

UO‘K: 532.595.2

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-2.08>

HAJMIY KAVITATSIYANI INOBATGA OLIB QUVURLARNI GIDRAVLIK ZARBAGA HISOBLASH

Jonqobilov Ulugmurad Umbarovich¹ - texnika fanlari doktori, professor,
E-mail: ulugmurad@inbox.ru, [ORCID: 0000-0003-0871-0317](https://orcid.org/0000-0003-0871-0317), Science ID: DQD-0626-0015

Jonqobilov Sobir Ulug‘murodovich¹ - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),
E-mail: jonqobilovsobir@gmail.com, [ORCID: 0000-0002-0619-936X](https://orcid.org/0000-0002-0619-936X),
Science ID: FQD-0626-0092

Rajabov Ulug‘bek Mamashoyevich¹ - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),
E-mail: 020267@mail.ru, [ORCID: 0009-0007-6110-1111](https://orcid.org/0009-0007-6110-1111), Science ID: FQD-0626-0094

Jonqobilov Bektemir Ulug‘muradovich¹ - texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD),
E-mail: bektemirzonqobilov@gmail.com, [ORCID: 0009-0003-7523897X](https://orcid.org/0009-0003-7523897X),
Science ID: FQD-0626-0093

Ruzimurodov Zoir Husniddinovich¹ - assistent, E-mail: ruzimurodovzoir1@gmail.com,
[ORCID: 0009-0008-6317-5760](https://orcid.org/0009-0008-6317-5760), Science ID: MQD-0626-0133

Bahodirov Shohruh Baxodir o‘g‘li¹ - doktorant (PhD),
E-mail: bahodirovshohruh2613@gmail.com, [ORCID: 0009-0000-6269-1220](https://orcid.org/0009-0000-6269-1220),
Science ID: MQD-0626-0131

Mamashoyev Umid Ulug‘bek o‘g‘li² - assistent, E-mail: umidmamashoyev@gmail.com,
[ORCID: 0009-0005-9904-4728](https://orcid.org/0009-0005-9904-4728), Science ID: MQD-0626-0134

¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

²Iqtisodiyot va pedagogika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada oqim uzluksizligining buzilishi va hajmiy kavitatsiya yuzaga keladigan sharoitlarda bosimli quvurlarda sodir bo‘ladigan gidravlik zarba jarayonini hisoblashning takomillashtirilgan sonli usuli ishlab chiqilgan. Gidravlik zarba jarayonining fizik mohiyati tahlil qilinib, hajmiy kavitatsiya zonasining hosil bo‘lishi va rivojlanishiga ta‘sir etuvchi asosiy omillar o‘rganilgan. Jarayonni tavsiflash uchun uzluksizlik va harakat tenglamalari asosida matematik model tuzilgan hamda uni yechish chekli ayirmalar usuli yordamida amalga oshirilgan. Oddiy bosimli quvur uchun hisoblash algoritmi ishlab chiqilib, elektron hisoblash mashinasi (EHM)da foydalanishga mo‘ljallangan dastur yaratilgan. Taklif etilgan metodika yordamida kavitatsiya zonasining hosil bo‘lish joyi, uning vaqt davomida siljishi, shuningdek, gidravlik zarba bosimining vaqt bo‘yicha o‘zgarish qonuniyatlari aniqlangan. Hisoblash natijalari mavjud eksperimental ma‘lumotlar bilan taqqoslanib, ularning o‘zaro yaxshi mos kelishi aniqlangan, bu esa ishlab chiqilgan metodikaning ishonchliligi va amaliy qo‘llash imkoniyatlarini tasdiqlaydi. Taklif etilgan hisoblash usuli nasos stansiyalari, magistral suv uzatish tizimlari hamda boshqa bosimli quvur tarmoqlarida gidravlik zarba va kavitatsiya hodisalarini oldindan baholash, quvurlarni mustahkamlikka tekshirish hamda gidravlik zarbadan himoya qilish qurilmalarini loyihalashda samarali qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: gidravlik zarba, quvur, kavitatsiya, chekli farq usuli, gidravlik zarbani hisoblashning sonli usuli.

УДК: 532.595.2

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР С УЧЕТОМ ОБЪЕМНОЙ КАВИТАЦИИ

Жонкобилов Улугмурад Умбарович¹ - доктор технических наук, профессор
Жонкобилов Собир Улугмуродович¹ - доктор философии по техническим наукам (PhD),
доцент

Ражабов Улугбек Мамашоевич¹ - доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент
Жонкобилов Бектемир Улугмуродович¹ - доктор философии по техническим наукам (PhD)

Рузимуродов Зоир Хусниддинович¹ - ассистент
Баходиров Шохрух Баходир угли¹ - докторант (PhD)
Мамашоев Умид Улугбек угли² – ассистент

¹Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

²Университет экономики и педагогики, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. В данной статье разработан усовершенствованный численный метод расчета гидравлического удара, возникающего в напорных трубопроводах при нарушении сплошности потока и возникновении объемной кавитации. Проведен анализ физической сущности процесса гидравлического удара, а также исследованы основные факторы, влияющие на образование и развитие зоны объемной кавитации. Для описания рассматриваемого процесса построена математическая модель на основе уравнений неразрывности и движения, численная реализация которой выполнена методом конечных разностей. Для простого напорного трубопровода разработаны алгоритм расчета и программное обеспечение, предназначенное для использования на электронно-вычислительной машине (ЭВМ). С использованием предложенной методики определены место возникновения зоны кавитации, ее перемещение во времени, а также закономерности изменения ударного давления во времени. Результаты численных расчетов сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными, что подтвердило их хорошее соответствие и свидетельствует о достоверности разработанной методики, а также о возможности ее практического применения. Предлагаемый метод расчета может быть эффективно использован при анализе гидравлического удара и кавитационных явлений в насосных станциях, магистральных водоводах и других напорных трубопроводных системах, а также при проверке трубопроводов на прочность и проектировании устройств защиты от гидравлического удара.

Ключевые слова: гидравлический удар, трубопровод, кавитация, конечно-разностный метод, численный способ расчета гидравлического удара.

UDC: 532.595.2

CALCULATION OF WATER HAMMER IN PIPELINES CONSIDERING VOLUMETRIC CAVITATION

Ulugmurad Jonkobilov¹, doctor of technical sciences, professor
Sobir Jonkobilov¹, doctor of philosophy in technical sciences, associate professor
Ulugbek Rajabov¹, doctor of philosophy in technical sciences, associate professor
Bektemir Jonkobilov¹, doctor of philosophy in technical sciences
Zoir Ruzimurodov¹, assistant
Shohruh Bahodirov¹, doctoral student
Umид Mamashoyev², assistant

¹Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

²University of Economics and Pedagogy, Karshi, Uzbekistan

Abstract. This paper presents an improved numerical method for calculating water hammer in pressurized pipelines under conditions of flow discontinuity and volumetric cavitation. The physical nature of the water hammer phenomenon is analyzed, and the main factors affecting the formation and development of the volumetric cavitation zone are investigated. A mathematical model describing the transient process is developed based on the continuity and momentum equations, and its numerical solution is obtained using the finite difference method. A computational algorithm and a computer program for a simple pressurized pipeline have been developed for implementation on a digital computer. The proposed methodology makes it possible to determine the location of the cavitation zone, its temporal evolution, and the variation of surge pressure with time. The numerical results are compared with available experimental data, demonstrating good agreement and

confirming the reliability and practical applicability of the proposed calculation method. The developed approach can be effectively applied to the analysis of water hammer and cavitation phenomena in pumping stations, main water transmission pipelines, and other pressurized pipeline systems. Furthermore, it can be used for evaluating the structural strength of pipelines and for designing protective devices against water hammer.

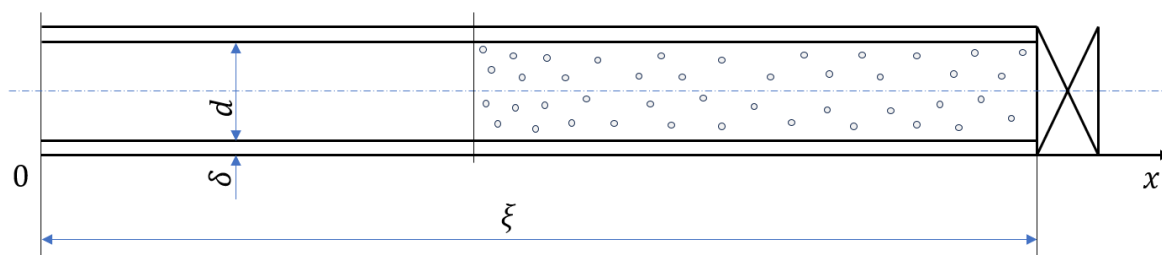
Key words: water hammer, pipeline, cavitation, finite difference method, numerical method for calculating water hammer.

Kirish

Bosimli quvur tizimlarida gidravlik zarba eng murakkab beqaror jarayonlardan biri hisoblanadi. U oqim tezligining keskin o'zgarishi natijasida yuzaga kelib, quvurlarda yuqori bosimlarning hosil bo'lishiga, armaturalar va boshqa gidrotexnik qurilmalarning shikastlanishiga sabab bo'lishi mumkin [1]. Ayniqsa, bosimning kritik qiymatgacha pasayishi natijasida oqim uzluksizligining buzilishi va hajmiy kavitatsiya hodisasi yuzaga kelganda gidravlik zarba jarayonining xarakteri sezilarli darajada murakkablashadi. Shu sababli hajmiy kavitatsiyani hisobga olgan holda gidravlik zarbani hisoblash usullarini ishlab chiqish va takomillashtirish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega [3, 4, 5].

Keyingi yillarda oqim uzluksizligining buzilishi, kavitatsiya jarayonlari va gidravlik zarbani hisoblash bo'yicha bir qator ilmiy tadqiqotlar olib borilgan [2, 6, 8]. Biroq hajmiy kavitatsiyani hisobga olgan holda gidravlik zarba parametrlarini sonli usullar yordamida aniqlash va hisoblash algoritmlarini takomillashtirish masalalari hali ham dolzarb bo'lib qolmoqda [10].

Uzunligi l , diametri d va devor qalinligi δ bo'lgan, μ_t tezlik bilan bo'ylama tebranishlarga uchrayotgan quvurning ma'lum bir ξ kesimida oqim uzilishi holatini ko'rib chiqamiz (1-rasm) [1, 2, 3]. Frontning o'ng tomonida bosim suvning mazkur haroratdagi bug' bosimi P_k ga teng, bug' miqdori esa $\varphi = \varphi_s$ bo'ladi. Frontning chap tomonida bosim P ga teng, bug' miqdori esa $\varphi = 0$ bo'ladi.



1-rasm. Naporli quvurning hisobiy sxemasi.

Boshqa mualliflar [4, 5] singari, biz ham bosim kritik qiymat - P_k gacha pasayganda suyuqlik ichida bug' pufakchalarining deyarli bir zumdada hosil bo'lishi yoki yopilib qolishi, shuningdek, oqim uzluksizligining buzilishi natijasida zatvor oldida hamda suv o'tkazgich profili sinadigan joylarda kavitatsion bo'shliqlar (kavernalar) hosil bo'lishini qabul qilamiz [6, 7]. Bunda ko'rib chiqilayotgan suyuqlik bo'laklarining kritik bosimdagi hajmiy deformatsiyalari bosim P_k ning o'zgarishi hisobiga emas, balki bug' miqdori yoki kavernalar hajmining o'zgarishi hisobiga sodir bo'ladi.

Materiallar va uslublar

Frontning chap tomonida joylashgan quvur qismida suyuqlikning harakati gidravlik zarba tenglamalari bilan tavsiflanadi [1, 8, 9]

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + g(i_f - i_0) - \frac{\partial u_T}{\partial t} \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\rho c^2 \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (2)$$

(1) va (2) tenglamalarga mos keluvchi xarakteristik tenglamalar chekli ayirmali shaklda quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\Omega(x, t) = \Omega(x - \Delta x, t - \tau) - R'_{x, x - \Delta x} \tau, \quad (3)$$

$$\Pi(x, t) = \Pi(x + \Delta x, t - \tau) + R'_{x, x - \Delta x} \tau, \quad (4)$$

bu yerda x - koordinata o'qi (chapdan o'ngga yo'nalgan), t - vaqt, ρ - suyuqlik zichligi, $u = \frac{Q}{\omega}$ - oqimning nisbiy tezligi, Q - suv sarfi, ω - ko'ndalang kesim yuzasi, g - erkin tushish tezlanishi, $i_f = \frac{u^2}{c^2 R}$ - gidravlik qarshilik nishabligi (bunda C - Shezi koeffitsienti, R - gidravlik radius), i_0 - quvur nishabligi, c - quyidagi ma'lum bog'lanishlar asosida aniqlanadigan gidravlik zarba to'lqinining tarqalish tezligidir [1, 8, 9]:

$$\Omega = \frac{p}{\gamma} + \frac{cu}{g}; \quad (5)$$

$$\Pi = \frac{p}{\gamma} - \frac{cu}{g}, \quad (6)$$

bu yerda Ω va Π - mos ravishda x o'qi yo'nalishi bo'ylab hamda unga qarama-qarshi yo'nalishda c tezlik bilan tarqaluvchi teskari va to'g'ri to'lqinlar, γ - suyuqlikning solishtirma og'irligini ifodalaydi.

$$R' = \left[(i_f - i_0)c + \frac{c}{g} \frac{\partial u_T}{\partial t} \right] \tau. \quad (7)$$

x , $x - \Delta x$ indeksi R' ning x va $x - \Delta x$ kesimlari hamda t va $t - \tau$ vaqt momentlari bo'yicha o'rtachalashtirilgan qiymatini, x , $x + \Delta x$ indeksi esa R' ning x va $x + \Delta x$ kesimlari orasida shu vaqt oralig'idagi o'rtachalashtirilgan qiymatini ko'rsatadi.

Frontning o'ng tomonidagi, bosim o'zgarish bo'lib, p_K ga teng bo'lgan quvur uchastkasida harakat quyidagi tenglamalar bilan tavsiflanadi [1, 2, 10]:

$$\frac{\partial u_S}{\partial t} + (u_S + u_T) \frac{\partial u_S}{\partial x} = g(i_0 - i_f) - \frac{\partial u_T}{\partial t}; \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varphi_S}{\partial t} + u_S \frac{\partial \varphi_S}{\partial x} = (1 - \varphi_S) \frac{\partial u_S}{\partial x}, \quad (9)$$

bu yerda $u_S = \frac{Q_S}{\omega}$ - bug'-suv aralashmasi oqimining o'rtacha tezligi; Q_S - bug'-suv aralashmasining sarfi.

Uzilish frontida quyidagi shartlar bajariladi [2, 3, 4]:

$$u - c_S = (1 - \varphi_S)(u_S - c_S); \quad (10)$$

$$(u - c_S)^2 + \frac{p}{\rho} = (1 - \varphi_S)(u - c_S)^2 + \frac{p_K}{\rho}, \quad (11)$$

bu yerda c_S - oqim uzilishi frontining tarqalish tezligi. (10) va (11) tenglamalardan c_S ni aniqlash uchun quyidagi munosabatni osonlik bilan olish mumkin, ya'ni:

$$c_S = u_S - \frac{c}{2(1-\varphi_S)} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4A(1-\varphi_S)}{c^2 \cdot \varphi_S}} \right], \quad (12)$$

bu yerda

$$A = cu_S - g\left(\Omega_\xi - \frac{p_K}{\gamma}\right), \quad (13)$$

bu yerda Ω_ξ - uzilish frontidagi Ω ning qiymati bo'lib, u (3) munosabatdan aniqlanadigan vaqt momentiga tegishlidir.

Natijalar va muhokama

Uzunligi l bo'lgan quvur uchastkasi uchun chegaraviy shartlar ma'lum bo'lganda, (3)-(13) tenglamalar hajmiy kavitatsiyani hisobga olgan holda quvurdagi gidravlik zarbani sonli hisoblash algoritmini ishlab chiqish uchun yetarli bo'ladi. Shu bilan birga, (8) va (9) tenglamalar ham chekli ayirmali ko'rinishda yozilishi kerak [2, 3, 4]. Bunda quvur n ta hisobiy uchastkaga bo'linadi, har bir uchastkaning uzunligi $\Delta x = \frac{l}{n} \geq \tau$ bo'lib, bu yerda τ - vaqt bo'yicha qadam, Δx esa fazoviy (uzunlik bo'yicha) qadam hisoblanadi. Bundan tashqari, har bir vaqt momentida uzilish fronti mavjud bo'lmagan Δx uchastkasida Q va $\frac{p}{\gamma}$ kattaliklarining quvur uzunligi bo'ylab chiziqli qonun bo'yicha o'zgarishi faraz qilinadi. Demak, $\Delta x > c\tau$ bo'lganda, (3) va (4) tenglamalar bo'yicha j kesimdagi Ω va Π qiymatlarini aniqlash uchun avval j kesimidan $\delta x = \pm c\tau$ masofada joylashgan kesimlardagi uva $\frac{p}{\gamma}$ qiymatlari interpolatsiya yordamida topiladi. Keyinchalik (5) va (6) munosabatlar asosida

$\Omega(j - \delta x, t - \tau)$ va $\Pi(j + \delta x, t - \tau)$ aniqlanib, ularning yordamida $\Omega(j, t)$ hamda $\Pi(j, t)$ qiymatlari hisoblab chiqiladi.

j kesimda Ω va Π qiymatlari ma'lum bo'lganda, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$H = \frac{\Omega + \Pi}{2}, \quad (14)$$

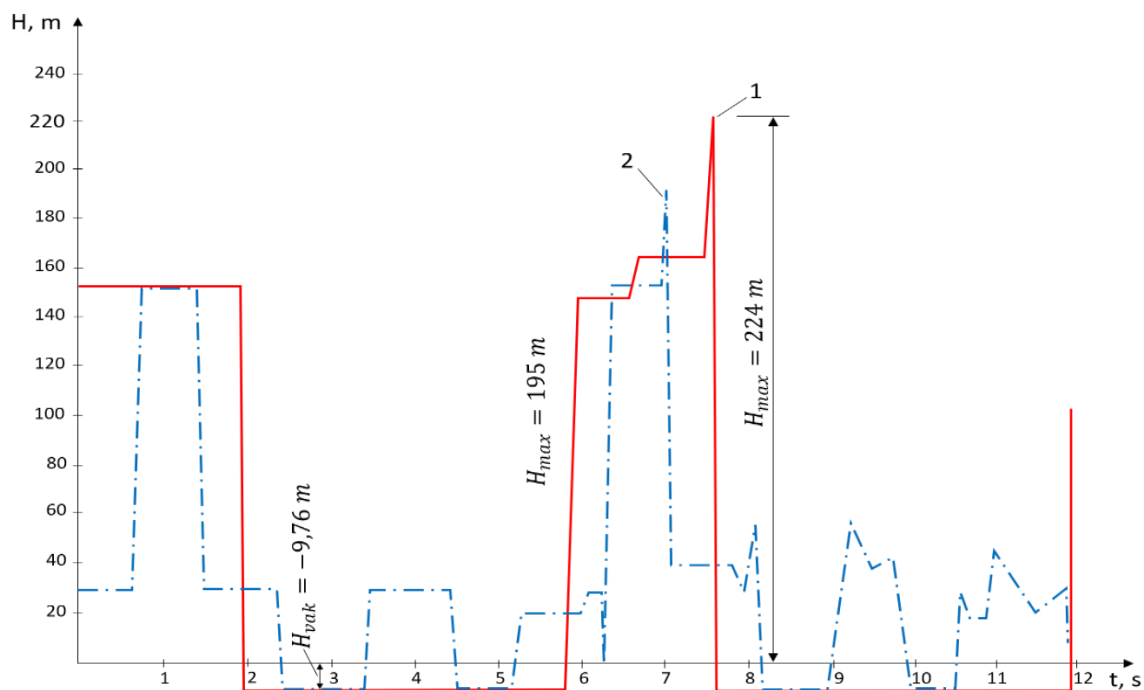
$$u = \frac{c}{g}(\Omega + \Pi). \quad (15)$$

Frontning o'ng tomonidagi $\frac{p_K}{Y} = \text{const}$ bo'lgan uchastkada hisoblashlar chekli ayirmali shaklda yozilgan (8) va (9) tenglamalar asosida amalga oshiriladi [2, 3, 4].

Uzilish frontining joylashuvi (12) munosabat asosida osongina aniqlanadi. Agar to'liq fronti j va $j + 1$ kesimlar orasida joylashgan bo'lsa, $\Omega(\xi - \delta x, t - \tau)$ qiymati $t - \tau$ vaqt momentida $j - 1$ va j kesimlaridagi u hamda $\frac{p}{Y}$ kattaliklarini interpolatsiya qilish orqali aniqlanadi. Frontning bevosita o'ng tomonida, ya'ni $t - \tau$ vaqt momentiga mos keluvchi ξ kesimida φ_s va u_s qiymatlari front bilan undan keyin joylashgan $j + 1$ tugun orasidagi uchastkada interpolatsiya usuli yordamida aniqlanadi.

Ta'kidlash joizki, u_T tezlik va $\omega_T = \frac{\partial u_T}{\partial t}$ tezlanish faqat vaqtning emas, balki x absissaning ham funksiyasi bo'lishi mumkin. Bundan tashqari, taklif etilgan metodikada bosim kamayganda suvda erigan havoning ajralib chiqishi hamda bosim ortganda uning qayta erishi jarayonlari hisobga olinmagan bo'lib, bu amaliy nuqtai nazardan to'liq asosli hisoblanadi [2, 3, 4, 8, 9].

Oddiy quvur uchun EHMda hisoblash algoritmi va dasturi tuzildi. Misol tariqasida bosh qismida rezervuar, oxirida esa qulfak (zadvijka) joylashgan oddiy quvur ko'rib chiqildi. Quvur uzunligi 150 m ni, kirish kesimidagi napor 30 m ni tashkil etadi. Gidravlik zarba to'liqining tarqalish tezligi 1240 m/s deb, quvur diametri esa $d = 50\text{mm}$ deb qabul qilingan [8, 9, 10]. 2-rasmda qulfakning to'satdan yopilishi natijasida qulfak oldida hamda quvurning o'rta qismida hosil bo'ladigan zarb bosimining vaqt bo'yicha o'zgarish diagrammasi tasvirlangan. Olingan natijalarni [10] da keltirilgan eksperimental ma'lumotlar bilan taqqoslash ularning sifat jihatidan yaxshi mos kelishini ko'rsatadi.



1 - zadvijka oldida, 2 - quvurning o'rta qismida

2-rasm. Zarb bosimining vaqt bo'yicha o'zgarish diagrammasi.

Xulosa

Kavitatsiya zonasini hisobga olgan holda bosimli quvurlarda musbat gidravlik zarbani hisoblashning sonli metodikasi taklif etildi.

Bosimli quvurda kavitatsiya zonasining joylashuvini aniqlovchi bog‘lanish olindi. Bunda bosim pasayganda suvda erigan havoning ajralib chiqishi va bosim oshganda uning qayta erishi hisobga olinmagan bo‘lib, bu amaliy nuqtai nazardan to‘liq maqbul hisoblanadi.

Kavitatsiya zonasini hisobga olgan holda bosimli quvurlarda gidravlik zarbani EHM yordamida hisoblash algoritmi va dasturi ishlab chiqildi.

Taklif etilgan metodika bo‘yicha bajarilgan hisoblash natijalarini eksperimental ma‘lumotlar bilan taqqoslash ularning yaxshi va qoniqarli mos kelishini ko‘rsatadi.

Adabiyotlar

- [1] Н.А.Картвелишвили. Динамика напорных трубопроводов. М., 1979, 224.
- [2] A.M.Arifjanov, A.M.Fatkhulloev, B.U.Jonkobilov, U.M.Rajabov, S.U.Jonkobilov. Calculation of a positive water hammer absorber // (2025) American Academic publishers, volume 05. Pages 618-623. <https://www.academicpublishers.org/journals/index.php/ijai>. (Impact Factor:12,23).
- [3] Jonkobilov U.U. Methodology of calculation and exploration of rupture at hydraulic impact. //European Science review Scientific journal Austria, Vienna. № 7-8. 2018-P.215-217.
- [4] J. Kalkwijk, Th. Kranenburg. J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. 97, № 10, 1971, 1585-1605.
- [5] Д.Н.Смирнов, Л.Б.Зубов. Труды Лаборатории инженерной гидравлики ВОДГЕО, 13, 1972, 138-158.
- [6] Jonkobilov, S. U., & Jonkobilov, U. U. (2022). Calculation of vacuum during hydraulic shock taking into account dissolved gas. Middle European Scientific Bulletin, 29, 14–17. <https://cejssr.academicjournal.io>.
- [7] Jonkobilov U., Dusmatov X., Jonkobilov S., Ruzikulov J., Jonkobilov B. Otritsatelnyy gidroudarnyy razryv nerazryvnosti potoka. O‘zbekiston Respublikasi Oliy harbiy aviatsiya bilim yurti, Samo qalqonlari ilmiy-axborot jurnali, 3(7) 2023 y. s.31-38. (OAK rayosatining 30.04.2022 yildagi qarori 315/1).
- [8] Jonkobilov U.U., Xushiyev Sh.P., Jonkobilov B.U., Ruzimuradov Z.H., Baxodirov Sh.B. Nasos stansiyasi naporli quvurlarida va tizimlarda suv zarbi va uning so‘ndirgichi hisoblari (Monografiya). Kar IEL, Intellect nashriyot. – K., 2024, 130 s.
- [9] Jonkobilov U.U., Jonkobilov S.U., Norinov F.K., Egamnazarov T.R., Jonkobilov K.U. Metodika i pribory dlya izmereniya napornyykh nestatsionarnyykh protsessov v laboratornykh ustanovkax. “Neft va gaz sanoatida zamonaviy texnologiyalar va innovatsiyalar” mavzusidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallar to‘plami, 22-23 aprel 2021 yil, -104-107 b.
- [10] Arifjanov A.M., Jonqobilov U.U., Jonqobilov S.U. Bir jinsli va gazli suyuqlik naporli oqimlarining gidravlik zarbaga hisobi. Monografiya, T.: Voris nashriyot. 2019, -155 b.