ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

UO‘K: 532.595.2 https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-3.14

MURAKKAB (HALQASIMON) NAPORLI QUVUR TARMOQLARIDA ISHQALANISH KUCHINI HISOBGA OLGAN HOLDA GIDRAVLIK ZARBANI HISOBLASH

Eshev Sobir Samatovich, texnika fanlari doktori, professor,
E-mail: telnets@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3880-9289, Science ID: DQD-1125-0019
Jonqobilov Ulugmurad Umbarovich, texnika fanlari doktori, professor,
E-mail: ulugmurad@inbox.ru, ORCID: 0000-0003-0871-0317, Science ID: DQD-0626-0015
Jonqobilov Sobir Ulug‘murodovich, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD), E-mail: jonkobilovsobir@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0619-936X, Science ID: FQD-0626-0092
Rajabov Ulug‘bek Mamashoyevich, texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),
E-mail: 020267@mail.ru, ORCID: 0009-0007-6110-1111, Science ID: FQD-0626-0094
Jonqobilov Bektemir Ulug‘muradovich, texnika fanlari falsafa doktori (PhD), E-mail: bektemirzonkobilov@gmail.com, ORCID: 0009-0003-7523897X, Science ID: FQD-0626-0093
Ruzimurodov Zoir Husniddinovich, assistent, E-mail: ruzimurodovzoir1@gmail.com,
ORCID: 0009-0008-6317-5760, Science ID: MQD-0626-0133
Bahodirov Shohruh Baxodir o‘g‘li, doktorant (PhD), E-mail: bahodirovshohrux2613@gmail.com,
ORCID: 0009-0000-6269-1220, Science ID: MQD-0626-0131

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. *Maqolada murakkab (halqasimon) naporli quvur tarmoqlarida gidravlik zarba to‘lqinlarining tarmoqlanish tugunlaridan o‘tishi va ishqalanish ta’sirini hisobga olgan holda bosqichma-bosqich hisoblash usuli kengaytirilgan tarzda bayon etilgan. Tugunga kiruvchi va undan chiquvchi quvurlardagi K va Ψ bosim impulslari, tugundagi naporning umumiyligi va sarflarning algebraik balansi asosida tugun tenglamasi shakllantiriladi. d=55 mm, a=235 m/s va H_0=1,2 m bo‘lgan ikki halqali polietilen tarmoq tajribasi tahlil qilingan. A va B kesimlarida 10 tadan tajriba natijasi bilan qiyoslashda o‘rtacha nisbiy xatolar 4,48 va 4,25 % bo‘lgan. Nasosning to‘satdan to‘xtashi misolida i=19 da teskari klapan yopilishi va i=27 da statik bosimga nisbatan 91 % ortiqcha bosim hosil bo‘lishi aniqlangan.*

Kalit so‘zlar: *halqasimon naporli tarmoq; gidravlik zarba; ishqalanish kuchi; tarmoqlanish tuguni; bosim impulsi; rekurrent algoritm; nasosning to‘satdan to‘xtashi.*

УДК: 532.595.2

РАСЧЁТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В СЛОЖНЫХ (КОЛЬЦЕВЫХ) НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЯХ С УЧЁТОМ СИЛ ТРЕНИЯ

Эшев Собир Саматович, доктор технических наук, профессор
Жонкобилов Улугмурад Умбарович, доктор технических наук, профессор
Жонкобилов Собир Улугмуродович, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
Ражабов Улугбек Мамашоевич, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
Жонкобилов Бектемир Улугмурадович, доктор философии по техническим наукам (PhD)
Рузимуродов Зоир Хуснидинович, ассистент
Баходиров Шохрух Баходир угли, докторант (PhD)

Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. *В статье в расширенном виде изложен пошаговый метод расчёта гидравлического удара в сложных (кольцевых) напорных трубопроводных сетях с учётом прохождения ударных волн через узлы разветвления и влияния сил трения. Уравнение узла формируется на основе импульсов давления К и Ψ во входящих в узел и выходящих из него трубопроводах, условия единства напора в узле и алгебраического баланса расходов. Проанализированы результаты экспериментов на двухкольцевой полиэтиленовой*

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

трубопроводной сети при $d = 55$ мм, $a = 235$ м/с и $H_0 = 1{,}2$ м. Сопоставление расчётных данных с 10 экспериментальными результатами в каждом из сечений A и B показало, что средние относительные погрешности составили соответственно 4,48 и 4,25 %. На примере внезапной остановки насоса установлено, что при $i = 19$происходит закрытие обратного клапана, а при $i = 27$возникает избыточное давление, составляющее 91 % относительно статического давления.

Ключевые слова: *кольцевая напорная сеть; гидравлический удар; сила трения; узел разветвления; импульс давления; рекуррентный алгоритм; внезапная остановка насоса.*

UDC: 532.595.2

CALCULATION OF WATER HAMMER IN COMPLEX (LOOPED) PRESSURE PIPELINE NETWORKS WITH ACCOUNT OF FRICTION FORCES

Sobir Eshev, Doctor of Technical Sciences, Professor
Ulugmurad Jonkobilov, Doctor of Technical Sciences, Professor
Sobir Jonkobilov, Doctor of Philosophy(PhD) in Technical Sciences, associate professor
Ulugbek Rajabov, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, associate professor
Bektemir Jonkobilov, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences
Zoir Ruzimurodov, Assistant
Shohruh Bahodirov, Doctoral Student

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. *The article presents an extended step-by-step method for calculating water hammer in complex (looped) pressure pipeline networks, taking into account the propagation of pressure waves through branching junctions and the effect of friction forces. The junction equation is formulated based on the pressure impulses $K$and Ψin the pipelines entering and leaving the junction, the condition of a common pressure head at the junction, and the algebraic balance of flow rates. Experimental results obtained from a two-loop polyethylene pipeline network with $d = 55$ mm, $a = 235$ m/s, and $H_0 = 1.2$ m were analyzed. Comparison of the calculated values with 10 experimental results at each of sections A and B showed mean relative errors of 4.48 and 4.25 %, respectively. Using the case of a sudden pump shutdown, it was established that the check valve closes at $i = 19$, while at $i = 27$an excess pressure of 91% relative to the static pressure occurs.*

Keywords: *looped pressure pipeline network; water hammer; friction force; branching junction; pressure impulse; recurrent algorithm; sudden pump shutdown.*

Kirish

Halqasimon va tarmoqlangan naporli tizimlarda gidravlik zarba oddiy quvurdagiga nisbatan murakkabroq rivojlanadi. Bosim to‘lqini tugunga yetganda bir nechta quvur yo‘nalishlariga ajraladi, akslanadi va tarmoqdagi sarflarning qayta taqsimlanishiga sabab bo‘ladi. Shu bois har bir tarmoqlanish tugunida naporning tutash quvurlar uchun umumiyligi hamda kiruvchi va chiquvchi sarflarning algebraik balansi bir vaqtda bajarilishi lozim.

Manba materialda oddiy quvur uchun shakllantirilgan Ψ–K rekurrent yondashuvi halqasimon tarmoqqa umumlashtiriladi. Asosiy hisoblash masalasi - ma’lum vaqt momentida tugunga yetib kelgan bosim impulslaridan tugun naporini topish, keyin esa shu napor orqali tarmoqlarga tarqaluvchi noma’lum impulslar va tezliklarni aniqlashdir.

Tadqiqot maqsadi-ishqalanish ta’sirini hisobga oluvchi rekurrent bosim impulslari usulini halqasimon tarmoq tugunlari uchun qo‘llash, ikki halqali polietilen tarmoqda hisobiy natijalarni tajriba bilan baholash va nasosning to‘satdan to‘xtashi kabi avariya rejimida to‘lqinlarning tarmoq bo‘ylab rivojlanishini tahlil qilish.

1. Murakkab quvurlarda muammoning o‘rganilganlik darajasi

Murakkab quvur tarmoqlarida suv zarbasi to‘lqinlari tugunlarga yetganda akslanish, o‘tish va tarmoqlar bo‘yicha qayta taqsimlanish bir vaqtda sodir bo‘ladi. Shu sababli tarmoq topologiyasi

oddiy geometrik xususiyat emas, balki zarba amplitudasi va bosim ekstremumlarini belgilovchi dinamik omildir. Zamonaviy tadqiqotlarda xarakteristikalar usuli hanuz asosiy vaqt sohasi yechuvchilaridan biri bo‘lib qolmoqda, chunki rezervuar, klapan, nasos va tarmoqlanish tugunlari uchun fizik ma’nosi aniq chegaraviy shartlarni qo‘llash imkonini beradi [4, 6-8, 9, 10, 11, 12].

2024-yilda taklif etilgan gibrid tarmoq usullarida xarakteristikalar chiziqlari va ekvivalent zanjirlar birlashtirilib, yuqori chastotali bosim tebranishlari va nochiziqli ishqalanishni hisoblash tezligini oshirishga urinishlar qilindi. 2026-yilgi tarmoqlangan Y-tizim tadqiqotlari esa tarmoq diametri, tugun joylashuvi va yopilish rejimi bosim ekstremumlarini sezilarli qayta tashkil etishini ko‘rsatadi. Bu holatlar halqasimon tarmoq tugunlarini alohida fizik hisoblash obyekti sifatida qarash zarurligini kuchaytiradi [6-8, 9, 11].

2. Ilmiy masalaning qo‘yilishi va yangilik

Mazkur maqoladagi asosiy masala - oldingi vaqt qatlamidan ma’lum bo‘lgan Ψ va K bosim impulslaridan foydalanib, tarmoqlanish tugunidagi yagona H naporni aniqlash va undan keyin har bir tutash quvur uchun yangi impuls hamda tezlikni hisoblashdir. Bu yondashuv tugundagi massa balansi bilan bosimning uzluksizligini bitta rekurrent hisoblash sxemasida birlashtiradi.

Ilmiy yangilik halqasimon tarmoqning istalgan tugunida bosimni kiruvchi va chiquvchi impulslarning $\varepsilon=g\omega/a$ bilan og‘irliklangan yig‘indisi orqali aniqlash, ushbu tugun bog‘lanishini ishqalanish hisobga olingan Ψ–K rekurrent algoritmi bilan birlashtirish va ikki halqali tajriba hamda nasos to‘xtashi rejimida tekshirishdan iborat.

3. Murakkab (halqasimon) naporli quvurlarda gidravlik zarba bo‘yicha adabiyotlar tahlili

Murakkab (halqasimon) naporli quvurlarda gidravlik zarbani hisoblash oddiy quvur masalasidan tarmoqlanish tugunlarida bosim to‘lqinlarining bo‘linishi, qisman aks etishi va turli yo‘nalishlarda qayta tarqalishi bilan farq qiladi. Manba materialida murakkab quvurlar bo‘yicha klassik yondashuvlardan biri Sh. Eger usuli sifatida ko‘rsatilgan [2]. Ushbu usul Alliyevi nazariyasining umumiy tenglamalarini tarmoqlanish tugunlaridagi sarf va bosimning uzluksizlik shartlari bilan to‘ldiradi.

Sh. Eger uchta quvur bir tugunda tutashgan sxemani ko‘rib, boshlang‘ich bosim impulsining tarmoqlanish nuqtasida qisman aks etishi va qolgan qismining boshqa tarmoqlarga o‘tishini hisobga olgan. Muallif to‘lqinlarni oddiy superpozitsiya bilan qo‘shish o‘rniga Alliyevining umumiy yechimidan va tugundagi sarf hamda bosim uzluksizligi shartlaridan foydalangan [1]. Bu yondashuv murakkab tarmoqdagi to‘lqin almashinuvi fizik mohiyatini ochib beradi, biroq hisoblash tenglamalarining murakkabligi sababli maksimal naporni aniqlash uchun soddalashtirilgan variant taklif etilgan.

M.A. Mostkov murakkab tizimlarni hisoblashni soddalashtirish uchun «ekvivalent uzunliklar» usulini ishlab chiqqan [2]. Uning mohiyati murakkab quvur tizimini ma’lum vaqt momentida bir xil zarba ordinatasini beradigan ekvivalent oddiy quvur bilan almashtirishdan iborat. Biroq manba tahliliga ko‘ra bu usul ishqalanish kuchlarini hisobga olmaydi, ekvivalent uzunlik koeffitsiyentini kanonik tasvirlar orqali aniqlash murakkab va zadvijkaning yopilish davomiyligi ortgan sari hisobga olinadigan hadlar soni keskin ko‘payadi.

I.V. Potapov «ekvivalent uzunliklar» usulini ishqalanish natijasidagi napor yo‘qotishlarini hisobga olish maqsadida takomillashtirgan [3]. Bunda o‘tish va aks etish koeffitsiyentlari, naporning tiklanish koeffitsiyenti hamda tarmoq sxemasiga bog‘liq maxsus koeffitsiyent kiritiladi. Biroq mazkur koeffitsiyent faqat bitta simmetrik va bitta asimmetrik halqa uchun aniqlanganligi sababli usulni boshqa konfiguratsiyalardagi tarmoqlarga bevosita tatbiq etish cheklangan.

M.A. Mostkovning umumiy sonli usuli murakkab tarmoqlar uchun nisbatan universal hisoblanadi va uning asosini Jukovskiy tenglamalarining xarakteristikalari tashkil etadi [1, 2]. Tugunga tutash quvurlarning o‘lchamlari va elastik xossalari turlicha bo‘lganda, tugundagi napor kiruvchi va chiquvchi xarakteristikalar orqali aniqlanadi. Manba materialida ushbu usulning yetarlicha aniqligi va hisoblash amaliyotida qo‘llash mumkinligi qayd etilgan.

Shu bilan birga, Mostkov usulida qarshiliklar hisobga olinganda har bir uchastkadagi napor yo‘qotishlari uning o‘rtasidagi maxsus «qarshilik tuguni»da jamlanadi. Bu hisoblash amallari hajmini

taxminan ikki baravar oshiradi va napor yo‘qotishlarining quvur uzunligi bo‘yicha taqsimlangan fizik tabiatini soddalashtiradi [2]. Bundan tashqari, manbada Mostkovning dastlabki umumiy sonli usulida halqasimon tarmoqdagi gidravlik zarba masalasi alohida ko‘rib chiqilmaganligi qayd etilgan [1].

Adabiyotlar tahlili halqasimon tarmoqlar uchun hisoblash usulini rivojlantirishda ikki talabni birlashtirish zarurligini ko‘rsatadi: birinchidan, ishqalanish ta’sirini quvur uchastkalari bo‘yicha hisobga olish; ikkinchidan, tarmoqlanish tugunida to‘g‘ri va teskari bosim impulslarining o‘zaro ta’sirini sarf uzluksizligi bilan birgalikda yechish. Shu sababli ushbu maqolada Ψ va K impulslaridan foydalanilib, ε=gω/a og‘irlik koeffitsiyenti orqali tugundagi naporni aniqlash tenglamasi shakllantiriladi. Natijada turli tarmoqlar uchun yagona rekurrent hisoblash sxemasi hosil qilinadi.

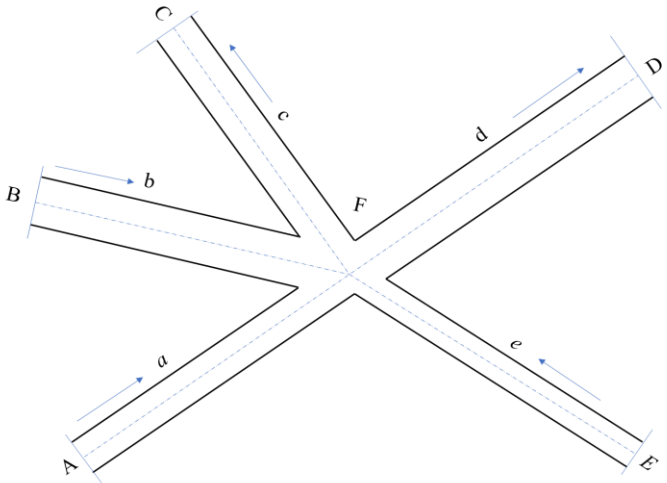
Materiallar va usullar

1. Tugun tenglamasining fizik mazmuni

F tuguniga tutash quvurlarda oqim yo‘nalishiga qarab to‘g‘ri Ψ yoki teskari K bosim impulsi ma’lum deb olinadi (1-rasm). Har bir quvur uchun napor va tezlik bosim impulslari bilan bog‘lanadi:

$$\Psi = H - \frac{a}{g}\varphi\vartheta, \tag{1}$$

$$K = H + \frac{a}{g}\varphi\vartheta. \tag{2}$$



1-rasm. Murakkab quvur tizimlari uchun Mostkov usuli.

Bir tugunga tutash quvurlar uchun φ koeffitsiyentlari juda kam farq qilsa, $\varphi_1=\varphi_2=\varphi_3=\ldots=\varphi$ deb qabul qilinadi. Tugundagi H barcha tutash quvurlar uchun bir xil; sarflarning algebraik yig‘indisi esa nol. Kesim yuzasi ω va zarba to‘lqini tezligi a ni hisobga oluvchi ε=gω/a og‘irlik koeffitsiyenti yordamida tugun napori ma’lum Ψ va K impulslarining og‘irliklangan yig‘indisi sifatida aniqlanadi:

$$H_F = \frac{\sum(\Psi_j\varepsilon_j)+\sum(K_k\varepsilon_k)}{\sum\varepsilon}. \tag{3}$$

Bu yerda Ψ_j tugundan chiqayotgan yo‘nalishlar, K_k esa tugunga kirayotgan yo‘nalishlar uchun ma’lum impulslarni bildiradi. Bog‘lanishning muhim xususiyati - u tugunga ulangan quvurlar soni oshganda ham umumiy algoritmik shaklini saqlaydi.

Tugunga tutash quvurlar uchun xarakteristik tenglamalar

Halqasimon tarmoqning har bir quvurida to‘g‘ri va teskari bosim impulslari napor va tezlik orqali yoziladi:

$$\Psi_j = H - \frac{a_j\vartheta_j}{g}\varphi_j, \tag{4}$$

$$K_j = H + \frac{a_j\vartheta_j}{g}\varphi_j. \tag{5}$$

Ishqalanish ta’sirini ifodalovchi koeffitsiyent oddiy quvur uchun olingan energetik bog‘lanishdan foydalanib yoziladi:

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

$$\varphi_j = 1 \pm \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{g h_{\text{ishq},j}}{a_j \vartheta_j}. \quad (6)$$

Har bir quvurdagi sarf va tugundagi uzluksizlik sharti:

$$Q_j = \omega_j \vartheta_j, \quad (7)$$

$$\sum Q_j = 0. \quad (8)$$

2. Vaqt-fazo bo‘yicha hisoblash algoritmi

Tarmoq zarba to‘lqinining hisobiy yarim faza davomiyligiga mos uchastkalarga bo‘linadi. Har bir vaqt momentida oldingi qatlamdan ma’lum bo‘lgan Ψ va K qiymatlari to‘lqin tarqalish yo‘nalishiga ko‘ra keyingi tugun yoki kesimga ko‘chiriladi. Tugunda avval (6) orqali H topiladi, keyin ma’lum H va kelgan impuls yordamida noma’lum qarama-qarshi impuls va ϑ aniqlanadi. Yopiq kran yoki teskari klapanda ϑ=0 va H=K=Ψ; doimiy naporli rezervuarda H=H₀ va K=2H₀−Ψ.

Tugun naporining takomillashgan tenglamasini keltirib chiqarilishi

M.A. Mostkov tomonidan tavsiya etilgan usulga ko‘ra, F tugunidagi (1-rasm) bosimni aniqlashda tugundan suvni chiqarib yuboruvchi quvurlar uchun to‘g‘ri bosim impulsi Ψ ning, tugunga suvni olib keluvchi quvurlar uchun esa teskari bosim impulsi K ning qiymatlari ma’lum deb qabul qilinadi.

$$\Psi_{c,C1} = \Psi_{c,F2} = H_{F2} - \frac{a_c \vartheta_c}{g}\varphi_c, \quad 9)$$

$$K_{b,B1} = K_{b,F2} = H_{F2} + \frac{a_b \vartheta_b}{g}\varphi_b, \quad (10)$$

$$K_{a,A1} = K_{a,F2} = H_{F2} + \frac{a_a \vartheta_a}{g}\varphi_a. \quad (11)$$

Quvur kesimi va zarba to‘lqini tezligining tugun hisobiga ta’sirini ifodalash uchun ε koeffitsiyenti kiritiladi:

$$\varepsilon_j = \frac{g\omega_j}{a_j}. \quad (12)$$

(9)-(11) tenglamalarni tegishli ε_j ga ko‘paytirib, $Q_j=\omega_j\vartheta_j$ dan foydalansak:

$$\Psi_j \varepsilon_j = H_F \varepsilon_j - Q_j \varphi_j, \quad (13)$$

$$K_j \varepsilon_j = H_F \varepsilon_j + Q_j \varphi_j. \quad (14)$$

Barcha tutash quvurlar bo‘yicha yig‘indi olinib, ΣQ=0 sharti qo‘llanganda sarf hadlari qisqaradi. Natijada tugundagi napor uchun umumiy bog‘lanish hosil bo‘ladi:

$$H_F = \frac{\sum_{\text{out}}(\Psi_j \varepsilon_j) + \sum_{\text{in}}(K_j \varepsilon_j)}{\sum_{\text{all}} \varepsilon_j}. \quad (15)$$

Bu formula halqasimon tarmoq hisobining asosiy tugun tenglamasidir. Agar barcha quvurlarda d va a bir xil bo‘lsa, ε lar teng bo‘ladi; turli diametr yoki *a* qiymatlarida esa tugun napori og‘irliklangan yig‘indi sifatida aniqlanadi.

H_F aniqlangach, har bir tarmoq uchun noma’lum qarama-qarshi impuls va tezlik quyidagicha topiladi:

$$K_j = 2H_F - \Psi_j \qquad (\Psi_j \text{ ma’lum bo‘lsa}) \quad (16)$$

$$\Psi_j = 2H_F - K_j \qquad (K_j \text{ ma’lum bo‘lsa}) \quad (17)$$

$$\vartheta_j = \frac{(K_j - \Psi_j)g}{2a_j \varphi_j}. \quad (18)$$

3. Ikki halqali polietilen tarmoq

Ikki halqali polietilen quvur tarmog‘ida gidravlik zarbaning tarqalishini hisoblash uchun qabul qilingan asosiy geometrik va gidravlik parametrlar 1-jadvalda keltirilgan.

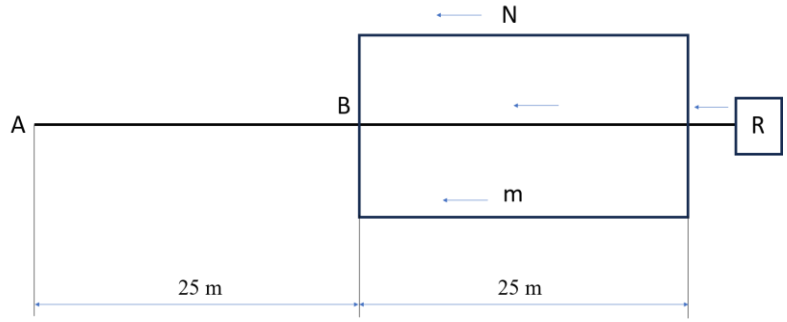
1-jadval. Ikki halqali polietilen tarmoqning boshlang‘ich hisobiy parametrlari

Liniya	L, m	Yarim faza ulushi	d, mm	H_w, m	ϑ₀, m/s	H₀, m
AB	25	5	55	0,69	0,79	1,2
BNP	25	7	55	0,14	0,23	1,2
BP	25	5	55	0,14	0,29	1,2
BMP	25	7	55	0,14	0,23	1,2

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

1-jadval ma’lumotlaridan ko‘rinadiki, barcha tarmoqlarda quvur diametri va statik napor bir xil qabul qilingan bo‘lsa-da, boshlang‘ich oqim tezligi va napor yo‘qotishlari liniyalar bo‘yicha farqlanadi. Xususan, AB liniyasida boshlang‘ich tezlik 0,79 m/s bo‘lib, BNP, BP va BMP liniyalaridagi qiymatlardan sezilarli darajada yuqori. Ushbu farqlar gidravlik zarba to‘lqinining B tuguniga yetib kelgandan keyingi qayta taqsimlanishiga ta’sir etuvchi boshlang‘ich gidravlik sharoitlarni belgilaydi.

Tarmoq doimiy statik naporli rezervuardan ta’minlanadi. Barcha quvurlar diametri 55 mm, zarba to‘lqini tezligi a=235 m/s. Gidravlik zarba A kesimdagi probkali kranning $t_з$=0,04 s da tez yopilishi bilan hosil qilinadi. Hisobiy uchastka uzunligi 5 m qilib olinadi. Mahalliy qarshiliklar ushbu misolda hisobga olinmaydi; liniyalar bo‘yicha napor yo‘qotishlari odatdagi gidravlik hisobdan olinadi. Tadqiq etilayotgan ikki halqali naporli quvur tarmog‘ining hisoblash sxemasi 2-rasmda keltirilgan.



2-rasm. Ikki halqali naporli quvur tarmog‘ida gidravlik zarbani hisoblash sxemasi.

4. Tugun tenglamasining keltirib chiqarilish mantiqi

Tugunga tutash har bir quvur uchun H va ϑ orasidagi xarakteristik bog‘lanish yoziladi. Oqim tugunga kirsa, ma’lum K impulsi; tugundan chiqsa, ma’lum Ψ impulsi olinadi. Har bir quvur sarfi $Q=\omega\vartheta$ orqali ifodalanadi. Tugunda $\Sigma Q=0$ sharti qo‘llanib, tezliklar H va ma’lum impulslar orqali almashtirilganda H ning algebraik tenglamasi hosil bo‘ladi. $\varepsilon=g\omega/a$ koeffitsiyenti aynan shu o‘zgartirish natijasida quvur kesimi va to‘lqin tezligining tugun bosimiga ta’sirini og‘irliklaydi.

Agar barcha quvurlarning diametri va to‘lqin tezligi bir xil bo‘lsa, ε lar tenglashadi va tugun napori keluvchi impulslarning oddiy o‘rtachalashgan kombinatsiyasiga yaqinlashadi. Diametrlar yoki a qiymatlari turlicha bo‘lsa, katta ω/a nisbatiga ega tarmoq tugun naporining shakllanishiga kuchliroq hissa qo‘shadi. Shu jihat formula orqali tarmoq geometriyasining dinamik ta’sirini bevosita ko‘rsatadi.

5. Hisobiy to‘r va yarim faza sharti

Hisobiy uchastka uzunligi zarba to‘lqinining tanlangan vaqt qadamida bosib o‘tadigan masofasiga moslashtiriladi. Ikki halqali tajribada 25 m uzunlikdagi liniyalar 5 va 7 yarim faza ulushlariga moslashtirilgan, bazaviy hisobiy uchastka esa 5 m qabul qilingan. Bunday diskretlash ma’lum impulslarni vaqt qatlamlari orasida aniq tugunlarga ko‘chirish imkonini beradi.

Halqali tarmoqda barcha liniyalar uchun bir xil fizik uzunlik shart emas; muhim talab - hisobiy vaqt qadamining to‘lqin yurish vaqtlariga mos kelishi. Amaliy dasturlashda uzunliklar umumiy vaqt qadamiga aniq bo‘linmasa, interpolatsiya yoki moslashtirilgan to‘r talab etiladi. Mazkur dissertatsiya misolida esa fazalar soni oldindan moslashtirilgan va rekurrent jadval usuli bilan hisoblash bajarilgan.

6. Boshlang‘ich va chegaraviy shartlar

Kran yoki teskari klapan to‘liq yopilganda $\vartheta=0$ va $H=K=\Psi$ sharti qo‘llanadi. Doimiy naporli rezervuarda $H=H_0$ bo‘lib, akslangan impuls $K=2H_0-\Psi$ orqali topiladi. Manba materialda bosim haddan tashqari manfiy bo‘lganda oqim uzilishi ehtimoli qayd etiladi; bu holat klassik bir fazali elastik modelning qo‘llanish chegarasini bildiradi va kavitatsiya yoki ustun ajralishini alohida modellashtirish zarurligini ko‘rsatadi.

Chegaraviy shartlar va vaqt qadami

Doimiy naporli rezervuar uchun $H_R=H_0$ sharti saqlanadi. Rezervuarga yetib kelgan Ψ impulsidan akslangan K impulsi aniqlanadi:

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

$$H_R = H_0 \quad \Rightarrow \quad K_R = 2H_0 - \Psi_R. \tag{19}$$

Kran yoki teskari klapan to‘liq yopilganda tezlik nolga teng:

$$\vartheta = 0 \quad \Rightarrow \quad K = \Psi = H. \tag{20}$$

Hisobiy vaqt qadami zarba to‘lqinining bitta hisobiy uchastkani bosib o‘tish vaqtiga moslanadi:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{a}. \tag{21}$$

Ikki halqali tajribada ΔL=5 m va a=235 m/s bo‘lganda:

$$\Delta t = \frac{5}{235} \approx 0{,}0213 \text{ s}. \tag{22}$$

Shu sababli i=1, 2, 3,... vaqt qatlamlari to‘lqinning tarmoq bo‘ylab ketma-ket tarqalishini ifodalaydi. B tugunida (15) formula, rezervuarda (19), yopiq klapanda esa (20) shart qo‘llanib, butun halqasimon tarmoq yagona rekurrent algoritm bilan hisoblanadi.

Natijalar

1. A kesimdan B tugungacha to‘lqin tarqalishi

i=1 da A nuqtadagi kran bir zumda yopilganda ϑ=0 bo‘ladi va chegaraviy shartdan H=K=Ψ=17,8 m olinadi. AB liniyasi bo‘yicha ortgan bosim to‘lqini besh hisobiy yarim fazadan keyin, ya’ni i=6 da B tugunga yetadi. Shu vaqtning o‘zida BNP, BP va BMP liniyalaridan B tugunga mos ravishda K=6,7; 8,1 va 6,7 m impulslar keladi.

Tugun tenglamasi orqali i=6 da B tugun napori H_B=9,8 m aniqlanadi. Shu napor va ma’lum impulslar yordamida AB uchun K_{AB}=1,8 m, BNP uchun Ψ=12,9 m, BP uchun Ψ=11,5 m va BMP uchun Ψ=12,9 m olinadi. Bu bosqich tarmoqlanish tugunida kelgan bitta zarba to‘lqinining bir necha yo‘nalishga qayta taqsimlanishini son jihatdan ifodalaydi.

2. Rezervuar chegarasidan to‘lqinning akslanishi

i=11 da BP liniyasi bo‘ylab Ψ=11,5 m impuls rezervuarga yetadi. Rezervuar napori H_0=1,2 m o‘zgarmas bo‘lgani uchun K=2H_0−Ψ=−9,1 m va oqim tezligi ϑ=−0,43 m/s hosil bo‘ladi. i=13 da BNP va BMP halqalari bo‘ylab Ψ=12,9 m impulslar rezervuarga yetadi; ular uchun K=−10,5 m va ϑ=−0,49 m/s. Tezlik ishorasining manfiy bo‘lishi oqim yo‘nalishining vaqtincha teskari tomonga o‘zgarishini bildiradi.

3. Tajriba natijalari bilan tekshirish

Taklif etilgan hisoblash usulining ishonchliligini baholash maqsadida A va B kesimlarida aniqlangan hisobiy napor qiymatlari 10 ta tajriba natijalari bilan taqqoslandi; olingan natijalar 2-jadvalda keltirilgan.

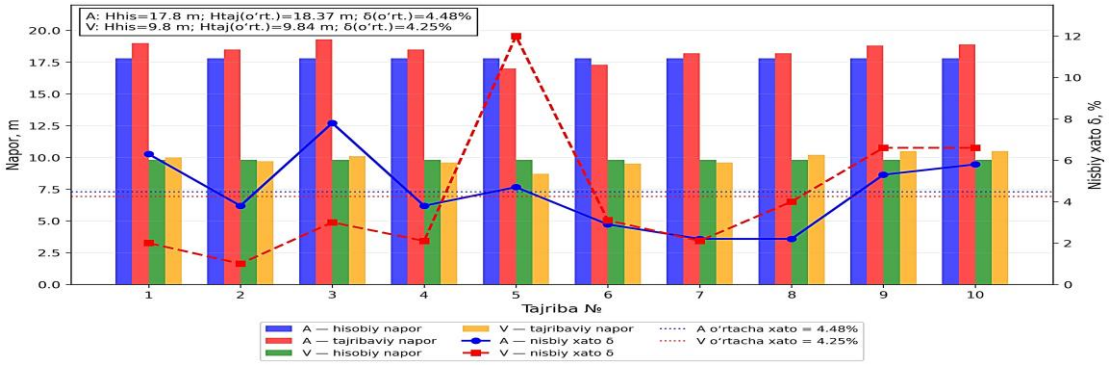
2-jadval. A va B kesimlarda hisobiy va tajribaviy napor qiymatlarining taqqoslanishi

№	$H_{A\ his.}$, m	$H_{B\ his.}$, m	$H_{A\ taj.}$, m	$H_{B\ taj.}$, m	δ_A, %	δ_B, %
1	17,8	9,8	19,0	10,0	6,3	2,0
2	17,8	9,8	18,5	9,7	3,8	1,0
3	17,8	9,8	19,3	10,1	7,8	3,0
4	17,8	9,8	18,5	9,6	3,8	2,1
5	17,8	9,8	17,0	8,7	4,7	12,0
6	17,8	9,8	17,3	9,5	2,9	3,1
7	17,8	9,8	18,2	9,6	2,2	2,1
8	17,8	9,8	18,2	10,2	2,2	4,0
9	17,8	9,8	18,8	10,5	5,3	6,6
10	17,8	9,8	18,9	10,5	5,8	6,6

2-jadval natijalarining tahlili hisobiy va tajribaviy qiymatlar o‘rtasida qoniqarli moslik mavjudligini ko‘rsatadi. O‘nta tajriba bo‘yicha o‘rtacha nisbiy xatolik A kesimida 4,48 %, B kesimida esa 4,25 % ni tashkil etdi. Maksimal nisbiy xatolik A kesimida 7,8 %, B kesimida 12,0 % bo‘ldi. Hisobiy napor qiymatlarining A kesimida 17,8 m va B kesimida 9,8 m bo‘lishi, tajribaviy

natijalarning esa ushbu qiymatlar atrofida tarqalishi taklif etilgan rekurrent hisoblash algoritmining ko‘rilayotgan ikki halqali tarmoq uchun tajriba natijalari bilan mos kelishini ko‘rsatadi.

A va B kesimlarida olingan hisobiy hamda tajribaviy zarba naporlarining o‘zaro mosligini vizual baholash uchun 2-jadval ma’lumotlari 3-rasmda grafik ko‘rinishda tasvirlangan.



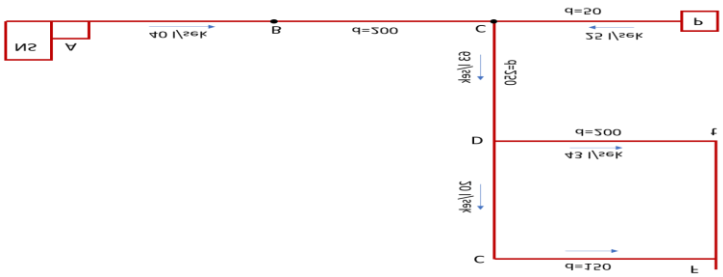
3-rasm. Ikki halqali yopiq sug‘orish tarmog‘ining A va B kesimlarida zarba naporining hisobiy va tajribaviy qiymatlarini qiyoslash.

3-rasmdan ko‘rinadiki, tajribaviy napor qiymatlari hisobiy qiymatlar atrofida nisbatan zich joylashgan. A kesimida tajribaviy qiymatlar 17,0–19,3 m, B kesimida esa 8,7–10,5 m oralig‘ida o‘zgaradi, hisobiy qiymatlar mos ravishda 17,8 va 9,8 m ni tashkil etadi. Natijalarning bunday taqsimlanishi hisobiy modelning tajriba ma’lumotlarini qoniqarli darajada ifodalashini ko‘rsatadi.

4. Nasosga elektr ta’minoti uzilganda murakkab tarmoqda gidravlik zarba

Murakkab tarmoqning ikkinchi hisobiy holatida tizim A tugunidagi nasos va P tugunidagi rezervuar orqali ta’minlanadi. P va F tugunlarida H_0=30 m. Barqaror rejimda H_A=40 m, H_B=38 m, H_C=36 m, H_D=34 m, H_G=32 m, H_F=H_P=30 m. Elektr ta’minoti uzilganda nasos suv uzatishni to‘xtatadi va A tugunda boshlang‘ich bosim pasayishi yuzaga keladi.

Nasosning elektr ta’minoti to‘satdan uzilganda murakkab tarmoqda yuzaga keladigan gidravlik zarba jarayonini tahlil qilish uchun qabul qilingan hisoblash sxemasi 4-rasmda keltirilgan.



4-rasm. Nasosning to‘satdan to‘xtashi natijasida tarmoqda yuzaga keladigan gidravlik zarbani hisoblash sxemasi.

4-rasmdagi sxemadan ko‘rinadiki, nasosning to‘satdan to‘xtashi A tugunida dastlabki bosim pasayishini yuzaga keltiradi va ushbu to‘lqin murakkab tarmoq bo‘ylab tarqalib, tugunlar hamda rezervuar chegaralaridan akslanadi. Hisoblash natijalariga ko‘ra, i=19 vaqt momentida teskari klapan yopilib, A tugunidagi oqim tezligi nolga tenglashadi. Keyingi akslangan to‘lqinlarning o‘zaro ta’siri natijasida i=27 da bosim maksimumga yetib, statik bosimga nisbatan 91 % ortiqcha bosim hosil bo‘ladi. Bu holat murakkab quvur tarmoqlarida nasos to‘xtaganidan keyingi jarayonni faqat dastlabki bosim pasayishi bilan baholash yetarli emasligini ko‘rsatadi.

Muhokama

Halqasimon tarmoqdagi asosiy farq to‘lqin energiyasining bitta quvur bo‘ylab emas, tugunlarda bir necha yo‘nalishlarga qayta taqsimlanishidir. Shu sababli tugun tenglamasi faqat geometrik bog‘lanish emas, balki tarmoq topologiyasi, quvur kesimi va zarba to‘lqini tezligining birgalikdagi ta’sirini ifodalaydi. $\varepsilon=g\omega/a$ koeffitsiyenti turli diametr va to‘lqin tezligiga ega quvurlarni bitta tugun hisobida og‘irliklash imkonini beradi.

ISSN 2181-4732
E-ISSN 2181-4015

Ikki halqali tajribada B tugundagi hisobiy 9,8 m qiymat bir nechta kiruvchi impulslarning birgalikdagi natijasidir. A kesimdagi 17,8 m zarba to‘lqini B tugunga kelganda aynan shu qiymatda saqlanib qolmaydi; BNP, BP va BMP liniyalaridan keluvchi impulslar bilan o‘zaro ta’sirlashib, tugun napori 9,8 m ga qayta shakllanadi. Keyingi bosqichda esa yangi Ψ va K impulslar halqa bo‘ylab tarqaladi va rezervuardan akslanadi.

Nasosning to‘satdan to‘xtashi misoli tarmoqni faqat dastlabki bosim pasayishi bo‘yicha baholash yetarli emasligini ko‘rsatadi. Akslangan to‘lqinlar va teskari klapanning yopilishi keyingi vaqt momentlarida statik qiymatdan ancha yuqori bosim hosil qilishi mumkin. Shu sababli murakkab tarmoqlarda hisobni birinchi to‘lqin bilan cheklamasdan, to‘lqinlarning qaytishi va tugunlarda qayta taqsimlanishini yetarli vaqt davomida kuzatish zarur.

Usulning ushbu materialdagi chegaralari: mahalliy qarshiliklar ikki halqali tajriba misolida hisobga olinmagan; tugunlardagi φ qiymatlari yaqin deb qabul qilinadi; juda katta manfiy bosimlarda oqim uzilishi ehtimoli alohida chegaraviy shart bilan nazorat qilinadi. Shuning uchun murakkab real tarmoqlarda kavitatsiya, havo cho‘ntaklari yoki keskin o‘zgaruvchi quvur xossalari mavjud bo‘lsa, qo‘shimcha modellar talab qilinishi mumkin.

1. Tugunda to‘lqinlarning qayta taqsimlanishi

A kesimda hosil bo‘lgan 17,8 m impuls B tugunga yetgach, u oddiy tarzda barcha tarmoqlarga 17,8 m sifatida uzatilmaydi. B tuguniga boshqa yo‘nalishlardan kelayotgan 6,7; 8,1 va 6,7 m teskari impulslar bilan birgalikda massa balansi bajariladi va tugun napori 9,8 m bo‘lib shakllanadi. So‘ng aynan shu yangi tugun napori asosida AB, BNP, BP va BMP liniyalari uchun yangi impulslar hisoblanadi. Demak, tugun zarba to‘lqinini faqat «bo‘luvchi» emas, balki uning amplitudasi va yo‘nalishini qayta shakllantiruvchi dinamik chegaraviy elementdir.

2. Halqa va rezervuarlarning akslantiruvchi roli

BP liniyasi bo‘yicha rezervuarga yetgan Ψ=11,5 m impuls H_0=1,2 m doimiy napor sharti bilan K=−9,1 m ga aylanadi. BNP va BMP halqalarida esa Ψ=12,9 m dan K=−10,5 m hosil bo‘ladi. Manfiy impuls va manfiy tezlik oqimning vaqtincha teskari yo‘nalishini ifodalaydi. Halqali topologiya tufayli ushbu akslangan to‘lqinlar B tugunga turli vaqtlarda qaytadi va keyingi bosim tarixini murakkablashtiradi.

3. Utkazilgan tajribalarda o‘lchangan zarba parametrlar xatoliklarining tahlili

A kesimda o‘rtacha nisbiy xatolik 4,48 %, B kesimda 4,25 % bo‘lsa-da, B kesimning bitta tajribasida 12 % xato kuzatiladi. B tugun tarmoqlanish nuqtasi bo‘lgani sababli, bu kesim natijasi bir vaqtning o‘zida bir nechta liniyadagi boshlang‘ich sarf, napor yo‘qotishi, to‘lqin kelish vaqti va tajriba o‘lchov xatolariga sezgir. Shuning uchun tugun kesimlaridagi tarqalishning oddiy quvur kesimiga qaraganda kattaroq bo‘lishi fizik jihatdan kutiladigan holatdir.

Hisobiy qiymatlarning tajribalarda o‘zgarmas, tajribaviy qiymatlarning esa tarqalganligi modelning deterministik boshlang‘ich shartlar asosida ishlashini ko‘rsatadi. Keyingi tadqiqotda boshlang‘ich sarf, yopilish vaqti va a qiymatining o‘lchash noaniqligini Monte-Karlo yoki sezgirlik tahlili bilan hisobga olish modelning ishonch oralig‘ini baholash imkonini beradi.

4. Nasosning tusatdan to‘xtashidan hosil bo‘lgan zarbaning fizik tahlili

Nasos to‘xtashi bilan A tugundagi bosim dastlab kamayadi va pasayish to‘lqini tarmoq bo‘ylab tarqaladi. Bu jarayon rezervuar tomondan tarmoqqa kiruvchi sarfni oshiradi. Keyinchalik qaytgan to‘lqinlar oqimni sekinlashtirib, i=19 da A tugundagi tezlikni nolga olib keladi va teskari klapan yopiladi. Klapan yopilishi yangi chegaraviy shart yaratadi; natijada tizimdagi energiya qayta taqsimlanib, i=27 da statik bosimga nisbatan 91 % ortiqcha bosim yuzaga keladi.

Bu natija muhandislik jihatdan muhim: nasos o‘chishidagi eng xavfli holat har doim dastlabki minimal bosim emas. Teskari klapan yopilishi va akslangan to‘lqinlar keyinroq katta musbat bosim maksimumini hosil qilishi mumkin. Shu sababli himoya qurilmalarini tanlashda butun vaqt tarixi, ayniqsa klapan dinamikasi va rezervuar/tugunlardan qaytuvchi to‘lqinlar hisobga olinishi lozim.

5. Zamonaviy usullarнинг ilmiy jihatdan ahamiyati

Zamonaviy tarmoq modellarida klassik xarakteristikalar usuli, ekvivalent zanjirlar, SPH, CFD va ma’lumotga asoslangan surrogat modellar birgalikda qo‘llanmoqda. Bunday usullar yuqori

chastotali tebranishlarni yoki katta tarmoqlarni tezroq hisoblashga imkon beradi. Mazkur maqoladagi Ψ–K tugun algoritmining kuchli tomoni esa fizik shaffoflikdir: har bir vaqt qadamida qaysi impuls qayerdan kelgani, tugunda qanday napor hosil bo‘lgani va qaysi impuls qaysi tarmoqqa ketgani bevosita kuzatiladi. Bu xususiyat muhandislik tahlili va algoritmni tekshirishda muhim [4, 6–8, 10- 12].

Xulosa

Oddiy quvur uchun Ψ–K rekurrent sxemasi tarmoqlanish tugunidagi sarf balansi va umumiy napor sharti bilan birlashtirilib, halqasimon tarmoq uchun umumlashtirildi.

Ikki halqali polietilen tarmoqda i=1 da A kesimda H=17,8 m, i=6 da B tugunda H=9,8 m aniqlangan; tugundan keyingi impulslar BNP, BP va BMP yo‘nalishlariga qayta taqsimlangan.

10 ta tajriba bo‘yicha A va B kesimlaridagi o‘rtacha nisbiy xatolar mos ravishda 4,48 va 4,25 % bo‘lib, tugun bog‘lanishining ko‘rilgan sxema uchun tajriba bilan mosligini ko‘rsatgan.

Rezervuar chegarasida bosim impulslari akslanishi natijasida oqim tezligining ishorasi o‘zgarishi mumkin; hisobda −0,43 va −0,49 m/s qiymatlar olingan.

Nasos to‘satdan to‘xtagan tarmoqda i=19 da teskari klapan yopilib, i=27 da ortiqcha bosim statik qiymatga nisbatan 91 % ga yetgan; bu murakkab tarmoqlarda keyingi akslangan to‘lqinlarni hisoblash zarurligini ko‘rsatadi.

Adabiyotlar

[1] Jonqobilov S.U. Oddiy va murakkab (halqali) naporli quvurlarni ishqalanish kuchini inobatga olib gidravlik zarbaga hisoblash. Monografiya. Qarshi: INTELLEKT, 2026. 112 b.
[2] Мостков М.А. Прикладная гидромеханика. М.–Л., 1963. 463 с.
[3] Потапов И.В. Исследование и расчет гидравлического удара в некоторых схемах водопроводной сети: канд. дисс. Новочеркасск, 1955. 133 с.
[4] Ahmed U., Waqar M., Ghidaoui M.S. Helmholtz numbers: Deciphering the role of side branches and loops in pipe systems // Journal of Hydraulic Engineering. 2025. 151(4). Article 04025020. P. 1–17. https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-14022.
[5] Ali N.A., Abozeid G., Darweesh M.S. Studying of water hammer in water supply pipes network with different abnormal operation conditions (Case study – Assiut city network) // Journal of Engineering Sciences, Assiut University. 2013. 41(6). P. 2036–2054. https://doi.org/10.21608/jesaun.2013.114945.
[6] Ko D., Lee J., Kim K., Kim S. Detection of multi-branching pipes using transients in a pilot-scale pipeline system with uncertainties // AQUA – Water Infrastructure, Ecosystems and Society. 2024. 73(11). P. 2242–2260.
[7] Ko D., Lee J., Kim S. Transient-based multiple branch detection in reservoir pipeline valve systems // Journal of Hydraulic Research. 2024. 62(1). P. 1–13.
[8] Kubrak M., Malesińska A., Kodura A., Urbanowicz K., Bury P., Stosiak M. Water hammer control using additional branched HDPE pipe // Energies. 2021. 14(23). Article 8008. P. 1–18.
[9] Li Z., Jin J., Pan Z., Sun J., Geng K., Qiao Y. Impact of branch pipe valve closure procedures on pipeline water hammer pressure: A case study of Xinlongkou Hydropower Station // Applied Sciences. 2025. 15(2). Article 897. P. 1–20.
[10] Meniconi S., Brunone B., Frisinghelli M. On the role of minor branches, energy dissipation, and small defects in the transient response of transmission mains // Water. 2018. 10(2). Article 187. P. 1–17.
[11] Meniconi S., Cifrodelli M., Capponi C., Duan H.-F., Brunone B. Transient response analysis of branched pipe systems towards a reliable skeletonization // Journal of Water Resources Planning and Management. 2021. 147(2). 04020098. P. 1–11. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001319.
[12] Simpson A.R., Wu Z.Y. Computer modelling of hydraulic transients in pipe networks and the associated design criteria // MODSIM’97: International Congress on Modelling and Simulation. 1997. P. 966–971.