

*О. М. ФАТЕЄВ, Н. М. ФАТЕЄВА, А. В. ШИЯН, В. В. ПОЛЯКОВ***АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ГІДРОСТАТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ТРУБ НАФТОГАЗОВОГО СОРТАМЕНТУ**

Проаналізовано ключові фактори, що впливають на якість та достовірність гідростатичних випробувань труб нафтогазового сортаменту, які є фінальним і 100 % обов'язковим методом контролю відповідності продукції експлуатаційним характеристикам. Виробництво труб регламентується низкою міжнародних та національних стандартів (наприклад, ДСТУ EN ISO 13679:2022, API 5 CT, ДСТУ ГОСТ 3845:2019), при цьому останній стандарт визначає методику розрахунку випробувального тиску залежно від співвідношення товщини стінки до діаметра труби (S/D) та допустимого напруження матеріалу (R). Дослідження сфокусоване на аналізі роботи гідропресів, що встановлені на ділянках фінішної обробки труб, та їх гідросистеми, яка складається з контурів низького, високого тиску та оливного контуру керування. Основним критерієм оцінки якості випробування визначено стабільність підтримання тиску протягом заданого часу витримки – технологічну «смужку» тиску. Виявлено та ідентифіковано чотири основні групи негативних факторів, що знижують якість гідровипробувань: наявність повітря в трубі, що спричиняє хвилі на діаграмі тиску; витоки через запірні клапани або технологічні манжети, що призводять до падіння тиску; нерівномірність ходу поршня гідромультиплікатора, яка викликає зміну швидкості підйому або перевищення тиску; неточна робота системи налаштування та обмеження тиску. Запропоновано комплекс технічних рішень для усунення цих факторів, включаючи впровадження систем діагностики та компенсації витоків, використання датчиків лінійного переміщення для контролю ходу мультиплікатора, а також автоматизацію процесу на основі програмованих логічних контролерів зі зворотним зв'язком від датчиків тиску. Визначено подальші напрямки досліджень, що полягають у моделюванні динамічних характеристик гідросистем.

Ключові слова: гідростатичні випробування, нафтогазовий сортамент, гідропрес, гідромультиплікатор, якість випробувань, технологічна смужка, витоки, неруйнівний контроль.

*O. FATYEYEV, N. FATIEIEVA, A. SHYIAN, V. POLIAKOV***ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE QUALITY OF HYDROSTATIC TESTS OF OIL AND GAS PIPES**

The key factors affecting the quality and reliability of hydrostatic testing of oil and gas pipes, which is the final and 100 % mandatory method of checking product compliance with operational characteristics, are analysed. Pipe production is regulated by a number of international and national standards (e.g. DSTU EN ISO 13679:2022, API 5 CT, DSTU GOST 3845:2019), with the latter standard defining the method for calculating the test pressure depending on the ratio of wall thickness to pipe diameter (S/D) and the permissible stress of the material (R). The study focuses on analysing the operation of hydraulic presses installed in pipe finishing areas and their hydraulic systems, which consist of low-pressure, high-pressure and oil control circuits. The main criterion for assessing the quality of the test is the stability of pressure maintenance during a specified holding time – the technological "pressure strip". Four main groups of negative factors that reduce the quality of hydraulic tests have been identified: the presence of air in the pipe, which causes waves on the pressure diagram; leaks through shut-off valves or technological collars, leading to a drop in pressure; uneven movement of the hydraulic multiplier piston, which causes a change in the rise speed or pressure overload; inaccurate operation of the pressure adjustment and limitation system. A set of technical solutions has been proposed to eliminate these factors, including the introduction of diagnostic and leakage compensation systems, the use of linear displacement sensors to control the multiplier stroke, and automation of the process based on programmable logic controllers with feedback from pressure sensors. Further research directions have been identified, consisting in modelling the dynamic characteristics of hydraulic systems.

Keywords: hydrostatic testing, oil and gas products, hydraulic press, hydraulic multiplier, test quality, technological strip, leaks, non-destructive testing.

Вступ. Актуальність дослідження та нормативна база. Виробництво труб нафтогазового сортаменту є критично важливим сектором металургійної промисловості, оскільки якість такої продукції безпосередньо впливає на безпеку та ефективність експлуатації нафто- та газопроводів. З огляду на це, виробництво та оцінка якості труб суворо регламентується низкою міжнародних та національних стандартів. Серед них можна виділити такі ключові нормативні документи, як ДСТУ ISO 11960:2006 «Нафтогазова промисловість. Труби сталеві обсадні або насосно-компресорні для свердловин. Технічні умови» [1] та ДСТУ EN ISO 13679:2022 «Промисловість нафтова та газова. Порядок проведення випробувань з'єднань обсадних та насосно-компресорних труб» [2]. Однак, якщо в основному нормативно-технічному документі на виробництво труб не обумовлено конкретні вимоги щодо проведення гідростатичних випробувань, контроль якості проводять згідно зі стандартом ДСТУ ГОСТ 3845:2019 [3].

Оцінка якості труб, зважаючи на складність технологічних процесів їх виробництва, охоплює перевірку цілої низки основних параметрів: хімічний склад матеріалу, однорідність структури, наявність дефектів (тріщини, вклучення), відповідність технології виробництва та конструктивним параметрам (товщина стінки, діаметр), а також стійкість до експлуатаційних навантажень [4].

Роль гідростатичних випробувань у системі контролю якості. Контроль якості продукції здійснюється як неруйнівними методами випробувань, так і методом внутрішнього гідростатичного тиску. Перевірка тиском є кращою для більшості кінцевих споживачів, оскільки цей метод максимально відповідає реальним експлуатаційним характеристикам, які труба витримуватиме в умовах свердловини чи трубопроводу [5].

Рівень контролю гідростатичним тиском досягає до 100 % всіх труб, що виготовляються [6]. Цей факт підкреслює, що гідровипробування є інтегральною та фінальною операцією, яка підтверджує сукупну якість

© О. М. Фатєєв, Н. М. Фатєєва, А. В. Шиян, В. В. Поляков, 2025

виробу після проходження всіх попередніх технологічних етапів. Тому оцінка факторів, що впливають на якість проведення гідровипробувань, набуває великого значення в технології виробництва труб [7]. Для проведення цієї операції використовують гідропреси, які встановлюють на ділянці фінішної обробки труб [5].

Мета та задачі дослідження. Метою цієї роботи є проведення комплексного аналізу технологічних та апаратних факторів, які безпосередньо впливають на якість та достовірність проведення гідростатичних випробувань труб нафтогазового сортаменту.

Для досягнення поставленої мети визначено такі задачі:

- систематизувати нормативно-методичні вимоги до розрахунку випробувального тиску та критеріїв оцінки якості процесу;
- проаналізувати технологічну схему гідросистеми преса, ідентифікувати ключові контрольовані параметри;
- виявити основні негативні фактори, що спричиняють відхилення від нормативного режиму випробування;
- розробити технічні рекомендації для усунення виявлених негативних факторів та підвищення якості процесу гідровипробувань.

Нормативно-методичне забезпечення та розрахунок випробувального тиску. Якість проведення гідростатичних випробувань (ГВ) як 100 % методу контролю інтегрально залежить від коректності визначення випробувального тиску та дотримання параметрів, встановлених профільними галузевими стандартами.

Основні параметри оцінки якості труб. Оцінка якості кінцевої продукції у виробництві нафтогазового сортаменту базується на комплексі параметрів, отриманих на різних етапах технологічного циклу, які, в кінцевому підсумку, впливають на здатність труби витримати гідростатичне навантаження. До таких параметрів належать:

- хімічний склад матеріалу та однорідність мікроструктури, що визначає механічні властивості;
- наявність внутрішніх та поверхневих дефектів (тріщини, неметалеві включення), що виявляються неруйнівними методами;
- відповідність конструктивним параметрам (номінальний діаметр, товщина стінки, прямоточність);
- стійкість до експлуатаційних навантажень, що підтверджується безпосередньо ГВ.

Огляд ключових стандартів щодо гідровипробувань. Нормативна база для обсадних та насосно-компресорних труб (ОКГ, НКТ) охоплює як українські, так і міжнародні стандарти, причому вимоги до ГВ є центральними в цих документах:

- ДСТУ ГОСТ 3845:2019 «Труби. Метод випробування гідростатичним тиском». Цей стандарт є основоположним на території України, особливо у випадках, коли основні технічні умови на труби не містять конкретних вимог до методики ГВ [3].

- API Specification 5CT (Casing and Tubing). Це

ключовий міжнародний стандарт Американського інституту нафти, який визначає технічні умови постачання обсадних та насосно-компресорних труб. Згідно з API 5CT, гідростатичне випробування є обов'язковим для кожної труби [8]. Стандарт встановлює мінімальний час витримки тиску та максимальне значення випробувального тиску (зазвичай, не вище 69 МПа). Критерієм відбракування є будь-який витік.

- ДСТУ ISO 11960:2006 «Нафтогазова промисловість. Труби сталеві обсадні або насосно-компресорні для свердловин. Технічні умови». Стандарт, вимоги якого щодо ГВ значною мірою гармонізовані з API 5CT [1].

Методика розрахунку випробувального тиску. Згідно з ДСТУ ГОСТ 3845:2019, випробувальний тиск (P) для труб діаметром до 550 мм розраховується на основі геометричних параметрів та механічних властивостей матеріалу [3]. Методика враховує співвідношення товщини стінки (S) до номінального зовнішнього діаметра (D), що є ключовим показником для оцінки міцності циліндричної оболонки:

Для труб зі співвідношенням $S/D \leq 0,13$ (товстостінні труби):

$$P = \frac{2 \cdot S_p \cdot R}{D - S_p}.$$

Для труб зі співвідношенням $S/D > 0,13$ (товстостінні труби):

$$P = 2,65 \cdot \frac{S_p}{D} \cdot \left(1 - \frac{S_p}{D}\right) \cdot R,$$

де P – випробувальний гідростатичний тиск, МПа;

S_p – номінальна товщина стінки, мм;

D – номінальний зовнішній діаметр труби, мм;

R – допустиме напруження в стінці труби при випробуванні, МПа, яке визначається як частка від границі плинності σ_T або границі міцності σ_B матеріалу, згідно зі стандартом (наприклад, $R = 0,8 \cdot \sigma_T$ або $R = 0,8 \cdot \sigma_B$).

Згідно API 5CT та ДСТУ ISO 11960:2006 максимальне значення гідростатичного випробувального тиску, яке дозволяють ці стандарти, за замовчуванням становить 69 МПа [3, 4]. Випробувальний тиск (P) розраховується для кожної конкретної труби за формулою, яка враховує її геометричні параметри та мінімальну границю плинності сталі ($Y_{\min}$):

$$P = \frac{2 \cdot f \cdot Y_{\min} \cdot t}{D},$$

де P – випробувальний тиск;

f – коефіцієнт (зазвичай 0,6 або 0,8 залежно від марки сталі та розміру);

$Y_{\min}$ – мінімальна межа плинності матеріалу;

t – задана товщина стінки;

D – заданий зовнішній діаметр.

Розраховане значення округлюється до найближчого 0,5 МПа, але не повинно перевищувати встановлене максимальне значення 69 МПа (10000 psi). За домовленістю між замовником і

виробником може бути обрано вищий тиск. Випробувальний тиск, що перевищує стандартне обмеження 69 МПа, використовується для спеціалізованих труб (НКТ та обсадних) у проектах, які вимагають максимальної надійності. Це, як правило, пов'язано з експлуатацією у свердловинах з екстремальними умовами. Такі труби, які часто належать до вищих груп міцності, застосовуються для глибоких та ультраглибоких свердловин, для свердловини з високим виском і високою температурою або для труб вищих груп міцності (P110, Q125, V150) які розроблені для екстремальних умов.

Виходячи з огляду основних стандартів, слід відмітити, що розрахункове значення тиску безпосередньо залежить від точності визначення товщини стінки труби та зовнішнього діаметру, а також від достовірності даних про механічні властивості матеріалу [4; 7]. Будь-яке відхилення від цих параметрів у процесі виробництва може призвести до невірної оцінки навантаження і, відповідно, вплинути на якість випробування.

Технологічна схема та обладнання гідропреса.

Місце гідропреса у технологічному циклі виробництва. Гідростатичні випробування являють собою невід'ємну складову кінцевої фази виготовлення труб нафтогазового сортаменту [9]. Для реалізації стовідсоткового контролю на ділянці фінішної обробки труб встановлюються гідростатичні гідропresi. Сучасна конструкція гідропреса має високий ступінь автоматизації та інтегрована в загальну лінію виробництва. Основні вузли забезпечують надійну фіксацію кінців труби, герметизацію внутрішнього об'єму і наступне створення в ньому випробувального тиску. Загальний вигляд випробувального гідропреса представлено на рис. 1. Значні габарити обумовлені максимальним осевим зусиллям (випробувальним тиском) та довжиною труб, які випробуються, як правило від 6 м до 14 м.

Технологічний процес випробування є циклічним та складається з трьох основних послідовних інтервалів:

- наповнення труби: на цьому етапі відбувається попереднє заповнення труби робочою рідиною, в якості якої, як правило, використовується вода або водна емульсія. Кінцевою метою є повне витіснення

повітря з внутрішнього об'єму труби, що є необхідною умовою для подальшого точного та стабільного створення тиску, оскільки рідина є практично нестисливим середовищем;

- підйом тиску: на цьому інтервалі гідропрес за допомогою гідромультиплікаторів нагнітає внутрішній тиск рідини від атмосферного або низького рівня до розрахункового випробувального значення (P). Швидкість наростання тиску повинна бути контрольованою, щоб уникнути динамічних навантажень та гідравлічних ударів, які можуть призвести до хибного руйнування або пошкодження обладнання [10];

- витримка під випробувальним тиском: це ключовий етап контролю, на якому тиск повинен підтримуватися на постійному, заданому стандартом рівні протягом встановленого часу.

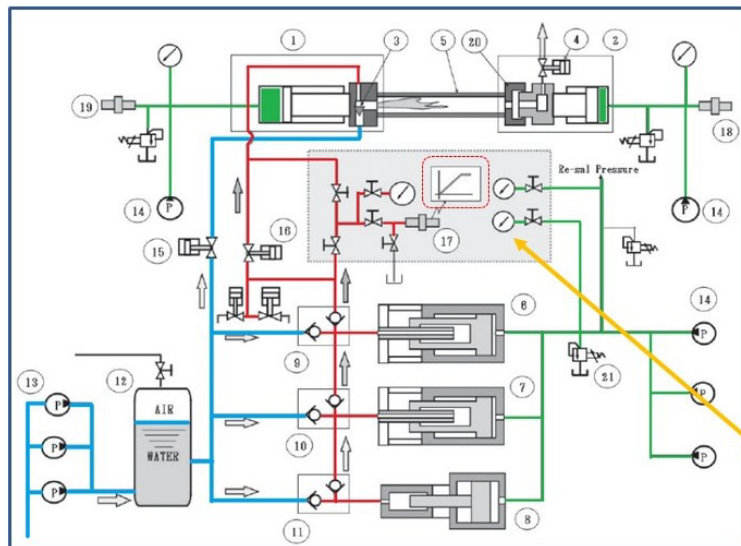
Структурна організація та функціональні контури гідросистеми преса. Для забезпечення точного, швидкого та безпечного виконання циклу випробувань гідросистема преса має комбіновану архітектуру [11], що базується на трьох основних, функціонально незалежних контурах: водяних гідросистемах низького та високого тиску, а також олійній системі керування (рис. 2).

Водяна гідросистема низького тиску призначена для початкової фази випробування. Її ключова роль полягає у попередньому наповненні труби робочою рідиною, як правило, водою або водною емульсією, для повного витіснення повітря. Цей контур також слугує для промивання труби та забезпечення живлення гідромультиплікаторів. До її складу входять насоси наповнення, ресівер та відповідна керуюча арматура.

Водяна гідросистема високого тиску є основним виконавчим контуром. Вона відповідає за нагнітання випробувального тиску до розрахункового значення, встановленого нормативною документацією, подальше підтримання цього тиску протягом нормованого часу витримки та, відповідно, розвантаження системи від тиску після завершення контрольного інтервалу. Центральними елементами цього контуру є гідромультиплікатори, які забезпечують перетворення низького тиску рідини на надвисокий тиск, а також комплекси зворотних та розвантажувальних клапанів, що контролюють потоки і рівень тиску.



Рис. 1. Загальний вигляд гідропреса для гідростатичного випробування труб



Джерело: huprex.jp

Рис. 2. Структурна організація та функціональні контури гідросистеми преса

4

Оливна гідросистема керування виконує функцію прецизійного управління. Вона використовується для активації та регулювання ключових виконавчих механізмів, де потрібна висока точність і швидкість спрацьовування. До її функцій належить керування гідромультплікаторами, позиціонування клапанів високого тиску, а також робота силових гідроциліндрів, які здійснюють фіксацію та герметизацію кінців труби. Цей контур включає насосну установку та клапани обмеження тиску, що гарантують надійну та контрольовану роботу гідравлічних компонентів [12].

Система моніторингу та контролю процесу. Для забезпечення достовірності випробувань гідропрес обладнаний комплексною панеллю контролю. Вона функціонує на базі промислового контролера (ПЛК), який взаємодіє з сертифікованими контрольно-вимірювальними приладами (КВП). Ця система забезпечує безперервний моніторинг критично важливих параметрів у режимі реального часу, включаючи:

- тиск рідини в трубі (фактичне значення випробувального тиску);

- тиск рідини в лінії гідромультплікатора (керуючий тиск);

- хід та швидкість переміщення поршня гідромультплікатора (для оцінки динаміки наростання тиску).

Зібрані дані формують діаграму процесу випробування, яка є основним інструментом для оцінки стабільності «смужки» тиску та діагностування можливих апаратних [13] або технологічних відхилень (рис. 3).

Аналіз факторів, що впливають на якість гідростатичних випробувань, та методи їх усунення. Критерії оцінки якості процесу випробування. Якість проведення гідростатичних випробувань є критичним показником, що інтегрально відображає як фізико-механічні характеристики самої труби, так і точність функціонування випробувального обладнання. Дотримання якості випробування регламентується такими нормативними вимогами:

- час витримки тиску повинен становити не менше ніж 5 с (згідно зі стандартами на кшталт ДСТУ ГОСТ 3845);

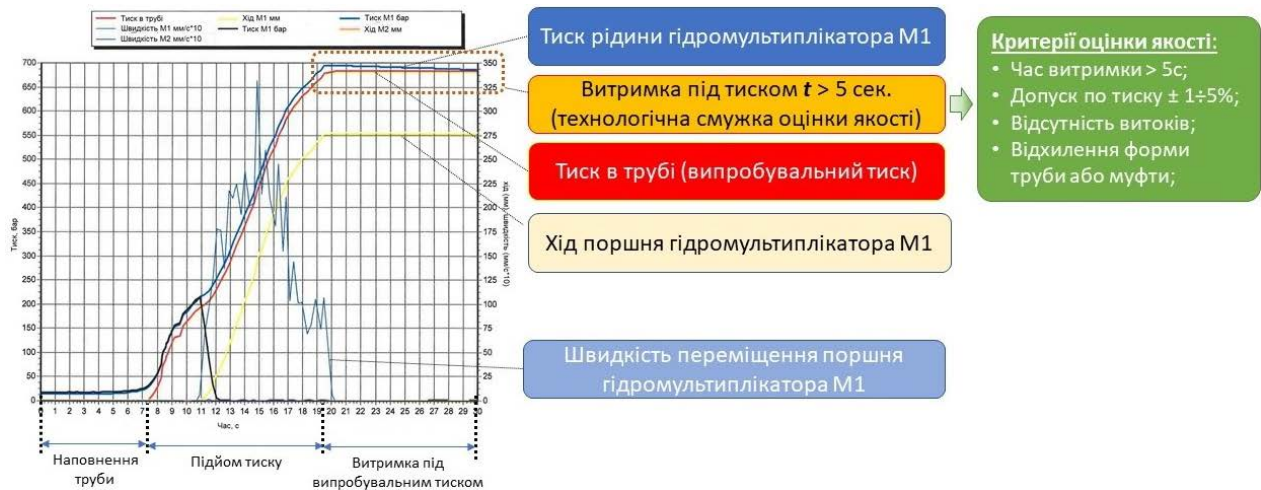


Рис. 3. Діаграма процесу проведення гідростатичного випробування труби

- допустиме відхилення за тиском від номінального значення має перебувати у вузькому діапазоні, що зазвичай становить $\pm 1-5\%$;

- відсутність витоків (що контролюється візуально, а також за стабільністю тиску);

- відсутність неприпустимих відхилень форми труби або муфти, що контролюється сертифікованим вимірювальним інструментом.

Ідентифікація та діагностика негативних факторів. Основним критерієм оцінки якості всього процесу випробування є стабільність підтримання випробувального тиску на етапі витримки. Ця стабільність графічно відображається на діаграмі процесу у вигляді технологічної «смушки» (або «полиці») тиску. Таким чином, будь-яке відхилення від параметрів «смушки» тиску (коливання, різке падіння чи перевищення) свідчить про наявність технологічних чи апаратних проблем, які ставлять під сумнів достовірність отриманого результату ГВ.

Критичні негативні фактори, які впливають на якість гідростатичних випробувань представлено на рис. 4.

Ці фактори можна систематизувати таким чином:

- присутність газових включень (повітря) у робочій рідині. Неповне витіснення повітря з внутрішнього об'єму труби на етапі наповнення призводить до суттєвого збільшення стисливості середовища, що піддається випробуванню. У гідросистемі це проявляється як гідравлічна пружність. Коли гідромультіплікатор починає нагнітати високий тиск, наявність повітря спричиняє коливання (так звані «хвилі») на графіку тиску, що фіксується датчиком тиску. Такі коливання ускладнюють точне регулювання системи автоматики та знижують достовірність випробування, оскільки фактичний тиск постійно виходить за межі допустимого допуску.

Негерметичність системи (витоки). Недотримання герметичності системи є одним із найбільш поширених факторів, що спричиняють порушення технологічного режиму. Витоки можуть мати внутрішнє або зовнішнє походження:

- внутрішні витоки виникають через неповне закриття або зношення запірних клапанів високого

тиску у гідросистемі;

- зовнішні витоки найчастіше спостерігаються через дефекти технологічних манжет, які ущільнюють кінці труби [14].

Будь-який тип витоку призводить до критичного падіння тиску на етапі витримки, що, у свою чергу, виводить параметр стабільності тиску за межі допуску. Це може призвести до хибного відбракування труби через підозру на її власну негерметичність, тоді як фактична проблема полягає у функціонуванні технологічного обладнання.

Нерівномірність динаміки роботи гідромультіплікатора [10]. Гідромультіплікатор є ключовим елементом, що забезпечує перехід до високого тиску. Нерівномірність ходу його поршня спричинена, як правило, порушеннями у роботі оливного контуру керування або механічним зносом. Така нестабільна швидкість поршня викликає нелінійну зміну швидкості підйому тиску. Це призводить до:

- появи додаткових пульсацій (хвиль) на діаграмі тиску;

- ризику перевищення заданого випробувального тиску.

Створення додаткових динамічних навантажень на трубу, що не відповідають нормативним вимогам до статичного випробування.

Похибка налаштування та обмеження тиску. Недостатня точність роботи системи налаштування та обмеження випробувального тиску, яка реалізується через пропорційні або запобіжні клапани, може стати причиною неконтрольованого стрибкоподібного перевищення тиску. Якщо фактичний тиск значно перевищує розрахункове значення, це не лише створює небезпечні умови експлуатації обладнання, але й може призвести до руйнування труби, яка за своїми фізико-механічними властивостями є цілком придатною до експлуатації. Це призводить до необґрунтованих виробничих втрат.

Заходи щодо усунення негативних факторів та підвищення якості. Для нівелювання впливу ідентифікованих негативних факторів та підвищення достовірності ГВ необхідна комплексна модернізація системи моніторингу та керування пресом:

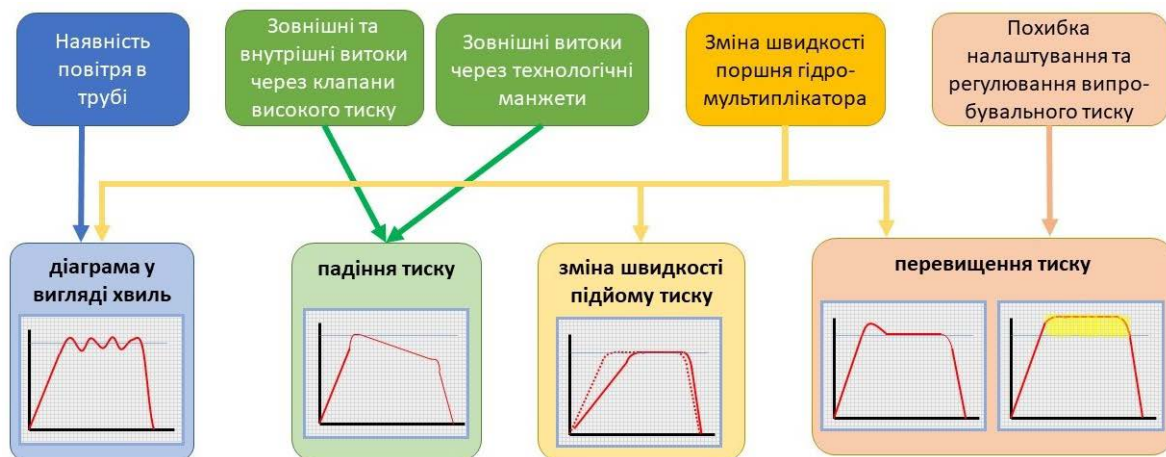


Рис. 4. Негативні фактори, що впливають на якість гідростатичних випробувань

- усунення витоків та їх компенсація: раціональним рішенням є впровадження автоматизованої системи діагностики [13] та компенсації витоків. Така система повинна використовувати високоточні датчики для ідентифікації незначного падіння тиску та здійснювати дозовану подачу рідини для підтримки його в межах нормативної «смушки». Паралельно необхідне вдосконалення конструкцій та матеріалів технологічних манжет з метою підвищення їхньої надійності та стійкості до високих тисків, що є первинним заходом для мінімізації зовнішніх витоків;

- контроль та стабілізація динаміки мультиплікатора: для забезпечення рівномірної роботи гідромultiплікатора та контролю за швидкістю підйому тиску необхідно інтегрувати датчик лінійного переміщення (наприклад, магнітострикційний) для безперервного моніторингу положення та швидкості поршня. Отримані дані використовуються промисловим контролером для зворотного зв'язку та прецизійного керування оливним контуром;

- поліпшення регулювання тиску через автоматизацію: для підвищення точності налаштування та обмеження випробувального тиску доцільно застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК). ПЛК реалізують складніші алгоритми керування, використовуючи дані від високоточних датчиків тиску як вхідний сигнал. Це забезпечує оперативну корекцію основних параметрів насоса (тиск, витрата) та позиції пропорційних клапанів, гарантуючи, що тиск підтримується стабільно у заданому вузькому діапазоні протягом всього часу витримки [15];

Для забезпечення компактності проєктованого обладнання для систем моніторингу та керування пресом доцільно використовувати гідроапаратуру модульного монтажу [16].

Висновки. Проведений аналіз підтвердив, що якість гідростатичних випробувань труб нафтогазового сортаменту, які є критичним 100 % методом контролю, визначається не лише властивостями металу, але й стабільністю та точністю роботи випробувального гідропреса. Основним критерієм достовірності є стабільність підтримання випробувального тиску – технологічна «смушка» – у вузькому нормативному допуску.

У процесі дослідження ідентифіковано чотири ключові групи негативних факторів: присутність повітря, витoki, нерівномірність ходу гідромultiплікатора та похибка системи регулювання. Вплив цих факторів проявляється у вигляді гідравлічних коливань, падіння тиску чи його неконтрольованого перевищення, що призводить до зниження достовірності контролю та ризику необґрунтованих виробничих втрат.

Для підвищення якості випробувань запропоновано комплекс заходів, що базуються на автоматизації та прецизійному контролі. Це включає впровадження систем компенсації витоків, використання датчиків лінійного переміщення для

контролю динаміки мультиплікатора та застосування програмованих логічних контролерів (ПЛК) для реалізації високоточного контуру зворотного зв'язку, що коригує тиск.

Практична цінність роботи полягає в обґрунтуванні необхідності модернізації обладнання для забезпечення відповідності вимогам міжнародних стандартів, зниження хибного відбракування та підвищення загальної надійності трубої продукції.

Перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз окреслив низку напрямків, які потребують подальшого поглибленого вивчення:

- моделювання та аналіз динамічних характеристик: створення детальних математичних моделей, що описують динамічні характеристики роботи ключових гідравлічних компонентів (гідромultiплікатора, клапана налаштування тиску) з метою оптимізації їхніх робочих режимів;

- синтез оптимальних схемних рішень: розробка та обґрунтування нових, більш ефективних схемних рішень гідросистем, які забезпечують максимальну швидкість реакції на збурення.

- розробка адаптивних алгоритмів керування: створення алгоритмів на базі ПЛК, здатних адаптивно коригувати параметри випробування в реальному часі залежно від змінних умов системи.

Список літератури

1. ДСТУ 11960:2006. *Нафтогазова промисловість. Труби сталеві обсадні або насосно-компресорні для свердловин. Технічні умови (ISO 11960:2004, IDT)* / Нац. стандарт України. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 60 с.
2. ДСТУ 13679:2022. *Промисловість нафтова та газова. Порядок проведення випробувань з'єднань обсадних та насосно-компресорних труб (EN ISO 13679:2019, IDT; ISO 13679:2019, IDT)* / Нац. стандарт України. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
3. ДСТУ 3845:2019. *Труби металеві. Метод випробування гідростатичним тиском (ГОСТ 3845:2017, IDT)* / Нац. стандарт України. Київ : УкрНДНЦ, 2019. 8 с.
4. McAllister E. W. *Pipeline Rules of Thumb Handbook. Quick and Accurate Solutions to Your Everyday Pipeline Problems*. Gulf Professional/Elsevier, 2009. 747 p.
5. Фатєєв О. М., Фатєєва Н. М., Красильник А. В., Шиян А. В., Поляков В. В. Технології гідростатичних випробувань у металургійній промисловості. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2024. No. 1. P. 71–75. doi: 10.20998/2411-3441.2024.1.10
6. Adjogbe S., Okoronkwo C., Oguoma O., Igbokwe J., Okwu M. Investigation of the Effect of Hydrostatic Pressure Testing on the Microstructure of Carbon Steel Pipeline Material. *AASCIT Journal of Materials*. 2018. Vol. 4, no. 3. P. 58–65.
7. Wen K., He L., Yu W., Gong J. A Reliability Assessment of the Hydrostatic Test of Pipeline with 0.8 Design Factor in the West-East China Natural Gas Pipeline III. *Energies*. 2018. Vol. 11, issue 5. P. 1197. doi: 10.3390/en11051197
8. *API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing*. Washington: American Petroleum Institute, 2018. 250 p.
9. *EIM. Hydrostatic Testing in Oil and Gas Industry*. URL: <https://excellenceintegrity.com/hydrostatic-testing/> (дата звернення: 10.11.2025).
10. Фатєєва 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 : HTU «XPI», 2021. С. 123.
11. *Hydrostatic pipe tester*. URL: <https://www.hyprex.co.jp/en/technology/pdf/2013/yukuatu201308.pdf> (дата звернення:

- 10.09.2025).
12. Роговий А. С., Панамарьова О. Б., Тиньянова І. І., Рєзва К. С. *Проектування гідравлічних приводів: навч.-метод. посіб.* Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 156 с.
 13. 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
 14. Bezghachniuk Y., Shtaiier L. Overview of Modern Leak Detection Methods for Pipelines. *International Science Journal of Engineering & Agriculture.* 2024. Vol. 3, no. 3. P. 43–50. doi: 10.46299/j.isjea.20240303.04
 15. An W., Ma Y., Xu H., Ke E., Liao X., Zhao R. Research and Application Analysis of Intelligent Control Strategy for Water Injection Pump in Offshore Oil and Gas Field. *Water.* 2025. Vol. 17, issue 10. P. 1506. doi: org/10.3390/w17101506
 16. Фатєєв Н. М., Шиян О. Е., Поляков В. В., Шиян А. В., Охріменко Д. О. Особливості проектування гідравлічних систем на базі модульної гідроапаратури. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv: NTU "KhPI". 2024. No. 2. P. 86–94. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.13
- References (transliterated)**
1. *DSTU ISO 11960:2006. Naftohazova promyslovist'. Truby stalevi obsadni abo nasosno-kompresorni dlya sverdlonyn. Tekhnichni umovy* [State Standard 11960:2006. Petroleum and natural gas industries. Steel pipes for use as casing or tubing for wells. Specifications]. Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrainy Publ., 2008. 60 p.
 2. *DSTU EN ISO 13679:2022. Promyslovist' naftova ta hazova. Poryadok provedennya vyprobuvan' z'yednan' obsadnykh ta nasosno-kompresornykh trub* [State Standard 13679:2022. Petroleum and natural gas industries. Procedures for testing casing and tubing connections]. Kyiv, DP "UkrNDNTs" Publ., 2022.
 3. *DSTU GOST 3845:2019. Truby metalevi. Metod vyprobuuvannya hidrostatchnym tyskom* [State Standard 3845:2019. Metallic pipes. Internal hydrostatic pressure testing method]. Kyiv, UkrNDNTS Publ., 2019. 8 p.
 4. McAllister E. W. *Pipeline Rules of Thumb Handbook. Quick and Accurate Solutions to Your Everyday Pipeline Problems.* Gulf Professional/Elsevier Publ., 2009. 747 p.
 5. Fatyeyev O. M., Fatieieva N. M., Krasyl'nyk A. V., Shyian A. V., Poliakov V. V. Tekhnolohiyi hidrostatchnykh vyprobuvan' u metalurhiyniy promyslovosti [Hydrostatic testing technologies in the metallurgical industry]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 1, pp. 71–75. doi: 10.20998/2411-3441.2024.1.10
 6. Adjogbe S., Okoronkwo C., Oguoma O., Igbokwe J., Okwu M. Investigation of the Effect of Hydrostatic Pressure Testing on the Microstructure of Carbon Steel Pipeline Material. *AASCIT Journal of Materials.* 2018, vol. 4, no. 3, pp. 58–65.
 7. Wen K., He L., Yu W., Gong J. A Reliability Assessment of the Hydrostatic Test of Pipeline with 0.8 Design Factor in the West-East China Natural Gas Pipeline III. *Energies.* 2018, vol. 11, issue 5, p. 1197. doi: 10.3390/en11051197
 8. *API Specification 5CT. Specification for Casing and Tubing.* Washington, American Petroleum Institute Publ., 2018. 250 p.
 9. *EIM. Hydrostatic Testing in Oil and Gas Industry.* Available at: <https://excellenceintegrity.com/hydrostatic-testing/> (accessed 10.11.2025).
 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]. *Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. Tezy dopovidey XXIX 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. *Hydrostatic pipe tester.* Available at: <https://www.hyprex.co.jp/en/technology/pdf/2013/yukuatu201308.pdf> (accessed 10.09.2025).
 12. Rogovyi A. S., Panamar'ova O. B., Tyn'yanova I. I., Ryezva K. S. *Proyektuvannya hidravlichnykh pryvodiv* [Design of hydraulic drives]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023. 156 p.
 13. 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
 14. Bezghachniuk Y., Shtaiier L. Overview of Modern Leak Detection Methods for Pipelines. *International Science Journal of Engineering & Agriculture.* 2024, vol. 3, no. 3, pp. 43–50. doi: 10.46299/j.isjea.20240303.04
 15. An W., Ma Y., Xu H., Ke E., Liao X., Zhao R. Research and Application Analysis of Intelligent Control Strategy for Water Injection Pump in Offshore Oil and Gas Field. *Water.* 2025, vol. 17, issue 10, p. 1506. doi: org/10.3390/w17101506
 16. Fatieieva N. M., Fatyeyev O. M., Polyakov V. V., Shyian A. V., Okhrimenko D. O. Osoblyvosti proyektuvannya hidravlichnykh system na bazi modul'noyi hidroaparaty [Features of designing hydraulic systems based on modular hydraulic equipment]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units.* Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 2, pp. 86–94. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.13

Надійшла (received) 06.10.2025

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

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