

UO‘K 532.543:519.633

**ZARAFShON DARYOSI ShPORALARI ATROFIDAGI OQIMNI IKKI O‘LCHOVLI
SEN-VENAN TENGLAMALARI ASOSIDA SONLI MODELLashtIRISH****Seytov Aybek Jumabayevich** – *texnika fanlari doktori (DSc), professor*saybek868@gmail.com*Jahon iqtisodiyoti va diplomatiya universiteti***Xamroyeva Dilafruz Namozovna** – *fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent*hdilafruz_285@mail.ru*Navoiy davlat universiteti***Kalxanov Polatbek Jumabayevich** – *fizika-matematika fanlari bo‘yicha falsafa doktori, dotsent*kalkhanov@uit.uz*Innovatsion texnologiyalar universiteti***ТЕЧЕНИЕ ВОКРУГ ШПОР РЕКИ ЗАРАФШАН ДВУМЕРНЫЙ ЧИСЛЕННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЙ СЕН-ВЕНАНА****Сейтов Айбек Жумабаевич** – *доктор технических наук, профессор**Университет мировой экономики и дипломатии***Хамроева Дилафруз Намозовна** – *доктор философии по физико-математическим наукам, доцент**Навоийский государственный университет***Калханов Полатбек Жумабаевич** – *доктор философии по физико-математическим наукам, доцент**Университет инновационных технологий***TWO-DIMENSIONAL FLOW AROUND THE ZARAFSHAN RIVER SPURS
NUMERICAL MODELING BASED ON THE SEN-VENAN EQUATIONS****Seytov Aybek Jumabaevich** – *Doctor of Technical Sciences, professor**University of World Economy and Diplomacy***Khamroeva Dilafruz Namozovna** – *Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor**Navoi State University***Kalkhanov Polatbek Jumabaevich** – *Doctor of Philosophy in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor**University of Innovative Technologies*

Tayanch so‘zlar: Sen-Venan tenglamalari, sayoz suv, shpora, chekli-ayirmali sxema, Militeyev sxemasi, Kurant sharti, massa balansi, to‘r bo‘yicha konvergensiya, Zarafshon daryosi, qirg‘oqni himoyalash, sonli modellashtirish, Python.

Rezyume. Maqolada daryo o‘zanidagi shpora (yarim to‘g‘on) atrofida tekis suv oqimini ikki o‘lchovli Sen-Venan tenglamalari asosida sonli modellashtirish masalasi qarang.

Ключевые слова: уравнения Сен-Венана, мелкая вода, шпора, конечно-разностная схема, схема Милитеева, условие Куранта, баланс массы, сеточная сходимость, река Зарафшан, берегозащита, численное моделирование, Python.

Резюме. В статье рассматривается задача численного моделирования планового (осреднённого по глубине) течения воды вокруг шпоры (полузапруды) в русле реки на основе двумерных уравнений Сен-Венана.

Key words: Saint-Venant equations, shallow water, spur dike, finite-difference scheme, Militeev scheme, Courant condition, mass balance, grid convergence, Zarafshan River, bank protection, numerical modelling, Python.

Summary. The paper considers the problem of numerical modelling of the plane (depth-averaged) water flow around a spur dike (groyne) in a river channel on the basis of the two-dimensional Saint-Venant equations.

Kirish. Daryo o‘zanlarining yuvilishi va qirg‘oqlarning buzilishi O‘zbekiston sharoitida, ayniqsa, Zarafshon daryosi havzasida dolzarb muhandislik muammolaridan biri hisoblanadi. Qirg‘oqni yuvilishdan saqlashning samarali vositalaridan biri – o‘zanga ko‘ndalang yoki unga parallel o‘rnatiluvchi shporalar (yarim to‘g‘onlar) tizimidir. Shpora oqimni qirg‘oqdan o‘zan o‘rtasiga siljitadi: shpora ortida tezlik pasayadigan, loyqa cho‘kadigan himoya zonasi hosil bo‘ladi, shporalar oralig‘ida esa oqim jadallashadi. Shporaning joylashuvi, uzunligi va yo‘nalishini asoslash uchun ular atrofida tezlik maydonini oldindan hisoblash talab etiladi. Zarafshon daryosi oqimining mavsumiy va yillik o‘zgaruvchanligi sonli usullar yordamida [11] ishda modellashtirilgan bo‘lib, undan olingan gidrologik ko‘rsatkichlar mazkur tadqiqotda hisob uchun boshlang‘ich va chegaraviy shartlarni tanlashda asos qilib olindi.

Bunday masalalarni tabiiy sharoitda tajriba yo‘li bilan o‘rganish katta xarajat talab qiladi, shuning uchun sonli modellashtirish asosiy tadqiqot vositasiga aylangan [1-4].

Sayoz suv oqimlarini tavsiflashda chuqurlik bo‘yicha o‘rtachalashtirilgan ikki o‘lchovli Sen-Venan tenglamalari keng qo‘llaniladi [1, 2, 5]. Ularni yechishning samarali usullaridan biri – A.N.Militeyev taklif etgan oshkor chekli-ayirmali sxema bo‘lib, u o‘zan-qayir tuzilishiga ega real daryo uchastkalari uchun o‘zini yaxshi ko‘rsatgan [3, 4]. O‘zbekiston sug‘orish tizimlarida turg‘unlashmagan suv harakatini modellashtirish va suv resurslarini optimal taqsimlash masalalari [9, 10] ishlarda Sen-Venan tenglamalari asosida o‘rganilgan. Ushbu ishda shu yondashuv daryo o‘zanidagi shpora atrofida tekis (chuqurlik bo‘yicha o‘rtachalashtirilgan) oqim masalasiga tatbiq etiladi.

Ishning asosiy maqsadi – ikki o‘lchovli Sen-Venan tenglamalari asosida shpora atrofida oqimni hisoblash algoritmini ishlab chiqish, uni Python dasturlash tilida ZarSpurFlow-SV (Zarafshon shporalari atrofida oqim – Sen-Venan modeli) dasturiy majmuasi ko‘rinishida amalga oshirish hamda Zarafshon daryosining tipik uchastkasi misolida shporalar tizimining gidravlik samarasini sonli baholashdan iborat.

Masalaning qo'yilishi va matematik model. Hisob sohasi sifatida uzunligi L , kengligi B bo'lgan to'g'ri burchakli o'zan-qayir uchastkasi olinadi. Koordinata o'qlari quyidagicha yo'naltiriladi: X – oqimga ko'ndalang, Y – oqim bo'ylab; suv yuqori chegaradan kirib, quyi chegaradan chiqadi. Oqim chuqurlik bo'yicha o'rtachalashtirilgan ikki o'lchovli Sen-Venan (sayoz suv) tenglamalari bilan tavsiflanadi. Uzlaksizlik tenglamasi:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

harakat miqdori tenglamalari:

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial (uq_x)}{\partial x} + \frac{\partial (vq_x)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} = - \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial (uq_y)}{\partial x} + \frac{\partial (vq_y)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} = - \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}. \quad (3)$$

Bu yerda $h(x, y, t)$ - oqim chuqurligi; $Z = Z_d + h$ - suvning erkin sirti belgisi; Z_d - tub belgisi; u, v - tezlikning X va Y o'qlari bo'yicha tashkil etuvchilari; $q_x = hu$, $q_y = hv$ - solishtirma sarflar; g - erkin tushish tezlanishi; n - Manning g'adir-budurlik koeffitsiyenti (o'zan va qayir uchun turlicha qiymatlar qabul qilinadi). (2), (3) tenglamalarning o'ng tomonida tub ishqalanishi Manning formulasi orqali hisobga olinadi.

Chegaraviy shartlar: kirish kesimida ($Y = L$) bo'ylama tezlik epyurasi V_{kir} beriladi; chiqish kesimida ($Y = 0$) suv sathi Z_n qiymati qayd etiladi; yon chegaralar va shpora yoqlarida sirpanish sharti, ya'ni normal sarfning nolga tengligi qabul qilinadi. Shpora hisob sohasining ichki chegarasi sifatida kiritiladi: u egallagan yacheyka yoqlaridan o'tuvchi normal sarf nolga tenglashtiriladi. Har bir shpora uchta parametr bilan beriladi: yo'nalish (o'zanga parallel yoki perpendikulyar) hamda yacheyka indeksleri N_x va N_y .

Yechish usuli. (1)-(3) tenglamalar tizimi A.N.Militeyevning oshkor chekli-ayirmali sxemasi bilan yechiladi [3, 4]. Kattaliklar siljirilgan to'rda – Arakava C – to'rida [6] joylashtiriladi: chuqurlik h , tub belgisi Z_d , suv sathi Z va g'adir-budurlik koeffitsiyenti n yacheyka markazlarida; ko'ndalang sarf q_x vertikal yoqlarda; bo'ylama sarf q_y gorizontal yoqlarda aniqlanadi. Bunday joylashuv uzluksizlik tenglamasini konservativ ko'rinishda yozish va shpora shartini yoqlarda aniq qo'yish imkonini beradi.

Sxema oshkor bo'lgani uchun uning turg'unligi Kurant-Fridriks-Levi sharti bilan ta'minlanadi. Vaqt qadami har bir qadamda avtomatik ravishda quyidagicha tanlanadi:

$$\Delta t = k_{ur} \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\max(|V| + \sqrt{gh})}, \quad 0 < k_{ur} < 1, \quad (4)$$

bu yerda $|V| = \sqrt{u^2 + v^2}$ - tezlik moduli, k_{ur} - Kurant koeffitsiyenti (hisoblarda 0,6-0,8 qabul qilindi). Bundan tashqari, hisobning barqarorligi uchun quruq/ho'l yacheykalar chegarasi ($h < h_{min}$ bo'lganda yacheyka quruq deb olinadi), Frud soni bo'yicha cheklov hamda kichik sun'iy (turbulent) yopishqoqlik kiritilgan. Oqim rejimini baholashda Frud soni

$$Fr = \frac{|V|}{\sqrt{gh}} \quad (5)$$

dan foydalaniladi: $Fr < 1$ - sokin, $Fr > 1$ – jadal oqim rejimiga mos keladi.

Dasturda (4) ning ikki o'lchovli, yig'indili ko'rinishi qo'llanadi: $\Delta t = \frac{k_{ur}}{\max(|u| + \sqrt{gh}) + \max(|v| + \sqrt{gh})}$; hisoblarda

$\Delta t \approx 0,09$ s bo'lib chiqdi. Quruq/ho'l yacheykalar chegarasi $h_{min} = 0,002$ m, Frud soni bo'yicha cheklov $Fr \leq 2$, sun'iy yopishqoqlik koeffitsiyenti 0,04 qilib qabul qilindi.

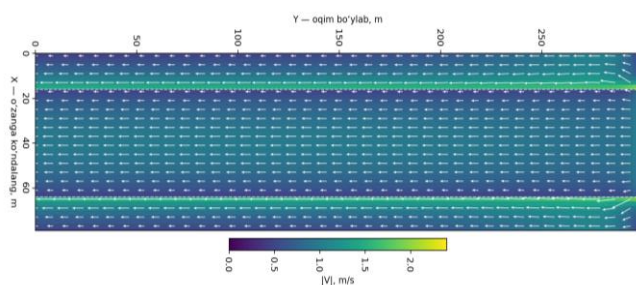
ZarSpurFlow-SV dasturiy majmuasi. Algoritm asosida Python tilida (NumPy, Matplotlib, Tkinter) ZarSpurFlow-SV majmuasi ishlab chiqildi. U uch qismdan iborat: hisoblash yadrosi, vizualizatsiya moduli va grafik interfeys. Interfeysda barcha gidravlik parametrlar – to'r o'lchamlari va qadamlari, vaqt parametrlari, tub belgilari va sath, Manning koeffitsiyentlari (chap qayir, o'zan, o'ng qayir uchun alohida), o'zan chegaralari va kirishdagi tezlik – alohida maydonlarda kiritiladi; shporalar jadval ko'rinishida (yo'nalish, N_x , N_y) beriladi. Dastur tezlik maydonini chizadi, vaqt bo'yicha animatsiya qiladi va istalgan nuqta uchun gidravlik kattaliklarni chiqaradi. Majmuaga verifikatsiya vositalari kiritilgan: har qadamda kirish va chiqish sarflari, ularning nisbiy farqi hamda $\max \left| \frac{\partial h}{\partial t} \right|$ hisoblanib boriladi; natijalarni berilgan oyna bo'yicha o'rtachalash mumkin. Majmua PyInstaller yordamida yagona bajariladigan faylga yig'ilishi mumkin.

Hisoblash tajribasi natijalari. Hisob Zarafshon daryosining tipik uchastkasiga yaqinlashtirilgan parametrlarda o'tkazildi. Hisob sohasi: kengligi 80 m (40 yacheyka, $\Delta x = 2$ m), uzunligi 300 m (120 yacheyka, $\Delta y = 2,5$ m); o'zan $X = 16..64$ m oralig'ida ($B = 48$ m), qolgan qismi qayir; o'zan tubi 0,00 m, qayir tubi 1,60 m, chiqishdagi sath 2,00 m, ya'ni o'rtacha chuqurlik o'zanda 2,2 m, qayirda 0,6 m. Kirishdagi o'rtacha tezlik 1,0 m/s ($Q \approx 103$ m³/s), tub qiyaligi 0,0008, Manning koeffitsiyenti o'zanda 0,028, qayirlarda 0,035. Sxema parametrlari: kur = 0,7 ($\Delta t \approx 0,09$ s), $h_{min} = 0,002$ m, $Fr \leq 2$, sun'iy yopishqoqlik $\nu = 0,04$ (effektiv qiymati $\nu_{ef} = \frac{\nu \Delta x^2}{\Delta t} \approx 1,7$ m²/s).

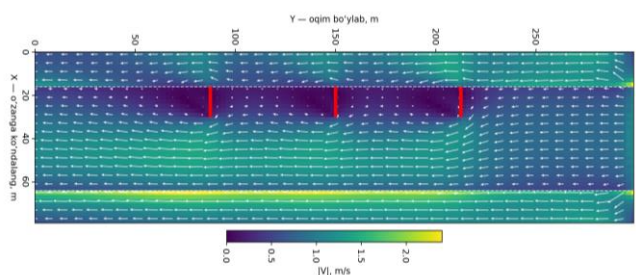
Chap qirg'oqda oqimga perpendikulyar uchta bir xil shpora joylashtirildi: uzunligi $l = 14$ m (7 yacheyka), ya'ni o'zan kengligining 0,29 ulushi; qalinligi bir yacheyka (2 m); joylashuv kesimlari $Y = 87,5$; 150,0 va 212,5 m, oraliq masofa $a = 62,5$ m = 4,5 l.

Hisobning turg'unlashishi va massa balansi. Uchastkadan suvning bir marta o'tish vaqti $T_{ot} = \frac{L}{v} = 300$ s, shuning uchun hisob $T = 1500$ s ($5 \cdot T_{ot}$), ya'ni ~17,7 ming vaqt qadamigacha olib borildi. Turg'unlik ikkita mezon bilan nazorat qilindi: kirish va chiqish sarflarining nisbiy farqi hamda o'zan kengligi bo'yicha o'rtachalangan chuqurlik profilining o'zgarish tezligi $\max \left| \frac{\partial h}{\partial t} \right|$. $t = 100$ s da massa balansi xatosi 23-33 % ni tashkil qiladi – bunday qisqa vaqtda natijani turg'un deb hisoblash mumkin emas; $t \approx 350-400$ s dan boshlab xato ± 3 % dan chiqmaydi, $\max \left| \frac{\partial h}{\partial t} \right|$ esa $3 \cdot 10^{-3}$ m/s dan kichik bo'ladi. O'rtachalangan balans xatosi 1,2 va 2,8 % ni tashkil etdi. Kirish kesimiga tutash ikki qatorda chegaraviy shovqin saqlanadi, shu sababli ko'rsatkichlar chetki besh qatordan tashqarida hisoblandi.

1-rasmda shporasiz, 2-rasmda uchta shporali variantlar uchun turg'unlashgan tezlik maydoni keltirilgan: strelkalar tezlik vektorlarini, fon rangi $|V|$ modulini, qizil kesmalar shporalarni ifodalaydi.



1-rasm. Shporasiz variant: o'rtachalangan tezlik maydoni ($T = 1500$ s)



2-rasm. Uchta shpora ($l = 14$ m) qo'yilgandagi tezlik maydoni ($T = 1500$ s)

Natijalar tahlili quyidagilarni ko'rsatdi. Shporalar ortida tezlik keskin pasayadigan aylanma (sirkulyatsion) zonalar hosil bo'ladi: chap qirg'oq bo'yi zonasida ($X = 16...30$ m, $Y = 70...230$ m) o'rtacha tezlik 0,72 m/s dan 0,22 m/s gacha, ya'ni 70 % ga kamaydi. Ayni paytda oqim o'zan o'rtasiga siqilib, shpora uchlarida mahalliy tezlanish kuzatildi: maksimal tezlik 0,98 m/s dan 1,43 m/s gacha (46 %) ortdi, Frud soni 0,21 dan 0,31 gacha ko'tarildi – oqim sokin rejimda qolaveradi. Bu shpora boshlarini mahalliy yuvilishdan qo'shimcha mustahkamlash zarurligini ko'rsatadi. O'zan bo'yicha o'rtacha tezlik amalda o'zgarmadi (0,807 va 0,808 m/s), ya'ni shporalar o'zanning suv o'tkazish qobiliyatini kamaytirmaydi. Olingan manzara shpora atrofidagi oqimning ma'lum fizik qonuniyatlariga [2, 7, 8] sifat jihatdan mos keladi.

To'r bo'yicha konvergensiya va sezgirlik tahlili. Yechimning hisob to'riga bog'liqligini baholash uchun bir xil fizik masala uch xil to'rda takrorlandi. To'r bo'yicha konvergensiya tahlili natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

$\Delta x / \Delta y$, m	Yacheyka	V qirg'oq, shporasiz, m/s	V qirg'oq, shporali, m/s	Kamayish %	V max, m/s
4,0 / 5,0	20 × 60	0,723	0,232	67,9	1,46
2,0 / 2,5	40 × 120	0,717	0,216	69,9	1,43
1,0 / 1,25	80 × 240	0,733	0,190	74,1	1,51

Uchala to'rda ham kamayish 68-74 % oralg'ida bo'lib, o'rtacha qiymatdan chetlanish ± 4 % dan oshmaydi. Sezgirlik testlari: soha uzunligi 300 dan 450 m gacha oshirilganda qirg'oq bo'yi tezligi 0,216 dan 0,204 m/s gacha (5,6 %) o'zgardi - chiqish chegarasining ta'siri sezilarli emas; kur = 0,5-0,85 da natija 0,198-0,231 m/s, sun'iy yopishqoqlik 0,04 dan 0,08 gacha oshirilganda 0,216 dan 0,245 m/s bo'ldi.

Dasturiy ta'minot interfeysida parametrlarni o'zgartirib, boshqa o'zan kesimi, suv sarfi yoki shpora joylashuvi uchun hisobni takrorlash, Zarafshonning turli uchastkalarida qirg'oqni himoyalash variantlarini taqqoslash va eng samaralisini tanlash mumkin. Natijalarni suv resurslarini boshqarish modellari [10] bilan birgalikda qo'llash havza miqyosidagi kompleks masalalarni yechish imkonini beradi.

Xulosa. Maqolada ikki o'lchovli Sen-Venan tenglamalari asosida shpora atrofidagi tekis oqimni hisoblash algoritmi ishlab chiqildi va Python tilidagi ZarSpurFlow-SV dasturiy majmuasi ko'rinishida amalga oshirildi. Hisob turg'un rejim qaror topguncha ($T = 1500$ s = $5 \cdot T_{ot}$) olib borilib, massa balansi va chuqurlik profilining o'zgarish tezligi bo'yicha nazorat qilindi; natijalarning to'rga bog'liq emasligi uch xil to'rda ($\Delta x = 4; 2; 1$ m) tekshirildi. Zarafshon daryosi misolidagi tajribalar uzunligi o'zan kengligining 0,29 ulushini tashkil etuvchi uchta shporadan iborat tizim qirg'oq bo'yi zonasida tezlikni 70 % ga kamaytirishini, shpora uchlarida esa 46 % gacha mahalliy tezlanish yuzaga kelishini ko'rsatdi. Dasturiy ta'minot qirg'oqni himoyalash inshootlarini loyihalashda muhandislik baholash vositasi sifatida tavsiya etiladi; keyingi bosqichda modelni o'lchov ma'lumotlari bilan validatsiya qilish rejalashtirilgan.

Adabiyotlar

1. Кюнж Ж.А. и др. Численные методы в задачах речной гидравлики. – Москва: Энергоатомиздат, 1985.
2. Vreugdenhil C.B. Numerical Methods for Shallow-Water Flow. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994.
3. Милитеев А.Н. Решение задач гидравлики мелкой воды численными методами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Москва: 1982.
4. Базаров Д.Р. Научное обоснование новых численных методов расчёта деформаций русел рек, сложенных легкоразмываемыми грунтами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Москва: 2000.
5. Chow V.T. Open-Channel Hydraulics. – New York: 1959.
6. Arakawa A., Lamb V.R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. // Methods in Computational Physics. 1977. Vol. 17. – P. 173-265.
7. Алтуниин С.Т. Регулирование русел. – Москва: «Сельхозгиз», 1962.
8. LeVeque R.J. Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. – Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
9. Rakhimov Sh. et al. Optimal control of unstable water movement in channels of irrigation systems under conditions of discontinuity of water delivery to consumers. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 883. – 012065.
10. Rakhimov Sh. et al. Algorithms for solving the problems of optimizing water resources management on a reservoir seasonal regulation. // AIP Conf. Proceedings. 2022. Vol. 2432. – 060023.
11. Seytov A.J., Xamroyeva D.N. Zarafshon daryosi oqimining mavsumiy va yillik o'zgaruvchanligini sonli usullar yordamida modellashtrish. // Amaliy matematika va sun'iy intellekt: xalqaro ilmiy-amaliy anjuman tezlari. – Qarshi: QarDU, 2026-yil 5-6-iyun. 631-633-b.