

О. М. ФАТЄЄВ, Н. М. ФАТЄЄВА, А. В. КРАСИЛЬНИК, А. В. ШИЯН, В. В. ПОЛЯКОВ

ТЕХНОЛОГІЇ ГІДРОСТАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ У МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Розробка нових випробувальних пресів обґрунтована вимогами сучасних технологій видобутку нафти з надглибоких свердловин і сланцевого газу до перевірки міцності труб в бік збільшення випробувального тиску. Алгоритм гідростатичних випробувань полягає в тому, що на кінці труби насувають випробувальні голівки, які герметизують внутрішню порожнину труби. Потім трубу наповнюють водяною емульсією і збільшують тиск цієї емульсії до величини, встановленої нормативними документами. Для гідростатичного випробування труб нафтогазового сортаменту високим тиском найбільше переваг має спосіб зовнішньої герметизації труб за допомогою сегментних манжет. Механічне обладнання для випробування має враховувати компенсацію осьових зусиль від дії тиску випробувальної рідини в середині труби, для цього рама преса має бути силовою. Розглянуто найбільш розповсюджену силову схему випробувальних пресів, в яких всі осьові сили, які виникають внаслідок дії тиску рідини всередині труби на випробувальні голівки, компенсуються силами реакції в силових колонах. Передню голівку роблять жорстко зв'язаною з колонами, а задню голівку розміщують на рухомій каретці для компенсації немірності довжини труби. В робочому положенні задня каретка фіксується на колонах спеціальними замковими механізмами. Підвищення якості проведення випробування доцільно розглядати за рахунок удосконалення конструкції елементів гідравлічної системи та дослідження процесів при підйомі та утриманні високого тиску. Випробувальний тиск в середині труби створюється переважно за допомогою гідромультіплікатора тиску. Параметри мультиплікатора: коефіцієнт мультиплікації, діаметр поршня та робочий хід вибирають в залежності від потрібного випробувального тиску, довжини та діаметрів труб, що піддаються випробуванню. Дослідження гідросистем високого тиску мультиплікаторного типу наразі представляють особливий інтерес.

Ключові слова: випробувальний тиск, труба нафтогазового сортаменту, сегментні ущільнення, осьові навантаження, прес, мультиплікатор високого тиску.

O. FATYEV, N. FATIEVA, A. KRASYLNYK, A. SHYIAN, V. POLIAKOV

HYDROSTATIC TESTING TECHNOLOGIES IN THE METALLURGICAL INDUSTRY

The development of the new test presses is based on the requirements of modern technologies for the extraction of oil from ultra-deep wells and shale gas to test the strength of pipes up to higher test pressures. The hydrostatic test algorithm involves pushing test heads onto the ends of the pipe to seal the internal cavity of the pipe. Then the pipe is filled with a water emulsion and the pressure of this emulsion is increased to the value specified in regulatory documents. For high-pressure hydrostatic testing of oil and gas pipes, the most advantageous method is the external sealing of pipes using segmental sleeves. The mechanical testing equipment should take into account the compensation of axial forces from the pressure of the test fluid inside the pipe, for which purpose the press frame should be power-operated. The most common power scheme of test presses is considered, in which all axial forces arising from the action of the fluid pressure inside the pipe on the test heads are compensated by reaction forces in the power columns. The front head is rigidly connected to the columns, and the rear head is placed on a movable carriage to compensate for uneven pipe lengths. In the working position, the rear carriage is fixed to the columns with special locking mechanisms. It is advisable to improve the quality of the test by improving the design of the hydraulic system elements and studying the processes during the rise and retention of high pressure. The test pressure inside the pipe is created mainly by means of a hydraulic pressure multiplier. The parameters of the multiplier: multiplication factor, piston diameter and stroke are selected depending on the required test pressure, length and diameters of the pipes to be tested. Research on high-pressure hydraulic systems of the multiplier type is of particular interest at present.

Keywords: test pressure, oil and gas pipe, segmental seals, axial loads, press, high-pressure multiplier.

Вступ. Труби нафтогазового сортаменту працюють у найжорсткіших умовах навантаження. Наприклад, при видобутку сланцевого газу в стовбур свердловини закачується в середньому від 3 до 10 тисяч тон води під тиском до 140 МПа. Буріння свердловин довжиною 3000 м для максимізації площі поверхні свердловин, яка контактує зі сланцевим пластом, чи надглибоке буріння нафтових свердловин, вимагають використання надміцних безшовних труб. Адаже руйнування труб в свердловинах призводить до великих збитків.

Щоб врахувати вимоги нових технологій [1; 2], постійно оновлюються процеси виготовлення і зміцнення труб нафтогазового сортаменту, розробляються нові різьбові з'єднання, покращується матеріал труб тощо. Найнадійнішим і незмінним способом перевірки міцності та щільності труб та трубних з'єднань є гідростатичні випробування. Під час цих випробувань для перевірки експлуатаційних характеристик виготовлених труб застосовується підвищений тиск рідини. Як правило, в якості випробувальної рідини використовують водяну емульсію з антикорозійними присадками. Величину

випробувального тиску встановлюють відповідними стандартами [3; 4] і нормативно-технічними документами на виробництво певного типу труб [5; 6].

Основна частина. Узагальнений алгоритм гідростатичних випробувань полягає в тому, що на кінці труби насувають випробувальні голівки, які герметизують внутрішню порожнину труби. Потім трубу наповнюють водяною емульсією і збільшують тиск цієї емульсії до величини, встановленої нормативними документами. Як правило, випробувальний тиск перевищує робочий на 25–70 %. Далі трубу витримують під дією цього тиску, як правило, 5–10 с. В цей час контролюють стабільність тиску в трубі та перевіряють відсутність просочування і витікання рідини з труби назовні.

В залежності від вимог нормативних документів витримка труби під дією випробувального тиску здійснюється або з компенсацією падіння тиску, або без компенсації. Компенсація невеликого падіння тиску відбувається за рахунок повільного руху штока мультиплікатора. Якщо ж компенсація падіння тиску не допускається, стабільність випробувального тиску досягається за рахунок цілісності труби, а також

герметичності ущільнень у випробувальних голівках і водяної апаратури високого тиску.

Труба успішно пройшла випробування, якщо графік витримки випробувального тиску не показує перевищення допустимого значення падіння; просочування і витікання рідини відсутні; деформації труби не перевищують норми – її відправляють на фінішну обробку. В іншому випадку трубу бракують [7].

Герметизацію внутрішньої порожнини труби забезпечують еластичні ущільнення. В залежності від того, зазор між якими поверхнями ущільнюється, можна виділити три види ущільнень. На рис. 1–3 схематично показані три типи ущільнень труби і відповідні осьові навантаження на трубу та випробувальну голівку.

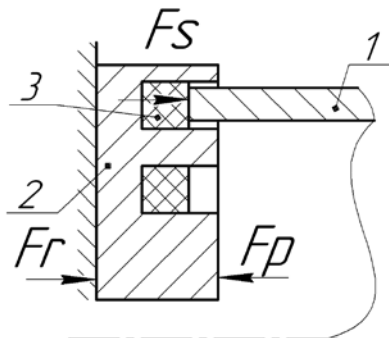


Рис. 1. Торцеве ущільнення

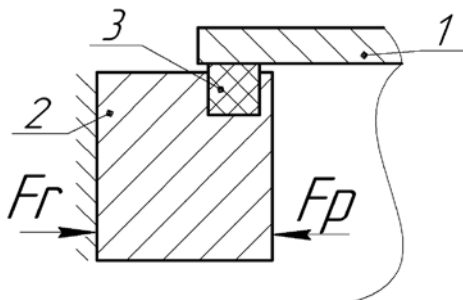


Рис. 2. Внутрішнє ущільнення

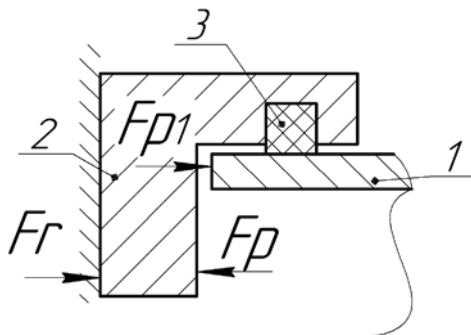


Рис. 3. Зовнішнє ущільнення

В схемах використані наступні позначення:

1 – труба;

2 – випробувальна голівка;

3 – еластичне ущільнення (узагальнено, не залежно від форми перерізу);

F_p – активна сила вздовж осі труби від дії тиску рідини на внутрішню поверхню голівки;

F_r – сила реакції на дію тиску рідини (виникає силової рами випробувального преса);

F_s – сила притискування ущільнення до торця труби;

F_{p1} – сила стискання труби вздовж осі, викликана дією тиску рідини на торець стінки труби.

При торцевому ущільненні труби герметизації досягають за рахунок притискування ущільнення до торця труби з певним зусиллям F_s , якого повинно вистачати для створення суцільної площадки контакту поверхонь ущільнення і торця труби [8].

Основними недоліками торцевого типу ущільнення труби є:

- швидке руйнування ущільнення через постійне циклічне механічне неконтрольоване притискування ущільнення торцем труб до голівки і через гострі краї труби;

- легка втрата герметичності через дефекти площини торця труби, нерівномірне притискування ущільнення до торця, або через недостатню компенсацію розтягнення рами преса.

Основні переваги торцевого ущільнення:

- простота монтажу і заміни ущільнень;

- можливість однією голівкою з кількома торцевими ущільненнями випробувати труби відповідних діаметрів труб без заміни голівок.

При внутрішньому ущільненні труби осьова сила стискання труби відсутня, контакт зовнішньої поверхні ущільнення з внутрішньою поверхнею труби більш стійкий, ніж у торцевого ущільнення. Це є переваги такого виду ущільнення.

Проте, форма і шорсткість внутрішньої поверхні труби без додаткової обробки, як правило, гірші за зовнішню і торцеву поверхні труб. Через це робоча поверхня внутрішнього ущільнення досить часто псується і доводиться його міняти. Крім того, як правило, для труб кожного внутрішнього діаметру треба своє відповідне ущільнення. Тобто, якщо внутрішні діаметри труб часто змінюються, треба часто міняти випробувальні голівки.

При зовнішньому ущільненні труби виникає додаткова сила стискання труби, зумовлена дією тиску рідини на торці труби. Чим більший випробувальний тиск і товщина стінки труби, тим більша сила стискання. Проте, ущільнення зовнішньої поверхні труби досягається найбільш просто, і воно найбільш стійке в порівнянні з торцевим і внутрішнім. Особливо, якщо взяти до уваги сегментне [9], рухоме в радіальному напрямі ущільнення, яке охоплює трубу під дією зовнішнього тиску рідини (рис. 4).

Оскільки робоча поверхня ущільнення типу МС контактує з поверхнею труби тільки під дією зовнішнього тиску рідини при випробуванні труб, довговічність такого типу ущільнень суттєво більша, ніж у торцевих чи внутрішніх ущільнень. Тому що при відсутності зовнішнього тиску між поверхнею труби і робочою поверхнею ущільнення існує досить великий гарантований зазор і робоча поверхня ущільнення не руйнується гострими краями труби чи шорсткою зовнішньою поверхнею труби. Крім того, завдяки збільшеним зазорам, одне сегментне

ущільнення може використовуватись для випробування труб цілого ряду зовнішніх діаметрів без зміни розміру ущільнення.

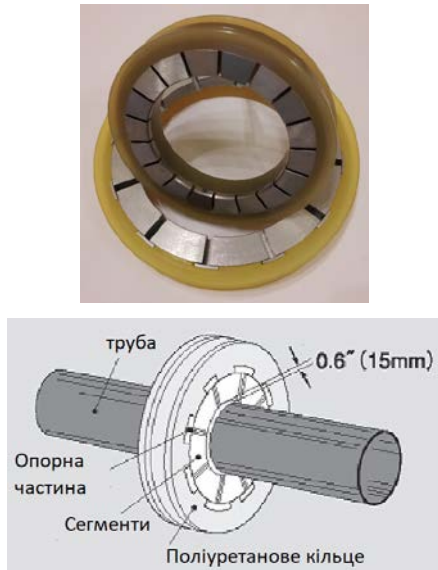


Рис. 4. Зовнішнє сегментне ущільнення типу MS та MCO

До того ж, сегментні ущільнення дозволяють випробувати труби з різбовими і потовщеними кінцями. Це одна з основних переваг сегментних ущільнень над звичайними *U*-подібними, чи комірцевими манжетами, котрі не дозволяють герметизувати подібні поверхні.

Схематично роботу сегментної манжети показано на рис. 5. При відсутності дії зовнішнього тиску рідини між робочою поверхнею манжети і поверхнею труби існує великий зазор, позначений на верхній половині рис. 5.

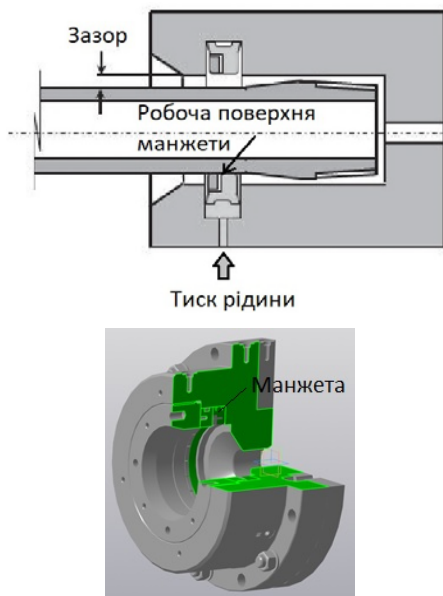


Рис. 5. Випробування труб з різбовими кінцями

Під дією тиску рідини на зовнішній обідок манжета охоплює трубу робочою поверхнею і створює міцний ущільнювальний пояс на поверхні труби, як показано на нижній половині рис. 5.

Як видно зі схем (рис. 1–3), тільки при внутрішньому ущільненні на трубу не діє ніяка зовнішня сила в осьовому напрямку. Але, при будь-якому з трьох видів ущільнень труби сила від дії тиску рідини всередині труби спрямована на те, щоб зіштовхнути випробувальні голівки з труби. Тому цю силу замикають на раму преса, тобто рама преса є силовою, як показано на рис. 6.

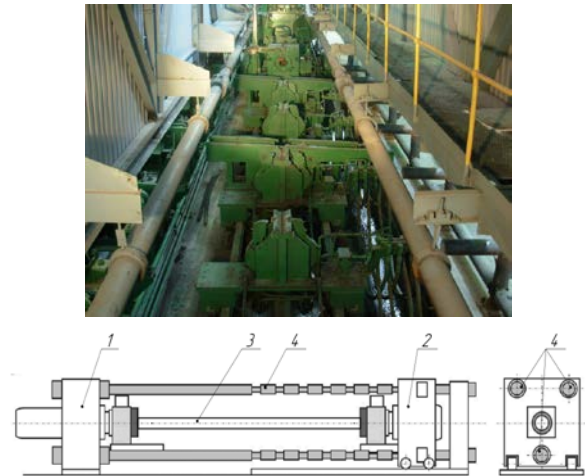


Рис. 6. Силова схема преса:

1 – передній фіксований упор; 2 – задній рухомий упор або задня каретка; 3 – випробувальна труба; 4 – силові колони

На рис. 6 наведена найбільш розповсюджена силова схема випробувальних пресів. На передньому фіксованому упорі, жорстко зв'язаному з силовими колонами, розміщена передня випробувальна голівка. На задній каретці розміщена задня випробувальна голівка. Задню каретку переміщують в залежності від довжини труби, завантаженої для випробування в прес, і фіксують на силових колонах. Таким чином, всі осьові сили, які виникають внаслідок дії тиску рідини всередині труби на випробувальні голівки, компенсуються силами реакції в силових колонах.

Створення випробувального тиску в трубі відбувається за рахунок роботи мультиплікатора високого тиску [10]. Спрощену принципову схему системи гідравлічного випробування труб показано на рис. 7.

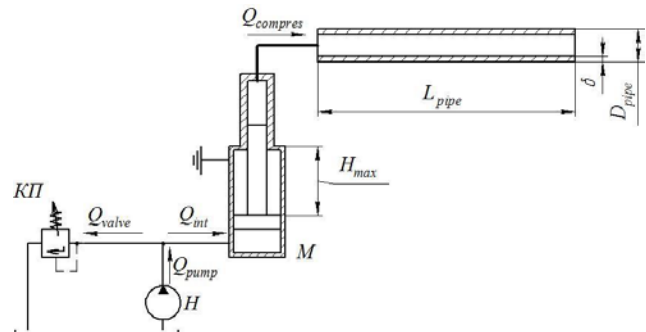


Рис. 7. Спрощена принципова схема системи випробування труб

Масляний насос *H* подає робочу рідину в поршневу порожнину мультиплікатора *M* і спричиняє рух поршня зі штоком. Шток мультиплікатора

втісняє водяну емульсію в наповнену трубу і підіймає тиск у ній. Значення тиску рідини в трубі пропорційне тиску робочої рідини, який створює масляний насос, і коефіцієнту мультиплікації. Коефіцієнт мультиплікації – стала характеристика мультиплікатора. Це співвідношення площі поршня до площі штока мультиплікатора.

Величина тиску масла встановлюється запобіжним клапаном КП масляної гідросистеми [11]. Параметри масляного насоса і масляної гідроапаратури, а також параметри мультиплікатора – коефіцієнт мультиплікації, діаметр поршня та робочий хід H_{\max} вибирають в залежності від потрібного випробувального тиску, довжини та діаметрів труб, що піддаються випробуванню [12]. Для забезпечення компактності проєктованого обладнання доцільно використовувати гідроапаратуру модульного монтажу [13].

Висновки. Розробка нових випробувальних пресів обґрунтована вимогами сучасних технологій видобутку нафти з надглибоких свердловин і сланцевого газу до перевірки міцності труб в бік збільшення випробувального тиску.

Для гідростатичного випробування труб нафтогазового сортаменту високим тиском найбільше переваг має спосіб зовнішньої герметизації труб за допомогою сегментних манжет.

Механічне обладнання для випробування має враховувати компенсацію осьових зусиль від дії тиску випробувальної рідини в середині труби, для цього рама преса має бути силовою. Найрозповсюдженіша схема рами пресів – з силовими колонами. Передню голівку роблять жорстко зв'язаною з колонами, а задню голівку розміщують на рухомій каретці для компенсації немірності довжини труби. В робочому положенні задня каретка фіксується на колонах спеціальними замковими механізмами.

Підвищення якості проведення випробування доцільно розглядати за рахунок удосконалення конструкції елементів гідравлічної системи та дослідження процесів при підйомі та утриманні високого тиску. Випробувальний тиск в середині труби створюється переважно за допомогою гідромультиплікатора тиску. Тому дослідження гідросистем високого тиску мультиплікаторного типу представляють особливий інтерес.

Список літератури

1. Роговий А. С., Костюк М. О., Азаров А. С. Удосконалювання енергетичних параметрів нафтових струминних насосів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 25–32. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.04
2. Черпаков М. І. Аналітичний огляд шляху та методів синтезу схем гідропневмоагрегатів. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 78–81. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.13
3. *ДСТУ 3845:2019. Труби металеві. Метод випробування гідростатичним тиском (ГОСТ 3845:2017, IDT)* / Нац. стандарт України. Київ: УкрНДНЦ, 2019. 8 с.
4. *ДСТУ 11960:2022. Нафтова та газова промисловість. Сталеві труби для використання як обсадних труб або труб для свердловин (EN ISO 11960:2021, IDT; ISO 11960:2020, IDT)* /

- Нац. стандарт України. Київ: УкрНДНЦ, 2022. 536 с.
5. *ДСТУ 8932:2019. Труби обсадні та муфти до них. Технічні умови* / Нац. стандарт України. Київ: УкрНДНЦ, 2020. 51 с.
6. *ДСТУ 8935:2019. Труби насосно-компресорні та муфти до них. Технічні умови* / Нац. стандарт України. Київ: УкрНДНЦ, 2020. 24 с.
7. Guangzheng J., Mantian L., Shujin Z., Fengshan W. Monitor and Control of Hydrostatic Sealing Tester for Tubing and Casing. *WRI World Congress on Software Engineering (19–21 May 2009, Xiamen, China)*. IEEE, 2009. P. 47–49. doi: 10.1109/WCSE.2009.323
8. Gu R. J., Liu J. G., Zhang J. G., Li P. L., Kou Y. L., Liu H. C. Simulation Study on the Heavy Parts of Pipe Hydrostatic Tester and their Structures Optimization. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 109. P. 296–301. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.109.296
9. *Hydrostatic pipe tester*. URL: <https://www.hyprex.co.jp/en/technology/pdf/2013/yukuatu201308.pdf> (дата звернення: 10.09.2024).
10. Фатєєв Н. М., Красильник А. В., Фатєєв О. М., Кулжанов О. А. Дослідження динаміки гідравлічного мультиплікатора. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2021 (18–20 травня 2021 р., Харків)*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. 123.
11. Fatyeyev O., Fatieieva N., Poliakov V., Shyian A., Radchenko O. Design Specifics of a Built-in Diagnostic System for Hydraulic Machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2023. No. 2. P. 78–84. doi: 10.20998/2411-3441.2023.2.12
12. Cameron K., Pettinger A. M. Effectiveness of Hydrostatic Testing for High Strength Pipe Material. *Proc. of the 8th International Pipeline Conference. Vol. 1 (27 September–1 October 2010, Calgary, Alberta, Canada)*. ASME, 2010. P. 647–651. doi: 10.1115/IPC2010-31426
13. Fatyeyev O., Fatieieva N., Ponomarov V. Advantages of using hydraulic equipment of modular mounting in the modernization of machine hydrosystems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2022. No. 1. P. 33–41. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.05

References (transliterated)

1. Rogovyi A. S., Kostyuk M. O., Azarov A. S. Udokonaluvannya enerhetychnykh parametriv naftovykh strumynnykh nasosiv [Improving energy parameters of oil jet pumps]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 25–32. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.04
2. Cherpakov M. I. Analitichnyy ohlyad shlyakhu ta metodiv syntezy skhem hidropnevmoahrehativ [Analytical review of the way and methods of synthesis of hydropneumatic units schemes]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 78–81. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.13
3. *DSTU GOST 3845:2019. Truby metalevi. Metod vyprovuvannya hidrostatychnym tyskom* [State Standard 3845:2019. Metallic pipes. Internal hydrostatic pressure testing method]. Kyiv, UkrNDNTS Publ., 2019. 8 p.
4. *DSTU 11960:2022. Naftova ta hazova promyslovist'. Stalevi truby dlya vykorystannya yak obsadnykh trub abo trub dlya sverdlavyin* [State Standard 11960:2022. Petroleum and natural gas industries – Steel pipes for use as casing or tubing for wells]. Kyiv, UkrNDNTS Publ., 2022. 536 p.
5. *DSTU 8932:2019. Truby obsadni ta mufty do nykh. Tekhnichni umovy* [State Standard 8932:2019. Casing pipes with couplings. Technical specification]. Kyiv, UkrNDNTS Publ., 2020. 51 p.
6. *DSTU 8935:2019. Truby nasosno-kompresorni ta mufty do nykh. Tekhnichni umovy* [State Standard 8935:2019. Tubing pipes and couplings for them. Technical specification]. Kyiv, UkrNDNTS Publ., 2020. 24 p.
7. Guangzheng J., Mantian L., Shujin Z., Fengshan W. Monitor and Control of Hydrostatic Sealing Tester for Tubing and Casing. *WRI World Congress on Software Engineering (19–21 May 2009, Xiamen, China)*. IEEE Publ., 2009, pp. 47–49. doi: 10.1109/

- WCSE.2009.323
8. Gu R. J., Liu J. G., Zhang J. G., Li P. L., Kou Y. L., Liu H. C. Simulation Study on the Heavy Parts of Pipe Hydrostatic Tester and their Structures Optimization. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, vol. 109, pp. 296–301. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.109.296
 9. *Hydrostatic pipe tester*. Available at: <https://www.hyprex.co.jp/en/technology/pdf/2013/yukuatu201308.pdf> (accessed 10.09.2024).
 10. Fatieieva N. M., Krasyl'nyk A. V., Fatyeyev O. M., Kulzhanov O. A. Doslidzhennya dynamiky hidravlichnoho mul'typlikatora [Study of the dynamics of a hydraulic multiplier]. *Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. Tezy dopovidey KhKhIKh mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi MicroCAD-2021 (18–20 travnya 2021 r., Kharkiv)* [Information technology: science, engineering, technology, education, health. Abstracts of the XXIX Int. Sci.-Pract. Conf. MicroCAD-2021 (18–20 May 2021, Kharkiv)]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, p. 123.
 11. Fatyeyev O., Fatieieva N., Poliakov V., Shyian A., Radchenko O. Design Specifics of a Built-in Diagnostic System for Hydraulic Machines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 2, pp. 78–84. doi: 10.20998/2411-3441.2023.2.12
 12. Cameron K., Pettinger A. M. Effectiveness of Hydrostatic Testing for High Strength Pipe Material. *Proc. of the 8th International Pipeline Conference. Vol. 1 (27 September–1 October 2010, Calgary, Alberta, Canada)*. ASME Publ., 2010, pp. 647–651. doi: 10.1115/IPC2010-31426
 13. Fatyeyev O., Fatieieva N., Ponomarov V. Advantages of using hydraulic equipment of modular mounting in the modernization of machine hydrosystems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 1, pp. 33–41. doi: 10.20998/2411-3441.2022.1.05

Надійшла (received) 10.09.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Фатєєв Олександр Миколайович (Fatyeyev Oleksandr) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9212-4507>; e-mail: fatyan1@ukr.net

Фатєєва Надія Миколаївна (Fatieieva Nadiia) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6955-5301>; e-mail: nadin_yak@ukr.net

Красильник Анатолій Володимирович (Krasyl'nyk Anatolii) – незалежний інженер-дослідник; м. Харків, Україна; e-mail: hydrotolik@meta.ua

Шиян Анатолій Вадимович (Shyian Anatolii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6744-085X>; e-mail: anatolii.shyian@mit.khpi.edu.ua

Поляков Валерій Валерійович (Poliakov Valerii) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-5868-9898>; e-mail: valerii.poliakov@mit.khpi.edu.ua