

## HIDRAULINIS SLĖGINĖS NUOTEKŲ LINIJOS MODELIAVIMAS

Karolis Baltrukėnas<sup>1</sup>, Dalius Misiūnas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>magistrantas, <sup>2</sup>docentas,

Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

el. p. <sup>1</sup>karolis.baltrukenas@gmail.com; <sup>2</sup>dalius.misiunas@gmail.com

**Anotacija.** Vandens paskirstymo sistemų modeliavimas naudojant kompiuterį yra patikima, efektyvi ir saugi technologija, padedanti imituoti ir analizuoti sistemos veikimą esant plačiam hidraulinių sąlygų diapazonui. Straipsnyje aprašomas hidraulinių sąlygų identifikavimas realioje slėginėje nuotekų linijoje nuo siurblinės „X“ iki slėgio slopinimo kameros. Renovavus slėginę nuotekų liniją buvo pastebėtas avarių dažnėjimas. Taikant modelį atlikti skaičiavimai ir identifiкуotos hidraulinės sąlygos būdinguosiuose slėginės linijos taškuose. Identifikuotas ir aptartas hidraulinių smūgių poveikis vamzdynui.

**Reikšminiai žodžiai:** nuotekų linija, hidraulinis smūgis, modeliavimas, vakuuminis slėgis, siurblinė.

### Įvadas

Vandens paskirstymo sistemų modeliavimas naudojant kompiuterį yra patikima, efektyvi ir saugi technologija, padedanti imituoti ir analizuoti sistemos veikimą esant plačiam hidraulinių sąlygų diapazonui (Larry 2004). Šiame straipsnyje aprašomas hidraulinių sąlygų identifikavimas taikant kompiuterinį modelį realioje slėginėje nuotekų linijoje. Tyrimo objektas buvo slėginės nuotekų linijos atkarpa nuo nuotekų siurblinės „X“ iki slėgio slopinimo kameros.

Taikant realios slėginės nuotekų linijos „X“ išėities duomenis, buvo sukurtas slėginės nuotekų linijos nuo „X“ siurblinės iki diukerio hidraulinis modelis. Taikant hidraulinį modelį identifiкуotos hidraulinės sąlygos būdinguosiuose slėginės linijos taškuose. Hidraulinis modelis sudarytas naudojant specialią programinę įrangą *Hammer V8i*, Bentley Systems Inc. (JAV). Programa skirta atskirų vamzdynų dalių ir vamzdynų sistemų hidrauliniui smūgiui modeliuoti. Sukurtas modelis kalibruotas pagal realius slėgio matavimo duomenis. Slėgis buvo matuojamas nuotekų siurblinėje ir viename nuotekų tinklo taške ir debite nuotekų siurblinėje.

### Hidraulinis tekėjimo režimas slėginuose nuotekų tinkluose

#### *Hidrauliniai smūgiai vamzdynuose*

Hidraulinis smūgis susidaro staigiai pasikeitus debiui, pavyzdžiui, uždarant sklendę ar stabdant siurbli. Tokie sutrikimai gali sukelti didžiulius slėgio pakitimus ir greitai sklindančias bangas vamzdyno viduje. Dauguma žmonių yra tiesiogiai susidūrę su hidraulinio smūgio pa-

dariniais. Pats paprasčiausias pavyzdys yra bildesys ar triukšmas, girdimas staigiai uždarius vandens ėmimo čiaupą. Iš tiesų šiame paprastame pavyzdyje įkūnytas visas hidraulinio smūgio proceso mechanizmas. Kinetinė skysčio tekėjimo energija uždarius čiaupą staigiai sutelkiama ir taip susidaro skysčio ir vamzdyno įtempimai. Rezultatas yra slėgio bangos impulsas, keliaujantis vamzdžiu. Bildesys vamzdyne reiškia, kad dalis bangos kinetinės energijos paverčiama akustine jos forma. Energijos transformacijos ir nuostoliai (tokie kaip skysčio trintis) priverčia slėgio bangą laipsniškai grįžti iki pastovaus slėgio ir pastovaus tekėjimo greičio (Misiūnas 2005).

### Tyrimo objektas

Tyrimo metu modeliuojama reali renovuota slėginės nuotekų linijos dalis. Nuo siurblinės „X“ iki tarpinės diukerio kameros į plieninį 900 mm skersmens vamzdį buvo įvilktas 700 mm skersmens stiklo pluošto audinio vamzdis. Renovuotos linijos ilgis yra 2716 metrų.

Siurblinės įrangą sudaro keturi lygiagrečiai pastatyti siurbliai, iš kurių vienas veikia su dažnio pavara, o kiti paleidžiami pagal nuotekų lygio kitimą rezervuare. Siurblių projektiniai parametrai (darbo taške):

- debitas 441 l/s;
- kėlimo aukštis 65,90 m;
- variklio galia 450 kW;
- siurbimo vamzdžio skersmuo DN500 mm;
- slėginio vamzdžio skersmuo DN500 mm.

Naudojant slėginę nuotekų liniją pastebėtas ryškus avarių dažnėjimas renovuotoje vamzdyno dalyje. Avarių

dažnėjimas siejamas su slėgio svyravimais slėginėje nuotekų linijoje siurblius paleidžiant ir stabdant. Tam, kad būtų galima išanalizuoti slėgio svyravimus būdinguosiuose linijos taškuose, buvo sukurtas hidraulinis slėginės linijos modelis. Modelio aprašymas ir modeliavimo rezultatai pateikiami straipsnio 3 skyriuje.

### Slėginės linijos modeliavimas

#### Darbo metodika

Buvo tiriama trimis etapais:

- Esamų slėgio ir debito matavimo duomenų analizė;
- Modelio sudarymas ir hidrauliniai skaičiavimai;
- Modelio skaičiavimų rezultatų tikrinimas naudojant papildomus slėgio matavimus linijoje.

Siekiant geriau susipažinti su slėginės linijos naudojimu hidrauliniu režimu, buvo išnagrinėti turimi slėgio ir debito matavimo duomenys, matavimai buvo atliekami siurblynėje „X“. Slėgis ir debitas matuoti abiejose linijose 1 s (1 Hz) arba 250 ms (4 Hz) dažnumu. Slėgis buvo matuojamas dažniau, lyginant su eksploatacijai reikalingu slėgio matavimo tikslumu, siekiant gauti patikimus hidraulinio smūgio matavimo duomenis.

#### Hidraulinio modelio sudarymas

Hidraulinis modelis sudarytas naudojant specializuotą programinę įrangą *Hammer V8i*, sukurtą *Bentley Systems Inc.* (JAV). *Hammer V8i* yra labai veiksminga ir patogi priemonė, skirta hidrauliniams smūgiams pavieniuose vamzdynuose ir tinkluose modeliuoti.

Sumodeliuota slėginė nuotekų linija nuo siurblynės „X“ iki diukerio kameros. Bendras slėginės nuotekų linijos modelio vamzdynų ilgis 5299 m. Nuo siurblynės „X“ iki tarpinės diukerio kameros į plieninį 900 mm skersmens vamzdį yra įvilktas 700 mm skersmens stiklo pluošto audinio vamzdis. Renovuotos linijos ilgis 2716 metrų.

Tarpinėje diukerio kameroje 700 mm skersmens stiklo pluošto vamzdynas sujungtas su 900 mm skersmens plieniniu vamzdynu. Bendras plieninio 900 mm skersmens vamzdynų ilgis 2583 m.

Siurblynės modelis sudarytas iš keturių lygiagrečiai pastatytų siurblių, vienas iš kurių veikia su dažnio pavara. Siurblynės modelis sudarytas remiantis projekciniais parametrais, pateiktais 2.2 skyriuje.

Formuojant modelį pirmiausia į programą įkeliamas fonas (angl. *Background Layers*), kuriame pradedama dirbti. Šiuo atveju tai yra topografinis planas su pažymėta

slėgine linija „X“. Programa automatiškai konvertuoja mastelį į tokį, kokiu buvo parengtas topografinis planas.

Tolesnis etapas – būdingųjų taškų (angl. *Junction*) išdėstymas. Būdingaisiais taškais vadiname tas vietas, kuriose galimas ryškus tekėjimo režimo pasikeitimas (posūkiai, altitudžių perkritimai, vamzdžio skersmens ar medžiagos pasikeitimai).

Būdinguosius taškus galima dėstyti dviem būdais:

- 1) dėstant tiesiogiai fone;
- 2) nustatant konkrečias koordinatas.

Išdėsčius būdinguosius taškus plane, naudojame profilius ir sujungiame taškų absoliutines altitudes.

Tolesnis žingsnis – modelio vamzdyno formavimas. Pasirinkus komandą *Pipe* būdingieji taškai tarpusavyje jungiami vamzdžiais, nurodant medžiagą, iš kurios pagamintas vamzdis, ir skersmenį. Parenkant vamzdyno medžiagą naudojamos programos duomenų bazė, kurioje yra įvairių medžiagų vamzdžių charakteristikos. Šiuo atveju naudojami dviejų medžiagų vamzdžiai – plieniniai (angl. *Steel*) ir stiklo pluošto audinio (angl. *Fiberglass rowing*).

Tolesni veiksmai kuriant modelį yra trūkstančių elementų tokių, kaip nuotekų talpa, oro vožtuvai, slėgio slopinimo įrenginiai, armatūra, įterpimas. Įterpiant kiekvieną iš šių elementų nurodomi jo parametrai (tūris, skersmuo ir pan.) ir altitudė.

Sudarytos slėginės linijos modelio profilis pavaizduotas (1 pav.) juoda linija (1). Kaip matyti paveiksle, linijos profilyje yra nemažų altitudės svyravimų, kuriuos lemia žemės paviršius. Šie altitudės svyravimai sudaro sąlygas susidaryti oro sankauptoms aukščiausiuose linijos taškuose. Oro sankauptų išleidimo į atmosferą linijoje sumontuoti trys oro išleidimo vožtuvai. Šie vožtuvai yra įtraukti į modelį. Į modelį taip pat įtrauktos atšakos ir kiti linijos elementai, maksimaliai parodant realią linijos topologiją.

#### Simuliaciniai skaičiavimai

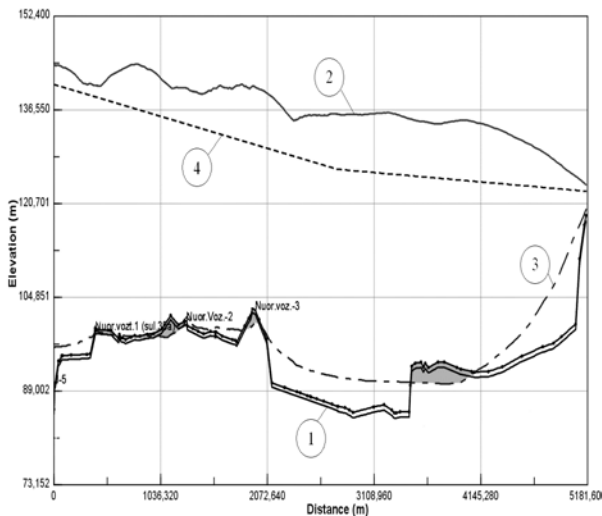
Paruoštas modelis automatiškai patikrinamas naudojant komandą *Validate*. Programa automatiškai patikrina, ar pateikdami duomenis nepadarėme klaidų ir ar visi taškai sujungti.

Jeigu modelis paruoštas korektiškai, pasirenkamas siurblių darbo scenarijus ir komanda *Compute* atliekami skaičiavimai. Scenarijus pasirenkamas naudojantis programos duomenų bazės siūlomų scenarijų variacijomis arba susikuriant savo tekėjimo režimo scenarijų.

## Skaičiavimų rezultatai

Siekiant išanalizuoti slėgio svyravimus būdinguose linijos taškuose, buvo pasirinktas analizuojant matavimo duomenis identifikuotas scenarijus, kai dažnio pavara išsijungia veikiantis siurblys. Visi kiti siurbliai per modeliavimą neveikė. Siurblių stabdyti buvo numatyta po 10 sekundžių nuo bandymo pradžios. Norint identifikuoti linijos vietas, kuriose slėgis įgauna neigiamas reikšmes, naudojant programą buvo generuotas visos linijos slėgio profilis. Šis profilis pavaizduotas 1 pav.

1 paveiksle juoda linija (1) žymi slėginės linijos profilį, raudona ištininė linija (2) – maksimalų slėgį, mėlyna punktyrinė linija (3) – minimalų slėgį, o juoda punktyrinė linija (4) rodo slėgio nuostolius linijoje. Kaip matyti 1 pav., linijoje atsiranda keletas atkarpų, kuriose slėgis krenta žemiau nulio. Kaip ir galima tikėtis, šios atkarpos sutampa su aukščiausiais linijos taškais. Labiausiai išsiskiria atkarpos aplink oro išleidimo vožtuvus Nr. 2 (1000–1300 m) ir Nr. 3 (1800–1900 m). Neigiamos slėgio vertės taip pat matomos ir nerenovuotos linijos atkarpoje (3400–4000 m), tačiau šiuo atveju slėgis krenta žemiau nulio tik labai trumpą laiko tarpą.

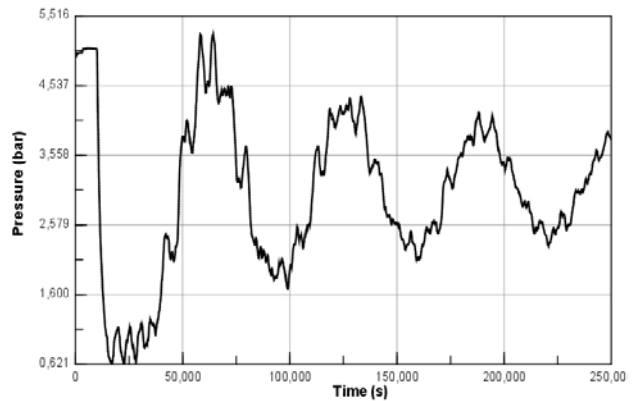


1 pav. Linijos slėgio profilis

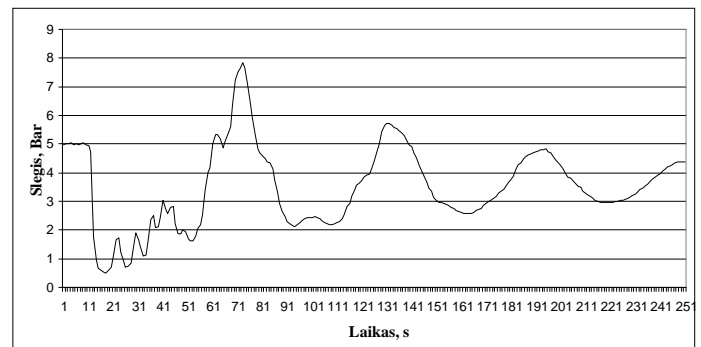
Modelio skaičiavimų rezultatus galima palyginti su matavimo duomenimis. 2 pav. pavaizduoti modeliuoti slėgio ir debito svyravimai siurblinėje.

Norint patikrinti apskaičiuotus modelio rezultatus, slėgis buvo matuojamas oro vožtuvo Nr. 2 prijungimo vietoje. Slėgis matuotas laikinai sumontavus slėgio daviklį oro išleidimo vožtuvo vietoje. Matuojant buvo priverstinai stabdomas vienas siurblys (be dažnio pavaros) atkartojant modeliuojamą scenarijų. Matavimo rezultatai pavaizduoti 3 paveiksle. Norint palyginti, 4

pavaizduoti 3 paveiksle. Norint palyginti, 4 pav. pavaizduoti modeliuojami slėgio svyravimai tame pačiame linijos taške.

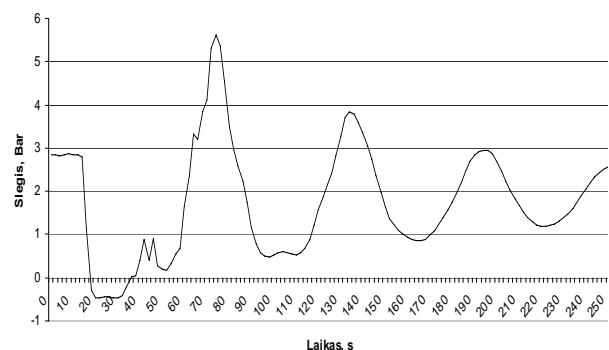


a

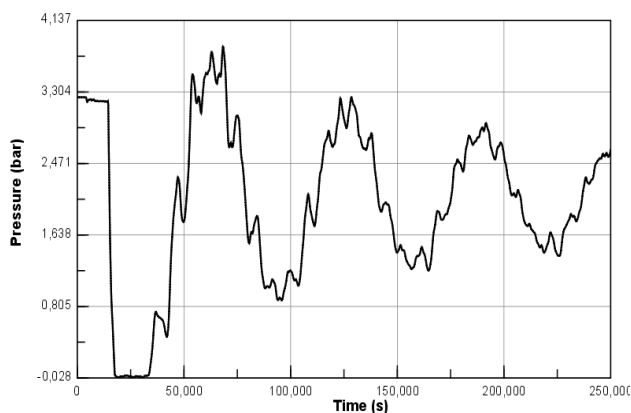


b

2 pav. Modelio kalibravimas, slėgio svyravimai siurblinėje: a – sumodeliuoti slėgio svyravimai; b – išmatuoti slėgio svyravimai siurblinėje



3 pav. Slėgio svyravimai oro vožtuvo Nr. 2 prijungimo vietoje (išmatuoti)



**4 pav.** Modelio rezultatai: slėgis oro išleidimo vožtuvo Nr. 2 prijungimo vietoje

4 pav. pavaizduoti slėgio svyravimai patvirtina modelio skaičiavimų rezultatus. Oro vožtuvo Nr. 2 prijungimo vietoje susidaro neigiamas slėgis. Nors modelio ir matavimo rezultatų atitikimas nėra idealus, tačiau iš principo rezultatai rodo, kad modelis yra tinkamas hidraulinių sąlygų būdingiesiems linijos taškams nustatyti. Modelio ir matavimo rezultatų neatitikimą gali lemti keletas priežasčių: modelio parametrų netikslumas, slėgio bangos greičio kitimas dėl oro patekimo į liniją ir kt. Norint, kad matavimų rezultatai tiksliau atitiktų modelio rezultatus, reikia kalibruoti jo parametrus. Tai pakankamai sudėtingas darbas, reikalaujantis nemažai papildomų matavimų ir tikslesnių duomenų apie fizines vamzdžio savybes ir linijos topologiją. Norint pasiekti modeliavimo tikslą, t. y. įvertinti ribines slėgio svyravimo vertes, pakanka pasiekti modelio tikslumo.

## Išvados

1. Slėginės linijos naudojimo režimas sudaro sąlygas, kurios gali sukelti hidraulinius svyravimus ir netgi smūgius. Didžiausi amplitudės slėgio svyravimai, galintys turėti įtakos linijos pažeidimams, įvyksta išsijungiant siurbliui, veikiančiam su dažnio pavara ar be dažnio pavaros.

2. Šie svyravimai kai kuriuose slėginės linijos taškuose lemia žemą slėgį, artimą vakuumui. Toks slėgio sumažėjimas didina vamzdžio mechanines apkrovas ir avarijų tikimybę.

3. Žemiausias slėgis susidaro aukščiausių linijos taškų vietose. Slėgiui krentant žemiau nulio, linijoje formuojasi oro tarpai, kurie plečiasi išilgai linijos, ir vėliau, kai slėgis įgauna teigiamą reikšmę, išnyksta kartu sukeldami slėgio didėjimą. Tai galima pavadinti vamzdžių kavitacija, kuri analogiška siurblių kavitacijai.

4. Išnagrinėjus jau įvykusių avarijų išsidėstymą, galima daryti išvadą, kad avarijos dažniausiai vyko šalia aukščiausių linijos taškų (oro vožtuvai Nr. 2 ir Nr. 3). Tikslus slėgio ir atitinkamai mechaninės jėgos, veikiančios vamzdį, kitimo mechanizmas yra pakankamai sudėtingas, nes jame dalyvauja ir krintant slėgiui susidarę oro tarpai. Norint tiksliai nustatyti slėgio sumažėjimo ir padidėjimo įtaką linijos avarijoms, reikia tolesnio tyrimo.

5. Remiantis mechaninio medžiagos atsparumo tyrimo duomenimis, stiklo puoštas nėra atsparus neigiamam slėgio sukeliama poveikiui. Todėl galima daryti išvadą, kad slėginei linijai renovuoti naudotos medžiagos pasirinkimas nėra optimalus esant šiam linijos eksploataavimo režimui.

## Literatūra

- Andersen, J. H.; Powell, R. S. 2000. Implicit state-estimation technique for water networks monitoring, *Urban Water* 2 (2): 123–130.
- Larry, W. M. 2004. *Water Distribution Systems Handbook*, American Water Works Association, 2.8–3.2.4.
- Misiūnas, D. 2005. *Failure Monitoring and Asset Condition Assessment in Water Supply Systems*. Media Tryck Lund University, Sweden, 2005. 331 p.

## HYDRAULIC MODELING OF PRESSURIZED WASTEWATER PIPELINE

**K. Baltrukėnas, D. Misiūnas**

### Summary

Computer modeling of water distribution systems has proven to be an effective and reliable technology for simulating and analyzing system behavior under a wide range of hydraulic conditions. This article describes the identification of the hydraulic conditions in an existing pressure wastewater pipeline from the “X” pumping station to the pressure slope camera. Frequent pipe failures were observed in the pipeline after it has been renovated. Pressure variations in the characteristic points of the pipeline were analyzed applying the model and simulation tools. The critical operational modes of the pipeline were identified and their impact on the pipe failure discussed.