rehabiliti*, Munich Germany, 1957.
- [3] Gulić, I.: *Opskrba vodom*, Sveučilišni udžbenik, DGHI, Zagreb, 2000.
- [4] Kalinske, A. A.; Robertson, J. M.: *Closed Condnit Flow Trans ASCE 108 – Paper 2195 1943.*
- [5] KATALOG proizvođača cijevi, fazona i armatura POUNT A MOUSSON. S. A. Nancy Cedec, 1987.
- [6] KATALOG proizvođača cijevi, fazona i armatura HALBERG. Ductil Gusrohre für Wasser Sarbrücken, 1997.
- [7] Kennison, K. R.: *The Design of Pipe Lines Jour.* NEWWA 47 (1933).
- [8] Twort A. C.; Law F. M.; Crowley F. W.; Ratmayaha D. D.: *Water Syply*, Fourth Edition 1994. by Edward Arnold, London.