

# KAVITACIJA PUMPE - OSVRT NA PRORAČUNSKE POSTUPKE I TUMAČENJA U LITERATURI

## PUMP CAVITATION - REVIEW OF CALCULATIONS AND TREATMENT IN LITERATURE

Vesna Alić Kostešić<sup>1</sup>, Branimir Markulin Grgić, Vladimir Markulin Grgić<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Tehničko veleučilište u Zagrebu*

<sup>2</sup>*Novamini, d. o. o*

### Sažetak

Rad se bavi objašnjenjem i usporedbom proračunskih postupaka za određivanje uvjeta koji moraju biti zadovoljeni na usisnoj strani pumpe da ne bi nastupilo kavitiranje. Kako je u literaturi vrlo čest algoritamski pristup propisivanja proračunskih koraka bez mnogo objašnjavanja, ovdje je učinjen pokušaj popunjavanja te praznine.

**Ključne riječi:** *Pumpe, kavitacija, neto pozitivna usisna visina*

### Abstract

This paper strives to explain and compare analytical procedures used to provide cavitation-free operation of pumps. Approach in most of literature is algorithmic, without necessary explanations. Therefore, an attempt is made to fill that gap.

**Keywords:** *Pump, cavitation, net positive suction head*

### 1. Uvod

#### 1. Introduction

Svatko tko je sustavnije u literaturi proučavao problem kavitacije, odnosno njezina sprječavanja ili izbjegavanja u normalnom radu pumpe, zasigurno je primijetio da se objašnjenja razlikuju, nedostaju ili su nepotpuna. Gotovo da bi se moglo reći da je prisutna mistifikacija problema. Namjera je ovoga rada usporediti, pojasniti i pomiriti naizgled različite koncepte. U radu će težište biti na onim aspektima koji su ključni za razumijevanje, neće se dakle

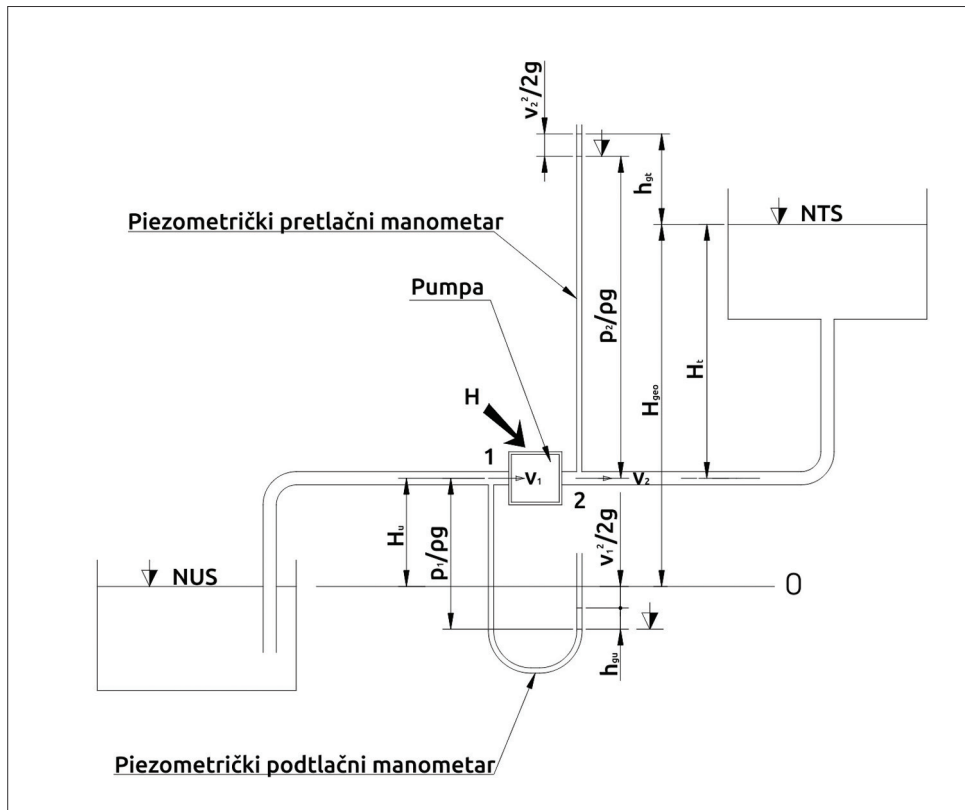
obrađivati konfiguracije ili slučajevi koji su možda eksploatacijski relevantni, ali nemaju objasnidbenu važnost.

### 2. Elementarna pumpna instalacija [1]

#### 2. Elementary Pump Installations [1]

Elementarna instalacija sastoji se od pumpe, usisnog spremnika, usisnog cjevovoda, tlačnog spremnika i tlačnog cjevovoda (Sl.1). U donju su shemu ucrtani piezometrički manometri zbog njihove izvanredne zornosti. Radi lakše predodžbe, ucrtani su otvoreni spremnici, što sugerira izloženost površina tekućine atmosferskom tlaku.

Krenimo od piezometričkog manometra na tlačnoj strani (jer je jednostavna oblika - ravna vertikalna cjevčica). Vidimo da je razina tekućine u cjevčici iznad razine u tlačnom spremniku. To je s razloga što se dio tlačne energije troši na svladavanje hidrauličkog otpora u tlačnoj cijevi. Ne smije se smetnuti s uma da u cjevovodu tekućina teče i svojim trenjem troši energiju, dok u piezometričkoj cjevčici miruje. Piezometrički manometar (za razliku od Pitotove cijevi) prikazuje samo statički tlak, tj. u obzir ne uzima i dinamičku komponentu tlaka (tlak zbog brzine). Na slici se može vidjeti na kojoj razini bi bila tekućina kada bi bila riječ o Pitotovoj cjevčici - bila bi viša za iznos  $v^2/2g$ . Isto tako se u shemi vidi da bi se do iste razine (Pitotove cjevčice) došlo kada bi se na razinu tlačnog spremnika pridodala visina hidrauličnih gubitaka. Na shemi je naznačena i razina tekućine u piezometričkom podtlačnom manometru. Ovdje se odmah primijeti da je razina u cjevčici ispod razine tekućine u usisnom spremniku. Visina tekućine u cjevčici



**Slika 1**  
Elementarna pumpna instalacija

**Figure 1**  
Basic pumping system

bi odgovarala razini u usisnom spremniku kada ne bi bilo hidrauličnih gubitaka zbog transporta tekućine i kada bi bila riječ o Pitotovoj cjevčici koja mjeri ukupni (stagnacijski) tlak. Kako tome nije tako, nivo u cjevčici niži je od nivoa spremnika za spomenute dvije veličine: visinu hidrauličnih gubitaka i visinu brzine.

### 3. Bernoullijeve jednadžbe

#### 3. Bernoulli's equations

Postavit ćemo Bernoullijeve jednadžbe za različite presjeka (točke) pumpne instalacije. Stanja na ulazu u pumpu i izlazu iz pumpe mogu se povezati sljedećom jednadžbom:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

U gornjoj formuli nema geodetskih visina, jer na našoj su shemi ulaz i izlaz pumpe na istoj horizontali. Hidraulički gubitci u samoj pumpi su zanemareni. Budući da se između stanja ulaza i izlaza s pomoću pumpe dodaje energija fluidu, mora u jednadžbi postojati odgovarajući član - to je H - specifična energija (džul po njutnu, tj. metar). Kada se piše Bernoullijeva jednadžba za površine

usisnog i tlačnog spremnika, zgodno je predstaviti si hidraulične gubitke na sljedeći način: Povećani hidraulični gubitci usisnog cjevovoda imaju za pumpu isti efekt kao i povećana geodetska usisna visina - znači da im treba dati negativan predznak. Povećani hidraulični gubitci tlačnog voda imaju isti efekt kao i povećana geodetska tlačna visina - treba im dakle dati pozitivan predznak. Stanja na površinama donjeg i gornjeg spremnika povezuju se ovakvom jednadžbom:

$$\frac{p_{NUS} + p_0}{\rho g} - H_u - h_{gu} = \frac{p_1 + p_0}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

U gornjoj formuli nisu popisane brzine zato što su na površinama spremnika zanemarivo male ili jednake nuli. Veličine  $H_u$  i  $H_t$  predstavljaju usisnu, odnosno tlačnu geodetsku visinu.

Oznakama  $h_{gu}$  i  $h_{gt}$  predstavljeni su hidraulični gubitci usisnog, odnosno tlačnog cjevovoda. Ako su oba spremnika pod istim (atmosferskim) tlakom, jednadžba se dodatno pojednostavnjuje dokidanjem članova s tlakom:

$$-H_u - h_{gu} + H = H_t + h_{gt}$$

odnosno

$$H = H_{st} + h_g$$

gdje je  $s$   $H_{st}$  predstavljena ukupna geodetska visina, a  $s$   $h_g$  ukupni hidraulični gubitci.

Stanja na površini usisnog spremnika i na usisu pumpe možemo povezati sljedećom jednačinom:

$$\frac{p_{NUS}}{\rho g} - H_u - h_{gu} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Ako u obzir uzmemo da je brzina na površini usisnog spremnika približno ili stvarno jednaka nuli, te u formulu unesemo manometarske, a ne apsolutne tlakove, dobijemo:

$$0 = H_u + h_{gu} + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Iz gornje formule možemo izraziti  $p_1/(\rho g)$ :

$$-\frac{p_1}{\rho g} = H_u + h_{gu} + \frac{v_1^2}{2g}$$

odnosno

$$H_v = H_u + h_{gu} + \frac{v_1^2}{2g}$$

gje je  $H_v$  visina vakuuma.

#### 4. Apsolutni i manometarski tlak

##### 4. Absolute and gauge pressure

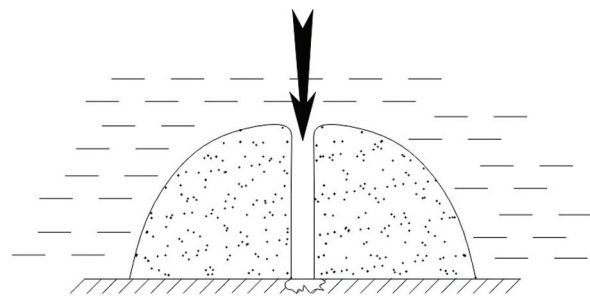
U Bernoullijevu jednačinu mogu se uvrštavati manometarski (relativni) i apsolutni tlakovi. Bitna je dosljednost - oba tlaka treba da su na isti način izraženi. Vakuum je kod manometarskog tlaka u jednačini predstavljen negativnom vrijednošću, ali negativni predznak može biti izostavljen kod prezentacije rezultata ako je jasno naznačeno da je riječ o podtlaku. Budući da se tlak para uvijek uvrštava kao apsolutni tlak, u jednačinama u kojima on figurira treba da su tlakovi izraženi kao apsolutni.

#### 5. Fenomen kavitacije

##### 5. Phenomenon of cavitation

Kavitacija se javlja kada najniži tlak unutar pumpe postane jednak tlaku para pumpane

tekućine. Riječ je o stvaranju parnih mjehurića u zoni niskog tlaka, te njihovom udarnom kolabiranjem (kondenziranjem) u zoni višeg tlaka. Tlak pare funkcija je temperature. Što je temperatura viša, i on je viši. Zbog toga opasnost od kavitacije raste s temperaturom. Nerijetko je potrebno vruću tekućinu privoditi pumpi, ne bi li se izbjegla kavitacija. Dugo nije bio poznat mehanizam razaranja tvrdih metalnih površina uslijed kavitacije, dok ga nije razotkrio W. Lauterborn g. 1976. On je, koristeći intenzivno lasersko osvjetljenje i visokofrekventnu kameru, uspio snimiti tijek kolabiranja mjehurića na površini metala [2]. Pokazao je da u jednoj fazi procesa mjehuriće pare probadaju "iglice" ili "žalci" okolne tekućine veoma velikom brzinom. Upravo ta faza procesa kavitiranja čini najveću štetu na površini.



Slika 2 Mehanizam razaranja podloge kod kavitiranja [2]

Figure 2 Mechanism of surface erosion under cavitation [2]

Interesantno je spomenuti da je kavitacija mehanički najdestruktivnija na samom početku procesa, dok su mjehurići sitni. nastankom većih mjehura smanjuje se oštećenje površina pumpe [3]. Taj se fenomen u novije vrijeme počeo praktički iskorištavati osmišljavanjem i primjenom tzv. superkavitirajućih aksijalnih pumpa. Takve pumpe u nominalnom režimu kavitiraju na način da se stvaraju veliki mjehuri koji nizvodno, na sigurnoj udaljenosti od lopatica, kolabiraju. Superkavitacija se koristi u primjenama gdje je željene performanse potrebno ostvariti uz minimalne gabarite i masu pumpe (svemirski program) [3].

## 6. Uzroci kavitacije

### 6. Cavitation causes

Kavitacija nastaje zbog smanjenja najnižeg tlaka do razine tlaka pare ili zbog povećanja temperature fluida i posljedičnog povišenja tlaka njegovih para.

Tlak na usisu pumpe može pasti:

- zbog smanjenja tlaka u usisnom spremniku
- zbog povećanja brzine na usisu pumpe
- zbog povećanja geodetske usisne visine

## 7. Definiranje stanja na usisu pumpe

### 7. Defining for cavitation-free operation

Da bismo opisali stanje na usisu pumpe u nekoj radnoj točki, možemo navesti:

- NPSHA - raspoloživu neto pozitivnu usisnu visinu
- visinu vakuuma na usisu pumpe
- idealnu usisnu geodetsku visinu (zanemareni hidraulički otpori)

## 8. Uvjeti odsutnosti kavitacije

### 8. Conditions for cavitation-free operation

Da bismo bili sigurni da pumpa neće kavitirati, gornje veličine moramo usporediti s dopuštenim vrijednostima koje je priložio proizvođač pumpe ili su ustanovljene testiranjem.

## 9. NPSH - neto pozitivna usisna visina

### 9. NPSH - net positive suction head

NPSH-metoda za utvrđivanje situacije na usisu pumpe glede kavitacije danas je najpopularnija. U svojoj konačnici provodi se na način da se u Q-h-karakteristiku pumpe ucrtaju, osim uobičajenih karakteristika pumpe i cjevovoda, i krivulje raspoložive i potrebne neto pozitivne usisne visine (NPSHA i NPSHR). U području protoka gdje je  $NPSHA > NPSHR$  nema kavitacije.

NPSHA se definira kao razlika stagnacijskog tlaka na usisnoj prirubnici pumpe i tlaka para za razmatranu temperaturu pumpane tekućine [3]:

$$NPSHA = \frac{p_{1,stag} - p_p}{\rho g} = \frac{p_0 + p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_p}{\rho g}$$

Želimo li NPSHA izraziti preko stanja na površini usisnog spremnika, upotrijebit ćemo ranije ispisanu Bernoullijevu jednadžbu:

$$\frac{p_{NUS}}{\rho g} - H_u - h_{gu} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

odnosno, izraženo apsolutnim tlakovima

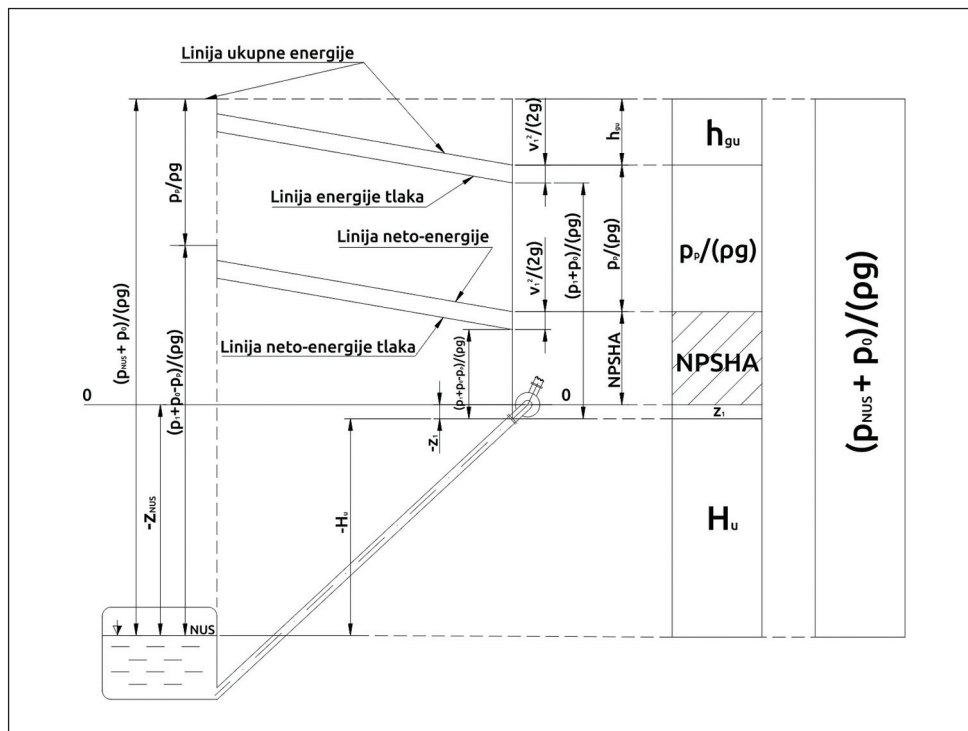
$$\frac{p_{NUS} + p_0}{\rho g} - H_u - h_{gu} = \frac{p_1 + p_0}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Sada možemo napisati novi izraz za NPSHA:

$$NPSHA = \frac{p_{NUS} + p_0}{\rho g} - \frac{p_p}{\rho g} - H_u - h_{gu}$$

Gornji izraz omogućuje nam da jednostavno, bez mjerenja tlaka  $p_1$ , računamo raspoloživu neto pozitivnu usisnu visinu, odnosno NPSH karakteristiku usisnog cjevovoda. Pri tome nam je jedino potrebno što točnije izraziti hidraulične gubitke (kao funkciju protoka).

U gornjem dijagramu je zorno prikazano što predstavlja NPSHA [4]. Riječ je zapravo o zakonu održanja energije. Budući da između usisnog spremnika i pumpe nismo dodavali energiju, ona mora ostati nepromijenjena. Naravno, jedan dio energije je pretvoren u toplinu (hidraulični gubici). NPSHA je ono što preostane kada od ukupne energije koju imamo na raspolaganju na površini usisnog spremnika (predstavljeno krajnjim desnim stupcem na gornjem dijagramu) oduzmemo geodetsku visinu, hidraulične gubitke i tlak para. To je dakle onaj dio ukupne energije koju smo imali na početku koji se može prikazati viškom stagnacijskog tlaka na usisnoj prirubnici pumpe u odnosu na tlak para. Činjenica da NPSH barata sa stagnacijskim tlakom ne treba zbunjivati niti zabrinjavati: Doprinosi dinamičkog tlaka ( $v^2/2g$ ) je uglavnom zanemariv, a njegovo uvrštavanje u NPSHA omogućuje jednostavne i praktične izraze za njegovo računanje. NPSHA nam govori koliko je stagnacijski tlak na usisu pumpe veći od tlaka para pumpane tekućine. Temeljem toga mi ništa ne možemo znati o opasnosti od kavitiranja jer ne znamo koja je minimalna vrijednost NPSH kod koje još uvijek nema kavitacije. Ta minimalna vrijednost NPSH naziva se potrebnom neto pozitivnom usisnom



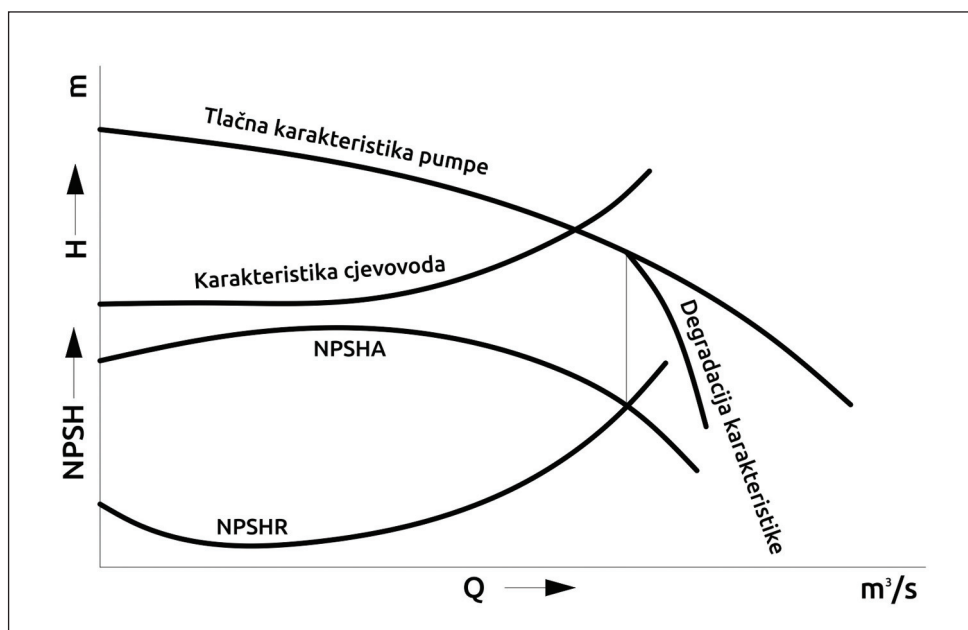
**Slika 3**  
 Grafički prikaz energetske bilance usisne strane pumpne instalacije  
**Figure 3**  
 Graphical representation energy balance the suction side of the pump installations

visinom i označuje s NPSHR. Nju ispituju proizvođači pumpa s pomoću ispitnih uređaja, koje ćemo spomenuti kasnije. Postoje i empirijski izrazi s pomoću kojih je moguće s priličnom točnošću predvidjeti NPSHR karakteristiku pumpe. NPSHR se računa istim formulama kao i NPSHA, samo što se bilježi ona vrijednost kod koje su senzori ustanovili početak kavitacije. Uobičajeno je NPSHR povećati u odnosu na vrijednost kada je detektirana kavitacija za 0,5 m [4] ili množiti faktorom sigurnosti  $S=1,1 \div 1,3$  [1].

Donji dijagram prikazuje sve relevantne karakteristike jedne pumpne instalacije:

- 10. Visina vakuuma na usisnoj prirubnici pumpe
- 10. Vacuum height at suction connection

Ranije smo izveli izraz za visinu vakuuma na ulazu u pumpu:



**Slika 4**  
 Relevantne karakteristike pumpe i instalacije  
**Figure 4**  
 Relevant characteristics of pump and system

$$H_v = H_u + h_{gu} + \frac{v_1^2}{2g}$$

Proizvođači pumpa ispitujući pumpe dolaze do saznanja do koje je mjere kod nekog protoka dopušteno povećavati visinu vakuuma, a da još uvijek ne dođe do kavitiranja (koje se prilikom ispitivanja može detektirati na više načina). Ona visina vakuuma kod koje se još uvijek ne događa kavitacija (uključujući sigurnosno umanjenje) naziva se dopuštena visina vakuuma,  $H_{vdop}$ , i unosi se u karakteristiku pumpe kao zasebna krivulja [1].

Kada znamo  $H_{vdop}$ , geodetsku usisnu visinu računamo kao

$$H_u \leq H_v^{dop} - h_{gu} - \frac{v_1^2}{2g}$$

## 11. Idealna geodetska usisna visina ( $h_{gu} = 0$ )

### 11. *Ideal static suction connection*

U literaturi [5] se može naći maksimalna usisna visina izražena ovom formulom:

$$H_u^{max} = \frac{p_0 - p_p}{\rho g} - \frac{v_1^2}{2g}$$

U gornjem izrazu figurira tlak para, pa tlakove izražavamo kao apsolutne. Vidimo da, za razliku od računanja stvarne usisne visine, ovdje zanemarujemo hidrauličke gubitke usisnog cjevovoda.

Želimo li iskazati stvarnu geodetsku usisnu visinu, adaptirat ćemo gornji izraz:

$$H_u = H_u^{max} - h_{gu} = \frac{p_0 - p_p}{\rho g} - \frac{v_1^2}{2g} - h_{gu}$$

## 12. Usklađivanje dopuštene visine stupca vode sa tlakom u spremniku i tlakom vodene pare

### 12. *Corrections of static suction head with respect to vapor pressure and suction vessel pressure*

Običaj je visine vakuuma i idealne geodetske visine iskazivati visinom stupca vode. Vrijednosti

iskazane u katalogu proizvođača odnose se na neki tlak iznad površine usisnog spremnika i na neku temperaturu vode s pripadajućim tlakom pare. Postoji li potreba da se visina izrazi za druge uvjete tlaka u spremniku i tlaka pare, pretvorba se provodi donjom relacijom [5]:

$$H_v^{stv} = H_v^{kat} + \left(\frac{p_0}{\rho g} - 10\right) - \left(\frac{p_0 - p_p}{\rho g}\right)$$

## 13. Najveća moguća geodetska visina crpljenja vode

### 13. *Najveća moguća geodetska visina crpljenja vode*

Napisat ćemo Bernoullijevu jednadžbu u obliku s izlučenom usisnom geodetskom visinom:

$$H_u = \frac{p_0 - p_1}{\rho g} - h_{gu} - \frac{v_1^2}{2g}$$

Ako zamislimo da je brzina jednaka nuli pa nema hidrauličkog otpora, te da je postignuti apsolutni tlak na usisu pumpe također jednak nuli, dobivamo:

$$H_u = \frac{p_0}{\rho g} = \frac{98100}{1000 \cdot 9,81} = 10m$$

## 14. Ispitivanje kavitacijske karakteristike pumpe

### 14. *Ispitivanje kavitacijske karakteristike pumpe*

Kavitacijska karakteristika ispituje se na ispitnim uređajima koji dolaze u dvije osnovne konfiguracije:

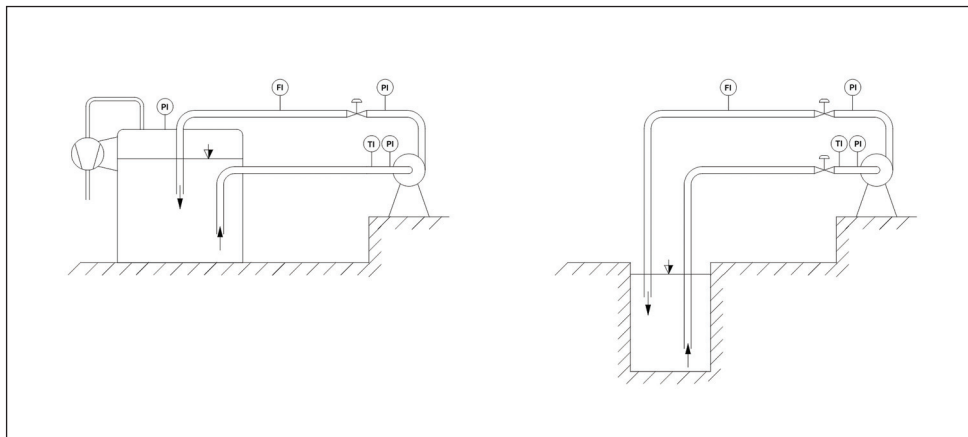
- uređaji s regulacijom podtlaka u zatvorenom spremniku
- uređaji s otvorenim spremnikom i regulacijom prigušivanjem

## 15. Zaključak

### 15. *Conclusion*

Za izostanak kavitacije ključna je samo jedna stvar: najniži tlak u pumpi ne smije biti niži od tlaka para pumpane tekućine.

Može se primijetiti da je praktična prednost



*Slika 5 Uređaji s regulacijom podtlaka u zatvorenom spremniku i uređaji s otvorenim spremnikom i regulacijom prigušivanjem*

**Figure 5**  
*Devices to control the negative pressure in sealed containers and devices with open container and regulation throttling*

korištenja dopuštene visine vakuuma  $H_{vdop}$  za računanje geodetske usisne visine sadržana u činjenici da u izrazu

$$H_u \leq H_v^{dop} - h_{gu} - \frac{v_1^2}{2g}$$

nisu prisutni članovi koji ovise o temperaturi ili atmosferskom tlaku, dok je, s druge strane, kod NPSH metode zgodno što u izraz za  $H_u$  ne ulazi brzina  $v_1$  [1]:

Na koncu, projektant pumpne instalacije

$$H_u \leq \frac{p_{NUS} + p_0}{\rho g} - NPSHR - \frac{p_p}{\rho g} - h_{gu}$$

upotrijebit će relevantne podatke koji mu stoje na raspolaganju - bili oni dopuštena visina vakuuma ili NPSHR. Stvarne razlike nema, jer oba podatka govore o istom događaju - početku kavitiranja pumpe.

## 16. Reference

### 16. References

- [1] G. I. Krivčenko: *Gidravličeskie mašinji*. Moskva: Energoatomizdat, 1983.
- [2] Bruno Eck: *Technische Stroemungslehre*. Berlin: Springer, 1978.
- [3] S. L. Dixon, C. A. Hall: *Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [4] Walter Wagner: *Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen*. Wuerzburg: Vogel Buchverlag, 2009.
- [5] V. V. Žabo, V. V. Uvarov: *Gidravlika i nasosi*. Moskva: Energoatomizdat, 1984.

**AUTOR · AUTHOR****Vesna Alić Kostešić**

Vesna Alić Kostešić rođena je u Zagrebu 1958. gdje je završila VII.gimnaziju te diplomirala na smjeru Automatizacija u proizvodnji, Fakulteta Strojarstva i brodogradnje

Sveučilišta u Zagrebu.

Viši je predavač na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu gdje je zaposlena od 2007.

Sudjelovala je u EU projektu: Razvoj međuzupanijskog e-learning sustava za obrazovanje odraslih. Trenutno je angažirana na projektu: Razvoj visokoobrazovnih standarda zanimanja, standarda kvalifikacija i studijskih programa na osnovama Hrvatskog kvalifikacijskog okvira u području specijalističkih studija politehnike, gdje je voditelj tima za razvoj kurikuluma specijalističkog diplomskog studija Mehatronika.

**Branimir Markulin Grgić**

Branimir Markulin Grgić rođen je 1969. u Zagrebu, gdje je završio Klasičnu gimnaziju te diplomirao na konstrukcijskom smjeru Fakulteta Strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u

Zagrebu 2001. godine. Radio je u Croscu, Odjelu za projektiranje, gdje je vodio remontne radove na bušačim postrojenjima u zemlji i inozemstvu. Od 2009. do 2016. godine radio je kao asistent u Zavodu za konstruiranje FSB-a.

Doktorski studij upisao je 2009. godine te radi na disertaciji naslova "Utjecaj podmazivanje na radni vijek poliamidnih zupčanika". Bio je suradnikom na nekoliko europskih projekata iz područja obnovljivih izvora energije. Otac je troje djece.

**Vladimir Markulin Grgić**

Vladimir Markulin Grgić rođen je 1969. u Zagrebu, gdje je završio Klasičnu gimnaziju te diplomirao na konstrukcijskom smjeru Fakulteta Strojarstva i brodogradnje Sveučilišta

u Zagrebu. Pola godine je radio u njemačkoj istraživačkoj tvrtki Magnet-Motor, a potom u Brodarskom institutu. Od 2008. radi u Novamini, d. o. o., na europskim projektima. Naslovni je asistent (vanjski suradnik) na Zavodu za konstruiranje gdje je izvodio vježbe iz kolegija Elementi konstrukcija. Otac je dvoje djece.