DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

MAGISTRAL SUV QUVURLARINING DINAMIK G‘ADIR-BUDIRLIGINI HISOBGA OLGAN HOLDA KOLBRUK–UAYT TENGLAMASINI ITERATSION MODELLASHTIRISH SAMARADORLIGI

Parpiyev S.F., *PhD,*
E-mail: sayfiddinparpiyev@mail.ru
Andijon davlat texnika instituti

Annotatsiya. *Magistral suv quvurlarining uzoq muddat ishlashi davomida ichki sirt holati va oqim kesimi o‘zgaradi. Bu holat gidravlik ishqalanish koeffitsiyentini boshlang‘ich qiymatda saqlab hisoblashning ishonchliligini pasaytiradi. Maqolaning maqsadi quvurning eskirishi va ichki cho‘kmalar hosil bo‘lishi sharoitida Darsi–Veysbax ishqalanish koeffitsiyentini vaqt bo‘yicha aniqlash uslubiyatini asoslashdan iborat. Buning uchun ekvivalent g‘adir-budirlikning chiziqli o‘sishi va foydali ichki diametrning kamayishi Kolbruk–Uayt tenglamasi bilan birlashtirildi. Tenglama teskari kvadrat ildizli o‘zgaruvchi orqali interval bilan himoyalangan Nyuton usulida yechildi va oddiy iteratsiya bilan taqqoslandi. Natijalar shartli magistral quvur misolida hamda 2 501 ta Reynolds soni va nisbiy g‘adir-budirlik kombinatsiyasida tekshirildi. Uzunligi 10 km, boshlang‘ich diametri 0,800 m va sarfi 0,600 m³/s bo‘lgan ssenariyda 20 yil davomida ishqalanish koeffitsiyenti 0,014586 dan 0,021765 gacha, ishqalanishdagi napor yo‘qotishi esa 13,24 m dan 20,26 m gacha oshdi. Bir xil boshlang‘ich baho va to‘xtash mezonida Nyuton usuli 2–3, oddiy iteratsiya 3–12 qadam talab qildi. Natijalar hisoblash algoritmining samaradorligini ko‘rsatadi; ularning real quvurga mosligi g‘adir-budirlik va diametrning o‘zgarish tezliklarini dala o‘lchovlari asosida kalibrlashga bog‘liq. Taklif etilgan uslub quvur holatini baholash, napor zaxirasini aniqlash va texnik xizmat davriyligini asoslash uchun qo‘llanishi mumkin.*

Аннотация. *В процессе длительной эксплуатации магистральных водопроводных труб состояние их внутренней поверхности и живое сечение потока изменяются. Это снижает надежность расчетов, в которых коэффициент гидравлического трения принимается постоянным на начальном уровне. Целью статьи является обоснование методики определения коэффициента трения Дарси–Вейсбаха во времени в условиях износа труб и образования внутренних отложений. Для этого линейный рост эквивалентной шероховатости и уменьшение полезного внутреннего диаметра были объединены с уравнением Колбрука–Уайта. Уравнение решалось методом Ньютона, защищенным интервалом по переменной обратного квадратного корня, и сопоставлялось с простой итерацией. Результаты были проверены на примере условного магистрального трубопровода, а также на комбинации из 2 501 значения чисел Рейнольдса и относительной шероховатости. В сценарии с длиной 10 км, начальным диаметром 0,800 м и расходом 0,600 м³/с за 20 лет коэффициент трения увеличился с 0,014586 до 0,021765, а потери напора на трение возросли с 13,24 м до 20,26 м. При одинаковой начальной оценке и критерии останова метод Ньютона потребовал 2–3 шага, в то время как простая итерация – 3–12 шагов. Результаты демонстрируют эффективность вычислительного алгоритма; их соответствие реальному трубопроводу зависит от калибровки скоростей изменения шероховатости и диаметра на основе натурных измерений. Предложенный метод может быть применен для оценки состояния трубопроводов, определения запаса напора и обоснования периодичности технического обслуживания.*

Abstract. *During the long-term operation of main water pipelines, the internal surface condition and the flow cross-section undergo changes. This circumstance reduces the reliability of hydraulic calculations that maintain the friction factor at its initial value. The objective of the article is to substantiate a methodology for determining the Darcy–Weisbach friction factor over*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

time under conditions of pipe aging and internal deposition. To achieve this, the linear growth of equivalent roughness and the reduction in useful internal diameter were integrated with the Colebrook–White equation. The equation was solved using an interval-bounded Newton's method via an inverse square root variable and compared with the simple iteration method. The results were verified using a hypothetical main pipeline case study, as well as a combination of 2,501 sets of Reynolds numbers and relative roughness values. In a scenario involving a length of 10 km, an initial diameter of 0.800 m, and a discharge of 0.600 m³/s over a 20-year period, the friction factor increased from 0.014586 to 0.021765, while the friction head loss expanded from 13.24 m to 20.26 m. Given the same initial guess and stopping criteria, the Newton method required 2–3 steps, whereas the simple iteration required 3–12 steps. The results demonstrate the efficiency of the computational algorithm; their applicability to real-world pipelines depends on calibrating the rates of roughness and diameter change based on field measurements. The proposed method can be applied to assess pipeline conditions, determine head margins, and substantiate maintenance intervals.

Kalit so‘zlar: *magistral suv quvuri, Kolbruk–Uayt tenglamasi, Darsi–Veysbax koeffitsiyenti, dinamik g‘adir-budirlik, ichki cho‘kma, Nyuton usuli, gidravlik qarshilik, kalibrlash.*

Ключевые слова: *магистральный водопровод, уравнение Колбрука–Уайта, коэффициент Дарси–Вейсбаха, динамическая шероховатость, внутренние отложения, метод Ньютона, гидравлическое сопротивление, калибровка.*

Keywords: *main water pipeline, Colebrook–White equation, Darcy–Weisbach friction factor, dynamic roughness, internal deposition, Newton's method, hydraulic resistance, calibration.*

Kirish. Magistral suv quvurida belgilangan sarfni yetkazib berish uchun zarur napor quvur uzunligi, haqiqiy ichki diametri, suvning qovushoqligi va devorning gidravlik holatiga bog‘liq. Ekspluatatsiya davomida korroziya mahsulotlari va cho‘kmalar ichki sirtni o‘zgartirishi mumkin. Shu sababli foydalanishga topshirish vaqtidagi g‘adir-budirlik qiymatini butun xizmat muddati uchun o‘zgarmas deb qabul qilish ayrim quvurlarda napor yo‘qotishini kamaytirib baholaydi.

Quvurdagi turbulent oqim qarshiligini aniqlashda Kolbruk va Uayt tajribalari hamda Kolbrukning umumlashtirilgan bog‘lanishi asosiy ilmiy manbalar hisoblanadi [1,2]. Mudi diagrammasi Reynolds soni, nisbiy g‘adir-budirlik va ishqalanish koeffitsiyenti orasidagi munosabatni muhandislik hisobida ifodalash imkonini bergan [3]. Ushbu bog‘lanishlarda quvur sirti holatini bildiruvchi parametr to‘g‘ri tanlanishi hisob natijasining muhim shartidir.

Sharp va Walski qoplamasiz metall suv quvurlarini o‘rganib, ekvivalent g‘adir-budirlik balandligining vaqt davomida taxminan chiziqli ortishi haqidagi farazga asoslangan usulni taqdim etgan [4]. Bu natija chiziqli eskirish modelini dastlabki yaqinlashuv sifatida tanlashga asos beradi. Biroq o‘sish tezligi quvur materiali, himoya qoplamasi, suv tarkibi va ekspluatatsiya sharoitiga bog‘liq bo‘lgani uchun bitta koeffitsiyentni barcha magistrallarga tatbiq etish mumkin emas.

EPANET 2.2 qo‘llanmasi ham quvur g‘adir-budirligi yosh bilan sezilarli o‘zgarishi mumkinligini qayd etadi. Mazkur dastur turbulent rejimda Darsi–Veysbax hisoblari uchun Kolbruk–Uayt tenglamasining Swamee–Jain yaqinlashuvidan foydalanadi [5]. Haaland hamda Swamee–Jain formulalari tezkor boshlang‘ich baholash uchun qulay [6, 7]. Bevosita iteratsion yechim esa tanlangan tenglamaga nisbatan qoldiqni nazorat qilish imkonini beradi. Praks va Brkić hisoblash o‘zgaruvchisi hamda boshlang‘ich bahoning iteratsiyalar soniga ta’sirini ko‘rsatgan [8].

Maqolada “dinamik g‘adir-budirlik” atamasi ichki sirtning ekspluatatsiya yillari davomida sekin o‘zgarishini anglatadi. Hisob har bir vaqt kesimida barqaror oqim holati uchun bajariladi. Uslubning hisoblash asosi ekvivalent g‘adir-budirlik, ichki diametr, Reynolds soni va ishqalanish koeffitsiyentini o‘zaro bog‘liq ravishda yangilashdan iborat.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

Tadqiqot maqsadi – quvurning eskirishi va ichki cho‘kmalari sabab Darsi–Veysbax ishqalanish koeffitsiyenti o‘zgarishini hisoblash uslubiyatini asoslash va uning iteratsion yechimini baholash. Uslubiy hissa ma’lum gidravlik tenglama va yechish usullarini vaqtga bog‘liq sirt hamda kesim modeli, yagona aniqlik mezoni va kalibrlash tartibiga birlashtirish bilan belgilanadi.

Materiallar va metodlar. Tadqiqot obyekti sifatida to‘liq to‘lgan, doiraviy kesimli, bir jinsli hisoblash uchastkasidan iborat bosimli magistral quvur qabul qilindi. Suv siqilmaydigan Nyuton suyuqligi, oqim esa har bir ekspluatatsiya yoshi uchun barqaror deb olindi. Uzunlik bo‘yicha ishqalanishdagi napor yo‘qotishi Darsi–Veysbax ifodasi bilan aniqlanadi [3, 5]:

$$h_f(t) = \lambda(t)\frac{L}{D(t)}\frac{v(t)^2}{2g} \tag{1}$$

bu yerda h_f – napor yo‘qotishi, m; λ – o‘lchamsiz Darsi ishqalanish koeffitsiyenti; L – quvur uzunligi, m; D – foydali ichki diametr, m; v – o‘rtacha tezlik, m/s; g – erkin tushish tezlanishi, m/s². Barcha keyingi formulalarda Darsi koeffitsiyenti ishlatiladi. Fanning koeffitsiyentiga o‘tishda $\lambda = 4f_F$ munosabati hisobga olinadi.

Sarf berilgan sharoitda oqim tezligi va Reynolds soni quyidagicha aniqlanadi:

$$v(t) = \frac{4Q(t)}{\pi D(t)^2}, \mathrm{Re}(t) = \frac{v(t)D(t)}{\nu(t)} = \frac{4Q(t)}{\pi D(t)\nu(t)} \tag{2}$$

bu yerda Q – hajmiy sarf, m³/s; ν – kinematik qovushoqlik, m²/s. Harorat o‘zgaradigan amaliy hisobda ν tegishli harorat bo‘yicha yangilanadi.

Turbulent oqim uchun Kolbruk–Uayt tenglamasi quyidagicha aniqlanadi [2]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda(t)}} = -2\log_{10}\left[\frac{\varepsilon(t)}{3.7D(t)} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}(t)\sqrt{\lambda(t)}}\right] \tag{3}$$

bu yerda ε – gidravlik jihatdan ekvivalent qum g‘adir-budirligining balandligi, m. U quvur devorining o‘lchangan har qanday geometrik notekisligi yoki cho‘kma qalinligiga bevosita tenglashtirilmaydi. Mazkur parametr oqim qarshiligiga mos ekvivalent qiymat sifatida aniqlanadi.

Uslubning asosiy hisoblash sohasi turbulent oqimdir. Laminar rejim uchun $\lambda = 64/\mathrm{Re}$ ishlatiladi; o‘tish rejimida alohida rejim modeli va ehtiyotkor talqin talab qilinadi [5]. Mazkur sonli misolda Reynolds sonlari 9.55×10^5 dan katta bo‘lib, o‘tish rejimi yuzaga kelmaydi.

G‘adir-budirlik va ichki diametrning vaqt bo‘yicha o‘zgarishi

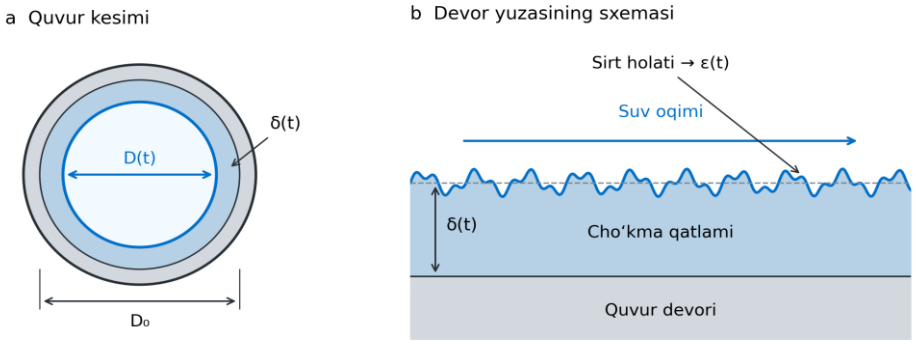
Ichki sirtning eskirishi va cho‘kma qatlamining o‘sishi ikkita mustaqil model parametri orqali ifodalanadi:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \alpha t, \delta(t) = \beta t, D(t) = D_0 - 2\delta(t) > 0 \tag{4}$$

bu yerda ε_0 – boshlang‘ich ekvivalent g‘adir-budirlik; α – uning yillik o‘sish tezligi; δ – radial cho‘kma qalinligi; β – cho‘kma qalinligining yillik o‘sish tezligi; D_0 – cho‘kma hosil bo‘lishidan oldingi foydali ichki diametr. t yil bilan ifodalansa, α va β birliklari m/yil bo‘ladi.

G‘adir-budirlik uchun chiziqli qonun [4] dagi farazga mos soddalashtirish sifatida olindi. Diametrning kamayishi esa doira shaklidagi kesimda bir tekis radial qatlam hosil bo‘lishining geometrik natijasidir. α va β bir-biridan mustaqil kalibrlanadi: sirtning gidravlik notekisligi o‘sishi bilan kesimning torayishi aynan bir jarayon ko‘rsatkichi emas.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116



1-rasm. Foydali ichki diametr va devor holatini alohida ifodalash sxemasi. Tasvir masshtabsiz; sirt holati ekvivalent $\varepsilon(t)$ parametri orqali baholanadi, $\delta(t)$ esa radial qatlam qalinligini bildiradi

Amaliy kuzatuvlarda tezlik o‘zgarsa, chiziqli qonun o‘rniga bo‘lakli chiziqli yoki to‘yingan o‘sish modeli tanlanishi mumkin. Modelni tanlash kuzatuvlar bilan asoslanishi kerak. Tozalash va ichki qoplamani tiklash bajarilganda o‘sha vaqtdagi diametr hamda g‘adir-budirlik qayta baholanadi.

Iteratsion yechim va yaqinlashishni nazorat qilish

Kolbruk–Uaytning (3) tenglamasini yechish uchun quyidagi almashtirish kiritildi:

$$x = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}, A = \frac{\varepsilon}{3.7D}, B = \frac{2.51}{\mathrm{Re}}, F(x) = x + 2\log_{10}(A + Bx) = 0 \qquad (5)$$

Hosila analitik shaklda hisoblanadi:

$$F'(x) = 1 + \frac{2B}{\ln(10)(A+Bx)} > 0 \qquad (6)$$

Musbat x uchun $F'(x) > 0$ bo‘lishi funksiyaning qat’iy o‘sishini va ildizning ko‘pi bilan bitta bo‘lishini ko‘rsatadi. Sinov sohasida $F(1) < 0$ va $F(100) > 0$ bo‘lib, musbat ildiz ushbu intervalda mavjud. Nyuton yangilanishi [8] quyidagi ko‘rinishda bajarildi:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{F(x_k)}{F\prime(x_k)}, \lambda_{k+1} = x_{k+1}^{-2} \qquad (7)$$

Barqarorlikni ta’minlash uchun ildizni qamrab olgan interval saqlandi. Har bir qadamda $F(x_k)$ ishorasi bo‘yicha interval chegarasi yangilandi. Nyuton bahosi intervaldan chiqsa, keyingi nuqta intervalning o‘rtasidan olindi. Shu tariqa tez yaqinlashish imkoniyati ildizni qamrab turish sharti bilan birlashtirildi.

Boshlang‘ich qiymat Haaland formulasi yordamida olindi [6]:

$$x_0 = -1.8\log_{10}\left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7D}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{\mathrm{Re}}\right] \qquad (8)$$

Taqqoslash uchun bir xil x_0 dan boshlanadigan oddiy iteratsiya ishlatildi:

$$x_{k+1} = -2\log_{10}(A + Bx_k) \qquad (9)$$

Ikkala usulda ham hisob quyidagi ikkita shart bir vaqtda bajarilganda to‘xtatildi:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

$$|F(x_{k+1})| \le 10^{-10}, \frac{|\lambda_{k+1}-\lambda_k|}{\lambda_{k+1}} \le 10^{-10} \quad (10)$$

Iteratsiya soni x_0 dan keyingi yangilashlar soni sifatida sanaldi; yakuniy aniqlikni tekshiruvchi yangilash ham hisobga kiritildi. Maksimal 100 qadam ruxsat etildi. Etalon sonli yechim ildizni qamrab oluvchi Brent usuli bilan, x bo‘yicha mutlaq va nisbiy tolerantliklar 10^{-14} qilib olindi. Hisoblar 64 bitli suzuvchi nuqtali arifmetikada bajarildi.

To‘liq vaqt algoritmida dastlab $\varepsilon(t)$ va $D(t)$ yangilanadi, keyin v, Re va ε/D hisoblanadi. Oqim rejimi tekshirilgach, λ iteratsion aniqlanadi va h_f topiladi. Keyingi ekspluatatsiya yoshi uchun shu ketma-ketlik qaytariladi. Bu tartib diametr torayishi oqibatida tezlik va Reynolds sonining o‘zgarishini ham qamrab oladi.

Hisoblash ssenariysi va usullarni qiyoslash

Sonli tajriba uchun 1-jadvaldagi shartli magistral qabul qilindi. Ushbu qiymatlar muayyan real quvurdan o‘lchangan ma’lumotlar emas. Xususan, α va β metodni ko‘rsatish uchun tanlangan ssenariy parametrlari bo‘lib, materialning universal me’yoriy ko‘rsatkichlari sifatida talqin qilinmaydi.

1-jadval

Hisoblash ssenariysining boshlang‘ich parametrlari

Parametr	Belgilanishi	Qiymati	Birligi
Quvur uzunligi	L	10 000	m
Boshlang‘ich ichki diametr	D_0	0,800	m
O‘zgarmas hajmiy sarf	Q	0,600	m³/s
Kinematik qovushoqlik	ν	$1{,}00 \times 10^{-6}$	m²/s
Boshlang‘ich g‘adir-budirlik	ε_0	0,150	mm
G‘adir-budirlikning o‘sish tezligi	α	0,050	mm/yil
Radial cho‘kmaning o‘sish tezligi	β	0,100	mm/yil
Suv zichligining model qiymati	ρ	1 000	kg/m³
Erkin tushish tezlanishi	g	9,81	m/s²
Nasos agregati FIK	η	0,75	o‘lchamsiz
Energetik baholashdagi ish vaqti	T	8 000	soat/yil
Ekspluatatsiya yoshi	t	0–30	yil

Jadvaldagi uzunlik birliklari (3) va (4) formulalarga qo‘yishdan oldin metrga keltirildi. Vaqt natijalari 0, 5, 10, 15, 20, 25 va 30 yil nuqtalarida hisoblandi. Uchta ssenariy qiyoslandi: boshlang‘ich ε_0, D_0 o‘zgarmas holat; faqat $\varepsilon(t)$ o‘zgaradigan holat; $\varepsilon(t)$ va $D(t)$ birgalikda o‘zgaradigan holat.

Yechish usullarining kengroq parametr sohasidagi xatti-harakati alohida tekshirildi. Reynolds soni 4×10^3 dan 10^8 gacha 61 ta geometrik taqsimlangan nuqtada olindi. Nisbiy g‘adir-budirlik uchun nol qiymat va 10^{-6} dan 0,05 gacha 40 ta geometrik taqsimlangan qiymat tanlandi. Jami $61 \times 41 = 2501$ kombinatsiya hosil bo‘ldi. Pastki Reynolds chegarasi sonli sinovning chegaraviy nuqtasi sifatida ham kiritildi.

Haaland va Swamee–Jain formulalari iteratsiyasiz baholash sifatida etalon bilan qiyoslandi. Swamee–Jain ifodasi [7] quyidagicha olindi:

$$\lambda_{SJ} = \frac{0.25}{\left[\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{\mathrm{Re}^{0.9}}\right)\right]^2} \quad 11)$$

Algoritmlar samaradorligi yangilashlar soni va etalonga nisbiy xato bilan baholandi. Bu ko‘rsatkichlar dastur bajarilish vaqtiga aynan teng emas: Nyuton qadamida hosila uchun

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

qo‘shimcha arifmetik amallar mavjud. Protsessor vaqtining tezlashish koeffitsiyenti ushbu tajribada aniqlanmadi.

Dala ma’lumotlari asosida kalibrlash tartibi

Real magistral uchun sirtning o‘zgarish tezligi kuzatuv ma’lumotlari orqali aniqlanadi. Ikki kesim orasidagi ishqalanish napor yo‘qotishi energiya tenglamasidan topiladi:

$$h_{f,\mathrm{obs}} = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (z_1 - z_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} - h_{\mathrm{mah}} \tag{12}$$

bu yerda p_1, p_2 – bir xil tayanchga nisbatan o‘lchangan bosimlar; z_1, z_2 – kesim balandliklari; h_{mah} – burilish, armatura va boshqa elementlardagi mahalliy napor yo‘qotishlari. Bir xil diametrli uchastkada tezlik naporlari ayirmasi nolga teng. Ushbu ifoda ikki o‘lchash kesimi orasida nasos yoki boshqa energiya manbai bo‘lmagan uchastka uchun yozilgan.

Ichki diametr mustaqil aniqlangan bo‘lsa, kuzatilgan qarshilik va unga mos g‘adir-budirlik quyidagicha baholanadi:

$$\lambda_{\mathrm{obs}} = \frac{2gD\,h_{f,\mathrm{obs}}}{Lv^2}, \varepsilon_{\mathrm{obs}} = 3.7D\left[10^{-1/\left(2\sqrt{\lambda_{\mathrm{obs}}}\right)} - \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda_{\mathrm{obs}}}}\right] \tag{13}$$

Manfiy $\varepsilon_{\mathrm{obs}}$ chiqishi o‘lchash, sarf, diametr, mahalliy yo‘qotishlar yoki tanlangan modelning mosligini qayta tekshirish zarurligini bildiradi. Natijani shunchaki manfiy g‘adir-budirlik sifatida qabul qilib bo‘lmaydi.

Turli ekspluatatsiya yoshlarida kuzatilgan h_f qiymatlari bo‘yicha $\theta = (\varepsilon_0, \alpha, \beta)$ parametrlar to‘plami og‘irlikli eng kichik kvadratlar usulida baholanishi mumkin:

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\mathrm{argmin}} \sum_{j=1}^{N} w_j \left[h_{f,\mathrm{obs},j} - h_{f,\mathrm{model}}\left(t_j, Q_j; \theta\right)\right]^2 \tag{14}$$

Og‘irliklar o‘lchov noaniqligining teskari dispersiyasiga mos tanlanadi. Fizik jihatdan ruxsat etilgan parametr chegaralari va diametr inspeksiyasi natijalari cheklov sifatida kiritiladi. Bitta sarfdagi bitta napor o‘lchovi ε va D ni bir vaqtda ishonchli aniqlash uchun yetarli emas. Bir nechta sarf rejimi va vaqt kesimidagi ma’lumotlar foydali, ammo to‘liq g‘adir-budir rejimda parametrlar o‘zaro bog‘liqligi saqlanishi mumkin; diametrni mustaqil o‘lchash ayniqsa muhim. Modelni tekshirish uchun kalibrlashda ishlatilmagan kuzatuvlar ajratiladi.

Natijalar. 2-jadvalda $\varepsilon(t)$ va $D(t)$ birgalikda yangilanadigan model natijalari keltirilgan. Ko‘rsatilgan raqamlar aynan 1-jadval shartlariga tegishli. Sarf o‘zgarmas bo‘lgani uchun diametr torayishi oqim tezligini oshiradi; shu sababli faqat g‘adir-budirlikni almashtirib hisoblash bilan cheklanib bo’lmaydi.

2-jadval

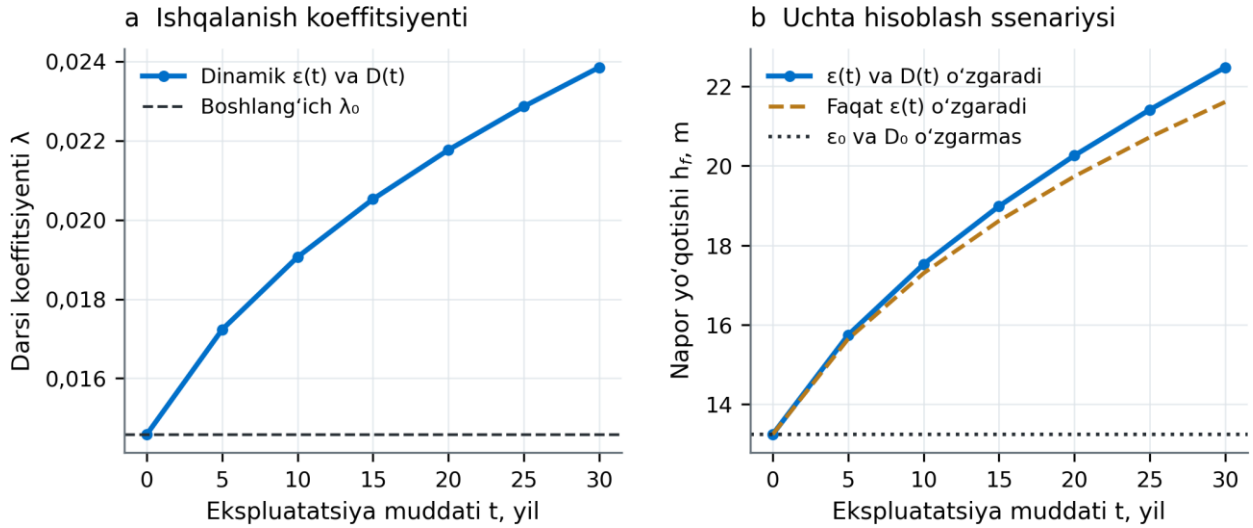
G‘adir-budirlik va diametr birgalikda o‘zgargandagi hisoblash natijalari

t, yil	ε, mm	D, mm	λ	h_f, m	h_f o‘sishi, %
0	0,150	800	0,014586	13,241	0,00
5	0,400	799	0,017233	15,742	18,89
10	0,650	798	0,019063	17,523	32,34
15	0,900	797	0,020523	18,984	43,38
20	1,150	796	0,021765	20,259	53,01
25	1,400	795	0,022860	21,413	61,72
30	1,650	794	0,023849	22,480	69,78

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

Izoh: Oxirgi ustun $\left(h_f(t)/h_f(0) - 1\right) \times 100\%$ bo‘yicha hisoblangan. Manba: ushbu tadqiqotdagi sonli hisoblar.

20 yil nuqtasida $\varepsilon/D = 0{,}00144472$, $\mathrm{Re} = 9{,}5973 \times 10^5$ va $v = 1{,}20569$ m/s bo‘ldi. Ishqalanish koeffitsiyenti boshlang‘ich holatga nisbatan 49,22 % ortdi. Napor yo‘qotishining 53,01 % o‘sishi ushbu koeffitsiyentning ortishi va diametrning kamayishi birgalikda ta’sir etganini ko‘rsatadi.



2-rasm. Shartli magistralda ishqalanish koeffitsiyenti va napor yo‘qotishining o‘zgarishi. Izoh: O‘ngdagi grafik boshlang‘ich holat, faqat g‘adir-budirlik o‘zgarishi hamda g‘adir-budirlik va diametr birgalikda o‘zgarishini taqqoslaydi

20 yilda faqat g‘adir-budirlik o‘zgarib, diametr 0,800 m holatda saqlansa, $h_f = 19{,}735$ m chiqdi. Diametrning kamayishini ham hisobga olish natijani 20,259 m gacha oshirdi. Shu holatda diametrni boshlang‘ich qiymatda saqlash to‘liq modelga nisbatan napor yo‘qotishini taxminan 2,59 % kamaytirib baholaydi.

Boshlang‘ich g‘adir-budirlik va diametrni birgalikda o‘zgarmas deb olishda $h_f = 13{,}241$ m saqlanadi. Bu qiymat 20 yildagi to‘liq model natijasidan 34,64 % past. 53,01 % o‘sish boshlang‘ich naporga, 34,64 % kamaytirib baholash esa eskirgan quvurning model naporiga nisbatan hisoblangan. Turli maxrajlardan keladigan bu ikki ko‘rsatkich bir xil ma’noni bildirmaydi.

Iteratsion yechimning hisoblash samaradorligi

3-jadvaldagi qiyoslash barcha 2 501 ta parametr kombinatsiyasiga tegishli. Har bir nuqtada ε/D va Re ikkala iteratsion usul uchun bir xil berildi. Natijalar hisoblash algoritmlarining tenglama yechimiga yaqinlashishini tavsiflaydi.

3-jadval

Yechish usullarining parametrlar panjarasidagi qiyosiy natijalari

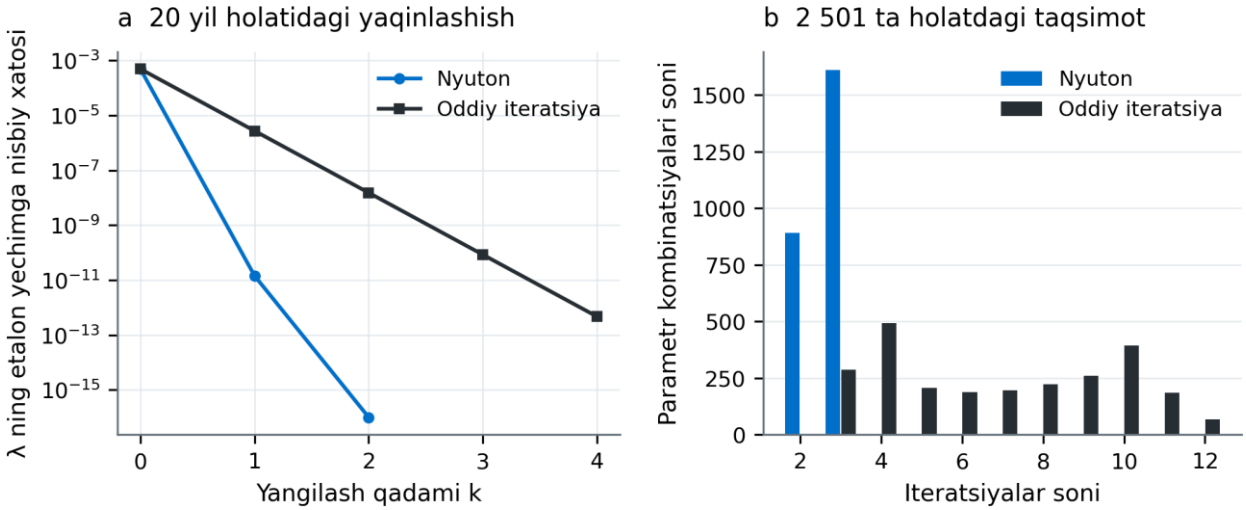
Usul	Qadamlar soni	O‘rtacha qadam	Maksimal nisbiy xato, %
Interval bilan himoyalangan Nyuton	2–3	2,64	$6{,}22 \times 10^{-13}$
Oddiy iteratsiya	3–12	6,91	$1{,}40 \times 10^{-9}$
Haaland formulasi	Iteratsiyasiz	–	1,4235
Swamee–Jain formulasi	Iteratsiyasiz	–	3,3580

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

Izoh: Xato $|\lambda_{\text{hisob}}/\lambda_{\text{etalon}} - 1| \times 100\%$ bo‘yicha olingan. Bir xil to‘xtash mezoni faqat dastlabki ikki usulga tatbiq etilgan. Maksimal xatolar tekshirilgan diskret panjara uchun berilgan.

Nyuton usulida o‘rtacha yangilashlar soni 6,913 dan 2,644 gacha, ya’ni 61,75 % kamaydi. Panjaradagi holatlarning hech birida Nyuton bahosi himoyalovchi intervaldan chiqmagan. Shunga qaramay, interval nazoratini saqlash boshqa boshlang‘ich baholar yoki kengaytirilgan parametrlar sohasida foydali bo‘lishi mumkin.

20 yil holatida Haaland boshlang‘ich bahosi $\lambda_0 = 0{,}0217758204$ bo‘ldi. Nyutonning birinchi yangilanishida qiymat 0,02176519036435 gacha yaqinlashdi; ikkinchi qadamdan keyin ikkala to‘xtash sharti bajarildi. Oddiy iteratsiya shu boshlang‘ich bahodan to‘rtta qadam talab qildi.



3-rasm. Nyuton va oddiy iteratsiya usullarining qiyosi. Izoh: Chapda 20 yil holati, o‘ngda 2 501 ta parametr kombinatsiyasi bo‘yicha yangilashlar taqsimoti ko‘rsatilgan. Chap grafikda $k = 0$ boshlang‘ich Haaland bahosidir; nol xatoni logarifmik o‘qda ko‘rsatish uchun 10^{-16} pastki tasvir chegarasi ishlatilgan

Yaqinlashishning tezlashishi tanlangan x o‘zgaruvchisida funksiya silliq va hosilasi sodda ekanligi bilan izohlanadi. Natijalar [8] da tahlil qilingan usullar xususiyatlariga mos keladi. 3-jadvaldagi juda kichik xatolar Kolbruk–Uayt tenglamasini yechish xatosini bildiradi; real quvurdagi bosim yoki g‘adir-budirlik shunday aniqlikda ma’lum degan xulosa kelib chiqmaydi.

G‘adir-budirlik noaniqligiga sezgirlik

G‘adir-budirlikni baholash xatosining ta’siri 20 yil nuqtasida, $D = 0{,}796$ m va $Q = 0{,}600$ m³/s o‘zgarmas holda tekshirildi. Nominal $\varepsilon = 1{,}150$ mm qiymatiga ±10 % va ±20 % o‘zgarishlar berildi.

4-jadval

G‘adir-budirlikdagi noaniqlikning napor yo‘qotishiga ta’siri

ε o‘zgarishi, %	ε, mm	λ	h_f, m	h_f o‘zgarishi, %
−20	0,920	0,020635	19,207	−5,19
−10	1,035	0,021218	19,750	−2,51
0	1,150	0,021765	20,259	0,00
+10	1,265	0,022281	20,739	+2,37
+20	1,380	0,022771	21,195	+4,62

Izoh: Oxirgi ustun nominal 20 yil holatiga nisbatan aniqlangan.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

Ushbu nuqtada mahalliy logarifmik sezgirlik $S_\varepsilon = \partial \ln h_f / \partial \ln \varepsilon = 0{,}2438$ bo‘ldi. Shuning uchun g‘adir-budirlikdagi kichik 10 % xato napor yo‘qotishida taxminan 2,44 % xato keltiradi; 4-jadvaldagi aniq qayta hisoblash uning nosimmetrik qiymatlarini ko‘rsatadi.

Sarf berilganda (1) va (2) formulalardan quyidagi munosabat kelib chiqadi:

$$h_f = \frac{8\lambda L Q^2}{\pi^2 g D^5} \tag{15}$$

Bu ifoda diametrni ishonchli aniqlash nega muhimligini ko‘rsatadi. λ ni o‘zgarmas deb olishning o‘zida h_f diametrning beshinchi darajasiga teskari proporsional. 20 yil nuqtasida λ ning diametr bilan bog‘liq o‘zgarishini ham hisobga oluvchi sezgirlik $S_D = \partial \ln h_f / \partial \ln D = -5{,}2327$ bo‘ldi. Demak, shu holat yaqinida diametrni 1 % oshirib baholash hisoblangan napor yo‘qotishini taxminan 5,23 % kamaytirishi mumkin.

Muhokama. Dinamik modelning amaliy qiymati eskirish sabab o‘zgarayotgan parametrlarni izchil yangilashdadir. Bir xil ekspluatatsiya yoshida faqat ε ni almashtirish va D ni saqlab qolish sirtning o‘zgarishini ifodalaydi, ammo kesim torayishining oqibatlarini to‘liq qamramaydi. Tahlil qilingan ssenariyda 20 yildagi diametr kamayishi atigi 0,5 % bo‘lsa ham, uning qo‘shimcha ta’siri hisob natijasida ko‘rinadi.

Modelning energiyaga ta’siri bir xil sarfni saqlash sharti ostida baholanishi mumkin. Ishqalanishdagi naporni qoplash uchun zarur elektr quvvati va boshlang‘ich holatga nisbatan yillik qo‘shimcha energiya quyidagicha ifodalanadi:

$$P_f(t) = \frac{\rho g Q h_f(t)}{\eta}, \Delta E_f = \frac{[P_f(t) - P_f(0)]T}{1000} \tag{16}$$

bu yerda P_f vattda, T soatda berilganda ΔE_f kW·soat bilan olinadi. 1-jadvaldagi FIK o‘zgarmas deb olinganda, 20 yil nuqtasida ishqalanishni qoplash quvvati 103,91 kW dan 158,99 kW gacha oshadi. Qo‘shimcha talab 55,08 kW, 8 000 soatlik yillik ishda esa 440,65 MW·soatga teng bo‘ladi. Bu raqam har yili aynan 20 yil holatidagi qarshilik bilan ishlash uchun shartli bahodir; u 20 yil davomida jamlangan energiyani bildirmaydi.

Mazkur energetik baho geodezik ko‘tarish balandligi, chiqishdagi talab etiladigan bosim va boshqa yo‘qotishlarni o‘z ichiga olmaydi. Haqiqiy nasosda ish nuqtasi va FIK o‘zgaradi. Nasos tavsifi berilganda sarfning o‘zi ham tarmoq qarshiligi bilan birgalikda aniqlanishi lozim. Shu sababli keltirilgan energiya farqi texnik xizmatdan keyin o‘lchangan tejash natijasi sifatida talqin qilinmaydi.

Iteratsion yechimning aniqligi va fizik prognozning aniqligi alohida baholanishi kerak. Hisoblash qoldig‘ini 10^{-10} gacha kamaytirish tenglama yechimini nazorat qiladi. Biroq $\varepsilon(t)$, $D(t)$, sarf va mahalliy yo‘qotishlar noaniqligi yakuniy napor bahosida kattaroq xatoga sabab bo‘lishi mumkin. 4-jadvalda g‘adir-budirlikning 10 % noaniqligi naporda taxminan 2,4–2,5 % farq hosil qilgani buni ko‘rsatadi.

Chiziqli eskirish modeli dastlabki yaqinlashuv sifatida foydali, ammo u barcha materiallar va suv tarkiblari uchun bir xil ishlamaydi. Himoya qoplamali quvurda yoki davriy tozalanadigan magistralda α doimiy musbat qiymatga ega bo‘lishi shart emas. 30 yilgacha berilgan ssenariyni kalibrlashsiz boshqa hudud yoki materialga ko‘chirish asoslanmagan bo‘ladi.

Hisobning boshqa chegaralari ham mavjud. Quvur uzunligi bo‘yicha holat keskin farq qilsa, u alohida uchastkalarga ajratilib, napor yo‘qotishlari yig‘iladi. Notekis cho‘kmalar doiraviy kesimni buzsa, faqat $D_0 - 2\delta$ almashtirish yetarli bo‘lmaydi; haqiqiy kesim geometriyasi va unga mos qarshilik modeli talab etiladi. Tezkor bosim tebranishlari va gidravlik zarba esa vaqt bo‘yicha alohida nostatsionar oqim tenglamalari yordamida tahlil qilinadi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.116

Sinovdagi 2501 ta nuqta sonli yaqinlashish haqida takrorlanadigan dalil beradi. Diskret panjaradagi maksimal xatolar butun uzluksiz parametr sohasidagi mutlaq chegaralar sifatida qabul qilinmaydi. Amaliy joriy etishning keyingi bosqichi mustaqil diametr inspeksiyasi, sarf va differensial bosim o‘lchovlari yordamida eskirish parametrlarini baholash hamda keyingi kuzatuvlar bo‘yicha prognozni tekshirishdan iborat.

Xulosa. Magistral suv quvurining ekvivalent g‘adir-budirligi va foydali ichki diametrini vaqt bo‘yicha yangilab, Kolbruk–Uayt tenglamasi orqali Darsi ishqalanish koeffitsiyentini aniqlash uslubiyati asoslandi. Cho‘kma qalinligi va ekvivalent g‘adir-budirlik mustaqil parametrlar sifatida ifodalandi.

Haaland boshlang‘ich bahosi va bir xil to‘xtash shartida 2 501 ta parametr kombinatsiyasi uchun interval bilan himoyalangan Nyuton usuli 2–3, oddiy iteratsiya 3–12 yangilashda yechimga yetdi. O‘rtacha yangilashlar soni 61,75 % kamaydi; bu natija bajarilish vaqti bo‘yicha alohida o‘lchangan tezlashish koeffitsiyenti emas.

Shartli 10 km uzunlikdagi, 0,800 m boshlang‘ich diametrli magistralda 20 yil uchun $\lambda = 0{,}021765$ va $h_f = 20{,}259$ m olindi. Bu boshlang‘ich holatga nisbatan mos ravishda 49,22 % va 53,01 % o‘sishni bildiradi. Boshlang‘ich sirt va kesimni o‘zgarmas deb olish eskirgan quvurning model napor yo‘qotishini 34,64 % kamaytirib baholadi.

Sezgirlik tahlili diametr va g‘adir-budirlikni kalibrlashning ahamiyatini ko‘rsatdi. Hisoblash algoritmining kichik sonli xatosi real magistral prognozining aniqligini o‘z-o‘zidan tasdiqlamaydi. Amaliy aniqlik mustaqil o‘lchovlar asosidagi parametr bahosi va tekshiruv bilan ta’minlanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1 Colebrook, C. F., & White, C. M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 161(906), 367–381. DOI: 10.1098/rspa.1937.0150

2 Colebrook, C. F. (1939). Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. Journal of the Institution of Civil Engineers, 11(4), 133–156. DOI: 10.1680/ijoti.1939.13150

3 Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. Transactions of the ASME, 66(8), 671–678. DOI: 10.1115/1.4018140

4 Sharp, W. W., & Walski, T. M. (1988). Predicting internal roughness in water mains. Journal AWWA, 80(11), 34–40. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1988.tb03132.x

5 Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2020). EPANET 2.2 user manual. EPA/600/R-20/133. U.S. Environmental Protection Agency.

6 Haaland, S. E. (1983). Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. Journal of Fluids Engineering, 105(1), 89–90. DOI: 10.1115/1.3240948

7 Swamee, P. K., & Jain, A. K. (1976). Explicit equations for pipe-flow problems. Journal of the Hydraulics Division, 102(5), 657–664. DOI: 10.1061/JYCEAJ.0004542

8 Praks, P., & Brkić, D. (2018). Advanced iterative procedures for solving the implicit Colebrook equation for fluid flow friction. Advances in Civil Engineering, 2018, Article 5451034. DOI: 10.1155/2018/5451034