

**Dinamični odziv zračnega mehurja ujetega v
hidravličnem cevnem sistemu**

Anton Bergant

**Litostroj Power d.o.o. (polna zaposlitev)
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani
(dopolnilna zaposlitev)**

**48. Strokovno srečanje SDHR
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana,
11.12.2019**



ARRS

JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST
REPUBLIKE SLOVENIJE

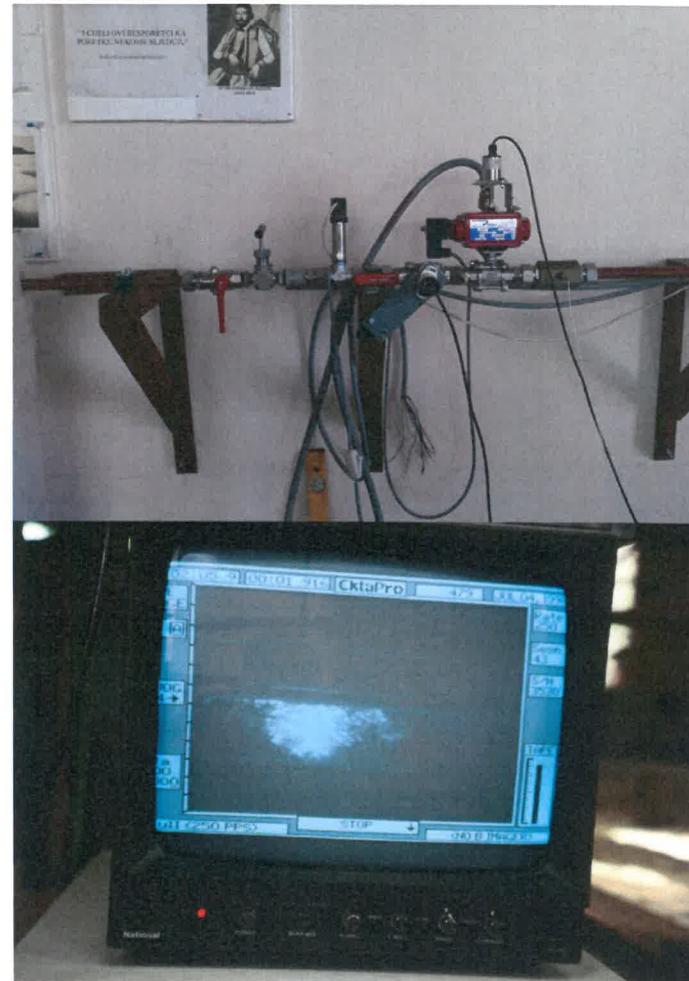
*Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo*



LITOSTROJPOWER

Vsebina

- Uvod
- Matematični model
- Preizkusna postaja v Podgorici
- Rezultati meritev in izračuna
- Preizkusna postaja v Adelaidi
- Rezultati meritev in izračuna
- Zaključki
- Literatura



ARRS

JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST
REPUBLIKE SLOVENIJE

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



LITO STR&JPOWER

Uvod

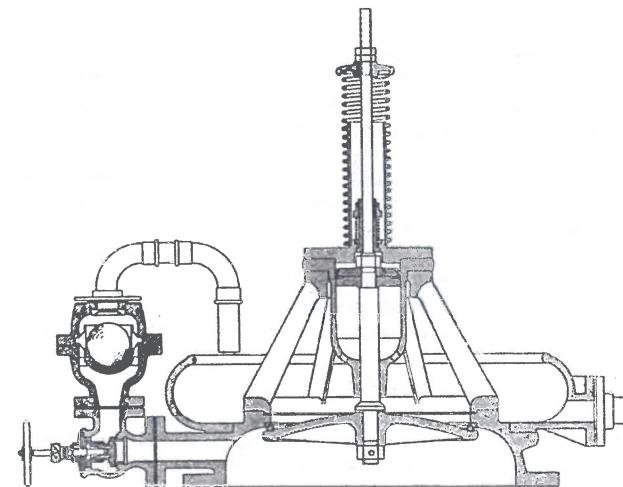
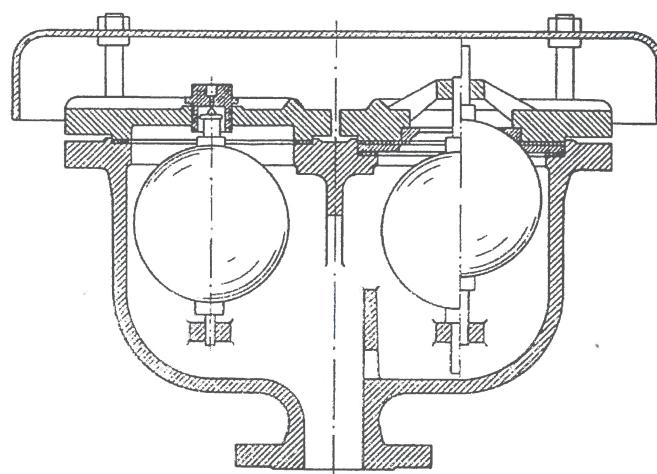


- (1) **Zračni mehurji ujeti (ali v gibanju) v cevovodih napolnjenih z vodo lahko povzročijo nekontrolirano obratovanje in poškodbe sistema.**
- (2) **Vpliv zračnih mehurjev je lahko kvaren ali blažilen (tlačni kotel). Kvarne vplive zmanjšamo s spremembo obratovalnega režima ali kontroliranim zračenjem sistema (zračni ventili).**
- (3) **Zračni mehur, ki je izoliran v cevovodu, povzroči značilne spremembe velikosti, oblike in časovnega poteka tlačnih valov.**

Uvod

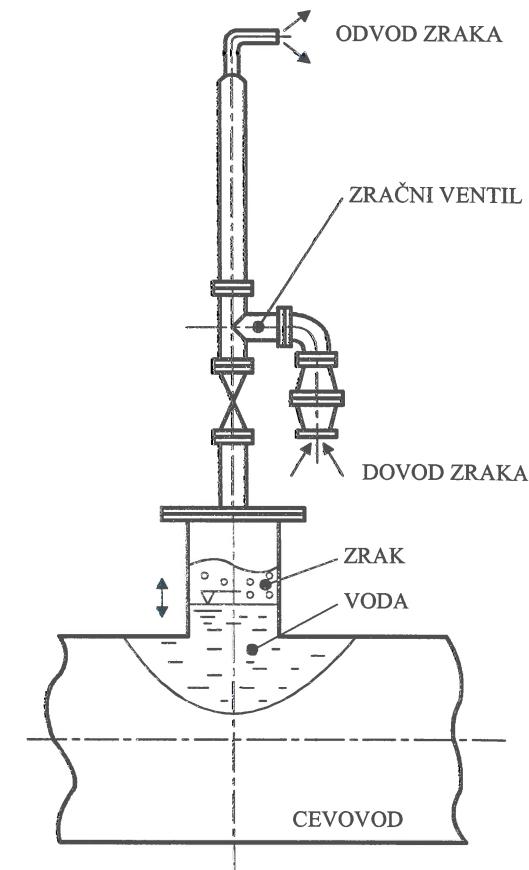
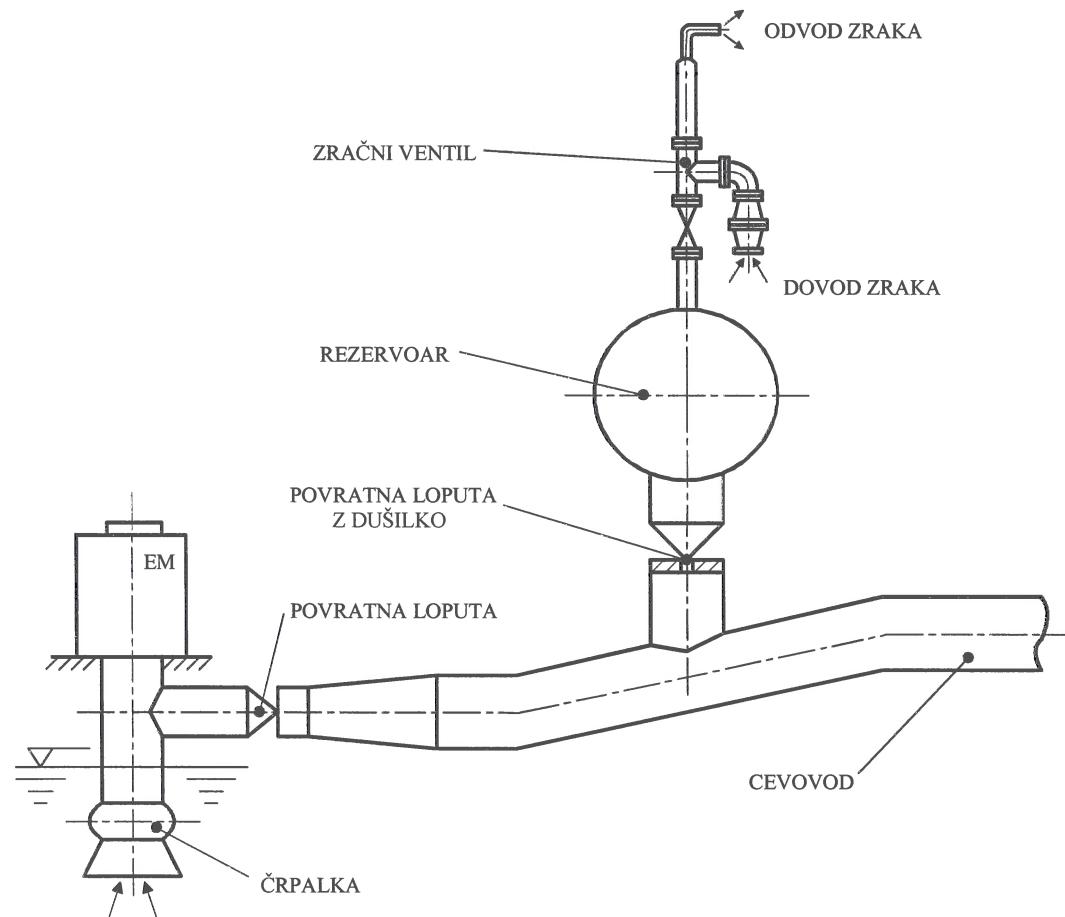
Uporaba zračnega ventila v hidravličnih cevnih sistemih:

- ozračenje cevovoda med stacionarnim obratovanjem
- ozračenje cevovoda med polnjenjem
- zračenje cevovoda med praznjenjem
- preprečitev ali blažitev kavitacijskih efektov med hidravličnim prehodnim procesom (vodni udar)



Uvod

Vgradnja zračnega ventila v črpальнem sistemu



Matematični model

Enačbi vodnega udara

(1) Kontinuitetna enačba:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

(2) Gibalna enačba:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0$$

Diskretni plinski kavitacijski model (DGCM)

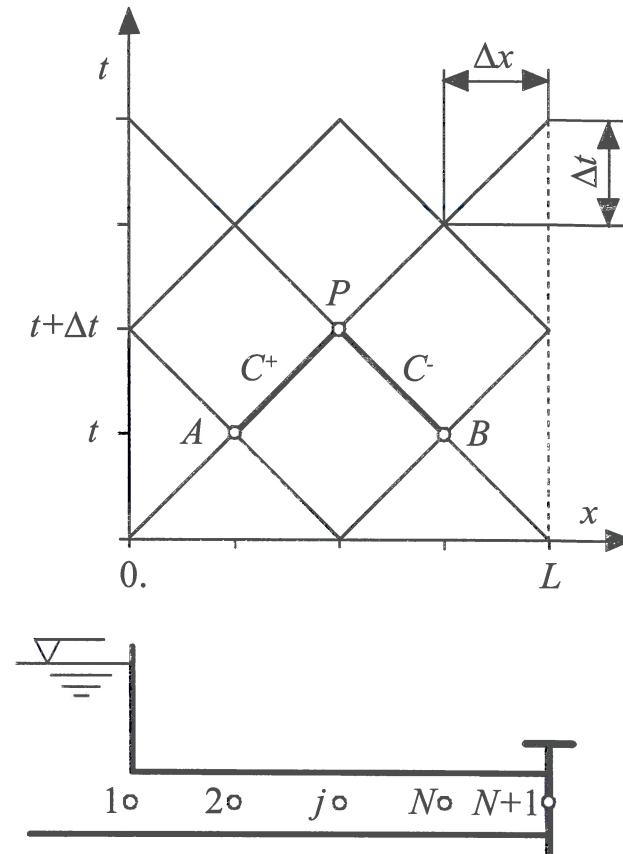
- Računska mreža po metodi karateristik
- DGCM dovoljuje vgradnjo diskretnih plinskih kavitacij v notranjih in robnih računskih točkah



arrs

JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST
REPUBLIKE SLOVENIJE

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo



LITOSTR® JPOWER

Matematični model

DGCM numerični algoritmom v diamantni mreži metode karakteristik

- kompatibilitetna enačba vzdolž C^+ karakteristike ($\Delta x/\Delta t = a$):

$$H_{i,t} - H_{i-1,t-\Delta t} + \frac{a}{gA} ((Q_u)_{i,t} - Q_{i-1,t-\Delta t}) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} (Q_u)_{i,t} |Q_{i-1,t-\Delta t}| = 0$$

- kompatibilitetna enačba vzdolž C^- karakteristike ($\Delta x/\Delta t = -a$):

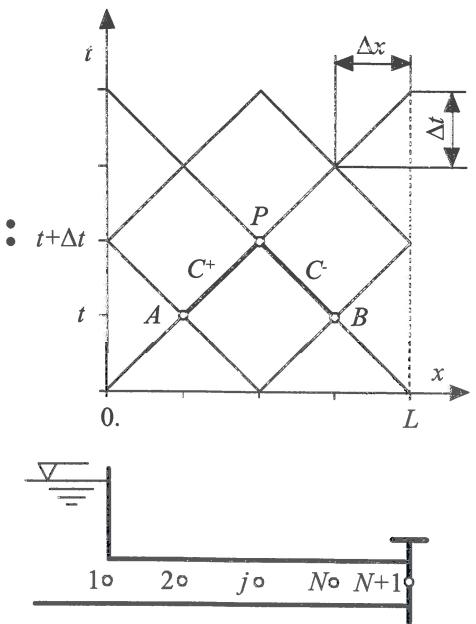
$$H_{i,t} - H_{i+1,t-\Delta t} - \frac{a}{gA} (Q_{i,t} - (Q_u)_{i+1,t-\Delta t}) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_{i,t} |(Q_u)_{i+1,t-\Delta t}| = 0$$

- kontinuitetna enačba diskretne plinske kavitacije:

$$(\forall_g)_{i,t} = (\forall_g)_{i,t-2\Delta t} + ((1-\psi)(Q_{i,t-2\Delta t} - (Q_u)_{i,t-2\Delta t}) + \psi(Q_{i,t} - (Q_u)_{i,t})) 2\Delta t$$

- plinska enačba (izoterma (kavitacije z malo prostornino)):

$$(\forall_g)_{i,t} (H_{i,t} - z_i - h_v) = (H_0 - z_0 - h_v) \alpha_{g0} A_i \Delta x$$



Matematični model

Zračni mehur pri zaprtem dolvodnem ventilu

- kompatibilitetna enačba C⁺ karakteristike ($\Delta x / \Delta t = a$):

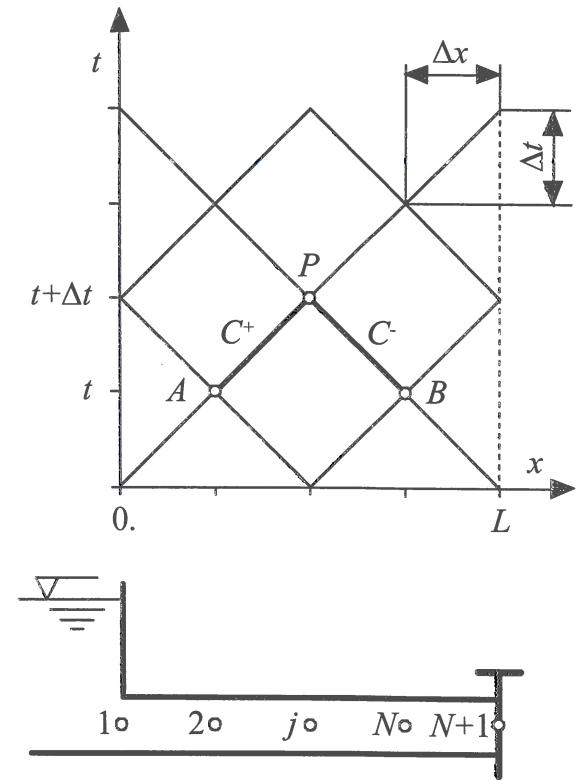
$$H_{i,t} - H_{i-1,t-\Delta t} + \frac{a}{gA} ((Q_u)_{i,t} - Q_{i-1,t-\Delta t}) + \frac{f\Delta x}{2gDA^2} (Q_u)_{i,t} |Q_{i-1,t-\Delta t}| = 0$$

- kontinuitetna enačba zračnega mehurja:

$$(\nabla_g)_{i,t} = (\nabla_g)_{i,t-2\Delta t} - ((Q_u)_{i,t-2\Delta t}) + (Q_u)_{i,t} \Delta t$$

- plinska enačba (politropa):

$$(H_{i,t} - z_i - h_v) (\nabla_g)_{i,t}^n = (H_0 - z_0 - h_v) (a_{g0} A_i \Delta x)^n$$



- Koeficient politrope n izberemo med 1 (izoterma) in 1.4 (izentropa)

Matematični model

Stensko trenje

- Stanje razvoja: V programih za vodni udar so vgrajeni ustaljeni modeli stenskega trenja.

POSTAVKA: Trenje je odvisno od povprečne hitrosti.

VELJAVNOST: Ta postavka velja za relativno počasne spremembe toka.

POSLEDICA: Odstopanja amplitude, oblike in časovnega poteka med izmerjenimi in izračunanimi tlaki za hitre prehode.

- Neustaljeni model stenskega trenja izboljša rezultate izračuna.

POSTAVKA: Trenje je odvisno od povprečne hitrosti in inercije kapljevine.



JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST
REPUBLIKE SLOVENIJE

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo

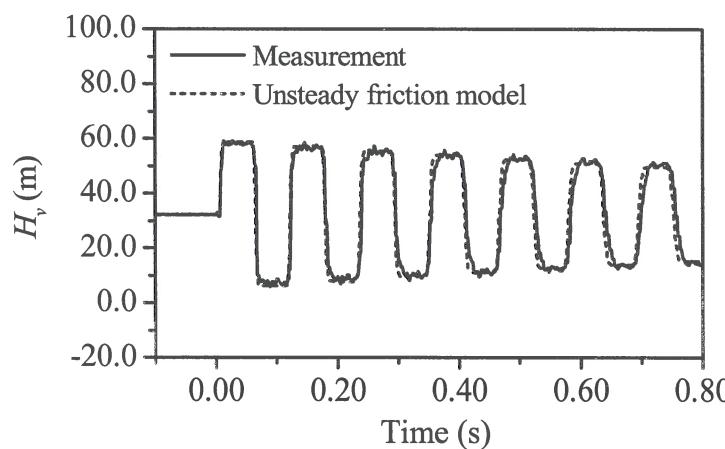
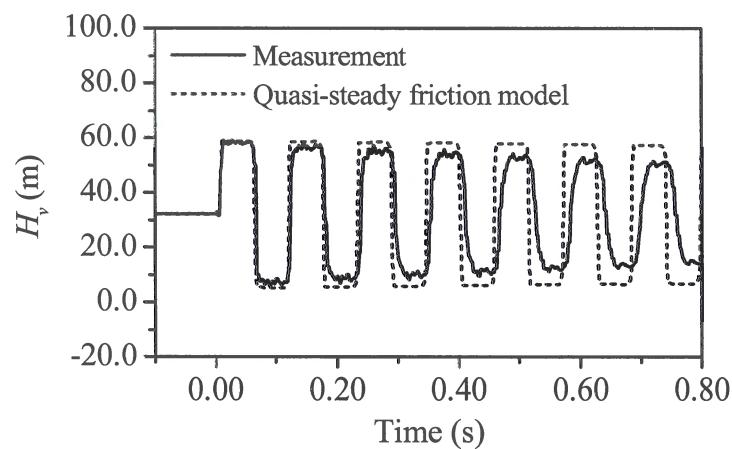


LITOSTRØJPOWER

Matematični model

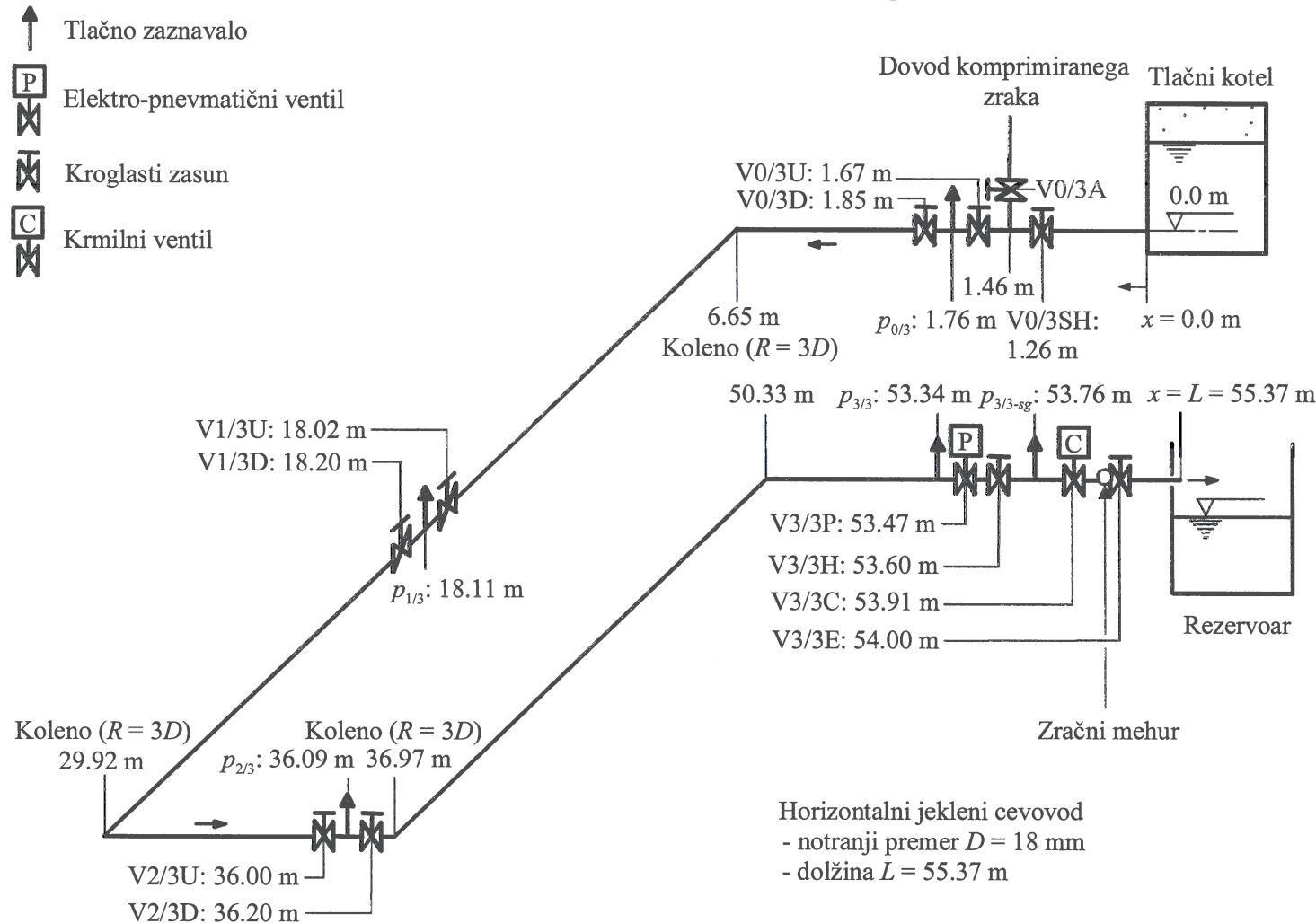
Stensko trenje

Hitro zapiranje dolvodnega ventila v sistemu rezervoar-cevovod-ventil (dolžina cevovoda $L = 37.2$ m; premer cevi $D = 22.1$ mm)



Primerjava tlačnih višin pri dolvodnem ventilu ($Re_0 = 4,400$) [Bergant *et al.* (2001)].

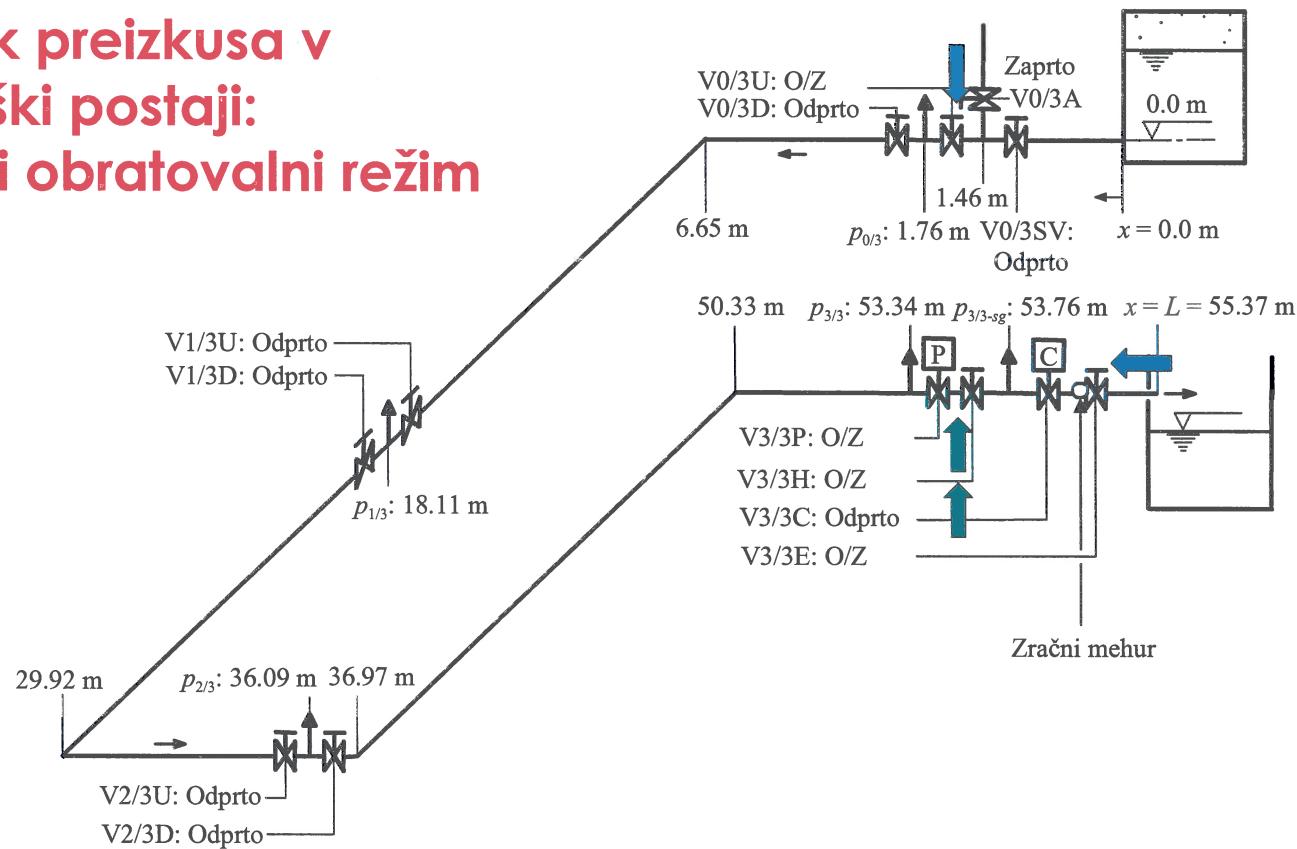
Preizkusna postaja v Podgorici



Preizkusna postaja v Podgorici

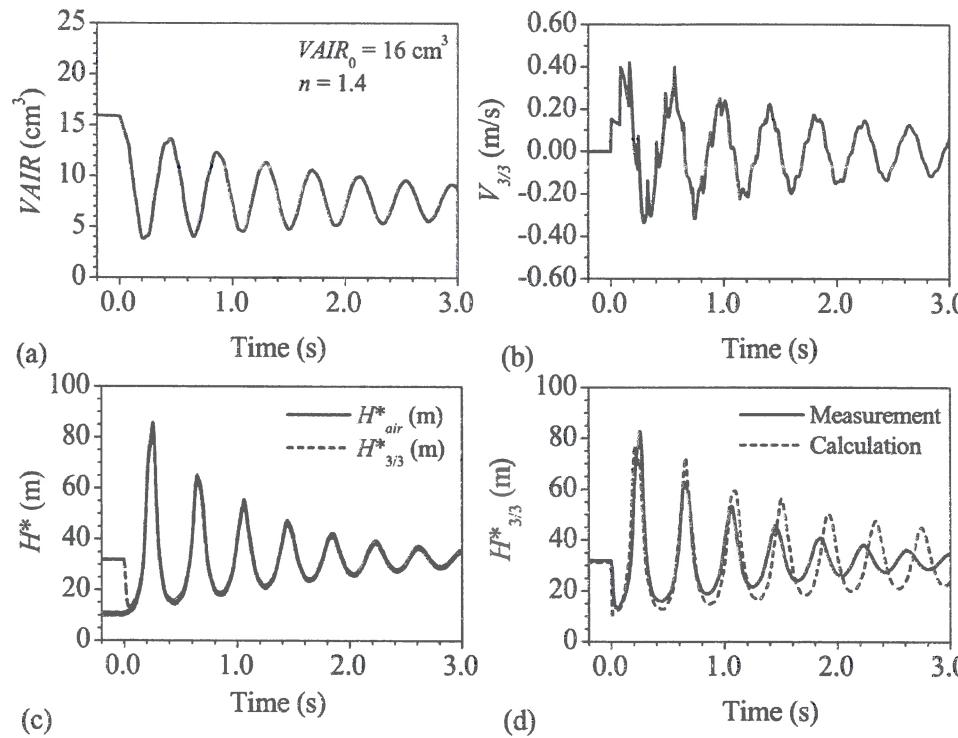


Postopek preizkusa v podgoriški postaji: zagonski obratovalni režim



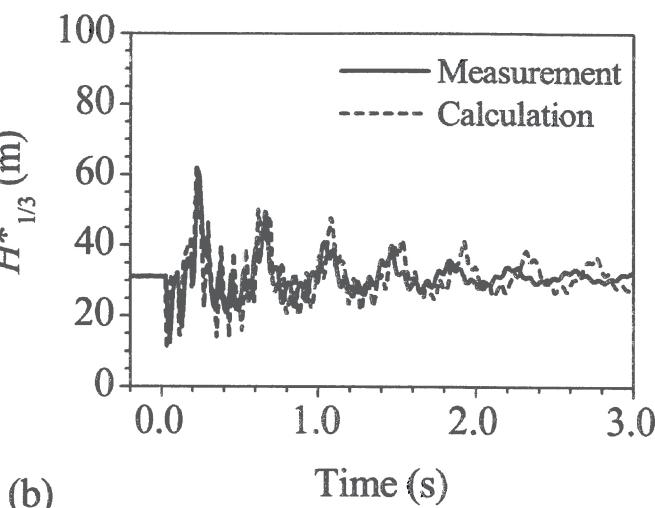
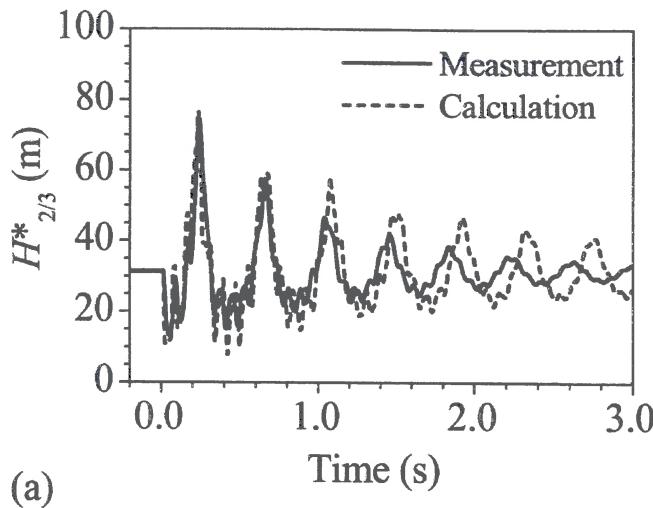
- ↓(1) Polnjenje praznega cevovoda z odprtjem V0/3U.
- ↑(2) Hitra zapora V3/3H (ali V3/3P).
- ←(3) Zapiranje V3/3E: zračni mehur se ujame med V3/3H (ali V3/3P) in V3/3E.
- ↑(4) Odprtje V3/3H (ali V3/3P) povzroči ciklično komprimiranje in ekspanzijo mehurja.

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v podgoriški postaji: Primer I



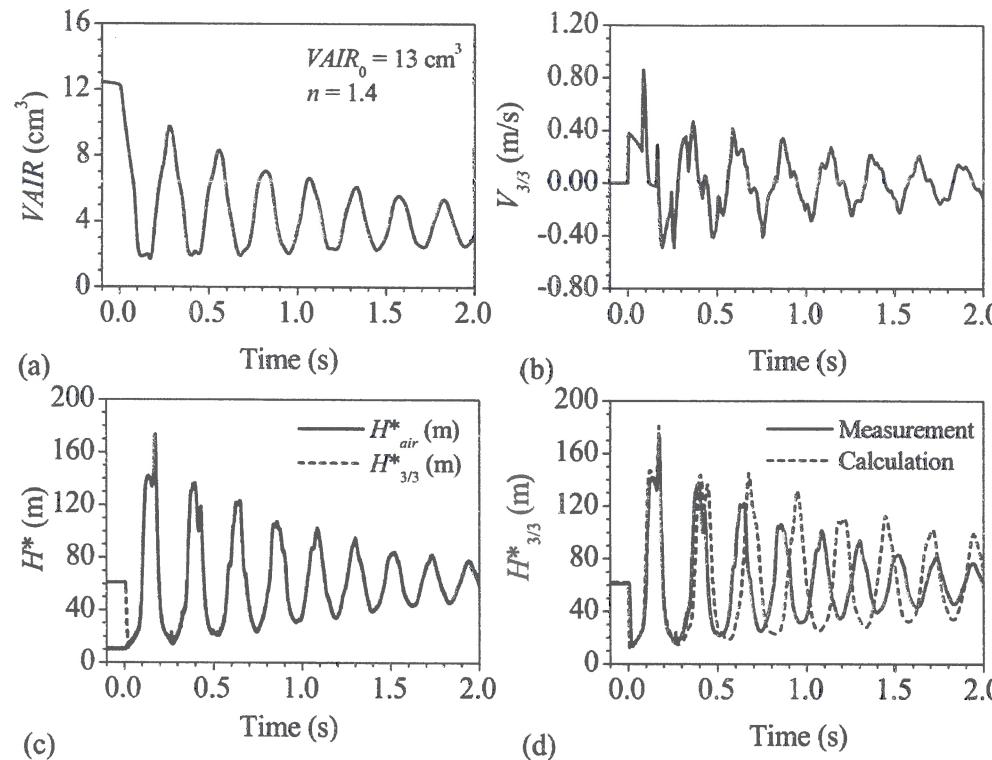
Primerjava izračunanih in izmerjenih sprememb volumna zraka ∇_g (V_{AIR}), pretočne hitrosti vode ($V_{3/3}$) ter absolutnih tlačnih višin zraka in vode pri dolvodnem ventilu (H_{air}^ in $H_{3/3}^*$): $H_{HTP} = 21 \text{ m}$; $\nabla_{g0} = 16 \text{ cm}^3$ [Bergant et al. (2016)].*

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v podgoriški postaji: Primer I



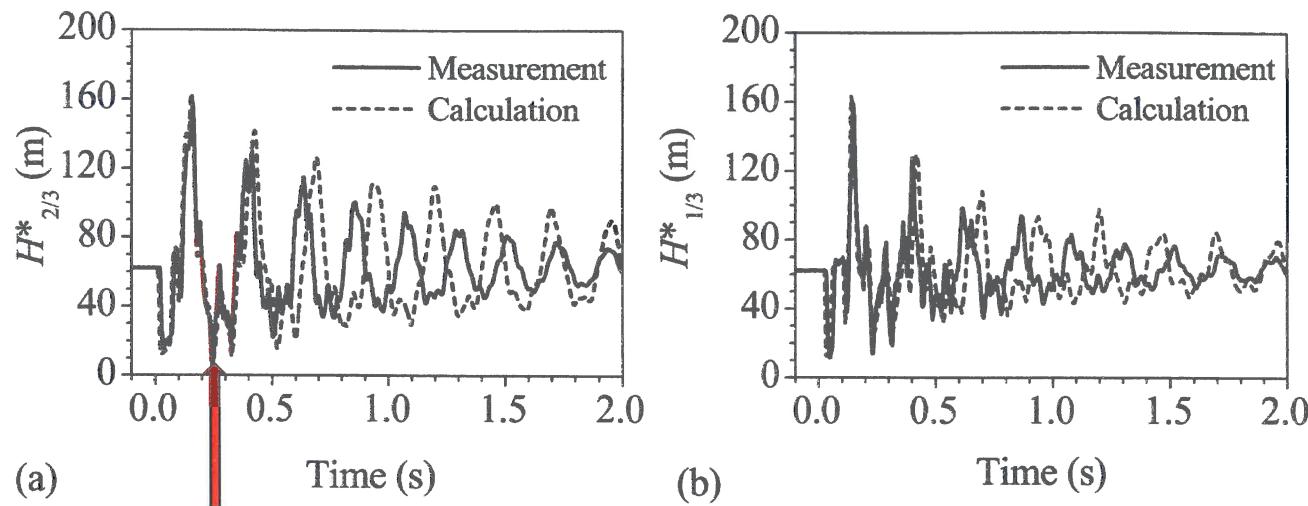
*Primerjava absolutnih tlačnih višin vzdolž cevovoda
($H^*_{2/3}$ in $H^*_{1/3}$): $H_{HTP} = 21$ m; $\nabla_{g0} = 16$ cm³ [Bergant et al. (2016)].*

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v podgoriški postaji: Primer II



Primerjava izračunanih in izmerjenih sprememb volumna zraka ∇_g (V_{AIR}), pretočne hitrosti vode ($V_{3/3}$) ter absolutnih tlačnih višin zraka in vode pri dolvodnem ventilu (H^*_{air} in $H^*_{3/3}$): $H_{HTP} = 52 \text{ m}$; $\nabla_{g0} = 13 \text{ cm}^3$ [Bergant et al. (2016)].

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v podgoriški postaji: Primer II

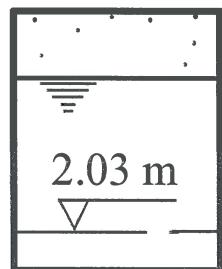


Prehodni kavitacijski tok (parni tlak)

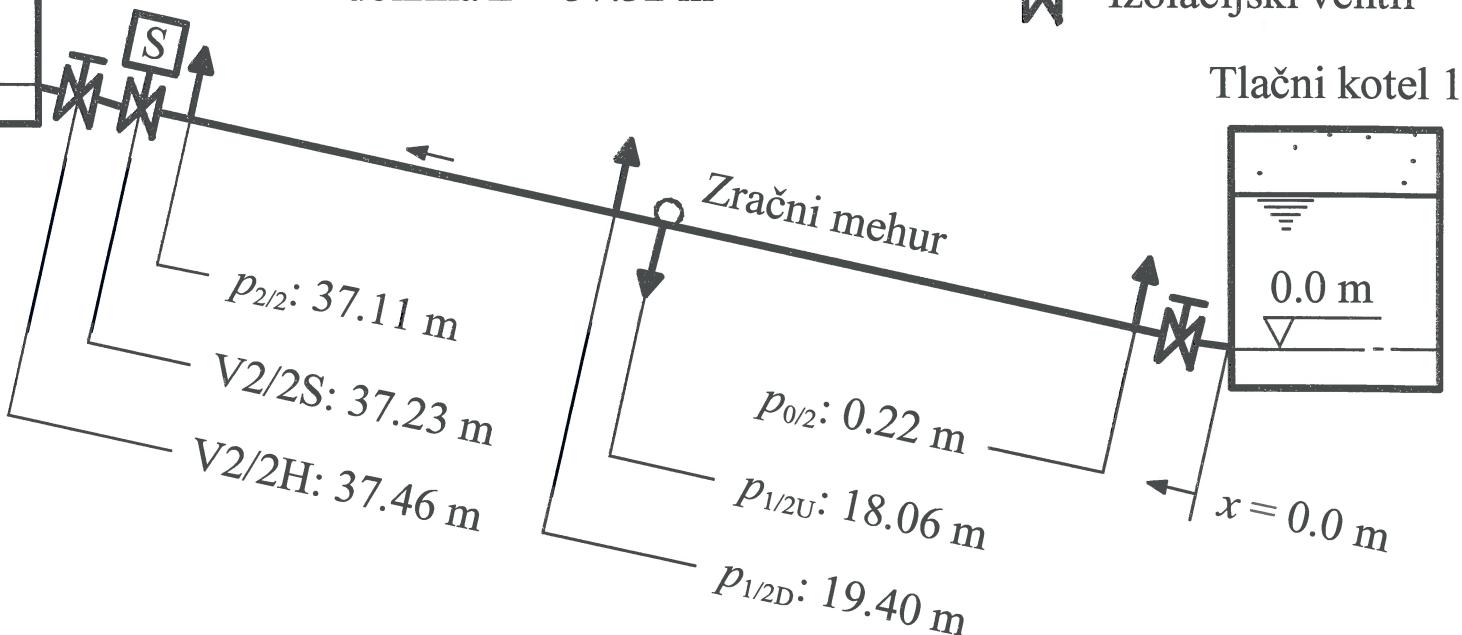
*Primerjava absolutnih tlačnih višin vzdolž cevovoda
($H^*_{2/3}$ in $H^*_{1/3}$): $H_{HTP} = 52 \text{ m}$; $\nabla_{g0} = 13 \text{ cm}^3$ [Bergant et al. (2016)].*

Preizkusna postaja v Adelaidi

Tlačni kotel 2

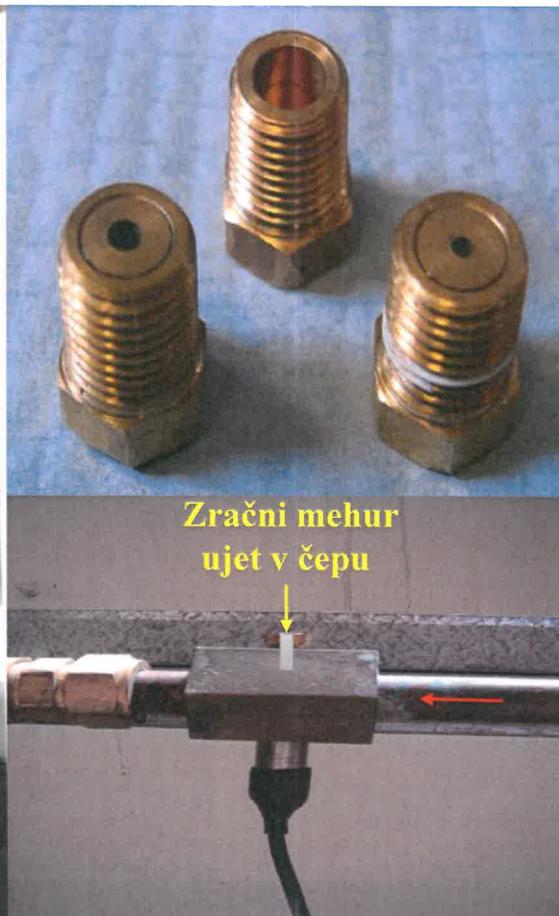


Poševni bakreni cevovod
- notranji premer $D = 22.1$ mm
- dolžina $L = 37.32$ m



- ↑ Tlačno zaznavalo
- S Hitrozaporni ventil
- Izolacijski ventil

Preizkusna postaja v Adelaidi

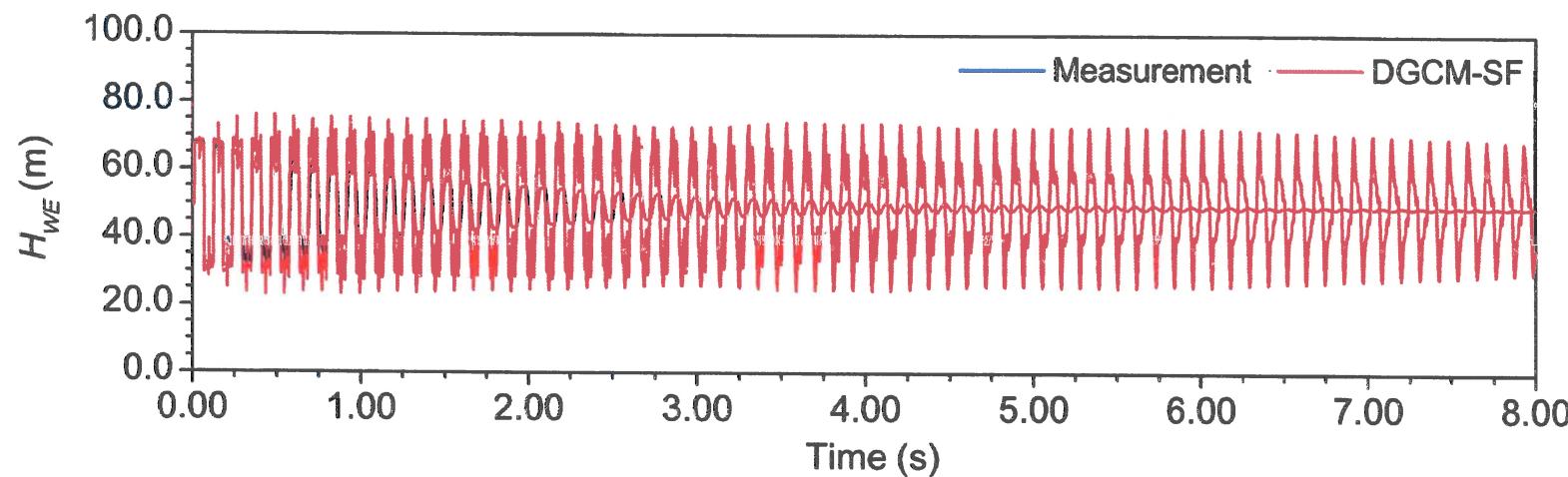


Postopek preizkusa v adelajdski postaji: zapiralni obratovalni režim



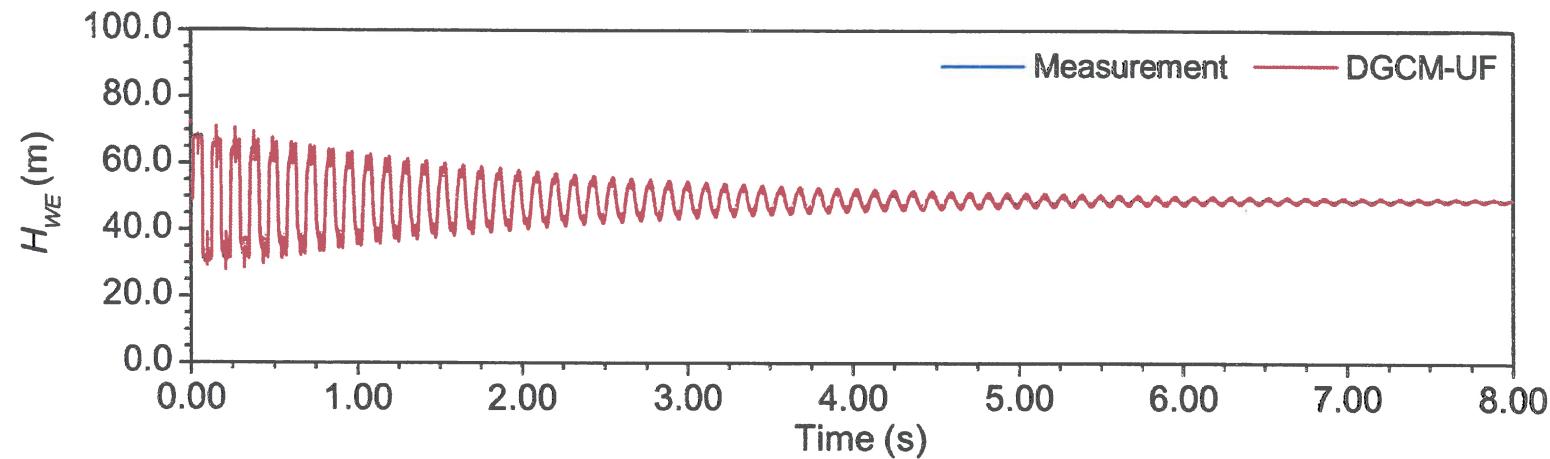
- ↑(1) Odzračenje cevovoda ((1) skozi odprt V2/2S, (2) skozi V2/2H; nizek tlak TK 1).
- ↓(2) Vgradnja ustrezne komore z ujetim zračnim mehurjem (V2/2S in V2/2H zaprta; nizek tlak TK 1).
- ←(3) Povečanje tlaka v TK1 in nato odprtje V2/2S.
- ↑(4) Hitra zapora V2/2S.

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v adelaidski postaji



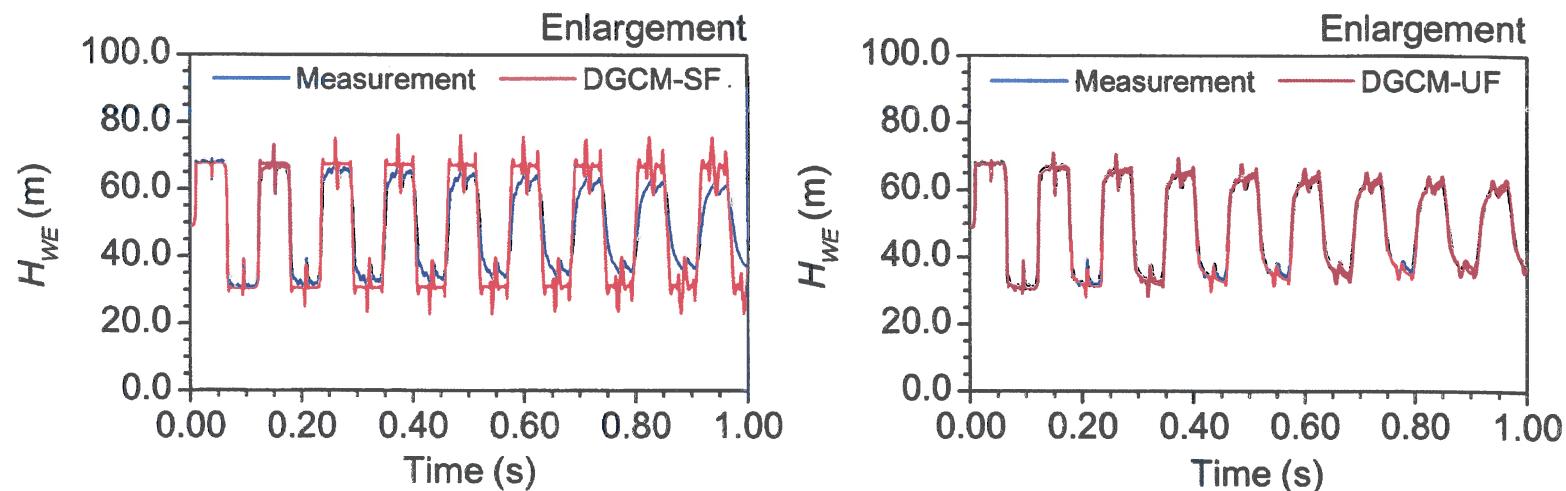
Primerjava izračunanih in izmerjenih tlačnih višin pri ventilu (H_{WE}):
 $Re_0 = 3,050$; volumen zračnega mehurja $\nabla_{g0,EM} = 3.93 \times 10^{-7} \text{ m}^3$;
volumski razmernik $\alpha_{g0,EM} = 0.0058$; $N = 212$; ustaljeni model
stenskega trenja (SF) [Bergant *et al.* (2013)].

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v adelaidski postaji



Primerjava izračunanih in izmerjenih tlačnih višin pri ventilu (H_{WE}):
 $Re_0 = 3,050$; volumen zračnega mehurja $\nabla_{g0,EM} = 3.93 \times 10^{-7} \text{ m}^3$;
volumski razmernik $\alpha_{g0,EM} = 0.0058$; $N = 212$; neustaljeni model
stenskega trenja (UF) [Bergant *et al.* (2013)].

Primerjava rezultatov izračuna in meritev v adelaidski postaji



Primerjava izračunanih in izmerjenih tlačnih višin pri ventilu (H_{WE}):
 $Re_0 = 3,050$; volumen zračnega mehurja $\forall_{g0,EM} = 3.93 \times 10^{-7} \text{ m}^3$;
volumski razmernik $\alpha_{g0,EM} = 0.0058$; $N = 212$; ustaljeni (SF)
in neustaljeni model (UF) stenskega trenja [Bergant *et al.* (2013)].

Zaključki

- (1) Zračni mehur ujet v vodi obravnavamo kot gradnik v notranjih ali robnih točkah računske mreže diskretnega plinskega kavitacijskega modela (DGCM).
- (2) Izoliran zračni mehur povzroči značilne spremembe velikosti, oblike in časovnega poteka tlačnih valov v cevi.
- (3) Ustaljeni model stenskega trenja ne zaduši tlačnih amplitud v zadostni meri. To velja tako za nizko- in visokofrekvenčne pulze.
- (4) Neustaljeni model stenskega trenja zaduši tlačne amplitude v zadostni meri in se priporoča za izračun relativno hitrih prehodov.



JAVNA AGENCIJA ZA RAZISKOVALNO DEJAVNOST
REPUBLIKE SLOVENIJE



LITOSTR® JPOWER

Literatura

BERGANT, Anton, TIJSSELING, Arris S., KIM, Young-il, KARADŽIĆ, Uroš, ZHOU, Ling, LAMBERT, Martin, SIMPSON, Angus R. (2018). Unsteady pressures influenced by trapped air pockets in water-filled pipelines. *Strojniški vestnik*, let. 64, št. 9, str. 501-512.

BERGANT, Anton, KARADŽIĆ, Uroš, TIJSSELING, Arris S. (2016). Dynamic water behaviour due to one trapped air pocket in a laboratory pipeline apparatus. *IOP conference series. Earth and environmental science* (splet), let. 49, 05207, 10 str.

BERGANT, Anton, KIM, Young-il, TIJSSELING, Arris S., LAMBERT, Martin F., SIMPSON, Angus R. (2013). Dynamic behaviour resulting from trapped air pockets in pipelines. *Proceedings of The First International Hydraulic Surge and Air Control Symposium*, Kibbutz Kfar Charuv, str. 93-106.

BERGANT, Anton, SIMPSON, Angus R., VÍTKOVSKÝ, John (2001). Developments in unsteady pipe flow friction modelling. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, let. 39, št. 3, 249-257.

Hvala za pozornost!