

## Neustaljeni tlaki vplivani z ujetimi zračnimi mehurji v cevovodih napoljenih z vodo

Anton Bergant<sup>1,\*</sup> – Arris Tijsseling<sup>2</sup> – Young-il Kim<sup>3</sup> – Uroš Karadžić<sup>4</sup> –  
Ling Zhou<sup>5</sup> – Martin F. Lambert<sup>6</sup> – Angus R. Simpson<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Litostroj Power d.o.o., Slovenija

<sup>2</sup> Tehniška univerza Eindhoven, Nizozemska

<sup>3</sup> Detection Services, Avstralija

<sup>4</sup> Univerza Črne gore, Črna gora

<sup>5</sup> Univerza Hohai, Kitajska

<sup>6</sup> Univerza v Adelaidi, Avstralija

Zračni mehurji ujeti v cevovodih napoljenih z vodo (pretočni sistem hidroelektrarne, črpalni sistem) lahko povzročijo nekontrolirano obratovanje in poškodbe sistema (zrušitev gradnikov cevne sistema). Prispevek obravnava dinamični odziv izoliranega zračnega mehurja. Zračni mehur, ki je izoliran v cevovodu (vzdolž cevi, na pregibih cevi, ob gradnikih sistema), povzroči značilne spremembe velikosti, oblike in časovnega poteka neustaljenih tlačnih valov. Intenziteta rezultirajočega hidravličnega prehoda je narekovana z volumnom, tlakom in tehniško razporeditvijo ujetega zračnega mehurja.

Teoretični model bazira na enčbah neustaljenega stisljivega kapljevinskega toka v ceveh. Transformacija postavljenih parcialnih diferencialnih enačb hiperboličnega tipa z uporabo metode karakteristik da navadne diferencialne enačbe, ki jih rešujemo s pomočjo diferenčne numerične metode. V deltoidno mrežo metode karakteristik je vgrajen Zielkejev konvolucijski model neustaljenega stenskega trenja. V Zielkejev model je vpeljana aproksimativna utežna funkcija, ki da računsko učinkovito konvolucijo z uvedbo eksponentnih funkcij. Vgradnja zračnih mehurjev oziroma mehurčkov (plinskih kavitacij) v numerična vozlišča da diskretni plinski kavitacijski model. Izolirani zračni mehur je glede na tehniško razporeditev obravnavan kot notranji ali robni element.

V prispevku obravnavamo dva karakteristična primera: (1) zagonski obratovalni režim (pospeševanje toka iz mirnega stanja) in (2) zapiralni obratovalni režim (zaustavitev pretoka). Zagonski preizkus smo izvedli na laboratorijski napravi Univerze Črna gora. Dolžina preizkusnega cevovoda je 55 m, notranji premer jeklene cevi pa 18 mm. Zračni mehur je izoliran (ujet) na dolvodnem koncu cevovoda. Prehodni pojav vzbudimo s hitrim odpiranjem ventila, ki ločuje vodni steber in zračni mehur. Razlika tlakov vode in zraka povzroči oscilacije vodnih in zračnih mas. Za primer v tem prispevku je tlak statičnega vodnega stebra na dolvodnem robu (ventil) 520 kPa, tlak v zračnem mehurju pa je enak tlaku okolice (atmosferski tlak). Prehodni pojav z ustavitvijo pretoka smo izvedli na preizkusni postaji Univerze v Adelaidi, Avstralija. Dolžina cevovoda je 37 m, notranji premer bakrene cevi pa 22 mm. V tem primeru je zračni mehur ujet na polovici dolžine cevovoda. Mehur je ujet v komori, ki je vgrajena na vrhu cevi. Tlaka zraka v mehurju in vode v okolici sta izenačena. Zaustavitev pretoka izvedemo s hitrim zapiranjem ventila na dolvodnem robu cevovoda. Spremembo tlaka v zračnem mehurju povzroči tlačni val, ki je vzbujen z zaprtjem dolvodnega ventila. Rezultat interakcije nizkofrekvenčnega vala z mehurjem je visokofrekvenčni tlačni pulz.

Za obravnavana primera (zagon, zaustavitev) se rezultati izračuna in meritev močno razlikujejo, ko v teoretičnem modelu uporabimo ustaljeni model stenskega trenja. Izkaže se, da ta model nezadostno duši tako nizkofrekvenčne kot visokofrekvenčne tlačne spremembe (pulze). To pomanjklivost smo odpravili z vpeljavo konvolucijskega modela neustaljenega stenskega trenja. Ta model zadostno duši tako nizko kot visokofrekvenčne tlake. Za izračun posebej hitrih prehodov priporočamo uporabo konvolucijskega modela. Naj omenimo, da smo v prispevku kot prvi obravnavali interakcije med nizko in visokofrekvenčnimi tlačnimi valovi v cevovodih z v vodi ujetimi zračnimi mehurji.

**Ključne besede:** prehodni pojav, vodni udar, ujet zračni mehur, diskretni plinski kavitacijski model, neustaljeno stensko trenje, preizkusna postaja