

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах  
рукопису

Копей Ігор Богданович

УДК 622.276.054

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОЦІНКА, ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ**  
**ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ СВЕРДЛОВИННИХ НАСОСНИХ**  
**УСТАНОВОК**

05.05.12 - машини нафтової і газової промисловості

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 І.Б.Копей

Науковий керівник: Лопатін Валерій Володимирович, д-р. техн. наук, с.н.с.

**Парайко Юрій Іванович**, канд. техн. наук

## АНОТАЦІЯ

*Koneй I.B.* Оцінка, прогнозування та підвищення надійності обладнання штангових свердловинних насосних установок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, МОН України, Івано-Франківськ, 2020.

**У вступі** обґрунтовано актуальність, сформульовано мету і основні завдання дисертаційної роботи, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

**В першому розділі** проведено аналіз умов експлуатації обладнання штангових свердловинних насосних установок та виділені основні причини відмов, такі як корозійне руйнування; деформація і злами; зношування; відкладання на робочих поверхнях обладнання різних речовин, які містяться в експлуатаційних середовищах.

На основі зібраних статистичних даних по відмовах свердловинного обладнання проведено аналіз надійності свердловинних насосів, колон насосних штанг (НШ) та насосно-компресорних труб (НКТ). Отримані рівняння регресії, які дозволяють визначити ймовірність безвідмовної роботи свердловинного обладнання. Графічні та аналітичні залежності, отримані в результаті аналізу, дозволяють оцінювати можливу глибину обриву штангової колони з певною ймовірністю для штанг різного діаметра та різних діаметрів насосів.

Для збору та оброблення даних про стан свердловинного обладнання використовують різноманітні діагностичні системи та комплекси, які оснований в основному на динамометруванні та ватметруванні. Вдосконалення таких діагностичних комплексів дозволяє створювати бази

даних на нафтовидобувних підприємствах, які використовуються для відстежування правильності розробки родовища і руху обладнання нафтопромислу.

**У другому розділі** розглянуто світовий досвід підвищення надійності колон насосних штанг і насосно-компресорних труб. Досвід експлуатації свердловинного обладнання штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) показує, що надійна робота досягається при дотриманні наступних основних вимог: правильного вибору складу конструкційної сталі чи сплаву; підбір твердості матеріалу; врахування впливу середовища на механічні властивості сталі чи сплаву; термічна обробка виробів для зняття внутрішніх напружень; контроль якості виготовлення.

Значний досвід у підвищенні надійності насосних штанг набули провідні компанії National Oilwell Varco, Norris Rods, Continental Emsco, Trico, Battenfeld, Weatherford International Ltd., Sovonex, Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG. Оригінальні конструктивні рішення для підвищення надійності насосно-компресорних труб застосовують фірми "Атлас Брэдфорд", "Маннесман", "Валурек".

Останнім часом велику увагу приділяють використанню полімерно-композиційних матеріалів для виготовлення насосних штанг і НКТ. Розглянуто області застосування насосних штанг і НКТ з полімерно-композиційних матеріалів (ПКМ), технологія їх виготовлення, порівняльні характеристики зі сталевими, переваги та недоліки застосування.

**В третьому розділі** приведені методики, наведено опис обладнання та зразки для випробовувань насосних штанг з полімерно-композиційних матеріалів.

Випробовування проводились на статичну міцність при дії розтягуючих навантажень; на витривалість при дії циклічних навантажень; на хімічну та корозійну стійкість при дії технологічних рідин з наступним механічними випробовуваннями; на зношування в різних середовищах.

Механічні випробовування зразків при статичному навантаженні проводились на розривній машині МР-50. Для випробовувань

використовувались склопластикові зразки для виробництва штанг діаметром 22 мм фрезеровані з двох сторін на довжину 130 мм і товщиною 15 мм та базальтопластикові зразки довжиною 100 мм з робочою частиною довжиною 40 мм та діаметром 7 мм.

Для натурних випробовувань насосних штанг на витривалість при дії циклічних навантажень використовувався стенд ЗКШ-25, який здійснює консольно-поперечний згин зразків довжиною до 500 мм з частотою навантаження 16 Гц. Для імітації нафтоводяної суміші в якості корозійного середовища використовувалась нафта Північно-Долинського родовища; пластова вода; розчини соляної кислоти (5%, 10%, 15%); мінералізована пластова вода; комбінування між собою таких середовищ, як нафта Північно-Долинського родовища, пластова вода, розчини соляної кислоти, мінералізована пластова вода.

Метою проведення випробовувань на зношування є визначення інтенсивності лінійного і масового зносу при терті сталевих зразків і зразків з ПКМ визначення характеру зношування зразків з сталей і ПКМ при сухому терті і при терті в корозійно-агресивних середовищах. Дослідження зношування полімерно-композиційних матеріалів проводились на машині тертя 2070 СМТ-1 по схемі “диск-колодка”.

Проведено мікроструктурний аналіз і аналіз на хімічний склад полімерно-композиційних матеріалів, що використовуються для виготовлення насосних штанг і НКТ, визначено відсоткове співвідношення складників.

**В четвертому розділі** розроблено математичну модель з’єднання сталеві головки з полімерним композиційним тілом насосної штанги. В основу досліджень контактних напружень циліндричної труби – склопластикової штанги покладено узагальнену теорію оболонок Тимошенка С.П., яка враховує зсувну жорсткість і анізотропію фізико-механічних властивостей матеріалу. Як показують результати моделювання, цілеспрямованою зміною пружних характеристик оболонки параметра ортотропії, параметра зсувної податливості, величини зчеплення, можна

істотно впливати на міцність з'єднання сталеві головки з склопластиковою штангою.

На основі методики розрахунків контактних напружень при взаємодії циліндричної труби-оболонки із жорсткими бандажами запропоновано ряд конструктивних рішень, які можуть бути реалізовані в з'єднанні сталеві головки з полімерним композиційним тілом насосної штанги.

Експериментальні дослідження НШ з ПКМ на статичну міцність показали, що границя міцності на розрив склопластикових НШ звичайної міцності досягає 445 МПа, підвищеної міцності 555 МПа.

В результаті випробовувань на витривалість встановлено, що штанги з полімерно-композиційного матеріалу мають більш високі характеристики витривалості, ніж сталеві, і ця перевага проявляється при числі циклів навантаження, які перевищують 2-5 млн.

Сформульована і розвинута концепція руйнування полімерно-композиційних матеріалів з врахуванням ефектів поглинання енергії на міжфазових границях.

Механізм зносу полімерно-композиційних матеріалів має втомний характер. Інтенсивність зношування склопластикових і базальтопластикових зразків при терті в нафті наближається до інтенсивності зношування сталі при сухому терті. На механізм зносу ПКМ і інтенсивність зношування при терті по твердих поверхнях суттєвий вплив мають температура в зоні тертя і швидкість ковзання.

**В п'ятому розділі** розроблений якісно новий програмний комплекс діагностування свердловин, що експлуатуються ШСНУ. Комплекс складається із двох самостійних вимірювальних систем, загальними елементами яких є персональний комп'ютер і електронний блок-перетворювач сигналів з давачів. Створення сучасних мобільних вимірювальних систем контролю для діагностування параметрів ШСНУ вимагає не просто заміни колишніх аналогових давачів, приладів і систем на цифрові, але і повинно припускати істотне підвищення точності контролю

шляхом використання високоефективних методів, що застосовуються в передових наукоємких галузях промисловості.

Для розробленого діагностичного комп'ютерного комплексу запропонований давач зусиль, що працює на розтяг.

Для нафтопромислового обладнання на даний час відсутні достатньо обґрунтовані величини наробітків деталей між відмовами, а також методичні підходи для їх визначення, що стримує широке і ефективне застосування системи планових ремонтів, призводить до значних простоїв виробничих об'єктів в зв'язку з несправністю обладнання. Застосування запропонованого методу визначення оптимального наробітку деталей та вузлів ШСНУ дозволяє більш ефективно здійснювати ремонт обладнання, розраховувати потрібну кількість запасних частин, збільшити ефективність системи планових ремонтів, якість виготовлення обладнання та його ремонту, що в кінцевому рахунку призводить до зниження простоїв об'єктів видобування нафти.

Використання обчислювальної техніки в організації планування ремонтних робіт ШСНУ дасть можливість зберігати в пам'яті комп'ютера дані про характеристику і параметри роботи обладнання, стан вузлів і деталей; швидко і з необхідною точністю обчислювати наробіток вузла чи деталі і порівнювати його з граничним значенням; розраховувати параметри надійності ШСНУ і його деталей; розробляти графіки заміни відпрацьованих вузлів і деталей.

Запропоновано аналітичний і графічний метод визначення оптимального міжремонтного періоду, який оснований на мінімізації питомих витрат на відновлення працездатного стану ШСНУ у випадку її відмови, що дозволить розробляти раціональні план-графіки ремонту обладнання.

Для прогнозування ресурсу роботи НШ запропоновано застосування теорії ланцюгів Маркова.

Промислові випробування насосних штанг з склопластику були проведені ІФНТУНГ на промислах НГВУ «Долинанафтогаз» на замовлення

Дніпропетровського відділення Української академії наук національного прогресу.

Розроблені та затверджені технічні умови на насосні штанги з склопластику.

**Ключові слова:** штангова свердловинна насосна установка, насосна штанга, свердловинний насос, полімерно-композиційний матеріал, склопластик, надійність, наробіток, системи діагностування.

## ANNOTATION

*Kopey I.B.* Estimation, forecasting and improvement of equipment reliability for sucker rod pumping units. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.05.12 – machines of the oil and gas industry. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2020.

**The introduction** substantiates the relevance, formulates the purpose and main tasks of the dissertation, highlights the scientific novelty and the practical significance of the results obtained, the personal contribution of the applicant, the approbation of the work, its structure and scope.

**In the first section**, an analysis of the operating conditions of well sucker rod pump equipment and the main causes of failures, such as corrosion failure, are identified; deformation and fracture; wear; postponing on the working surfaces of equipment of various substances contained in the operating environment.

Based on the collected statistical data on failures of well equipment, an analysis of the reliability of standardized pumps, columns of sucker rods and tubing was conducted. The regression equations, which allow determining the probability of failure-free operation of well equipment, were obtained. The graphical and analytical dependencies as a result of the analysis allow us to estimate the possible depth of the breakage of the rod column with a certain

probability for a rod of different diameters and different diameters of the pumps were obtained.

Various diagnostic systems and complexes are used to collect and process data on the state of the well equipment, which are based mainly on dynamometry and watt metering. Improvement of such diagnostic complexes allows us to create databases at oil-producing enterprises that are used to track the proper development of the field and the movement of equipment for oil exploration.

**The second section** examines the world experience in improving the reliability of columns of pump rods and tubings. The experience of the operation of the well equipment of the SRPU shows that reliable work is achieved with the following basic requirements: the correct choice of structural steel or alloy composition; selection of hardness of a material; taking into account the influence of the medium on the mechanical properties of steel or alloy; thermal treatment of products for removal of internal stresses; manufacturing quality control.

The leading companies in National Oilwell Varco, Norris Rods, Continental Emsco, Trico, Wattenfeld, Weatherford International Ltd., Sovonex, Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG have gained considerable experience in improving the reliability of the sucker rods. The original design solutions for improving the efficiency of the tubing are used by the companies Atlas Bradford, Mannesman, Valourec.

Recently, much attention has been paid to the use of polymer-composite materials for the manufacture of sucker rods and tubing. Areas of application of sucker rods and tubing made of polymer-composite materials, technology of their manufacture, comparative characteristics with steel, advantages and disadvantages of application are considered.

**In the third section,** a methodology is developed; a description of equipment and samples for tests of sucker rods made of polymer-composite materials is given. Tests were conducted on static strength under the action of tensile loads; on endurance under the action of cyclic loads; to chemical and corrosion resistance



under the influence of technological fluids with subsequent mechanical tests; to wear in various environments. Mechanical tests of samples under static load are carried out on a discontinuous machine MP-50. For field tests of sucker rod on endurance under the action of cyclic loads, a unit ZKSH-25 is used. For tests, glass-plastic samples are used for the production of a 22 mm diameter sucker rod, milling on both sides, 130 mm in length and 15 mm in thickness, and basalt-plastic specimens in length of 100 mm with a working part in length of 40 mm and a diameter of 7 mm. To simulate the oil-and-gas mixture as a corrosive medium, the oil of the North-Dolyna deposit is used; formation water; solutions of hydrochloric acid (5%, 10%, 15%); mineralized reservoir water; combining among such environments such as oil of the North Dolyna deposit, reservoir water, hydrochloric acid solutions, mineralized reservoir water. The purpose of testing for wear is to determine the intensity of linear and mass wear when friction of steel samples and samples with PCM determine the nature of deterioration of samples from steels and PCM with dry friction and friction in corrosive and aggressive environments. The research of wear of polymeric-composite materials is carried out on a friction machine 2070 SMT-1. Testing of samples on a SMT-1 friction machine is carried out according to the "disk-block" scheme. The microstructural analysis and analysis on the chemical composition of polymer-composite materials used for the manufacture of sucker rods and tubing, a percentage ratio of components is determined.

**In the fourth section** a mathematical model of connection of a steel head with a polymer composite body of a sucker rod was developed. The basis of research on the contact stresses of a cylindrical tube - a fiberglass rod - is the generalized theory of shells of Tymoshenko, which takes into account the shear rigidity and anisotropy of the physical and mechanical properties of the material. As the results of simulation show, the purposeful change in the elastic characteristics of the shell of the parameter of orthotropy, the shear flexibility parameter, and the size of the bandage, can significantly affect the strength of the

connection of the steel head with a fiberglass rod. On the basis of the method of calculation of contact stresses in the interaction of a cylindrical shell-shell with rigid bandages, a number of constructive solutions are proposed that can be implemented in the connection of a steel head with a polymeric compositional body of a pump rod. Experimental studies of sucker rods made of PCM on static strength showed that the breaking strength of fiberglass plastics of ordinary strength reaches 445 MPa, an increased strength of 555 MPa.

As a result of endurance tests, it has been established that the polystyrene-composite material rods have higher endurance characteristics than steel, and this advantage is manifested in the number of load cycles exceeding 2-5 million. The concept of destruction of polymeric-composite materials with the account of energy absorption effects on interphase boundaries is formulated and developed.

The mechanism of wear of polymer-composite materials is studied. The intensity of deterioration of specimens made of fiberglass and basalt plasticization with friction in oil is approaching the intensity of wear of steel with dry friction. On the mechanism of wear of PCM and the intensity of wear at friction on solid surfaces, the temperature is strongly influenced by the temperature in the friction zone and the slip speed.

**In the fifth section** a qualitatively new software complex for diagnosing wells, operated by the SRPU, was developed. The complex consists of two independent measuring systems, the common elements of which are personal computer and electronic block converter of signals from the sensors. The creation of modern mobile measurement control systems to diagnose SRPU parameters requires not just the replacement of former analogue sensors, devices and systems on a digital basis, but also requires a significant increase in the accuracy of control through the use of high-performance methods used in advanced scientific-intensive industries.

For a developed diagnostic computer complex, a sensor for tension is proposed.

For oilfield equipment, there are currently not sufficiently substantiated quantities of workpiece details between failures, as well as methodological approaches to their determination, which holds back the widespread and effective use of the system of planned repairs, leads to significant downtime of production facilities due to equipment failure. The application of the proposed method for determining the optimal use of parts and assemblies of SRPU allows for more efficient repair of equipment, counting the required number of spare parts, increasing the efficiency of the system of planned repairs, the quality of the manufacture of equipment and repair, which ultimately leads to a decrease in downtime for oil production facilities. The use of computer technology in the organization of the planning of repair works of the SRPU will enable to store in the memory of the computer data on the characteristics and parameters of the equipment, the state of the assemblies and parts; quickly and accurately calculate the work of the site or component and compare it with the limit values; to calculate the reliability parameters of SRPU and its parts; develop schedules for replacing worn assemblies and parts.

The analytical and graphical method of determination of the optimal inter-repair period is proposed, which is based on minimization of specific expenses for restoration of the working state of the SRPU in case of its failure, which will allow to develop rational schedules of repair of equipment. The use of the theory of Markov chains is proposed to predict the work resource of sucker rod. Industrial testing of pumping rods from fiberglass was carried out by IFNTUNG at the enterprise "Dolyna-Neftegaz" fields on request of the Dnipropetrovsk branch of the Ukrainian Academy of Sciences of National Progress. The technical specifications for the pumping rod made of fiberglass have been developed and approved.

**Key words:** pumping unit, sucker rod, downhole pump, polymer-composite material, fiberglass, reliability, work time, diagnostic systems.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. **Копей І. Б.** Аналіз використання штангових глибинних насосів виробництва ТОВ «Магістраль» на родовищах ПАТ «Укрнафта». *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1(66). С. 76-80. (фахове).
2. Лопатін В. В., Копей Б. В., **Копей І. Б.** Оцінка надійності обладнання штангової насосної установки та розробка оптимальних план-графіків ремонтів. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38) С. 274-283. (фахове).
3. Лопатін В. В., Копей Б. В., **Копей І. Б.** Стратегія оновлення елементів колони насосних штанг на основі теорії ланцюгів Маркова. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38). С. 53-56. (фахове).
4. Копей Б. В., Копей В. Б. **Копей І. Б.** Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. *Монографія*. Івано–Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. 406 с. (розділ монографії).
5. **Копей І. Б.**, Гладкий С. І. Результати досліджень зношення полімерно-композиційних матеріалів насосних штанг і насосно-компресорних труб. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. №4(29). С. 58-62. (фахове).
6. Копей Б. В., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** Нормуючий підсилювач для вимірювального давача випробувального комплексу дослідження деформації і руйнування гірських порід і навантажень на СШНУ. *Нафтогазова енергетика*. 2007. №4(5). С. 47-50. (фахове).
7. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Копей Б. В., Бобошко Ю. А., Лопатин В. В., **Копей И. Б.** *Нафтогазова енергетика*. 2007. №3(4). С. 47-54. (фахове).
8. Копей Б. В., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2003. №1(6). С. 129-133. (фахове).

9. Optimization of pumping units performances with fiberglass sucker rod strings / Kopey B., Mal'ko B., Kindrachuk S., Kharun V., **Kopey I.** *Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems* / ed. Daizhong Su : Proceedings of International Conference (3-6 July, 2000, Nottingham Trent University, UK). Bury St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2000. P. 835-844. ISBN 978-1-860-58260-8. (розділ монографії, *Web of Science*).
10. Kopey B., **Kopey I.** Diagnostic computer system for pumping units. *Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems* / ed. Daizhong Su : Proceedings of International Conference (3-6 July, 2000, Nottingham Trent University, UK). Bury St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2000. P. 825-834. ISBN 978-1-860-58260-8. (розділ монографії, *Web of Science*).
11. Development of steel head joints with fiberglass sucker rod on the base of contact stresses investigation / Kopey B. V., **Kopey I. B.**, Maksymuk A. V., Shcherbyna N. M. *VTT SYMPOSIUM* : Proceedings of Int. Symp. Fatigue Design 1998. (Espoo, Finland. 26-29 May 1998). 1998. 182. Vol. II. P. 603-612. ISSN 0357-9387. (стаття у періодичному виданні держави ЄС).
12. Дослідження контактних напружень у з'єднанні сталевий головки з склопластиковою штангою / Копей Б.В., Максимук О.В., Щербина Н.М., **Копей І.Б.** *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 1996. №33. С. 166 – 178. (фахове).
13. Копей Б. В., **Копей І. Б.** Аналіз надійності штангових свердловинних вставних і невставних насосів різного діаметра. *Державний міжвідомчий наук.-техн. збірник «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. Серія: *Нафтопромислова механіка*. Івано-Франківськ, вип. 32, 1995. С.49-56. (фахове).

#### Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

14. Лопатін В. В., Копей Б. В., **Копей І. Б.** Промышленные испытания метода ватметрирования станка-качалки штанговой насосной установки. *Инновационная наука, образование, производство и транспорт: техника и*

*технологии* : за результатами симпозиума (30-31 октября 2018 г., Одесса). Одесса : КУПРИЕНКО СВ, 2018. С. 170-178. (Серия «Инновационная наука, образование, производство и транспорт»; №1). ISBN 978-617-7414-51-2. (РИНЦ, *Index Copernicus*, розділ монографії).

15. **Копей И. Б.** Преимущества применения штанговых насосов производства ООО «Магистраль» на месторождениях ПАО «Укрнефть». *Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2017* : сборник тезисов Международной научно-практической Интернет-конференции (10 - 17 октября 2017 г). URL: <https://www.sworld.com.ua/index.php/technical-sciences-317/mining-and-geodesy-317/29532-317-012>. (РИНЦ, *Index Copernicus*).

16. Копей Б. В., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** Оптимізація вибору складу мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексів у нафтогазовій промисловості. *Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи* : анотації Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. С. 93.

17. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Копей Б. В., Бобошко Ю. А., Лопатин В. В., **Копей И. Б.** *Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці „ІФНТУНГ-40”* : анотації Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 16-20 квітня 2007 р.). Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2007. С. 269.

18. Kopey B. V., Lopatin V. V, **Kopey I. B.** Transducers for mobile information-measuring systems of mine elevating complexes. *Special Methods of Deposit Utilization* : Transactions of 3<sup>rd</sup> International Conference (Ostrava, October 6-7, 2005). Ostrava: VSB-TU, 2005. P. 409-413.

19. Закономірності руйнування нафтового обладнання з полімерних композиційних матеріалів під дією експлуатаційних чинників / Крижанівський Є. І., Копей Б. В., Шкіца Л. Є., **Копей І. Б.** *Некласичні проблеми теорії тонкостінних елементів конструкцій та фізико-хімічної*

*механіки композиційних матеріалів* : (матеріали доповідей III Міжнародного симпозіуму. Івано-Франківськ, 15 – 16 листопада 1995 р.) Т1. Івано-Франківськ: Факел, 1996. С. 89-90.

20. Копей Б. В., **Копей І. Б.** Витривалість насосних штанг з склопластика в нафтоемультійних середовищах та концепція їх втомного руйнування. *Матеріали наук.-практ. конф. «Нафта і газ України-96»*. Харків, 1996. С. 104-106.

21. Оптимізація технічного обслуговування і ремонту ШСНУ за допомогою комп'ютерних баз даних та діагностичних комп'ютерних комплексів / Копей Б. В., Андрушко М. Р., Ільїн С. Р., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** *Проблеми і перспективи наук.-техн. прогресу АТ "Укрнафта" в умовах ринку*: матеріали науково-практичної конф. (Івано-Франківськ, 27 – 29 вересня 1995 р.). Івано-Франківськ, 1996. С. 192-193.

22. Насосные штанги из полимерных композиционных материалов / Крижановский Е.И., Копей Б.В., Парайко Ю.И., Малый Н.А., **Копей И.Б.** *Полимерные композиты-95 (Поликом-95)* : тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. (12-13 сент. 1995 г, Солигорск). г. Гомель: издательство ИММС АН Б и ООО «Инфто-Трибо», 1995. С. 73-74.

#### **Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

23. Використання склопластикових насосно-компресорних труб в газових свердловинах / Копей Б. В., Шопен О. Б., Кузьмін О. О., Ківіренко О. Б., **Копей І. Б.**, Боднарук В. Б. *Нафтогазова енергетика*. 2010. №2(13). С. 23-29. (фахове).

24. Копей Б. В., **Копей І. Б.**, Євчук О. В., Лопатін В. В., Стефанишин О. І. Давач для вимірювання навантажень, що діють на колону насосних штанг : пат. 49754 У Україна : МПК E21B 19/00 ; заявлено 16.11.2009 ; опубл 11.05.2010, Бюл. №9.

25. Копей Б. В., Лопатин В. В., **Копей И. Б.** Помехоустойчивость низкопотенциальных электрических измерений в штанговых скважинных насосных установках и горных выработках. *Методы и средства технической диагностики* : сб. научных статей. Вып. XXIII. Йошкар-Ола : Марийский гос. ун-т., 2006. С. 127-132. (РИНЦ).
26. Копей Б. В., Лопатин В. В., **Копей И. Б.** Датчики привязки регистрируемых параметров для мобильных информационно-измерительных систем. *Методы и средства технической диагностики* : сб. научных статей. Вып. XXIII. Йошкар-Ола : Марийский гос. ун-т., 2006. С. 59-65. (РИНЦ).
27. Копей Б. В., Стефанишин О. І., **Копей І. Б.** Аналіз надійності редукторів верстатів-качалок. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2006. №4(21). С. 96-99. (фахове).
28. Копей Б. В., Копей В. Б., **Копей І. Б.** Спосіб з'єднання сталльної головки з полімерно-композиційним тілом глибинонасосної штанги : пат. 35751А Україна : МПК E21B17/00, E16B11/00 ; заявлено 22.04.1998 ; опубл. 16.04.2001, Бюл. №3.
29. Копей Б.В., **Копей І.Б.** Розробка комп'ютерного діагностичного комплексу верстата-качалки. *Оглядова інформація наук.-техн. розробок в галузі бур. і нафтопром. обладн. Вип.2*. Івано-Франківськ : УНГА, Відділ «Нафтогаз. обл. і механізми», 1999. С. 25-32.
30. **Копей И.Б.** Определение оптимального срока восстановления станков-качалок на основании анализа надежности их узлов и деталей. *«Нефтепромысловое дело»*. 1998. № 2. С.26–28.
31. **Копей И.Б.**, Драгомирецкий Я.Н., Копей Б.В. Определение оптимальной величины наработки между отказами деталей нефтепромыслового оборудования. *Нефтепромысловое дело*. 1997. №10-11. С. 30-32.



## ЗМІСТ

|   | стор. |
|---|-------|
| ВСТУП   | 20    |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ СВЕРДЛОВИННИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК   | 27    |
| 1.1 Аналіз умов роботи обладнання штангових свердловинних насосних установок  | 27    |
| 1.2 Аналіз надійності штангових свердловинних насосів   | 30    |
| 1.3 Аналіз надійності колон насосних штанг  | 40    |
| 1.4 Аналіз надійності колон насосно-компресорних труб   | 49    |
| 1.5 Аналіз надійності верстатів-качалок   | 55    |
| 1.6 Аналіз обладнання для діагностування штангових свердловинних насосних установок   | 59    |
| 1.7 Висновки до розділу, конкретизація задач досліджень   | 67    |
| РОЗДІЛ 2 СВІТОВИЙ ДОСВІД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СВЕРДЛОВИННОГО ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК                                       | 70    |
| 2.1 Існуючі методи підвищення надійності колон насосних штанг і насосно-компресорних труб   | 70    |
| 2.2 Використання полімерно-композиційних матеріалів для виготовлення свердловинного обладнання  | 75    |
| 2.2.1 Області застосування виробів нафтового сортаменту з полімерно-композиційних матеріалів  | 75    |
| 2.2.2 Порівняння характеристик труб і виробів з полімерно-композиційних матеріалів зі сталевими   | 79    |
| 2.2.3 Технологія виготовлення і матеріали   | 83    |
| 2.3 Висновки до розділу   | 89    |
| РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  | 91    |
| 3.1 Методика, обладнання та зразки для випробовувань насосних штанг з полімерно-композиційних матеріалів на статичну міцність та опір втомі | 91    |

|  |            |
|--|------------|
|  | 18         |
| 3.2 Методика, обладнання та зразки для дослідження зношування полімерно-композиційних матеріалів в різних середовищах  | 98         |
| 3.3 Дослідження мікроструктури полімерно-композиційних матеріалів, що використовуються для виготовлення насосних штанг | 103        |
| 3.4 Висновки до розділу  | 109        |
| <b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ НАСОСНИХ ШТАНГ З ПОЛІМЕРНО-КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ</b>  | <b>110</b> |
| 4.1 Розроблення математичної моделі з'єднання сталеві головки з полімерним композиційним тілом насосної штанги         | 110        |
| 4.1.1 Постановка задачі дослідження  | 110        |
| 4.1.2 Інтегральне рівняння контактної задачі взаємодії   | 114        |
| 4.1.3 Чисельний аналіз інтегрального рівняння контактної задачі взаємодії  | 115        |
| 4.2 Раціональні конструкції з'єднання сталеві головки з полімерним композиційним тілом насосної штанги                 | 121        |
| 4.3 Випробовування зразків з полімерно-композиційних матеріалів на статичну міцність                                   | 130        |
| 4.4 Випробовування зразків з полімерно-композиційних матеріалів на опір втомі та концепція їх втомного руйнування      | 133        |
| 4.5 Зношування зразків з полімерно-композиційних матеріалів в різних середовищах                                       | 138        |
| 4.6 Висновки до розділу  | 145        |
| <b>РОЗДІЛ 5 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ СВЕРДЛОВИННИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК</b>                     | <b>147</b> |
| 5.1 Розроблення діагностичного комп'ютерного комплексу штангових свердловинних насосних установок                      | 147        |
| 5.2 Визначення оптимального наробітку деталей та вузлів штангових свердловинних насосних установок                     | 159        |
| 5.3 Створення банку даних по наробітках деталей та вузлів штангових свердловинних насосних установок                   | 164        |

|   |     |
|---|-----|
|   | 19  |
| 5.3.1 Опис бази даних   | 164 |
| 5.3.2 Опис програми «Program»   | 167 |
| 5.4 Оцінка надійності обладнання штангових свердловинних насосних установок і розроблення оптимальних план-графіків ремонту | 169 |
| 5.5 Стратегія оновлення колони насосних штанг на основі ланцюгів Маркова  | 174 |
| 5.6 Промислові випробовування насосних штанг з полімерно-композиційних матеріалів   | 178 |
| 5.8 Висновки до розділу   | 179 |
| ВИСНОВКИ  | 181 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ  | 184 |
| ДОДАТКИ   | 200 |
| ДОДАТОК А   | 201 |
| ДОДАТОК Б   | 207 |
| ДОДАТОК В   | 211 |
| ДОДАТОК Г   | 218 |
| ДОДАТОК Д   | 242 |
| ДОДАТОК Е   | 243 |
| ДОДАТОК Є   | 244 |
| ДОДАТОК Ж   | 245 |
| ДОДАТОК З   | 246 |
| ДОДАТОК И   | 247 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Рівень розвитку енергетики має вирішальний вплив на стан економіки в державі, на вирішення проблем соціальної сфери та рівень життя людини.

В енергетичному балансі України нафта і газ займають 60%. За рахунок розроблення власних родовищ країна забезпечує свої потреби лише на 20% від рівня внутрішнього споживання природного газу та менш, ніж на 10% – нафти.

Проблеми видобування нафти в Україні пов'язані з тим, що понад 70% запасів нафти за критеріями рівня виснаження запасів, обводненості продукції, в'язкості нафти, колекторських характеристик порід належать до категорії важковидобувних. Розроблення важковидобувних запасів нафти потребує застосування специфічних, наукоємних і високовитратних технологій та устаткування.

На території України і в світі в цілому видобування нафти штанговими свердловинними насосними установками (ШСНУ) є найбільш розповсюджене як по кількості свердловин ними обладнаних, так і по тривалості їх експлуатації.

Наукові та інженерні основи механізованого способу видобування нафти за допомогою ШСНУ розроблені досить детально. Основи механіки насосної установки розроблені Вірновським А.С.. Теорія гідравліки насосної установки висвітлена в працях Пірвердяна А.М.. Оптимізацією процесу насосного способу видобування займалися Адонін А.Н., Дреготеску Н.Д. Вивченню умов роботи свердловинного обладнання для підвищення його ресурсу приділена увага в працях: Сулейманова А.Б., Фаєрмана І.Л., Крумана Б.Б., Протасова В.Н., Копея Б.В. та інших. Питанню динамометрування свердловинних насосних установок присвячені праці Белова І.Г.

Ступінь рентабельності насосного способу видобування нафти залежить від багатьох факторів. До них слід віднести надійність та працездатність як свердловинного, так і наземного обладнання, а також умови його роботи. Низькі показники надійності та складні умови роботи приводять до відмов і аварій обладнання, що в свою чергу спричиняє тривалі простої, збільшує вартість ремонтних робіт. Тому одним з найбільш першочергових є завдання підвищення показників надійності обладнання ШСНУ.

Контроль та діагностування обладнання, збір, обробка та аналіз показників надійності, розроблення оптимальних план-графіків ремонту, застосування якісно нових матеріалів, новітніх технологій виготовлення, нових захисних покриттів та протекторів – ось основні напрямки, що потребують постійного наукового пошуку для розв'язання вищенаведених завдань.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалась у відповідності з основними науковими напрямками кафедри нафтогазового обладнання ІФНТУНГ. Окремі розділи роботи склали основу виконання держбюджетних тем: «Розробка основ механіки контактної взаємодії та технологій з'єднання трубчатих конструкцій із армованих композиційних матеріалів» (1996 р.), що входила до державної науково-технічної програми по пріоритетному напрямку 7 «Нові речовини та матеріали»; «Розробка труб і виробів з полімерно-композиційних матеріалів (ПКМ) та підготовка їх серійного виробництва» (1994-1996 рр.); «Розробка інтегральних електронно-комп'ютерних комплексів для діагностики свердловинних штангових насосних установок» (1996 р.); «Розробка наукових основ планово-попереджувальних ремонтів обладнання свердловинних штангових насосних установок з використанням баз даних» (1997-1999 рр.); «Розробка труб та бандажів з ПКМ» (2002 р.). Роботи входять в координаційний план Міністерства освіти і науки «Наукові основи розробки нових технологій видобування нафти і газу, газопромислового обладнання, поглибленої переробки нафти і газу з метою отримання високоякісних моторних палив, мастильних матеріалів,

допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини». Вказаний план входить в національну програму «Нафта і газ України».

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є встановлення за результатами статистичного аналізу показників надійності та визначення оптимальних наробітків основних вузлів і деталей ШСНУ, обґрунтування та розроблення шляхів і заходів щодо підвищення її працездатності.

Поставлена мета реалізується через вирішення наступних завдань:

1. Статистичне оцінювання показників надійності свердловинного і наземного обладнання ШСНУ, визначення оптимальних наробітків її основних вузлів і деталей з використанням діагностичного комп'ютерного комплексу та розроблення методів підвищення працездатності свердловинного обладнання.

2. Розроблення теоретичних засад створення з'єднань композитного тіла насосних штанг зі сталевією голівкою та експериментальні дослідження насосних штанг з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) з врахуванням розсіювання їх втомних характеристик.

3. Розроблення способів та комплексу апаратних і програмних засобів для діагностування, аналізу та визначення технічного стану ШСНУ.

4. Створення бази даних для оцінювання основних показників надійності обладнання ШСНУ та розроблення оптимальних план-графіків ремонту обладнання.

5. Розроблення стратегії оновлення елементів колони насосних штанг на основі теорії ланцюгів Маркова.

**Об'єкт дослідження** – технічний стан обладнання штангових свердловинних насосних установок, при експлуатації яких виникають відмови і аварії, що спричиняють тривалі простої та збільшують вартість ремонтних робіт.

**Предмет дослідження** – методи та засоби оцінки технічного стану, прогнозування і підвищення надійності обладнання штангової свердловинної насосної установки.

**Методи дослідження.** У роботі застосовано добре відомі та перевірені: методи математичної статистики та теорії ймовірності при аналізі відмов обладнання ШСНУ; основні положення лінійної механіки руйнування та трибології при випробовуваннях насосних штанг з ПКМ; метод мікроструктурного аналізу для дослідження складу ПКМ; сучасні методи контактної взаємодії на основі теорії оболонок і стержнів Тимошенка С.П. при розробленні математичної моделі з'єднання сталеві головки з склопластиковим тілом насосної штанги.

**Положення, що виносяться на захист:**

Наукові основи до комплексного підходу оцінювання та прогнозування показників надійності обладнання ШСНУ шляхом ресурсного проектування деталей і вузлів та програмно-технологічних комплексів з використанням інформаційного масиву і даних промислових випробовувань.

Закономірності руйнування насосних штанг з ПКМ при випробуваннях на статичну міцність, опір втомі та опір зношуванню. Концепція руйнування ПКМ з врахуванням ефектів поглинання енергії на міжфазових границях.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в комплексному підході до оцінювання та прогнозування показників надійності обладнання ШСНУ з одночасною концентрацією зусиль на ресурсному проектуванні деталей і вузлів ШСНУ та розробленні мобільних вимірювальних системних комплексів для діагностування як свердловинного, так і наземного обладнання. Зокрема:

– вперше розроблена математична модель контактної взаємодії сталеві головки з полімерно-композиційним тілом насосної штанги на основі узагальненої теорії оболонок і стержнів Тимошенка С.П., яка дозволяє дослідити розподіл контактних напружень залежно від механічних та геометричних властивостей оболонки;

– вперше сформульована і розвинута концепція руйнування ПКМ з врахуванням ефектів поглинання енергії на міжфазових границях на основі

узагальненого енергетичного критерію, що дозволить при певних умовах підвищеного опору руйнуванню структури досягнути максимальної тріщиностійкості;

– набула подальшого розвитку постановка вибору оптимального складу мобільного інформаційно-вимірювального системного комплексу для ШСНУ у випадку обмеження числа некорельованих вимірювань з використанням алгоритму фільтрації на базі задачі Ельвінга;

– вперше запропонований метод визначення оптимальних інтервалів часу відновлення обладнання ШСНУ на основі аналізу його експлуатаційної надійності з використанням стратегії періодичного відновлення;

– вдосконалена математична модель оновлення елементів колони насосних штанг з дискретним часом в заданому просторі на основі Марковського випадкового процесу (теорія ланцюгів Маркова).

**Практичні значення отриманих результатів.** Результати експериментальних досліджень та промислових випробувань показують перевагу використання насосних штанг з ПКМ у порівнянні зі сталевими, що дасть змогу значно підвищити експлуатаційну надійність штангової колони зокрема та ШСНУ в цілому.

Створена комп'ютерна програма для чисельного розв'язку інтегрального рівняння контактної взаємодії сталеві головки з склопластиковим тілом насосної штанги дозволяє зміною пружних характеристик матеріалів спряжених деталей досліджувати міцність та працездатність розглянутого конструктивного з'єднання та має практичний інтерес для проектування нових з'єднань.

Сформульовані вимоги до вибору оптимального складу мобільного діагностичного комп'ютерного комплексу, а створена база даних з наробітків основних вузлів і деталей дасть змогу нафтогазовидобувним підприємствам розробляти оптимальні план-графіки ремонту обладнання.



Розроблена математична модель оновлення елементів колони насосних штанг дозволить підготувати замовлення на необхідну кількість штанг у зв'язку з відпрацюванням певної її частини в процесі експлуатації.

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі умов роботи обладнання ШСНУ та аналізі статистичних показників надійності обладнання ШСНУ в західних регіонах України [16, 17, 20, 36, 38], світового досвіду використання ПКМ для насосних штанг і насосно-компресорних труб [61, 83, 105, 138], аналізу діагностичних комплексів ШСНУ [44, 116, 121, 125, 115, 117, 118, 119, 120]. Проведено експериментальні дослідження штанг з ПКМ на статичну міцність, опір втомі, опір зношуванню та розроблено конструкцію насосних штанг з ПКМ [84, 85, 87, 106, 113, 123]. Розроблено мобільний діагностичний комп'ютерний комплекс ШСНУ [122, 126, 128, 129]. Розроблено оптимальну стратегію технічного обслуговування і ремонту обладнання ШСНУ [130, 134, 137].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи викладені в тезах наукових конференцій та статтях. Матеріали досліджень доповідались на Міжнародній науково-технічній конференції «Полімерні композити–95» (м. Солігорськ, Білорусія, 1995 р.), Науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи науково-технічного прогресу АТ «Укрнафта» в умовах ринку» (м. Івано-Франківськ, 1995 р.), III Міжнародному симпозиумі «Некласичні проблеми теорії тонкостінних елементів конструкцій та фізико-хімічної механіки композиційних матеріалів» (м. Івано-Франківськ, 1995 р.), науково-практичній конференції «Нафта і газ України–96» (м. Харків, 1996 р.), Науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи науково-технічного прогресу АТ «Укрнафта» в умовах ринку» (м. Івано-Франківськ, 1996 р.), Міжнародному симпозиумі «Fatigue Design–98» (м. Еспо, Фінляндія, 1998 р.), Міжнародній науково-технічній конференції RoM2000 (м. Івано-Франківськ – м. Яремча, 2000 р.), 3-ій Міжнародній конференції «Special methods of deposit utilization» (м. Острава, Чехія, 2005 р.), Міжнародній науково-технічній

конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» (м. Івано-Франківськ, 2009 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 31 друкована праця, з яких: 1 – монографія у співавторстві; 11 – у наукових фахових виданнях України; 7 – у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію; 9 – тез конференцій; 1 патент України на винахід і 1 патент України на корисну модель.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота викладена на 151 сторінці машинописного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 10 додатків. Робота ілюстрована 25 таблицями та 58 рисунками. Список використаних джерел містить 139 найменування, з них 120 кирилицею та 19 латиницею.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ УМОВ РОБОТИ ТА НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ СВЕРДЛОВИННИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

#### 1.1 Аналіз умов роботи обладнання штангових свердловинних насосних установок

Обладнання ШСНУ експлуатується в досить різноманітних умовах: при значних знакозмінних і динамічних навантаженнях, при інтенсивному абразивному зношуванні, підлягає впливу високих температур, високих тисків, висококорозійних робочих середовищ, агресивність яких ще більше зростає у випадку одночасної дії вищенаведених факторів. Необхідно врахувати і те, що багато деталей ШСНУ експлуатується глибоко під землею, і ремонт чи заміна внаслідок зносу деяких з них спричиняє тривалі простой свердловин.

Різноманітність умов експлуатації обумовлює різні причини відмов насосного обладнання. Тривалі спостереження за відмовами нафтового обладнання дозволяють розділити всі причини відмов на чотири основні групи: корозійне руйнування; деформація і злами; зношування; відкладання на робочих поверхнях обладнання різних речовин, які містяться в експлуатаційних середовищах [1, 2].

Корозійне руйнування є однією з найбільш розповсюджених причин відмов. Корозійні пошкодження проявляються у вигляді точкової корозії, корозійного і сульфідного розтріскування, а також спостерігаються руйнування у вигляді ерозії і кільцевої корозії.

Більшість деталей нафтогазового обладнання виготовляється з сталей. Одним з найнебезпечніших факторів, що впливає на надійність та довговічність сталевих деталей, є сірководнева корозія в поєднанні з напруженнями розтягу.

В карстових і інших, багатих карбонатами породах, внаслідок термічного розщеплення сіркоорганічних сполук, функціонування сірчаних бактерій і вимивання сульфідів утворюється значна кількість агресивного

сірководню. В присутності водяного середовища (відстою, конденсату, деемульгованої пластової і технологічної води) сірководень збільшує корозію сталевого обладнання. Наявність домішок  $\text{H}_2\text{S}$  створює підкислення водяної фази ( $\text{pH} \leq 4$ ) і зміщує реакцію взаємодії його з залізом в сторону утворення малорозчинних продуктів корозії – сульфідів. Присутність кислотоутворюючого ангідриду  $\text{CO}_2$  викликає додаткове підкислення водяної фази ( $\text{pH} \leq 3,5$ ). Результуючий вплив корозії зростає з підвищенням температури і парціального тиску  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$  [3]. При  $\text{pH} \leq 4$  корозія протікає з водневою диполяризацією. При цьому певна частина відновленого водню в атомарному вигляді адсорбується на поверхні сталі і частково вклинюється в кристалічну ґратку металу. При цьому виникає крихкість сталі – утворюється небезпечне сірководнє корозійне розтріскування (СКР) у вигляді внутрішньокристалічного розтріскування міцних і твердих сталей чи розшаровування м'яких і пластичних [4]. СКР розвивається під дією напружень розтягу, величина яких тим менша розрахункової границі міцності, чим вищий вміст сірководню в середовищі. СКР – надзвичайно небезпечна форма руйнування обладнання, початок якого важко передбачити.

Необхідність запобігання руйнуванню внаслідок виникнення СКР приводить до певних особливостей роботи свердловинного обладнання в умовах впливу сірководню та вуглекислоти.

В середовищах з досить низьким показником рН ( $\text{pH} \leq 4$ ) використання обладнання з нержавіючих сталей з високим вмістом хрому безперспективне, так як ці сталі в таких умовах кородують швидше ніж вуглецеві в зв'язку з тим, що хром характеризується (в активному стані) меншою термодинамічною стабільністю [5]. Захисні властивості хрому проявляються в нейтральних ( $\text{pH} \approx 5$ ) сірководневих середовищах. При чому для хромистих і хромонікелевих сталей більш характерний локальний, а для вуглецевих – рівномірний характер корозії. При підвищених температурах (більше  $70^\circ\text{C}$ ) більш стійкі до корозії сталі з високим вмістом хрому і нікелю [5].

При впливі на обладнання двофазного середовища вуглеводень-пластова вода характерна посилена корозія поблизу границі фаз. Електроліт вибірково змочує частину поверхні, занурену в вуглеводневу фазу, в якій  $H_2S$  розчиняється в 5-7 разів швидше, ніж у водних середовищах. В умовах впливу двофазного середовища вуглеводень-пластова вода слід використовувати сталі з більш високою ступінню легування.

Аналіз причин руйнування свердловинного обладнання ШСНУ показує, що значний вміст солей і висока (до  $250^{\circ}C$ ) температура в пластах прискорюють руйнування насосних штанг (НШ), свердловинних штангових насосів (ШСН) і насосно-компресорних труб (НКТ). Обриви НШ спричиняються сірководневою корозійною втомою, тобто крихким руйнуванням під дією динамічних навантажень [6]. Механізм корозійної втоми близький до механізму СКР.

На свердловинне обладнання діють як статичні, так і динамічні навантаження. Основне статичне навантаження – власна вага колон НКТ і НШ. При ході плунжера ШСН вгору і вниз навантаження розтягу, як на колону НКТ, так і на колону НШ, змінюється в результаті дії ваги рідини. В колоні НКТ виникають також напруження стиску, які залежать від гідростатичного тиску рідини в свердловині, що передається на торець колони труб. Спуск колон НКТ і НШ у викривлену свердловину супроводжується появою додаткових розтягуючих і стискаючих навантажень, пов'язаних з силами тертя колони НКТ об стінки свердловини і колони НШ об внутрішню поверхню НКТ. У викривлених свердловинах крім того виникають напруження згину, величина яких залежить від зенітного кута і зміни азимута свердловини [7].

При одночасній дії сил тертя і корозійного середовища під час відносного переміщення контактуючих поверхонь свердловинного обладнання проходить корозійно-механічне зношування [8]. При роботі ШСН штангові муфти, а також і самі НШ контактують з внутрішньою поверхнею НКТ в багатьох місцях і нерідко зі значним зусиллям. Причинами виникнення сил тертя є перш за все кривизна свердловини, неспіввісність

тіла і головки штанг, викривленість НШ і НКТ. Відомо, що при відкачуванні малообводненої нафти, яка не містить агресивних домішок, зношування деталей ШСН і пари «труба-колона штанг» незначне. Однак при відкачуванні парафінистих нафт, при наявності в нафті води, сірководню і механічних домішок процес зношування значно прискорюється [9]. Зношування приводить до зниження подачі ШСН, втрати герметичності колони НКТ, обриву НШ.

Обладнання ШСНУ підлягає значній парафінізації через випадання твердої фази з нафти [10]. Парафінові відкладання, що утворюються на поверхнях НКТ і НШ, маніфольдних і викидних лініях, приводять до звуження робочого перетину труб чи до утворення пробок. Парафінові відкладання включають в себе не тільки парафіни, а і асфальтени, смоли, воду, пісок, глину, солі та інші домішки.

Все це викликає необхідність знаходити нові критерії раціонального вибору матеріалів, створювати нові типи сплавів і неметалевих матеріалів для виготовлення свердловинного обладнання ШСНУ, розробляти методи зміцнення і армування їх у відповідності до певних умов експлуатації.

## **1.2 Аналіз надійності штангових свердловинних насосів**

Оцінювання технічного рівня ШСНУ і одного з найголовніших її елементів – ШСН – представляє практичний інтерес, оскільки даними установками обладнана більша частина механізованого фонду свердловин як на території України, так і за її межами. Серед багатьох типорозмірів ШСН на долю стандартних насосів приходить 90 %, решта 10 % відносяться до спеціальних насосів [11]. Стандартні ШСН випускаються трьох типів: вставні, трубні та підвішені до обсадної колони.

Вставні насоси є найбільш розповсюдженими серед всіх типорозмірів штангових насосів. Середній наробіток на відмову насосів вставного виконання більший ніж насосів невставного виконання [12].

Для видобування нафти механізованим способом у ПАТ "Укрнафта" використовуються ШСН вітчизняного (ТОВ НВК Укр-Ленд, м. Харків) та

закордонного (АТ "Элкамнефтемаш", м. Перм, РФ; АТ "Ижнефтемаш", м. Іжевськ, РФ; Schoeller-Bleckmann Oilfield Equipment AG, Австрія), виробництва, що за конструкцією, матеріалами, вимогами до виготовлення, випробуваннями відповідають вимогам міжнародного стандарту Spec.11AX API "Well Rod Pumps" та ГОСТ Р 51896-2002 "Насосы скважинные штанговые. Общие технические требования". Втулкові насоси не приводяться в стандартах Spec.11AX API, починаючи з 7-го видання 1978 р. Проте багато фірм внаслідок популярності втулкових насосів залишили їх у своїх виробничих програмах. Відомості про матеріали деталей ШСН, призначених для роботи в нестандартних умовах, вказані відповідно до стандарту NACE (Національна асоціація інженерів-корозійників) MR-01-76. В НГВУ «Долинанaftогаз» проводилися дослідно-промислові випробування ШСН закордонного виробництва (США, Канада, Китай, Словенія).

Одним з важливих показників технічного рівня ШСНУ є тривалість безвідмовної роботи насосного обладнання або його міжремонтний період, які головним чином залежать від правильного підбору типорозміру обладнання для конкретних умов експлуатації та від відповідного режиму роботи ШСНУ. Проведення заходів, спрямованих на збільшення міжремонтного періоду ШСНУ, дозволяє розширити область застосування обладнання, покращити економічні показники.

У видобувних свердловинах, обладнаних ШСНУ, 50 % відмов пов'язано з ШСН, 48 % – з НШ [12]. Тому для збільшення працездатності ШСНУ в цілому, в першу чергу слід орієнтуватись на покращенні показників надійності саме насосів та НШ.

На основі аналізу причин виходу з ладу насосів [12] встановлено, що основні відмови наступні: запарафінення насосів – 24 %; зношування циліндра і клапанних вузлів – 18,4 %; руйнування клапана і клапанної клітки – 13,8 %; деформація (згин) штока насоса – 13 %; зношування плунжера – 11,5 %; заклинювання плунжера в циліндрі – 7,5 %; деформація (згин) корпусу насоса – 5,2 %; заклинювання клапана – 4 %; перекіс втулок

циліндра – 2,6 %. Основними причинами є запарафінення насоса та зношування пари «плунжер-циліндр».

ШСН можна віднести до групи обладнання, яке ремонтується і експлуатується до граничного стану, внаслідок чого виникають втрати від вимушених простоїв і витрати на ремонтні роботи. Економічний ефект від експлуатації ШСН при цьому залежить від тривалості безвідмовної роботи і часу простоїв з причини відмови. Ремонтований виріб характеризується таким показником надійності як середній наробіток на відмову [13,14]. Проведено аналіз показників надійності ШСН по свердловинах Довбушанського родовища НГВУ “Надвірнанафтогаз” та з фонду свердловин НГВУ “Долинанафтогаз” за результатами промислових даних, зібраних з 1994 р. по 2008 р. та з 2011 по 2013 р.

В роботі [15] проведено порівняння показників експлуатаційної надійності, зокрема наробітків на відмову, ШСН з втулковими і безвтулковими циліндрами, яке показало їх незначну різницю. Однак порівняння проводилось по свердловинах з відсутньою або незначною обводненістю продукції (до 30 %). Відомо, що відсоток обводненості продукції, що видобувається, є однією із факторіальних ознак, які впливають на надійність як свердловинного обладнання взагалі, так і ШСН зокрема [14].

В роботі [16, 17] проведено порівняння фактичних показників надійності ШСН в свердловинах з великою обводненістю продукції (50-90 %).

Із фонду свердловин Довбушанського родовища НГВУ “Надвірнанафтогаз” зібрані статистичні дані по наробітках на відмову свердловинних насосів діаметром 32 мм з приблизно однаковою глибиною спуску насоса (табл. 1.1). Кількість досліджуваних насосів з втулковим циліндром – 14, з безвтулковим циліндром – 8.

Для визначення показників надійності необхідно визначити емпіричну функцію густини розподілу наробітку на відмову. При аналізі надійності нафтопромислового обладнання найчастіше користуються законами розподілу: нормальним, експоненціальним, Вейбула [18, 19].



Для визначення показників надійності ШСН приймаємо, що час безвідмовної роботи свердловинного насоса підпорядкований закону розподілу Вейбула, так як даний розподіл є найбільш універсальним і широко застосовується в теорії надійності:

$$P(t) = \exp \left[ - \left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (1.1)$$

де  $\eta$  – масштабний параметр;  $\beta$  – параметр форми розподілу Вейбула.

На основі розрахунку статистичних даних (табл. 1.1) для насосів з втулковими циліндрами  $\eta=95,4$  і  $\beta=2,24$ , для насосів з безвтулковими циліндрами  $\eta=28,5$  і  $\beta=1,07$ .

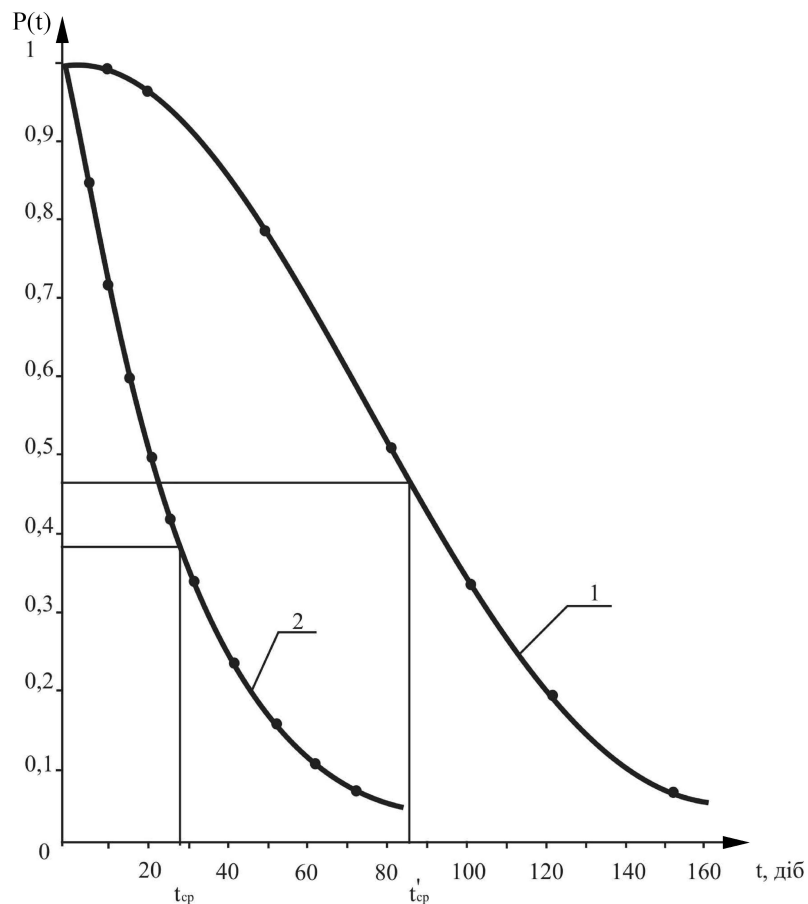
**Таблиця 1.1** – Наробітки на відмову ШСН діаметром 32 мм по Довбушанському родовищу НГВУ “Надвірнанафтогаз” (1994 – 2008 р.р.)

| № свердловини | Тип циліндра | Наробіток на відмову, діб | № свердловини | Тип циліндра | Наробіток на відмову, діб |
|---------------|--------------|---------------------------|---------------|--------------|---------------------------|
| Д - 6         | безвтулковий | 22                        | Д - 64        | безвтулковий | 66                        |
| Д - 6         | втулковий    | 60                        | Д - 64        | втулковий    | 180                       |
| Д - 6         | втулковий    | 80                        | Д - 65        | втулковий    | 75                        |
| Д - 9         | втулковий    | 102                       | Д - 65        | втулковий    | 93                        |
| Д - 9         | втулковий    | 28                        | Д - 67        | втулковий    | 76                        |
| Д - 12        | безвтулковий | 18                        | Д - 67        | втулковий    | 64                        |
| Д - 12        | втулковий    | 60                        | Д - 70        | безвтулковий | 10                        |
| Д - 14        | безвтулковий | 10                        | Д - 70        | втулковий    | 100                       |
| Д - 14        | безвтулковий | 25                        | Д - 88        | втулковий    | 43                        |
| Д - 14        | втулковий    | 76                        | Д - 253       | безвтулковий | 4                         |
| Д - 64        | безвтулковий | 44                        | Д - 253       | втулковий    | 130                       |

Доказом того, що розподіл підпорядкований закону розподілу Вейбула є те, що розподіл Вейбула характерний для випадків, коли відмови відбуваються внаслідок зношування і втоми ( $\beta > 1$ ), або раптово, внаслідок аварії ( $\beta < 1$ ). В нашому випадку  $\beta > 1$ , отже маємо поступові відмови внаслідок зношування і втоми (переважно контактної).

Графічне зображення залежності  $P(t)$  для насосів з втулковими і безвтулковими циліндрами показане на рисунку 1.1.

Знайдене значення математичного очікування, яке рівне середньому наробітку на відмову, становить для насосів з втулковими циліндрами  $t_{\text{вср}}=84,4$  доби і для насосів з безвтулковими циліндрами  $t_{\text{вср}}=27,7$  доби. Ймовірність безвідмовної роботи при цьому відповідно  $P(t_{\text{вср}})=0,42$  і  $P(t_{\text{вср}})=0,39$ . Таким чином, середній наробіток на відмову ШСН з втулковими циліндрами більш, як в три рази перевищує середній наробіток на відмову ШСН з безвтулковими циліндрами.



1 – з втулковим циліндром; 2 – з безвтулковим циліндром

**Рисунок 1.1** – Криві ймовірності безвідмовної роботи штангових свердловинних насосів діаметром 32 мм

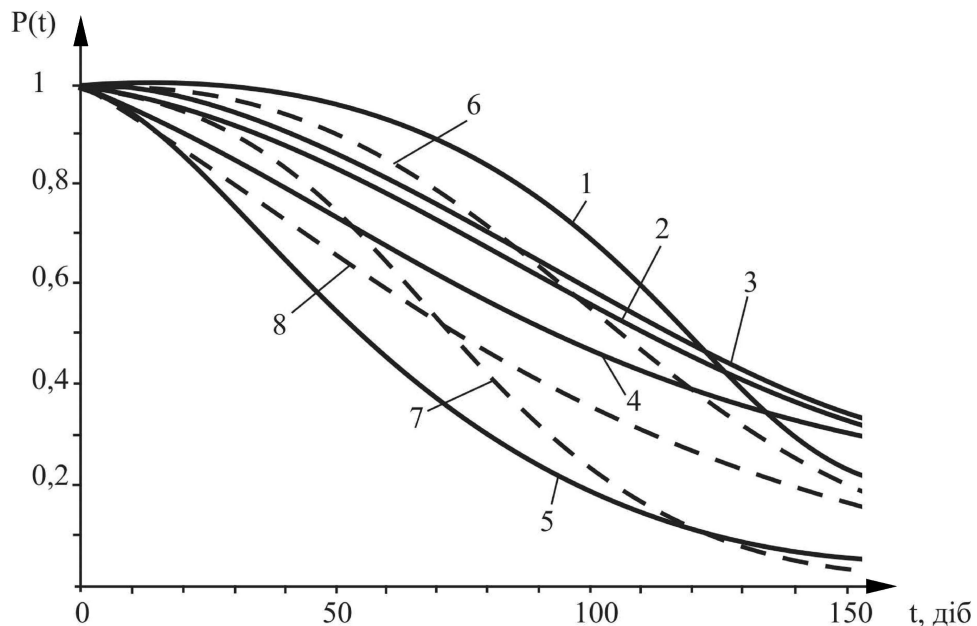
На основі статистичної обробки промислових даних по відмовах ШСН з фонду свердловин НГВУ “Долинанарфтогаз“ зібрані дані по наробітках та проведено порівняння фактичних показників надійності вставних і невставних свердловинних насосів різного діаметра [20]. Найменша вибірка насосів одного діаметра рівна 8, найбільша – 35. В таблиці 1.2 вказано вибірку по насосам різного діаметра n; середній наробіток на відмову  $T_{\text{ср}}$ ;

середнє квадратичне відхилення  $\sigma$ ; коефіцієнт варіації  $v$ ; параметри закону розподілу наробітків на відмову  $\eta$  і  $\beta$ . Прийнято, що час безвідмовної роботи свердловинного насоса підпорядкований розподілу Вейбула.

**Таблиця 1.2** – Параметри надійності свердловинних штангових насосів по НГВУ “Долина нафтогаз” (1994 – 2008 р.р.)

| Тип насоса       | D, мм | n  | T <sub>ср</sub> , діб | $\sigma$ | v    | Параметри розподілу Вейбула |         | Коефіцієнт лінійної кореляції R |
|------------------|-------|----|-----------------------|----------|------|-----------------------------|---------|---------------------------------|
|                  |       |    |                       |          |      | $\eta$                      | $\beta$ |                                 |
| Вставні НВ1Б-32  | 32    | 8  | 119                   | 32,8     | 0,27 | 132                         | 3,37    | 0,930                           |
| НВ1С-32          | 32    | 16 | 117                   | 60,6     | 0,52 | 137                         | 1,67    | 0,970                           |
| НВ1С-38          | 38    | 9  | 120                   | 68,6     | 0,57 | 139                         | 1,87    | 0,940                           |
| НВ1С-43          | 43    | 35 | 105                   | 65,5     | 0,63 | 120                         | 1,35    | 0,989                           |
| НВ1С-56          | 56    | 15 | 62,1                  | 42,1     | 0,67 | 70                          | 1,55    | 0,959                           |
| Невставні НН2-56 | 56    | 15 | 102                   | 40,8     | 0,38 | 121                         | 2,63    | 0,960                           |
| ННА-68           | 68    | 17 | 74,1                  | 31,3     | 0,42 | 84                          | 2,38    | 0,977                           |
| ННА-93           | 93    | 14 | 79,5                  | 50,3     | 0,63 | 94                          | 1,30    | 0,935                           |

На основі закону розподілу Вейбула побудовані графічні залежності ймовірності безвідмовної роботи вставних і невставних насосів різного діаметра від часу (рис. 1.2).



1 – НВ1Б-32; 2 – НВ1С-32; 3 – НВ1С-38; 4 – НВ1С-43; 5 – НВ1С-56;  
6 – НН2-56; 7 – ННА-68; 8 – ННА-93

**Рисунок 1.2** – Криві ймовірності безвідмовної роботи штангових свердловинних насосів різного діаметра

Ймовірність безвідмовної роботи вставних насосів, окрім вставних насосів з безвулковим циліндром (крива 1), має менше розсіювання,

особливо в межах середніх наробітків на відмову (60-120 діб). В таблиці 1.3 вказані ймовірності безвідмовної роботи насосів при середніх значеннях наробітків на відмову. Ймовірність безвідмовної роботи невставних насосів незначно перевищує ймовірність безвідмовної роботи вставних насосів, проте середній наробіток на відмову вставних насосів більший ніж невставних.

**Таблиця 1.3** – Ймовірність безвідмовної роботи вставних і невставних насосів різного діаметра при середніх наробітках на відмову

| Тип насоса       | $T_{\text{ср}}$ , діб | $P(t)$ |
|------------------|-----------------------|--------|
| Вставні НВ1Б-32  | 119                   | 0,50   |
| НВ1С-32          | 117                   | 0,46   |
| НВ1С-38          | 120                   | 0,47   |
| НВ1С-43          | 105                   | 0,44   |
| НВ1С-56          | 62,1                  | 0,44   |
| Невставні НН2-56 | 102                   | 0,52   |
| ННА-68           | 74,1                  | 0,48   |
| ННА-93           | 79,5                  | 0,45   |

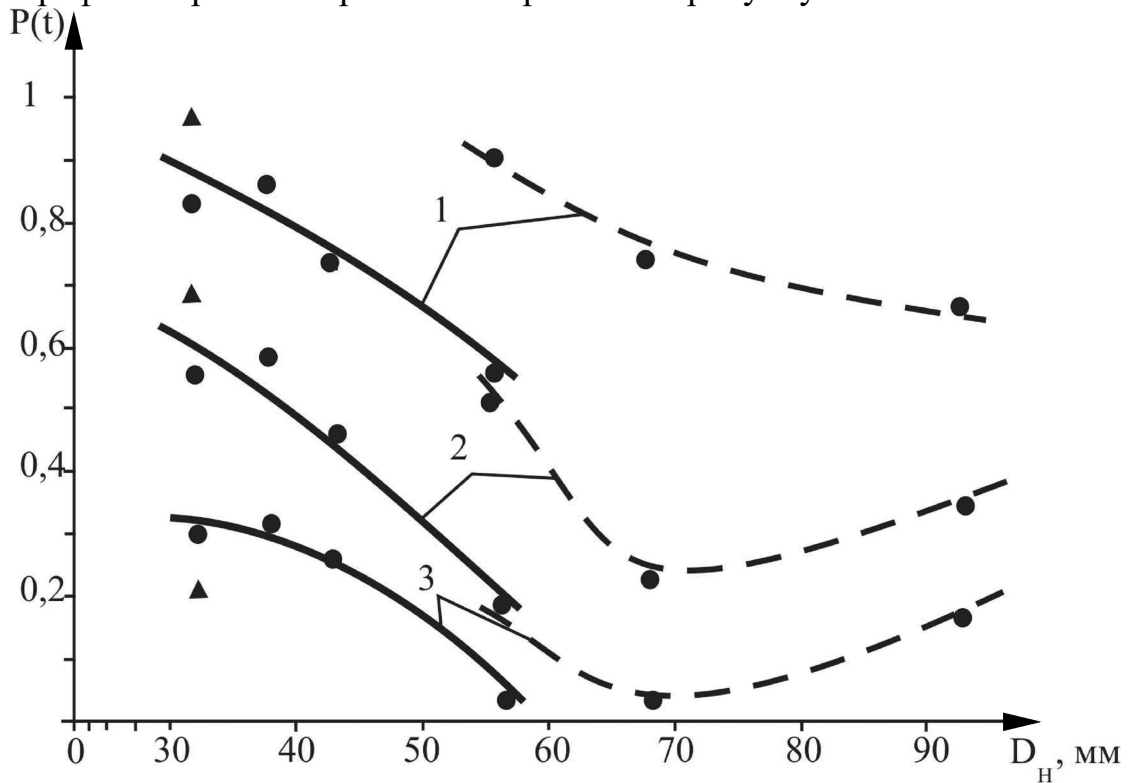
На основі графіків ймовірності безвідмовної роботи за допомогою комп'ютерної програми ерк1 (Додаток Б) знайдено регресійні рівняння залежності ймовірності безвідмовної роботи вставних і невставних насосів від діаметра при наробітках 50; 100; 150 діб (табл. 1.4). За основу було взято рівняння регресії виду  $P(t)=D/(a \cdot D-b)$ .

**Таблиця 1.4** – Регресійні рівняння залежності ймовірності безвідмовної роботи ШСН від діаметра насоса при різних наробітках на відмову

| Тип насоса | $t$ , діб | Рівняння регресії   |
|------------|-----------|---|
| Вставні    | 50        | $P(t) = D/(2,652 \cdot D - 51,068)$<br>$P(t) = 1,076 - 1,72E-4 \cdot D^2$ * |
|            | 100       | $P(t) = D/(8,468 \cdot D - 230,9)$<br>$P(t) = 0,716 - 2,99E-6 \cdot D^3$ *  |
|            | 150       | $P(t) = D/(2,689 \cdot D + 32,47)$  |
| Невставні  | 50        | $P(t) = D/(2,269 \cdot D - 64,95)$  |
|            | 100       | $P(t) = D/(5,363 \cdot D - 163,01)$   |
|            | 150       | $P(t) = D/(12,23 \cdot D + 141,96)$<br>$P(t) = 0,11 + 3,7E-8 \cdot D^3$ *   |

\* Крайні регресійні залежності

Графіки отриманих рівнянь зображені на рисунку 1.3.



— НВ1С; - - - НН; ▲ – НВ1Б;

1 - при наробітку 50 діб; 2 - при наробітку 100 діб; 3 – при наробітку 150 діб

**Рисунок 1.3** – Залежність ймовірності безвідмовної роботи штангових свердловинних насосів від діаметра

З графічних залежностей (рис. 1.3) очевидно, що з збільшенням діаметра свердловинного насоса ймовірність його безвідмовної роботи знижується. Однак, з збільшенням часу роботи насоса (більше середнього наробітку на відмову) криві ймовірності безвідмовної роботи набувають більш пологого вигляду.

У період з 01.09.2011 р. по 1.11 2013 р. на 17 нафтових свердловинах НГВУ «Охтирканафтогаз» було упроваджено 9 штангових насосів виробництва ТОВ «Магістраль» (РФ) (табл. 1.5), з них 4 використовувалися повторно без ремонту. За станом на 01.11.2013 р. експлуатацію трьох насосів було продовжено. Три насоси підняті (підйом не пов'язаний з технічним станом ШСН) і знаходяться в робочому стані, два насоси вийшли з ладу з напрацюванням відповідно 441,5 і 665,7 діб, один насос втратив придатність до експлуатації з вини бригади цеху капітального ремонту свердловин [16].

Порівнювалось середнє напрацювання до першої відмови випробовуваних в свердловинах на родовищах НГВУ "Охтирканафтогаз" насосів з середнім міжремонтним періодом роботи (МРП).

**Таблиця 1.5** – Використання насосів ТОВ «Магістраль» станом на 01.11.2013 р.

| Типорозмір насоса | К-ть насосів, які експлуатувались, шт | Відпрацьований час, діб | К-ть насосів, що вийшли з ладу |      | Середній період до підйому насоса, діб |
|-------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|------|--|
|                   |                                       |                         | шт.                            | %    |  |
| НН2Б-44           | 1                                     | 181                     | 1                              | 100  | 181                                    |
| НВ2Б-38           | 7                                     | 3690,9                  | 2                              | 28,5 | 527,27                                 |
| НН2Б-70           | 1                                     | 475,3                   | 0                              | 0    | 475,3                                  |
| Всього            | 9                                     | 4347,2                  | 3                              | 33,3 | 483,02                                 |

Конструктивні особливості насосів виробництва ТОВ «Магістраль» полягають в конструкції плунжера з високою зносостійкістю робочої поверхні, рельєф якої перешкоджає розриву водонафтової змащуючої плівки і виключає сухе тертя до поверхні циліндра. У практиці експлуатації даних насосів був випадок падіння динамічного рівня нижче за рівень прийому, при якому насос відпрацював "насухо" близько 10 годин без яких-небудь видимих наслідків.

Завдяки високій точності виготовлення комплектуючих в сукупності із застосуванням передових конструкційних матеріалів, з'явилася можливість на  $2/3$  зменшити довжину плунжера без помітного погіршення експлуатаційних характеристик насоса. Зменшення довжини плунжера дозволяє збільшити максимальний хід насоса в порівнянні з аналогічним стандартним обладнанням без зміни довжини циліндра. Ця обставина сприятливо впливає на експлуатаційний ресурс циліндра і насоса загалом, а також, дозволяє збільшити коефіцієнт подачі насоса.

Зменшення довжини в сукупності з особливостями рельєфу робочої поверхні плунжера дозволяють застосовувати насоси в умовах підвищеної в'язкості пластової рідини, не збільшуючи зазор між плунжером і циліндром

вище II групи посадки [17]. Завдяки щільнішій посадці плунжера в циліндрі знижуються витoki рідини, яка видобувається, але, що найважливіше, значно зменшується динаміка зношування робочих поверхонь насоса у зв'язку через неможливість проникнення в зазор між плунжером і циліндром твердих абразивних частинок.

Міжремонтний період роботи на 1.11.2013 р. штангових насосів ТОВ «Магістраль» значно більший за такий для насосів, що використовувалися раніше (табл. 1.6).

**Таблиця 1.6** – Порівняння МРП ШСН виробництва ТОВ «Магістраль» і насосів, які експлуатувалися в свердловинах НГВУ «Охтирканафтогаз» раніше (за методикою "Укрнафти")

| МРП ШСН<br>НГВУ на<br>01.03.2011 р. | МРП ШСН<br>НГВУ на<br>01.10.2013 р. | МРП ШСН<br>виробництва<br>ТОВ<br>"Магістраль" на<br>01.10.2013 р. | Відношення<br>спільного МРП<br>ШСН<br>"Магістраль" до<br>спільного МРП<br>ШСН НГВУ |
|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 155                                 | 171                                 | 1845  | 10,78  |

Проведені промислові дослідження та результати трирічного досвіду експлуатації насосів у свердловинах НГВУ "Охтирканафтогаз" дають підстави стверджувати, що в порівнянні з аналогічним обладнанням інших виробників втричі збільшився міжремонтний період, пов'язаний з відмовами насосного устаткування. Відмічено значне зниження динаміки падіння видобутку внаслідок фізичного зношування вузлів тертя. В зв'язку з цим при незмінних режимах відбору практично на усіх свердловинах спостерігалося збільшення середнього об'єму видобутку за аналогічні інтервали часу. Наявність позитивної динаміки на переважній кількості свердловин дозволяє виключити випадковий вплив зміни геологічних параметрів на роботу свердловинних установок.

На основі вищесказаного, використання насосів виробництва ТОВ «Магістраль» є ефективним на родовищах ПАТ «Укрнафта» і

рекомендовано до впровадження на нафтовидобувних підприємствах України.

### 1.3 Аналіз надійності колон насосних штанг

Найбільш відповідальним елементом ШСНУ є колона НШ, яка сприймає в процесі відкачування рідини з свердловини складний комплекс змінних за величиною навантажень, одночасно контактуючи з агресивним середовищем, яке нерідко містить сірководень і мінералізовану воду. Міцність і довговічність штанг обумовлює надійність всієї установки.

Вплив умов експлуатації на роботу НШ достатньо викладений в роботах Б.Б. Крумана [21, 22], А.Н. Адоніна [23, 24], І.Л. Фасермана [25]. Однак до недавнього часу були відсутні дослідження впливу конкретних факторів на відмови штангових колон. Вплив максимальних і мінімальних навантажень на відмови штангових колон, які експлуатуються в похило-скерованих свердловинах досліджувався Ю.Н. Лепехіним [3]. В роботах Б.В. Копея [6], С.Й. Тараєвського [26, 27], Я.Т. Федоровича [28] досліджувались причини і характер корозійно-втомного руйнування НШ та пропонувалися ефективні способи захисту від нього. Руйнування колони штанг виникає, як правило, по тілу штанги або в місцях різьбових з'єднань. Крім того, обриви штангових колон викликані обривами полірованого штока, відгвинчуванням різьбових з'єднань, обривами по муфтах внаслідок зношування їх при терті об внутрішню поверхню НКТ. Обрив штанг викликає простої і необхідність підземного ремонту. Кількість підземних ремонтів, пов'язаних з ліквідацією обривів насосних штанг міняється з року в рік і може складати від 8 % до 23 % від загальної кількості підземних ремонтів [29]. Для визначення ресурсу НШ необхідно провести детальний аналіз обривів штангових колон з визначенням основних параметрів надійності.

Надійність колони насосних штанг – властивість виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах на протязі даного проміжку часу або потрібного наробітку. Основними



питаннями вивчення надійності колони насосних штанг є визначення показників надійності і пошук ефективних шляхів її підвищення. Підвищити надійність штанг можна:

- використанням високоякісних матеріалів для виготовлення штанг;
- введенням нових методів обробки штанг.

Перший метод вимагає значних капіталовкладень і тому широко не використовується. Ефективними рішеннями другого методу є зміцнення поверхні тіла штанги з наступним нанесенням полімерного покриття, гартування штанг струмами високої частоти та інші.

На надійність колони насосних штанг впливає якість виготовлення штанг, тривалість, умови і режим роботи.

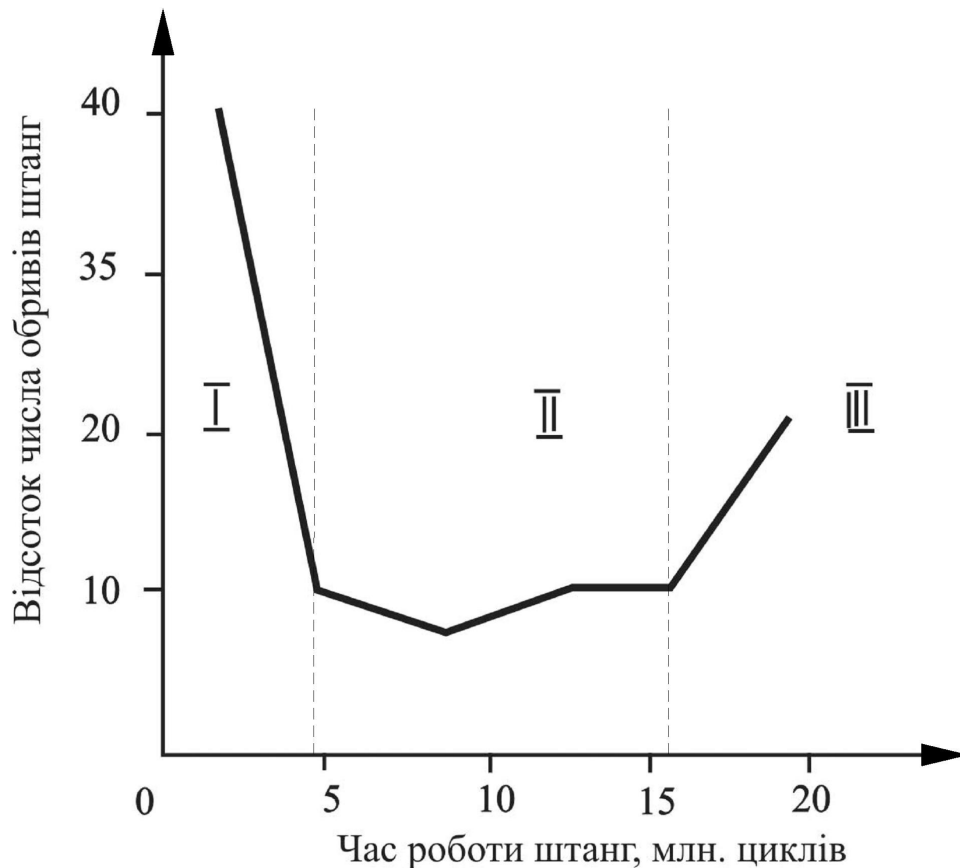
Використовуючи промислові дані (табл. 1.7), зібрані в НГВУ «Долинанасфтогаз», проведено аналіз обривів колон НШ. Діапазон глибин спуску насоса складав 1320-1920 м. Для аналізу вибрані свердловини, які характеризувались приблизно однаковими параметрами. З аналізу вилучені свердловини з наявністю в продукції парафінів, відкладення яких може суттєво вплинути на перерозподіл напружень і місце обриву.

**Таблиця 1.7** – Характеристика обривів штангових колон в НГВУ «Долинанасфтогаз» [30]

| Характер обриву        | Рік  |      |      |      |      | Всього | %     |
|------------------------|------|------|------|------|------|--------|-------|
|                        | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |        |       |
| Обрив по тілу штанги   | 40   | 31   | 77   | 60   | 63   | 271    | 36,92 |
| Обрив по різьбі штанги | 31   | 30   | 33   | 30   | 25   | 149    | 20,30 |
| Обрив по штоку         | 27   | 19   | 48   | 30   | 33   | 157    | 21,39 |
| Обрив по муфті         | 21   | 16   | 24   | 27   | 24   | 112    | 15,26 |
| Відкручування штанг    | 12   | 4    | 7    | 12   | 10   | 45     | 6,13  |
| Всього                 | 131  | 100  | 189  | 159  | 155  | 734    | 100   |

Встановлено [30], що зміна інтенсивності відмов в часі в більшості випадків має характер U-подібної кривої. Перший період характеризується підвищеним значенням інтенсивності відмов; в другому періоді (період нормальної експлуатації) інтенсивність відмов зменшується і змінюється порівняно мало, відмови носять випадковий характер; в третьому періоді

інтенсивність відмов знову різко зростає. На рисунку 1.4 показана графічна залежність обривів колон насосних штанг від часу експлуатації в свердловинах НГВУ “Долина нафтогаз”. Зона I – зона обривів штанг внаслідок заводських дефектів. Основними заводськими дефектами в тілі штанги є повздожні тріщини, поперечні мікротріщини і зміна товщини по довжині штанг. Зона II – зона стабілізації обривів насосних штанг. Ця зона є найтривалішою: число обривів насосних штанг складає в середньому 10% від загального числа аварій на протязі більше ніж 10 млн. циклів. Зона III – зона росту обривів штанг внаслідок експлуатаційних факторів, що спричиняють зародження і розвиток корозійно-втомних тріщин.



I – зона обривів внаслідок заводських дефектів; II – зона стабілізації обривів;  
 III – зона обривів внаслідок експлуатаційних факторів

**Рисунок 1.4** - Залежність обривів штанг від часу роботи [30]

Розподіл обривів по глибині свердловин має наступний характер: в верхній третині колони НШ (за винятком полірованого штока) сталося 12,9 % від загального числа всіх обривів; в другій третині – 23,8 %; в третій

третині колони – 40,1 %. Тобто в середній частині штангової колони частота обривів подвоюється в порівнянні з верхньою, а внизу потроюється.

Найбільший інтерес представляє вивчення розподілу обривів НШ по довжині колони в залежності від діаметра свердловинного насоса. В роботі використано базу даних глибини обривів НШ діаметром 16, 19, 22, 25 мм (табл. 1.8).

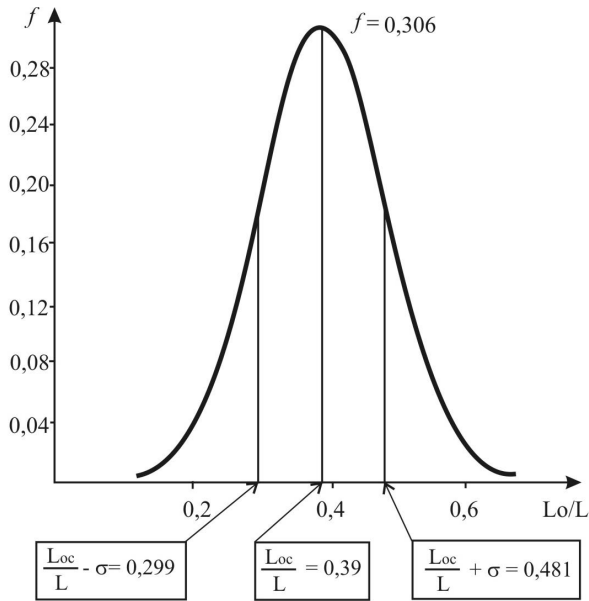
**Таблиця 1.8** – Вхідні дані для розрахунку статистичних характеристик розподілу обривів колон НШ

| Діаметр НШ,<br>мм | Діаметр<br>насоса, мм | Відносна глибина обриву<br>колони НШ |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
|                   |                       |                                      |      |      |      |      |      |      |
| 16                | 28                    | 0,25                                 | 0,31 | 0,36 | 0,42 | 0,4  | 0,48 | 0,51 |
| 19                | 28                    | 0,33                                 | 0,29 | 0,39 | 0,35 | 0,42 | 0,4  | 0,37 |
|                   | 32                    | 0,3                                  | 0,31 | 0,35 | 0,41 | 0,43 | 0,5  | 0,48 |
|                   | 38                    | 0,49                                 | 0,54 | 0,58 | 0,52 | 0,59 | 0,51 | 0,61 |
|                   | 43                    | 0,58                                 | 0,77 | 0,83 | 0,87 | 0,34 | 0,25 | 0,24 |
|                   |                       | 0,85                                 | 0,66 | 0,99 | 0,62 | 0,69 | 0,84 | 0,37 |
| 56                | 0,91                  | 0,78                                 | 0,77 | 0,96 | 0,98 | 0,95 | 0,97 |      |
| 22                | 32                    | 0,6                                  | 0,05 | 0,2  | 0,22 | 0,26 | 0,12 | 0,21 |
|                   |                       | 0,29                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
|                   | 38                    | 0,51                                 | 0,98 | 0,19 | 0,01 | 0,05 | 0,12 | 0,16 |
|                   | 43                    | 0,79                                 | 0,05 | 0,17 | 0,07 | 0,02 | 0,11 | 0,1  |
|                   |                       | 0,11                                 | 0,07 | 0,02 | 0,06 | 0,08 | -    | -    |
|                   | 56                    | 0,36                                 | 0,31 | 0,49 | 0,42 | 0,55 | 0,24 | 0,48 |
| 68                | 0,24                  | 0,21                                 | 0,58 | 0,32 | 0,52 | 0,48 | 0,29 |      |
| 25                | 38                    | 0,02                                 | 0,09 | 0,14 | 0,05 | 0,08 | 0,11 | 0,02 |
|                   | 43                    | 0,01                                 | 0,16 | 0,01 | 0,18 | 0,1  | 0,09 | 0,14 |
|                   | 68                    | 0,12                                 | 0,02 | 0,02 | 0,08 | 0,14 | 0,18 | 0,16 |

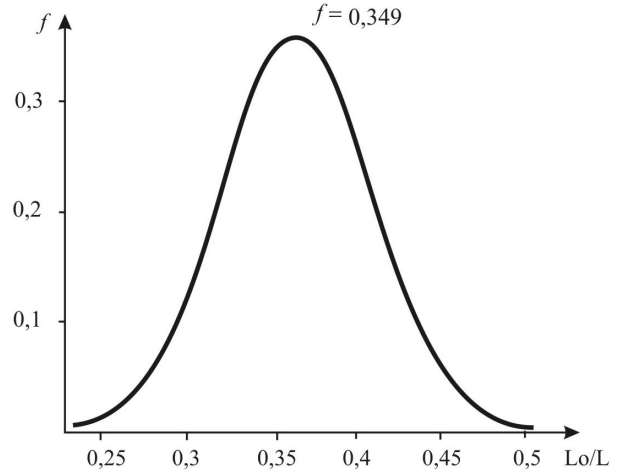
Для обробки даних використовувався розділ DATA MANAGEMENT комп'ютерної програми STATGRAPHICS (Statistical Graphics System), розробленої американськими вченими А.А.Аффі (University of California) та С.Р.Азен (University of Southern California) [31], після чого була проведена обробка отриманих даних в розділі DESCRIPTIVE METHODS (Summary Statistics). Дана програма дозволяє отримувати вихідні дані розрахунку статистичних характеристик розподілу обривів колон насосних штанг в залежності від діаметра свердловинного насоса у вигляді таблиць (табл. 1.9) і у вигляді графічних залежностей (рис. 1.5 – 1.18).

Таблиця 1.9 – Вихідні дані розрахунку статистичних характеристик розподілу обривів колон НШ

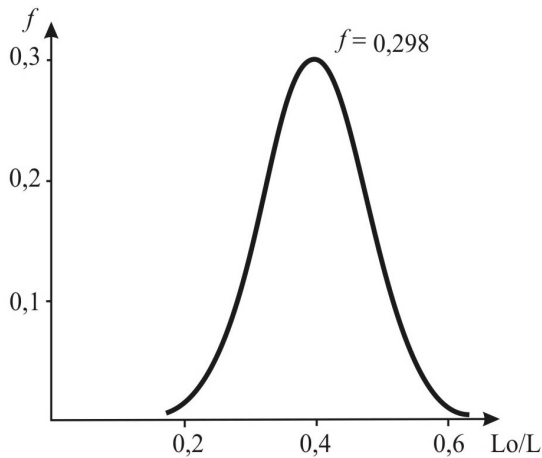
| Статистичні характеристики                | Діаметр насосної штанги, мм |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 19                          |       |       |       |       | 22    |       |       |       |       | 25    |       |       |       |       |
|   | 28                          | 32    | 38    | 43    | 56    | 32    | 38    | 43    | 56    | 68    | 38    | 43    | 56    | 68    | 8     |
| Об'єм вибірки                             | 7                           | 7     | 7     | 14    | 7     | 8     | 7     | 12    | 7     | 7     | 7     | 7     | 7     | 7     | 8     |
| Середня величина відносної глибини обриву | 0,39                        | 0,364 | 0,394 | 0,635 | 0,902 | 0,243 | 0,288 | 0,137 | 0,407 | 0,377 | 0,072 | 0,098 | 0,102 | 0,102 | 0,102 |
| Медіана                                   | 0,4                         | 0,37  | 0,41  | 0,675 | 0,95  | 0,215 | 0,16  | 0,075 | 0,42  | 0,32  | 0,08  | 0,1   | 0,12  | 0,12  |       |
| Мода                                      | 0,4                         | 0,37  | 0,41  | 0,66  | 0,95  | 0,21  | 0,16  | 0,07  | 0,42  | 0,32  | 0,02  | 0,01  | 0,02  | 0,02  |       |
| Середнє геометричне                       | 0,38                        | 0,361 | 0,39  | 0,579 | 0,898 | 0,199 | 0,137 | 0,08  | 0,393 | 0,352 | 0,058 | 0,062 | 0,076 | 0,076 |       |
| Дисперсія                                 | 0,008                       | 0,002 | 0,006 | 0,061 | 0,008 | 0,026 | 0,119 | 0,043 | 0,012 | 0,021 | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0,004 |       |
| Середнє квадратичне                       | 0,091                       | 0,44  | 0,079 | 0,247 | 0,09  | 0,16  | 0,345 | 0,209 | 0,109 | 0,147 | 0,04  | 0,068 | 0,064 | 0,064 |       |
| Стандартна похибка середнього відхилення  | 0,034                       | 0,016 | 0,03  | 0,066 | 0,034 | 0,057 | 0,13  | 0,06  | 0,041 | 0,055 | 0,017 | 0,025 | 0,024 | 0,024 |       |
| Мінімальне значення                       | 0,25                        | 0,29  | 0,3   | 0,24  | 0,77  | 0,05  | 0,01  | 0,02  | 0,24  | 0,21  | 0,02  | 0,01  | 0,02  | 0,02  |       |
| Максимальне значення                      | 0,51                        | 0,42  | 0,5   | 0,99  | 0,98  | 0,6   | 0,98  | 0,79  | 0,55  | 0,58  | 0,14  | 0,18  | 0,18  | 0,18  |       |
| Розмах значень                            | 0,26                        | 0,13  | 0,2   | 0,75  | 0,21  | 0,55  | 0,97  | 0,77  | 0,31  | 0,37  | 0,12  | 0,17  | 0,16  | 0,16  |       |
| Нижній квартиль                           | 0,31                        | 0,33  | 0,31  | 0,37  | 0,78  | 0,16  | 0,05  | 0,055 | 0,31  | 0,24  | 0,02  | 0,01  | 0,02  | 0,02  |       |
| Верхній квартиль                          | 0,48                        | 0,4   | 0,48  | 0,54  | 0,97  | 0,275 | 0,51  | 0,11  | 0,49  | 0,52  | 0,11  | 0,16  | 0,16  | 0,16  |       |



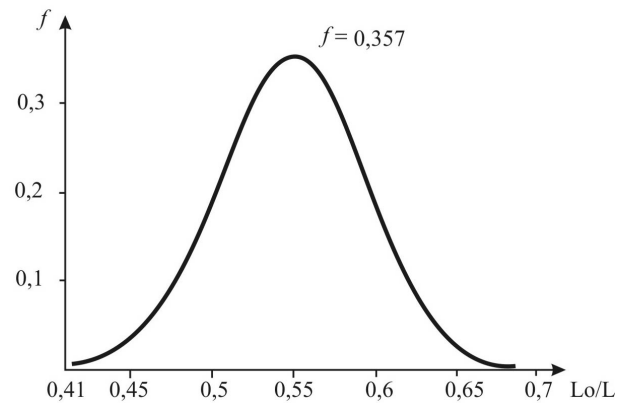
**Рисунок 1.5** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 16 мм (діаметр насоса 28 мм)



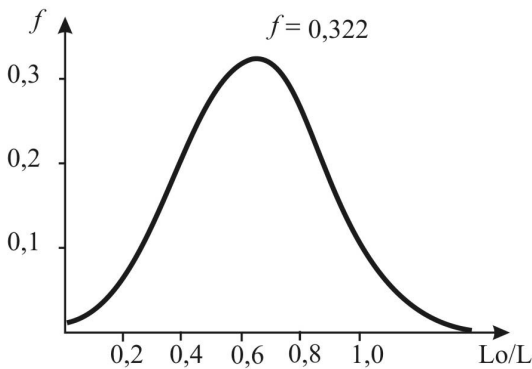
**Рисунок 1.6** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 19 мм (діаметр насоса 28 мм)



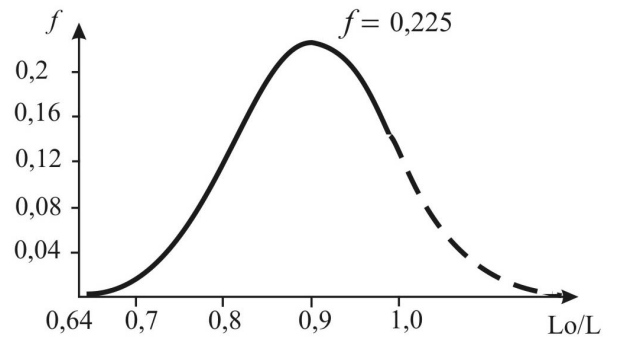
**Рисунок 1.7** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 19 мм (діаметр насоса 32 мм)



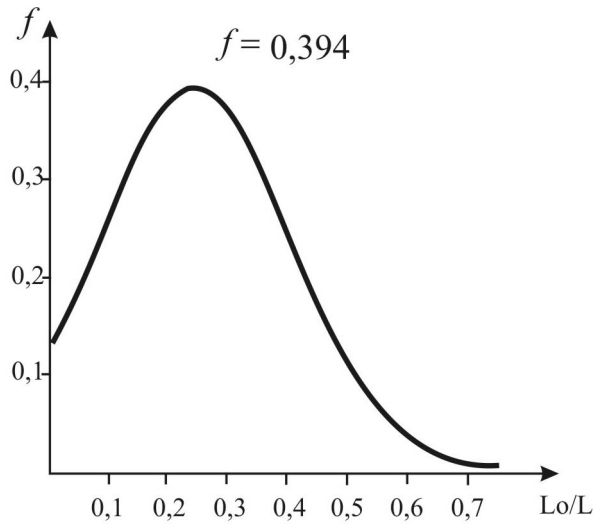
**Рисунок 1.8** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 19 мм (діаметр насоса 38 мм)



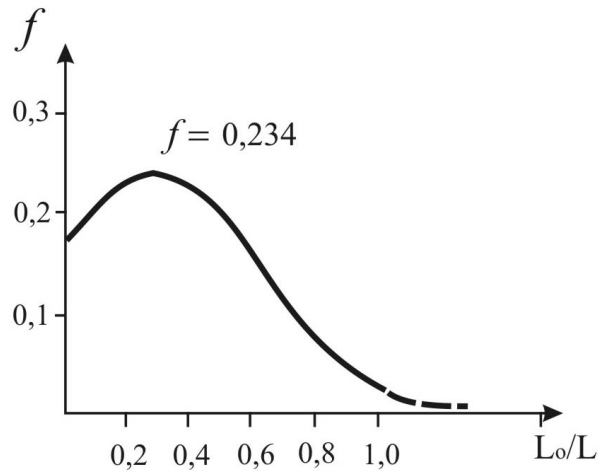
**Рисунок 1.9** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 19 мм (діаметр насоса 43 мм)



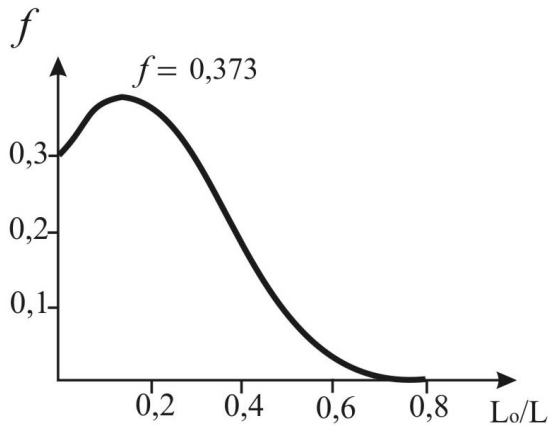
**Рисунок 1.10** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 19 мм (діаметр насоса 56 мм)



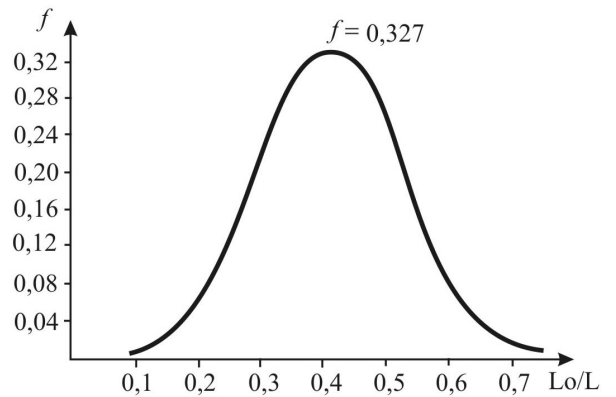
**Рисунок 1.11** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 22 мм (діаметр насоса 32 мм)



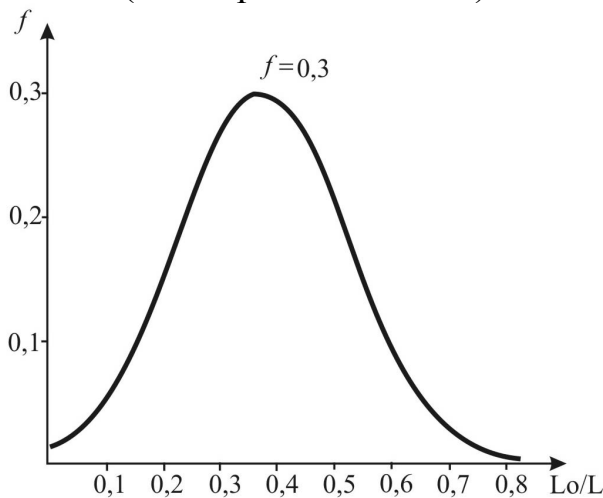
**Рисунок 1.12** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 22 мм (діаметр насоса 38 мм)



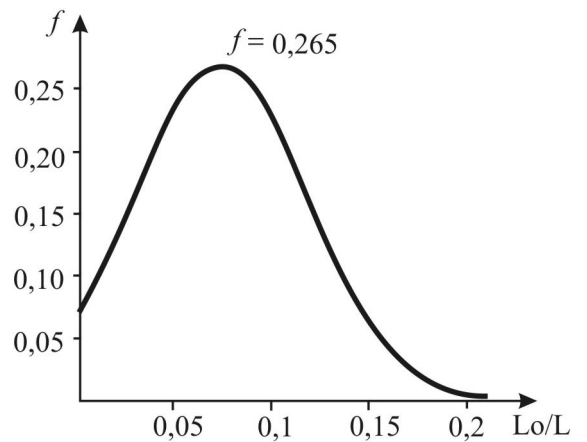
**Рисунок 1.13** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 22 мм (діаметр насоса 43 мм)



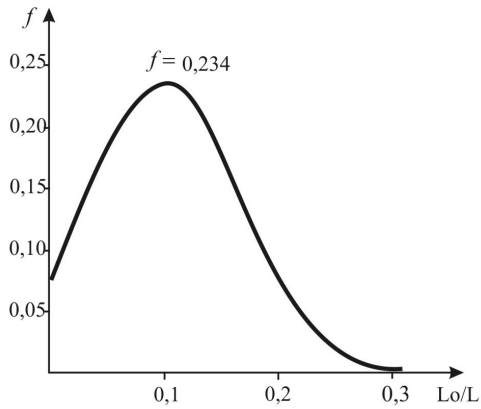
**Рисунок 1.14** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 22 мм (діаметр насоса 56 мм)



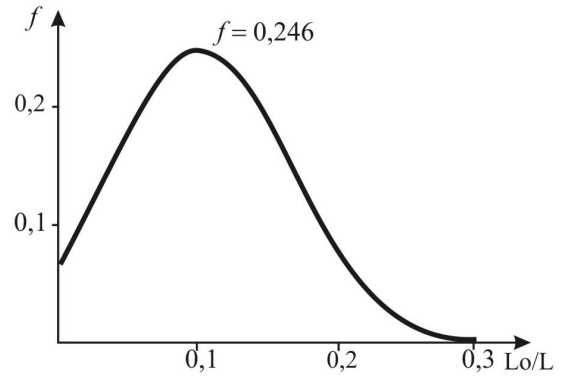
**Рисунок 1.15** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 22 мм (діаметр насоса 68 мм)



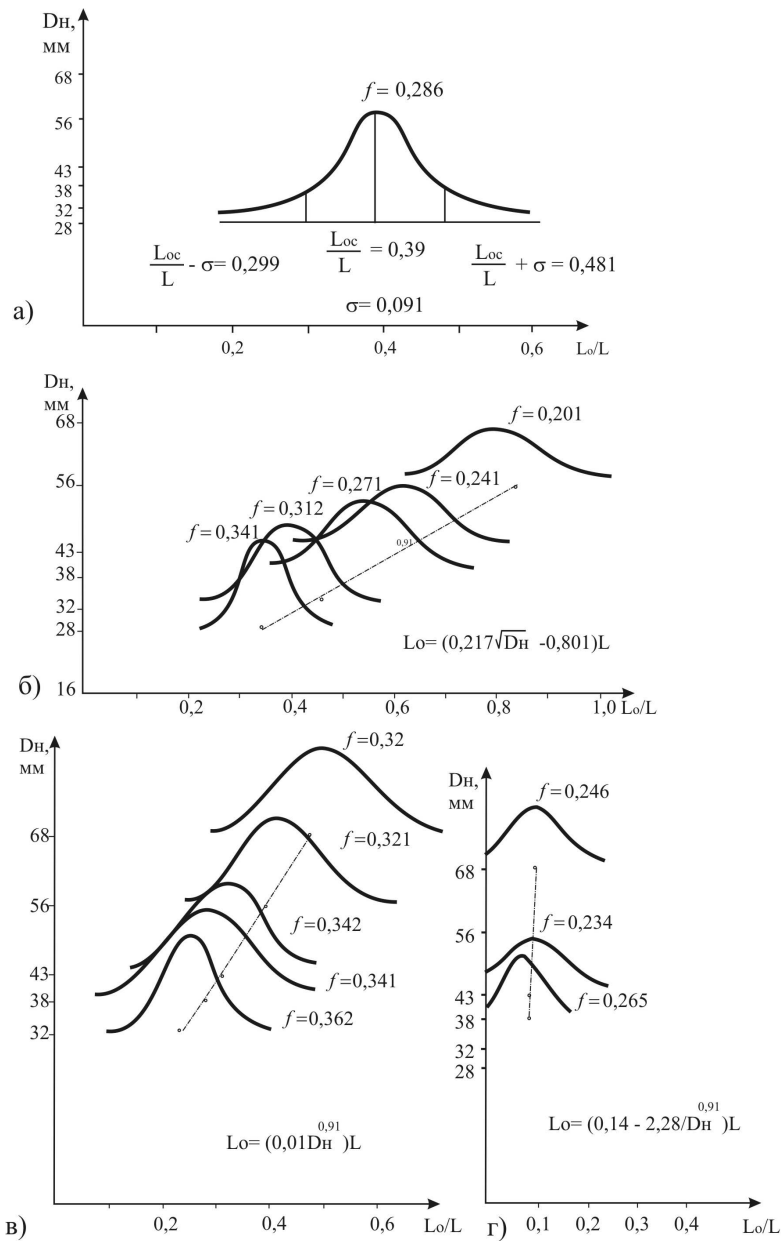
**Рисунок 1.16** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 25 мм (діаметр насоса 38 мм)



**Рисунок 1.17** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 25 мм (діаметр насоса 43 мм)



**Рисунок 1.18** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром 25 мм (діаметр насоса 68 мм)



а – 16 мм; б – 19 мм; в – 22 мм; г – 25 мм

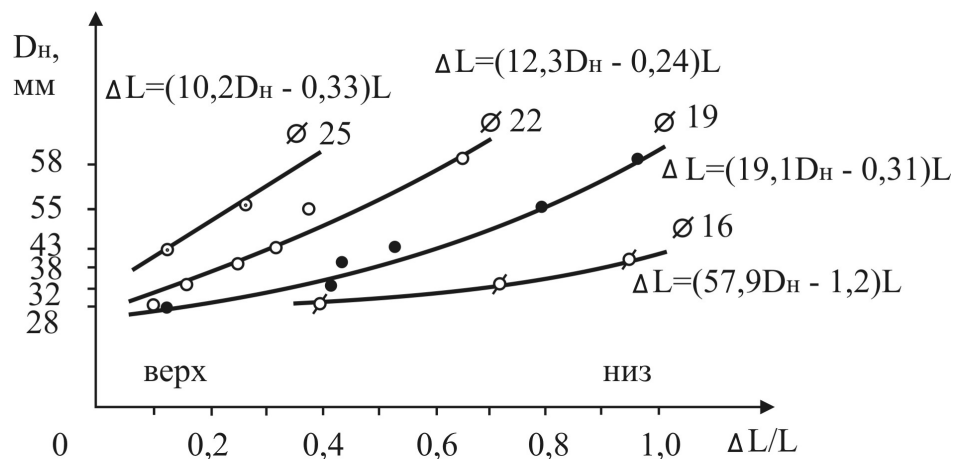
**Рисунок 1.19** – Густина розподілу глибини обривів НШ діаметром

З графіків отримуємо, що зі збільшенням діаметра насоса зростає відносна глибина обриву  $L_0/L$ . В зв'язку з багатоступеневою компоновкою насосних штангових колон фактичні середні глибини обриву для штанг діаметром 25 мм не перевищують  $0,4L$ , діаметром 22 мм –  $0,65L$ , діаметром 19 і 16 мм досягають  $(0,95...0,96)L$ .

Тобто при застосуванні свердловинних насосів меншого діаметра місця обривів переміщуються в верхню частину колони, а зі збільшенням його діаметра місця поломок переходять в нижню частину колони. Зі збільшенням діаметра насоса частота обривів колони насосних штанг значно зростає. Відкинувши дані, які виходять за межі вибірки даних і згладжуючи графічні залежності, об'єднуємо їх по діаметру штанг (рис. 1.19).

Аналіз кривих глибини обривів НШ діаметром 19 мм показує, що зі зростанням діаметра свердловинного насоса густина розподілу зменшується на 40 %, в той час як середнє квадратичне відхилення збільшується з 0,6 до 1,2, тобто на 50 %. Для штанг діаметром 22 мм спостерігається аналогічна залежність. Аналізуючи криві залежності глибини обривів НШ діаметром 25 мм отримуємо, що зі зростанням діаметра насоса глибина обриву суттєво не зростає.

На рисунку 1.20 показані графічні залежності та регресійні рівняння глибин обриву НШ різного діаметра при використанні свердловинних насосів діаметром 28-68 мм.



**Рисунок 1.20** – Розподіл глибини обриву НШ в залежності від діаметра насоса



Отримані графічні та аналітичні залежності дозволяють прогнозувати глибину обриву з певною ймовірністю для штанг різного діаметра та різних діаметрів свердловинного насоса.

#### **1.4 Аналіз надійності колон насосно-компресорних труб**

При насосній експлуатації колона НКТ забезпечує:

- подачу флюїду, що видобувається з пласта;
- закачування в пласт різних рідин для інтенсифікації видобування;
- ізолювання з допомогою пакерів обсадної колони від впливу пластового флюїду;
- підвішування свердловинних насосів.

При насосному способі експлуатації колоні НКТ передається значний внутрішній тиск від стовпа рідини. При ході плунжера насоса вгору і вниз навантаження розтягу змінюється в результаті дії ваги рідини. Тому на колону НКТ буде передаватись як статичне навантаження від власної ваги, так і змінне навантаження, обумовлене впливом стовпа рідини. Рух колони НШ при експлуатації ШСН спричиняє тертя штанг і муфт об внутрішню поверхню НКТ. Крім цього при експлуатації насосні труби постійно контактують з корозійно-агресивним середовищем.

Складні і специфічні умови, в яких працює колона НКТ обумовлені дією цілого ряду негативних факторів, що вимагають великих матеріальних і трудових витрат – витрат на заміну пошкоджених труб, покриття їх захисними плівками, нагнітання інгібіторів корозії в свердловину та інших. Ось чому важливо провести аналіз причин відмов і несправностей колон НКТ, встановити вимоги, які повинні бути дотримані при проектуванні, виготовленні і експлуатації обладнання з врахуванням необхідної їх надійності і довговічності. Питаннями підвищення надійності і довговічності колон НКТ займались Сароян А.Е., Суботін М.А. [10, 32].

В роботі [33] розглянуто основні види відмов елементів колон НКТ. До відмов елементів колон НКТ відносяться:

- порушення цілісності різьбового з'єднання у вигляді виривання різьби труби з муфти чи розриву нарізного кінця труби;
- розрив труби по тілу (поперечний або повздовжній);
- порушення герметичності різьбових з'єднань;
- заїдання різьби в процесі згвинчування-розгвинчування;
- зношування стінок труб внаслідок спуско-підіймальних операцій і при роботі штангової колони;
- зминання внаслідок деформації обсадної колони;
- прихоплення колони внаслідок відкладання піску, парафінів, продуктів корозії;
- корозійне руйнування;
- відкладання парафінів і солей.

Не завжди потрібно домагатися максимальної надійності, адже проектування і виготовлення такого обладнання вимагає додаткових засобів. Існує певне оптимальне значення надійності, при якому сумарна вартість проектування, виготовлення і експлуатації мінімальна. Встановлення цих оптимальних значень вимагає глибокого виявлення причин несправностей і відмов, вивчення фізичної сутності явищ, пов'язаних із зношуванням і руйнуванням обладнання та його вузлів. Істотний і особливий вплив на характер та інтенсивність протікання зношування, кінцевим результатом якого є відмова, створює середовище. В таких умовах працюють ШСН, НШ та НКТ при насосній експлуатації. Середовище є факторіальною ознакою, що впливає на надійність перерахованого вище обладнання. Особливості явищ зношування деталей у водонафтових середовищах вивчені ще недостатньо.

В літературі [34] висвітлені дані щодо впливу агресивних середовищ на поведінку НКТ. При обводненості нафти більше 90 % НКТ виходять з ладу через 2-2,5 роки. На окремих свердловинах спостерігаються наскрізні отвори в тілі труб через 5-7 місяців з початку експлуатації. Середній термін служби НКТ в нафтових свердловинах при обводненості 40-60 % складає 66 місяців

(5,5 років), при 60-80 % – 36 міс. (3 роки) і при 80-100 % зменшується до 26 міс. (2,2 роки). Нормативний термін служби НКТ – 11 років.

Завдання полягає в тому, щоб визначити період проведення профілактичних підземних ремонтів, а оскільки умови експлуатації свердловин не подібні, то і фактори, що впливають на цей період, та їх залежність одне від одного.

В роботі [2] показано, що однією із факторіальних ознак, які впливають на надійність колони НКТ, є відсоток обводненості продукції, що видобувається. Можна припустити, що іншими факторами є: параметри свердловинної установки, діаметр НКТ та колони НШ, їх конструкція, хімічний склад продукту, його температура, якість труб і матеріал, з якого вони виготовлені та інші.

З фонду свердловин НГВУ "Долинанафтогаз" були зібрані статистичні дані по наробітках НКТ діаметром 73 мм з подібною конструкцією колони НШ та ШСНУ, з приблизно однаковим часом роботи [35]. Кількість досліджуваних свердловин – 14. В таблиці 1.10 приведений варіаційний ряд наробітків (до першої відмови і між відмовами) НКТ і відсоток обводненості продукції свердловин.

**Таблиця 1.10** – Статистичні дані по наробітках колон НКТ з фонду свердловин НГВУ «Долинанафтогаз»

| № свердловини | Обводненість продукції В, % | Наробіток до першої відмови Т, діб | Наробіток між відмовами Т, діб |      |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|               |                             |                                    | 849                            | 805  | 776 | 640 | 397 | 293 | 106 | 88  |
| 331           | 79,6                        | 4674                               | 849                            | 805  | 776 | 640 | 397 | 293 | 106 | 88  |
| 326           | 87,5                        | 4250                               | 2024                           | 657  | 206 | 173 | 149 |     |     |     |
| 242           | 90,8                        | 4222                               | 826                            | 104  |     |     |     |     |     |     |
| 118           | 93,2                        | 3674                               | 1954                           | 574  | 553 | 353 | 344 | 215 | 206 | 189 |
|               |                             |                                    | 14                             | 148  | 127 | 115 | 107 | 100 | 80  | 67  |
|               |                             |                                    | 50                             |      |     |     |     |     |     |     |
| 235           | 88,4                        | 3598                               | 702                            | 293  | 268 | 248 | 197 | 170 | 141 | 69  |
|               |                             |                                    | 189                            | 167  | 88  | 88  | 54  |     |     |     |
| 247           | 97,2                        | 2623                               | 1495                           | 1056 | 423 | 357 | 302 | 272 | 233 | 220 |
|               |                             |                                    | 92                             |      |     |     |     |     |     |     |

## Продовження таблиці 1.10

|     |      |      |      |      |      |     |     |     |     |     |
|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 215 | 88,4 | 2509 | 1650 | 1164 | 993  | 619 | 328 | 193 | 179 | 178 |
|     |      |      | 250  | 242  | 216  | 201 | 194 | 155 | 142 | 104 |
| 202 | 73,2 | 2436 | 2015 | 387  | 128  | 58  | 354 | 311 | 269 | 250 |
|     |      |      | 147  | 100  | 31   |     |     |     |     |     |
| 516 | 83,1 | 1968 | 757  | 667  | 549  | 468 | 512 | 388 | 362 | 241 |
| 40  | 38,2 | 1689 | 1810 | 714  | 709  | 674 | 275 | 179 |     |     |
| 276 | 41,9 | 1346 | 3418 | 1195 | 1156 | 995 | 458 | 458 |     |     |
| 207 | 73,7 | 1309 | 2888 | 1504 | 1077 | 871 |     |     |     |     |
| 609 | 88,0 | 1051 | 2494 | 1323 | 1234 |     |     |     |     |     |
| 239 | 41,2 | 940  | 2550 | 741  | 224  | 105 |     |     |     |     |

Відмовою колони НКТ була прийнята заміна хоча б однієї труби під час ремонту свердловини, спричинена її експлуатацією до граничного стану. Граничним станом вважались такі ознаки: тріщина по тілу труби чи в різьбі; протерта гладка частина труби; промита різьба; зношена різьба; пошкодження труб (вм'ятини, раковини тощо); сильне корозійне пошкодження та інші стани, що не допускають подальшого використання труб.

Ремонт НКТ відбувається шляхом заміни пошкодженої труби на нову. Якщо розглядати колону НКТ поелементно (тобто кожну трубу окремо), то таку систему можна вважати неремонтованим виробом, а, як відомо, наслідком відмови неремонтованого виробу є його втрата. Для визначення показників надійності колони НКТ до першої відмови було умовно прийнято, що вона є неремонтованим виробом. Але оскільки більша частина колони повторно використовується для подальшої експлуатації і постійно під час ремонтів поновлюється новими трубами, то в цілому колону НКТ можна віднести до групи обладнання, що ремонтується і експлуатується до граничного стану, наслідками чого є втрати від вимушених простоїв і витрати на ремонтні роботи. Економічний ефект від експлуатації НКТ при цьому залежить від тривалості безвідмовної роботи і часу простоїв через

відмови. Ремонтований виріб характеризується таким показником надійності, як середній наробіток на відмову [19].

Для визначення показників надійності і їх залежності від обводненості продукції необхідно перш за все визначити емпіричну функцію густини розподілу наробітку до першої відмови і між відмовами. Відповідно до теореми Бернуллі, в якій говориться, що при необмеженій кількості дослідів частота деякої події сходиться по ймовірності до ймовірності цієї події, можна припустити, що час безвідмовної роботи колони НКТ підпорядкований розподілу Вейбула, доказом чого є те, що розподіл Вейбула характерний для випадків, коли відмови деталей і вузлів обладнання відбуваються внаслідок зношування і втоми, тобто поступово або раптово внаслідок аварійних руйнувань.

Параметри закону розподілу Вейбула розраховані за допомогою комп'ютерної програми. Теоретична функція розподілу часу безвідмовної роботи колони НКТ до першої відмови має вигляд:

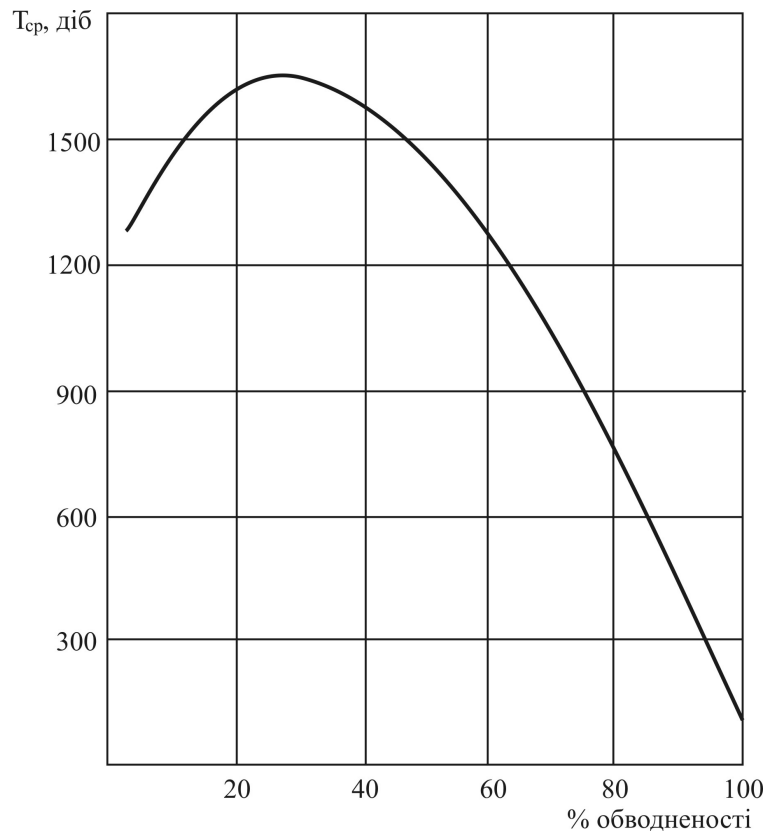
$$P(t) = \exp \left\{ - \left( \frac{t}{2986,7} \right)^{1,89} \right\}. \quad (1.2)$$

Параметр  $\beta=1,89>1$  вказує на поступовий характер відмов колон НКТ (внаслідок зношування і втоми). Знайдене з (1.2) значення математичного очікування, яке є середнім наробітком до першої відмови, становить  $T_{cp}=2646$  діб. Ймовірність безвідмовної роботи при цьому  $P(t)=F(t)=0,451$ , а ймовірність відмови  $q(t)=1-F(t)=1-0,451=0,549$ .

Регресійним аналізом встановлено залежність між середнім наробітком до першої відмови  $T_{cp}$  і обводненістю продукції  $V\%$  як поліноміальну другого степеня:

$$T_{cp} = 1338 + 16,7(V\%) - 0,29(V\%)^2. \quad (1.3)$$

Коефіцієнт невизначеності при цьому  $R_H=0,743$ , а коефіцієнт кореляції  $R_K=0,862$ . Графічне зображення залежності  $T_{cp}(V\%)$  представлено на рисунку 1.21.



**Рисунок 1.21** – Залежність середнього наробітку до першої відмови колони НКТ від обводненості продукції свердловини

На графіку видно, що із зростанням обводненості продукції свердловини приблизно до 30 % середній наробіток до першої відмови плавно зростає, але при обводненості продукції більше 30 % середній наробіток до першої відмови різко зменшується, що говорить про значний вплив обводненості продукції на надійність колон НКТ. Користуючись знайденими залежностями можна з певною точністю оцінити значення періоду профілактичного ремонту свердловин з метою перевірки працездатності колони НКТ з відомою ймовірністю (при виборі якої слід керуватися важливістю об'єкта) в залежності від обводненості продукції свердловини. Для порівняння оцінимо тривалість наробітку при ймовірності  $P(t)=0,98$ :  $T \approx 360$  днів. Безвідмовна робота колони НКТ з вище вказаною ймовірністю забезпечується при профілактичному огляді її через один рік після переведення свердловини на механізований спосіб видобування. Такий висновок можливий тільки при оцінюванні ймовірності до першої відмови.

## 1.5 Визначення параметрів надійності верстатів-качалок

Надійність ШСНУ обумовлена довговічністю та безвідмовністю як підземного так і наземного обладнання. Від відомих значень наробітку вузлів та деталей до відмови або на відмову залежить ефективність організації ремонтних робіт. Величина наробітку деталей в однотипному обладнанні немає однозначної величини, бо розподіл відмов за часом носить ймовірнісний характер. Оцінити ймовірність безвідмовної роботи та розробити стратегію технічного обслуговування та ремонту обладнання можна на основі обробки статистичних даних за відмовами вузлів і деталей ШСНУ.

Зібрано статистичні дані за відмовами вузлів і деталей верстата-качалки СК8-3,5-4000 [36]. Найбільш характерними відмовами вузлів і деталей верстата-качалки є: редуктор – зношення зубців, витікання мастила, низька якість виготовлення; палець кривошипа – самовідгвинчування, повертання пальця у втулці і втулки в кривошипі, руйнування підшипника; канатна підвіска – руйнування каната, зношення клиноподібних плашок та затискачів; опора балансира – зношення і руйнування підшипників, тріщини в корпусі підшипника, зношення посадкових поверхонь осі; підшипники траверси – зношення та руйнування; клинопасова передача – зношення пасів; вузол фіксації головки балансира – заклинювання пальця-фіксатора, відрив тяги тощо.

Для визначення показників надійності необхідно визначити емпіричну функцію густини розподілу наробітку на відмову. Прийнято, що час безвідмовної роботи вузлів і деталей верстата-качалки підпорядковується експоненціальному закону розподілу, якому в основному підпорядкована тривалість безвідмовної роботи при раптових відмовах виробів, особливо складних складальних одиниць [19]:

$$P(t) = e^{-\lambda_m t}, \quad (1.4)$$

де  $\lambda_m$  – інтенсивність відмов  $m$ -го елемента; при експоненціальному законі розподілу  $\lambda_m = \text{const}$ ;  $t$  – час роботи.

Основні показники надійності вузлів і деталей верстата-качалки СК8-3,5-4000 представлені в таблиці 1.11, де  $N$  – вибірка;  $t_{\max}$ ,  $t_{\min}$  – відповідно максимальний і мінімальний наробіток на відмову;  $t_{\text{ср}}$  – середнє значення наробітку на відмову;  $\lambda$  – інтенсивність відмов;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення.

**Таблиця 1.11** – Основні показники надійності вузлів і деталей верстата-качалки СК8-3,5-4000

| № з/п | Вузли і деталі      | N  | $t_{\max}$ , год. | $t_{\min}$ , год. | $t_{\text{ср}}$ , год. | $\lambda$ , $10^{-4}$ , год. $^{-1}$ | $\sigma$ , год. |
|-------|---------------------|----|-------------------|-------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| 1     | Редуктор            | 70 | 11920             | 264               | 3613                   | 2,77                                 | 3613            |
| 2     | Канатна підвіска    | 50 | 14448             | 844               | 6641                   | 1,51                                 | 6641            |
| 3     | Палець кривошипа    | 97 | 9712              | 264               | 3608                   | 2,77                                 | 3608            |
| 4     | Пасова передача     | 54 | 11932             | 796               | 6071                   | 1,65                                 | 6071            |
| 5     | Підшипники траверси | 27 | 10248             | 476               | 5195                   | 1,93                                 | 5195            |
| 6     | Опора балансира     | 63 | 11736             | 1080              | 5838                   | 1,71                                 | 5838            |

На рисунку 1.22 показані графічні залежності безвідмовної роботи вузлів і деталей верстата-качалки від часу експлуатації, на рисунку 1.23 графік безвідмовної роботи верстата-качалки СК8-3,5-4000 в цілому.

Ймовірність безвідмовної роботи верстата-качалки в цілому:

$$P(t) = \sum_{m=1}^7 P_m(t) = e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

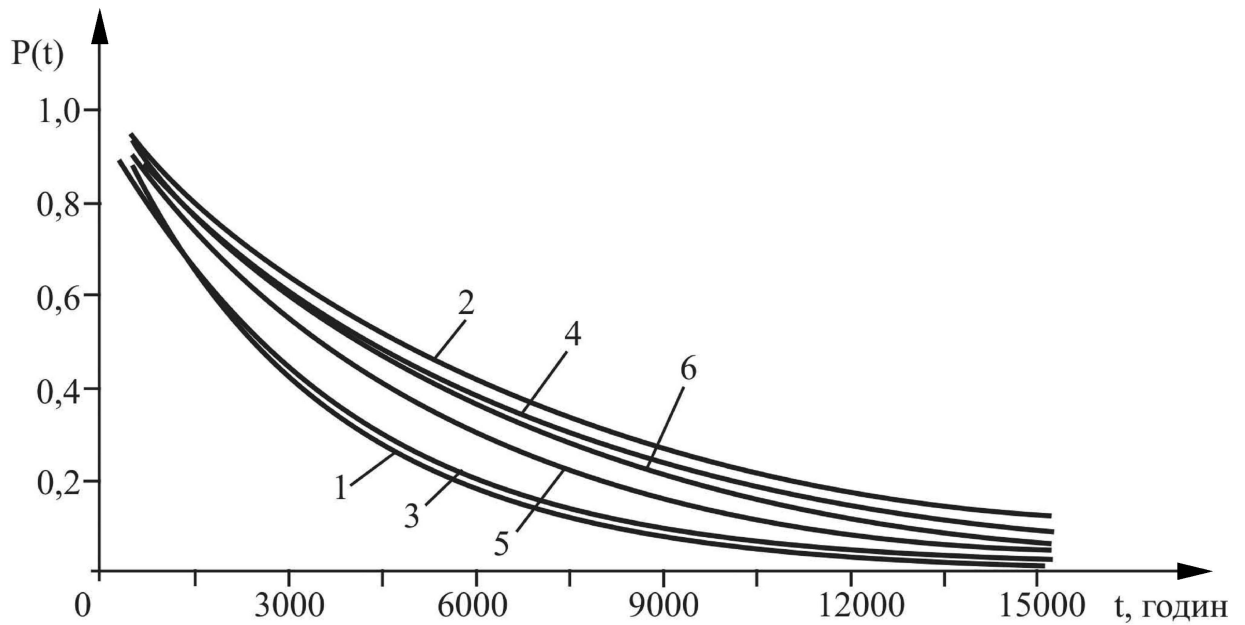
де  $P_m(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи  $m$ -го елемента системи;  $P(t)$  – сумарна інтенсивність відмов усієї системи.

За Глазуновим Л.Л. [37] для електродвигуна  $\lambda = 20 \cdot 10^{-6}$  год. $^{-1}$  при  $t_{\text{ср}} = 50000$  годин. Тоді

$$\lambda = \sum_{m=1}^7 \lambda_m = 20 \cdot 10^{-6} + 1,65 \cdot 10^{-4} + 2,77 \cdot 10^{-4} + 2,77 \cdot 10^{-4} + 1,93 \cdot 10^{-4} + 1,71 \cdot 10^{-4} + 1,51 \cdot 10^{-4} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ год.}^{-1} . \quad (1.6)$$

$$P(t) = e^{-1,25 \cdot 10^{-3} \cdot t} . \quad (1.7)$$

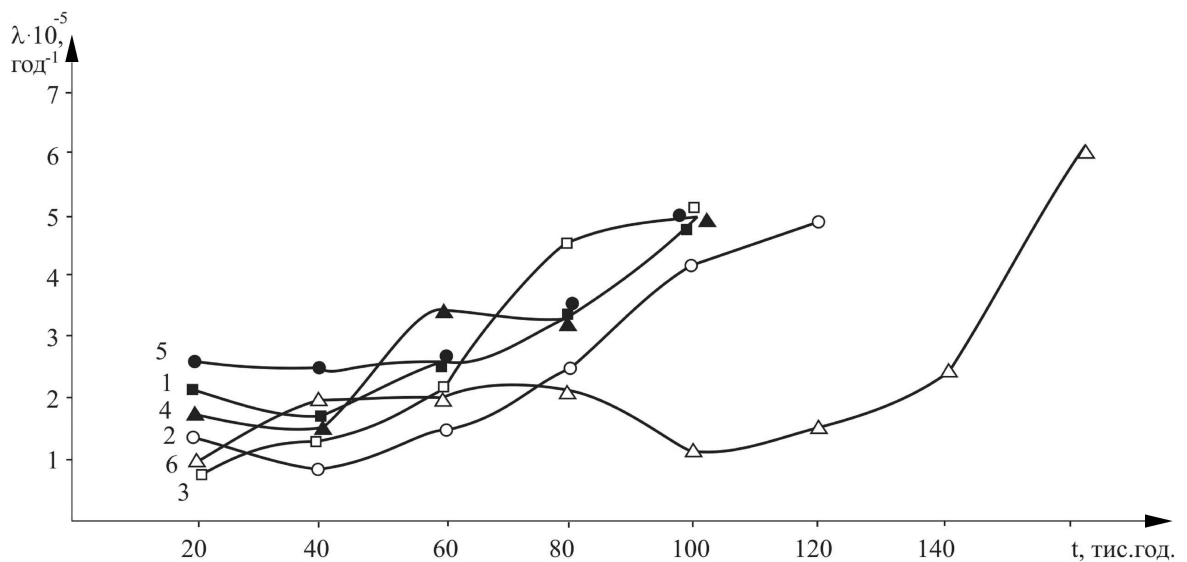




1 – редуктор; 2 – канатна підвіска; 3 – палець кривошипа; 4 – пасова передача; 5 – підшипник траверси; 6 – опора балансира

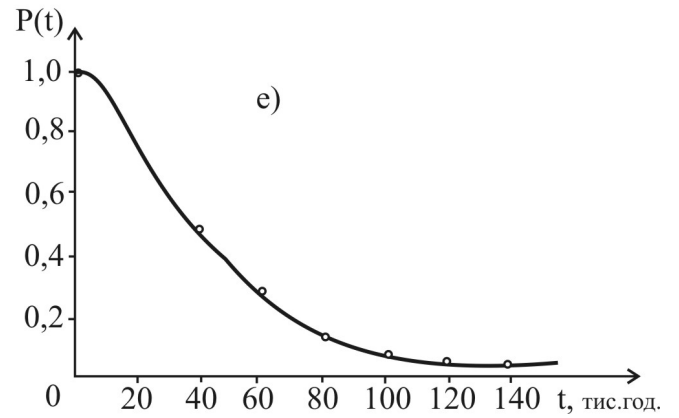
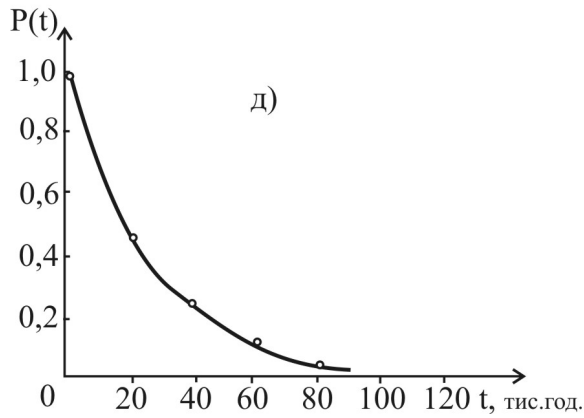
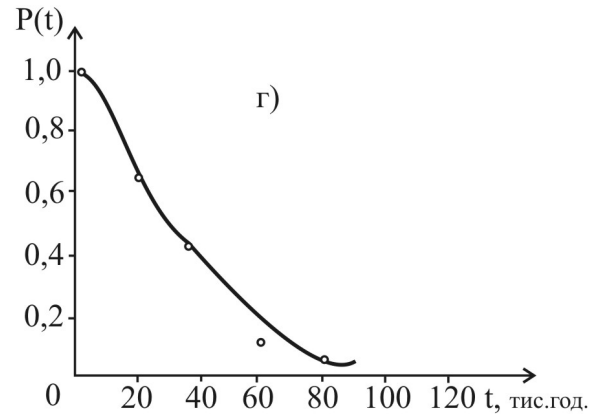
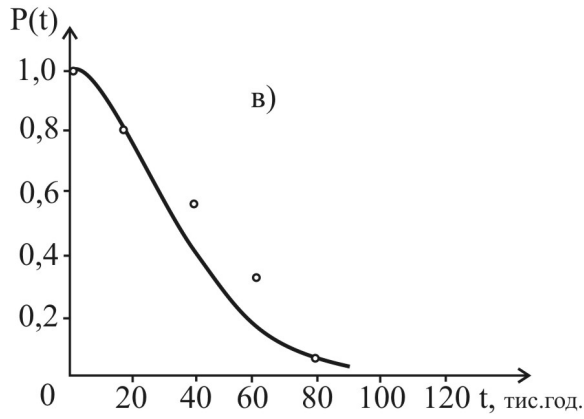
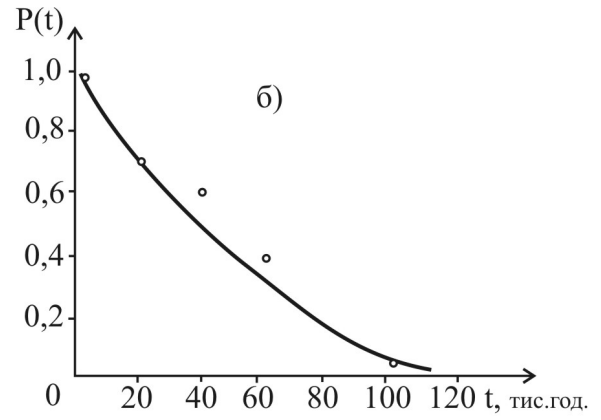
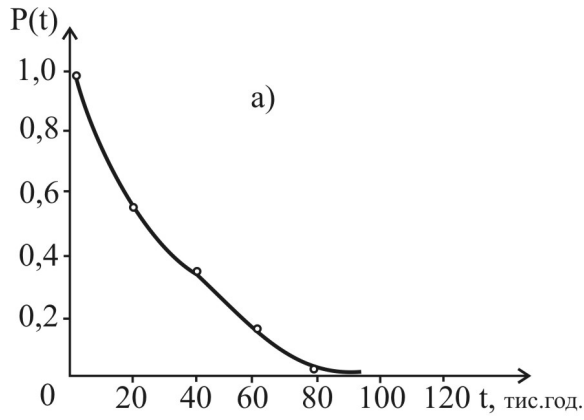
**Рисунок 1.22** – Криві ймовірності безвідмовної роботи вузлів і деталей верстата-качалки СК8-3,5-4000

На базі аналізу статистичної інформації, яка зібрана протягом 15 років при експлуатації ШСНУ в умовах Долинського НГВУ побудовані криві інтенсивності відмов (рис. 1.23) та криві ймовірності безвідмовної роботи (рис. 1.24) основних вузлів верстатів-качалок СК8-3,5-4000 [38].



1 – клинопасова передача; 2 – канат; 3 – балансир; 4 – палець кривошипа; 5 – редуктор; 6 – канатна підвіска

**Рисунок 1.23** – Криві інтенсивності відмов основних вузлів наземного обладнання верстатів-качалок СК8-3,5-4000



а – клинопасова передача; б – канат; в – балансир;

г – палець кривошипа; д – редуктор; е – канатна підвіска

**Рисунок 1.24** – Криві ймовірності безвідмовної роботи основних вузлів

верстатів-качалок СК8-3,5-4000

За допомогою комп'ютерної програми *epk1* отримані рівняння регресії для визначення оптимального наробітку вузлів і деталей ШСНУ в залежності від навантаження на головку балансира  $P$ , кН (табл. 1.12).

**Таблиця 1.12** – Рівняння регресії для вузлів и деталей ШСНУ

| Вузол ШСНУ       | Рівняння регресії типу<br>$T=A+D \cdot P^3$ | Краща залежність                        |
|------------------|---|---|
| Опора балансира  | $T=6,231+2,897 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=5,999+3,754 \cdot 10^{-4} \cdot P^2$ |
| Привід ШСНУ      | $T=4,436+5,690 \cdot 10^{-7} \cdot P^3$     | $T=(5,765-57,63)/P$                     |
| Балансир в зборі | $T=6,865+1,780 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=6,865+1,780 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$ |
| Редуктор         | $T=3,913+1,631 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=3,913+1,631 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$ |
| Шатун            | $T=3,775+2,806 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=3,775+2,806 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$ |
| Вузол кривошипа  | $T=4,732+2,256 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=3,775+2,806 \cdot 10^{-4} \cdot P^3$ |
| Вузол гальма     | $T=3,643+2,205 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=3,643+2,205 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$ |
| Траверса         | $T=4,097+2,385 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=3,643+2,205 \cdot 10^{-4} \cdot P^2$ |
| Канатна підвіска | $T=3,746+3,113 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$     | $T=3,746+3,113 \cdot 10^{-6} \cdot P^3$ |

Дані рівняння дозволяють з певною точністю прогнозувати наробіток основних вузлів і деталей верстатів-качалок при конкретних значеннях навантажень на головку балансира.

## 1.6 Аналіз обладнання для діагностування штангових свердловинних насосних установок

Сьогодні відома велика кількість методів і засобів технічної діагностування ШСНУ для видобування нафти. Серед методів, що знаходяться на стадії впровадження або розробки, відносяться методи, що базуються на використанні складних математичних залежностей, які реалізуються мікропроцесорною технікою.

Методи діагностування ШСНУ можна розділити на три групи [39]:

- діагностування за динамограмами;
- діагностування за ватметрограмами;
- діагностування за інформативними характеристиками віброакустичного процесу, що генерується елементами ШСНУ в процесі

роботи і передається по штанговій колоні та реєструється на усті свердловини.

Найбільш поширеним методом діагностування стану ШСНУ є динамометрування – процес зняття залежності зусилля на полірованому штоку верстата-качалки від переміщення точки підвісу штанг. Форма динамограм дозволяє встановити наявність несправностей в різних частинах ШСНУ. Недоліком цього методу є низька надійність, пов'язана з частим виходом з ладу первинних перетворювачів зусилля і переміщення в електричний сигнал. Крім того, характеристики використовуваних в даний час індуктивних давачів зусилля і переміщення схильні до впливу численних чинників: умов довкілля, нестабільності живлення, зміни початкового положення давача і тому подібне. Це призводить до того, що масштабні коефіцієнти і положення нульової лінії динамограми виявляються невідомими і визначення кількісних показників роботи нафтових свердловин за динамограмами неможливе.

Надійнішим методом діагностування ШСНУ є ватметрування – процес отримання ватметрограмм (ВМГ), тобто залежності  $P(f)$  потужності, споживаної електродвигуном верстата-качалки, від кута повороту кривошипа. При цьому відпадає необхідність у використанні перетворювачів механічних величин в електричний сигнал, оскільки використовується давач потужності змінного струму. Крім того, ВМГ несуть інформацію не лише про підземну, але і про наземну частину ШСНУ та дозволяють визначити роботу клапанів, коефіцієнти корисної дії наземного і свердловинного обладнання тощо [40, 43, 44].

Автоматизацією ШСНУ передбачається управління, протиаварійний захист, контроль і діагностування обладнання. Засобами автоматизації ШСНУ є:

– давачі динамометрування, ватметрування, тиску, рівня, несанкціонованого доступу до станції управління або стаціонарні системи

динамометрування (ДДС-06, СДА-10), виміру рівня рідини у свердловині (МИКОН-811) та ін.;

– блок управління верстатом-качалкою, призначений для управління і захисту електродвигуна, забезпечує аварійне відключення електродвигуна, самозапуск верстата-качалки через встановлений час після відключення, якщо була перерва в постачанні електроенергією; включення і відключення за заданою програмою.

В нафтовій промисловості при технічному діагностуванні ШСНУ широкого поширення набули мікропроцесори. Існує багато видів обладнання для діагностування і контролю за роботою ШСНУ на основі спеціального мікропроцесорного пристрою вводу/виводу сигналів – контролера. Практично всі сучасні станції управління (СУ) для свердловин мають в своєму складі контролер для реалізації інтелектуальних функцій контролю і управління.

Сьогодні розробкою систем автоматизації для нафтовидобувної промисловості на базі сучасних апаратно-програмних засобів і, зокрема, контролерів займається значна кількість фірм: «Lufkin Automation» (США), «Production Solutions» (США), «ABB» (США), «Automation Electro-nics» (США), «DrSCADA Automation» (США), «R & M Energy Systems» (США), «International Automation Resources» (США), «SPOC Automation» (США), ТОВ «Вотум» (Івано-Франківськ, Україна), ТОВ «Західний ІТЦ» (Івано-Франківськ, Україна), НВФ «Екос» (Уфа, РФ), НВФ «Інтек» (Уфа, РФ), ГУПНН «Авітрон-Ойл» (Уфа, РФ), НВО «Інтротест» (Єкатеринбург, РФ), НВФ «Інтеграл +» (Казань, РФ), «Шатл» (Казань, РФ), ЗАТ «Линт» (Казань, РФ), ТОВ «Аякс» (Ульяновськ, РФ) та інші [45, 46, 47].

Це обумовлено тим, що малогабаритні і доступні за ціною контролери володіють високими обчислювальними потужностями, високою надійністю і здатністю працювати в польових умовах. Вказане дозволяє сучасним системам управління максимально сконцентрувати обробку інформації з

давачів і управління виконавчими механізмами безпосередньо на об'єктах. Використання інтелектуальних контролерів забезпечує вирішення таких завдань, як автоматизація роботи електроприводу, оптимізація режимів роботи обладнання, моніторинг технічного стану вузлів ШСНУ, оперативне виявлення аварійних ситуацій і невідповідності режимів експлуатації обладнання з наступною передачею інформації про стан об'єкта на диспетчерський пункт.

Фірма АТК (м. Перм, РФ) [45] пропонує систему, що складається зі стандартного геліксного динамографа, давачів тиску і переміщення, які сполучені з вторинними приладами, призначеними для зберігання і первинної обробки інформації, а також для передачі її в ЕОМ для обробки і аналізу отриманих даних. Фірма постачає також програмне забезпечення, що дозволяє визначити до 14 параметрів системи "пласт-свердловина-установка", такі як: динамічний рівень, дебіт свердловини, навантаження в точці підвісу колони штанг, коефіцієнти подачі і наповнення насоса та інші. Проте при всіх перевагах цей спосіб динамометрування має свої недоліки. До них в першу чергу відноситься необхідність зупинки верстата-качалки для монтажу динамографа, підвіска полірованого штока на спеціальному затискачі, ручний монтаж і демонтаж динамографа між траверсами канатної підвіски верстата-качалки, неможливість телемеханізації процесу.

Подібне обладнання використовується фірмою Dynarump (США) [45]. У цій системі геліксний динамограф замінений на електронні давачі тиску, а персональний комп'ютер максимально наближений до свердловини для оперативної обробки і аналізу інформації. Система в цілому мобільна і має ряд переваг. Недоліком цієї системи є неможливість телемеханізації процесу діагностування.

Цього недоліку позбавлені системи, розроблені фірмами Mobil Oil Co (США), DELTA-X (США), Baker CAS (США) [45]. Система діагностування включає давач навантаження на колоні штанг, систему збору даних і канали

від кінцевих пристроїв до ЕОМ. Система складається з центрального комплексу обробки інформації і польових комп'ютерів, обслуговуючих групи свердловин. Оцінювання технічного стану ШСНУ проводиться за результатами послідовних вимірів певних параметрів роботи. Система застосовується не лише для діагностування, але і для оптимізації режиму роботи установок, аналізу навантаженості колони НШ, роботи верстата-качалки і його зрівноваженості.

Інша система діагностування ШСНУ розроблена французькою фірмою CIMSA [45] на базі мікрокомп'ютера SYSTEP і складається з трьох головних частин: локальної системи відбору і обробки даних; центральної диспетчерської системи; системи зв'язку. Локальна система передає в центральну повну динамограму свердловини, технологічний номер свердловини, мінімальні і максимальні значення навантаження. Перевага системи в тому, що вона дозволяє управляти як однією свердловиною, так і групами свердловин. Система включає первинні давачі зусилля, розміщені на траверсах канатної підвіски, і кутового переміщення, розміщеного в підшипнику опори балансира. Відмінною особливістю цієї системи є постійний контроль і аналіз параметрів роботи системи "пласт-свердловина-обладнання" за допомогою ЕОМ.

Система фірми Baker CAS (США) типу ROD PUMP CONTRROLLER MODEL 8500 [45] призначена тільки для спостереження граничних величин навантаження і стану обладнання (включено/ відключено). До переваги цієї системи слід віднести: зниження експлуатаційних витрат; простоту в експлуатації; економію електроенергії.

Американська фірма Technical Oil Tool Corporation (TOTCO) [45] випускає автоматичні системи контрольно-вимірювальної апаратури для нафтогазовидобувних установок. Нова система Dataкс для контролю, виміру і управління видобутком, а також для збору і обробки даних, про роботу промислової установки складається з польової станції, системи зв'язку і

центральної станції збору і обробки даних. Польова станція включає дистанційний термінал, що є мікрокомп'ютером, який виконує операції контролю, виміру, зв'язку і управління на місці промислової установки. На термінал поступають сигнали з аналогових, дискретних і частотних давачів, доступні для обслуговуючого персоналу на місці установки, які передаються на центральну станцію обробки даних.

Компанія EXOMETP (США) [45] пропонує комплексну систему дослідження роботи свердловин SPE-24060. Для кількісного динамометричного аналізу потрібні дані високої точності, для отримання яких вимагається використання калібруючого давача. Відстежування руху полірованого штока здійснюється кількома способами. Традиційно, положення полірованого штока реєструється обертово-переміщуваним давачем. Перевага системи у високій швидкості обробки даних і чутливості до прискорення давача навантаження. Останнє можливо завдяки використанню компактного акселерометра на інтегральній схемі, який вбудований в елемент виміру навантаження. Таким чином потрібний тільки один кабель для з'єднання комп'ютера і давача навантаження/прискорення. Швидкість руху полірованого штока визначається шляхом інтеграції сигналу прискорення, а повторна інтеграція дає значення положення полірованого штока як функції часу. У приладі використовується чутливий вимірювач навантаження напруги для отримання інформації про навантаження і акселерометр для отримання інформації про положення.

Американська корпорація Дельта-Х займає ведуче положення в виробництві обладнання для аналізу і управління штанговими насосами. Вона поставляє динамометри з бібліотекою програм, що дозволяють проводити прогнозування і аналіз роботи ШСНУ. Корпорація пропонує систему DDI-01, що є динамометричним аналоговим інтерфейсом даних, який під'єднується до будь-якого персонального комп'ютера. Система здійснює прийом аналогових сигналів від давачів навантаження, положення і



струму та перетворює їх в цифрові. Давач навантаження має підковоподібну форму, давач струму двигуна відноситься до типу хомутових [45].

Система "Сіксті" корпорації "Дельта-Х" реалізує нову концепцію управління і аналізу для ШСН. Вона включає як систему управління на мікропроцесорі, так і кількісну динамометричну систему. В управляючому пристрої можна встановити операційний інтерфейс, або його можна використовувати як просту доповнюючу вставну схему. Установка управління дозволяє використати спеціальну процедуру, що автоматично визначає оптимальний час простою і представляє оператору графік співвідношення робочого часу і часу простою. Два аналогових входи і чотири цифрових виходи дозволяють слідкувати за ручними і автоматичними вимикачами, перемикачами тиску, струмом двигуна, температурою викидної лінії і іншими важливими параметрами свердловини.

Корпорація "Дельта-Х" представляє для користування пакет програмного забезпечення систем діагностування. Бібліотека програм для системи штангових насосів складається із кількох програм співставлення, аналізу і користування, що приймає один і той же масив даних. Бібліотека програми може мати додаткові можливості прогнозування, конструювання і передбачення на основі хвильового рівняння для сталевих і склопластикових штанг. Вихід при використанні хвильового рівняння включає динамометричні карти для поверхні і вибою, довжину ходу в вибої, продуктивність, розміщення насоса, потужність, напругу, навантаження і крутні моменти. В програму включений також аналіз стану вибою з використанням хвильового рівняння і аналізу величини крутного моменту. Вихід при використанні такої додаткової можливості включає динамометричні карти для вибою і поверхні, навантаження, напруження в колоні штанг, продуктивність, довжину ходу на вибої. Режим користування дозволяє об'єднувати, передавати або записувати дані.

Останнім часом велика кількість російських компаній займається розробкою і впровадженням систем діагностування роботи ШСНУ. Серед них необхідно відмітити систему діагностування СДНУ-ЗМ (РГУ нафти и газа им. И.М. Губкина), апаратно-програмний комплекс динамометрування свердловин "Квантор", електронний динамограф MS-117 (фірма Маркетинг-сервис, г. Набережные Челны), динамограф СИДДОС (фірма "СИАМ", г. Томск), комплекс діагностики свердловин "КДС-П" (ПермьНИПИнефть), комплекс діагностування верстатів-качалок "Омега" (конструкторское бюро «Волжское», г. Самара) та інші. Практично усі вони засновані на аналізі динамограм, які знімаються за допомогою тензометричних давачів навантаження і давачів переміщення полірованого штока. Також, як в раніше розглянутих системах (Дельта-Х, ЕХОМЕТР, Дунаримп), давачі навантаження можуть бути накладними (на полірований шток) або міжтраверсними. Отримані динамограми передаються на комп'ютер по фізичних лініях (дротяні системи) або по системах радіозв'язку. У деяких конструкціях фірми "Микон" (г. Набережные Челны) [41] і фірми СИАМ (г. Томск) мікроЕОМ вбудована в прилад, поєднаний з давачем навантаження. В цьому випадку мікроЕОМ оснащена і давачем акселерометром, що замінює давач переміщення полірованого штока. Окрім динамограм вказані системи можуть проводити виміри ватметрограм для визначення зрівноваженості верстата-качалки. Деякі з сучасних систем діагностування намагаються відтворити тестування клапанів свердловинного насоса, використання системи для точного визначення дійсного дебіта, побудова плунжерної динамограми з визначенням навантажень в колоні НШ в будь-якому перетині.

Використання комп'ютеризованої системи, розробленої на кафедрі комп'ютерних технологій в системах управління та автоматизації ІФНТУНГ, має такі переваги [42]:

- можливість створення бази даних;

- візуалізація результатів контролю динамограм в декількох формах;
- отримання даних про стан підземного обладнання та порівняння їх з граничними значеннями;
- оцінка максимально можливої подачі та оптимізація режиму роботи;
- прогнозування технічного стану;
- значна швидкодія, менший гістерезис і нелінійність при контролі навантаження і переміщень полірованого штока.

Окрім відсутності суб'єктивного підходу до аналізу динамограм і ватметрограм, електронні системи діагностування мають важливу перевагу, що полягає в збереженні даних по дослідженню свердловин в хронологічному порядку. Це дозволяє створювати бази даних на нафтовидобувних підприємствах, які використовуються для відстежування правильності розробки родовища і руху обладнання нафтопромислу.

Сучасні тенденції побудови систем управління і діагностування ШСНУ, які розглянуті вище, висувають підвищені вимоги до апаратно-програмних засобів вказаних систем, що обумовлено значним енергоспоживанням ШСНУ, параметрами нафтоносного пласта, параметрами роботи ШСНУ та її технічним станом.

### **1.7 Висновки до розділу, конкретизація задач досліджень**

В області науки про надійність машин першочерговою є концентрація зусиль на розробку основ ресурсного проектування з метою прогнозування надійності складних систем, однією з яких є ШСНУ.

На першому етапі формулюються вимоги до надійності деталей, вузлів і системи в цілому. Далі розробляються динамічні моделі і аналізується навантаженість основних елементів системи.

Наступний етап – визначення параметрів надійності, в першу чергу безвідмовності і ресурсу з заданою ймовірністю. Існуючі на сьогодні методи розрахунку основних показників надійності вузлів і деталей в більшості

дають не достатньо точні результати через не враховування окремих факторів, що впливають на надійність обладнання. Для обмежуючих надійність деталей систем вже на цій стадії визначаються шляхи підвищення їх ресурсу пошуком і використанням нових конструктивних і технологічних рішень.

Статистичний аналіз показників надійності вузлів і деталей ШСНУ показав, що надійність ШСНУ в цілому найбільше залежить від надійності свердловинного насоса та колони НШ.

На основі проведеного аналізу умов роботи та статистичного аналізу показників надійності обладнання ШСНУ формулюємо наступні висновки:

1. Отримані рівняння регресії, які дозволяють визначити ймовірність безвідмовної роботи ШСН для наробітків тривалістю 50, 100 і 150 діб. Зі збільшенням діаметра ШСН імовірність безвідмовної роботи та середній наробіток на відмову його зменшується. Обводненість продукції значно впливає на термін безвідмовної роботи ШСН. Із збільшенням обводненості продукції свердловини більше 30% значно зменшується термін служби насоса.

2. Отримані графічні та аналітичні залежності, які дозволяють оцінювати можливу глибину обриву штангової колони з певною ймовірністю для штанг різного діаметра та різних діаметрів ШСН. При використанні насосів меншого діаметра місця обривів НШ переміщуються в верхню частину колони, а з ростом його діаметра місця поломок переходять в нижню частину. Із збільшенням діаметра насоса частота обривів колони НШ різко зростає. Розподіл обривів колон НШ в НГВУ «Долинаназфтогаз» по глибині свердловини має наступний вигляд: в середній частині штангової колони частота обривів подвоюється в порівнянні з верхньою, а внизу потроюється.

3. Отримані залежності середнього наробітку до першої відмови колони НКТ від обводненості продукції свердловини. При обводненості продукції свердловин більше 30 % середній наробіток до першої відмови НКТ

діаметром 73 мм на свердловинах НГВУ «Долинанaftогаз» різко зменшується.

4. Отримані рівняння регресії, які дозволяють з певною точністю прогнозувати наробіток основних вузлів і деталей верстатів-качалок при певних значеннях навантаження на головку балансира.

Перспективним шляхом підвищення ресурсу ШСНУ є застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) для виробництва НШ і НКТ, що вже тривалий час підтверджується світовою практикою. Ставиться задача, опираючись на світовий досвід, розробити, випробувати і підтвердити доцільність використання НШ з ПКМ, які б могли випускатись вітчизняною промисловістю. Враховуючи, що в світовій практиці найбільша кількість обривів НШ з ПКМ відбувається через недостатню міцність з'єднання тіла з сталеву головку, першочергову увагу потрібно приділити розробці математичної моделі з'єднання і визначити найбільш раціональні його конструкції. Необхідно визначити основні деформаційні характеристики НШ з ПКМ, випробувати на зношування та опір втомі.

Для оцінки і прогнозування надійності обладнання ШСНУ необхідно проводити збір і аналіз даних. Використання комп'ютерної техніки дозволяє створювати потужні бази даних для систематизації та подальшої обробки різного роду експлуатаційних параметрів, наробітків як системи в цілому, так і окремих її частин. Для контролю та діагностування технічного стану ШСНУ потрібно розробити діагностичний комплекс, який би дозволяв проводити аналіз поточного стану і прогнозувати ресурс роботи обладнання, що може лягти в основу розробки план-графіків ремонтів [48]. Необхідне створення бази даних для оцінювання основних показників надійності обладнання ШСНУ і розроблення оптимальних план-графіків ремонту обладнання з розробленням стратегії оновлення елементів колони НШ на основі теорії ланцюгів Маркова.

## РОЗДІЛ 2

# СВІТОВИЙ ДОСВІД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СВЕРДЛОВИННОГО ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

### 2.1 Існуючі методи підвищення надійності колон насосних штанг і насосно-компресорних труб

Надійність свердловинного обладнання залежить від умов експлуатації, конструктивної проробки, якості ремонту, монтажу і може бути підвищена наступними методами: використанням нових матеріалів, захисних покриттів і методів обробки матеріалів; розробленням різноманітних захисних пристроїв; застосуванням ефективних інгібіторів корозії і засобів боротьби з парафіновідкладеннями. Крім цього на стадії виготовлення обладнання велику увагу слід приділяти вдосконаленню технології виробництва, автоматизації і забезпеченню високої якості продукції, а на стадії експлуатації – науковим методам експлуатації, збору і конкретизації досвіду експлуатації, зв'язку з виробництвом і проектувальниками, підвищенню кваліфікації робітників.

Досвід експлуатації свердловинного обладнання ШСНУ показує, що надійна робота досягається при дотриманні наступних основних вимог: правильного вибору складу конструкційної сталі чи сплаву; обмеження твердості вибраного матеріалу і твердості зварних швів; врахування впливу середовища на механічні властивості сталі чи сплаву при розрахунку на міцність; термічна обробка виробів для зняття внутрішніх напружень, що виникають при їх виготовленні (особливо при зварюванні); контроль якості основного металу, зварних швів і загальної якості виготовлення [4].

Значний досвід у виробництві сталевих НШ набули провідні в даній галузі компанії: американські National Oilwell Varco (NOV), Norris Rods, Continental Emsco, Trico, Battenfeld, швейцарська Weatherford International Ltd., китайська Sovonex, а також відома австрійська компанія Schoeller-

Bleckmann Oilfield Equipment AG [45, 49, 50, 51, 52]. Всі НШ цих фірм відрізняються одна від одної за механічними, фізичними властивостями, але вони відповідають стандарту API Spec 11B [53]. Серед виробників, що працюють на теренах колишнього Радянського Союзу, найбільш відомими виробниками є ВАТ «Мотовіліхінські заводи», ВАТ «Очерський машинобудівний завод», ВАТ «Іжнафтомаш», завод «Компласт» та ін.

Компанія National-Oilwell виготовляє НШ класу С API Spec 11B і «Електра» [49]. НШ «Електра» призначені для надвисоких навантажень при роботі в безсірчаних і високосірководневих корозійних середовищах при умові використання відповідних методів захисту від корозії. Для їх виготовлення використовують спеціальний нікельхроммолібденовий сталевий сплав. Процес «Електра» оснований на унікальному методі індукційного гартування, який не використовується ні одним іншим виробником.

Сталеві НШ компанії Norris [51] виготовляються з гарячекатаних прутків модифікованої мікродобавками вуглецевої чи легованої сталі особливої якості. Всі прутки випрямляють і піддають поверхневій електромагнітній дефектоскопії методом вихрових струмів. Прутки нормалізують по всій довжині для зняття залишкових напружень, піддають гартуванню і відпуску для рафінування і гомогенізації зернистої структури, а потім дробоструменевій обробці для повного видалення окалини. Муфти для НШ Norris типу «Т» і Sprayloy<sup>®</sup> виготовляються з приготовлених холодним штампуванням заготовок чи холоднотягнутих безшовних труб машинобудівної сталі особливої якості. Муфти типу «Т» рекомендується встановлювати при відсутності небезпеки абразивного чи корозійного руйнування. Зовнішня поверхня муфти Sprayloy<sup>®</sup> захищена від зношування і корозії шаром нікельхромового покриття товщиною 0,254-0,508 мм.

Високоміцні (HS) НШ компанії Continental Emsco [50] виготовляються з мікролегованої сталі і призначені для важких умов відкачування з глибоких

свердловин. Штанги, отримані з легованої хромом, молібденом і марганцем сталі з ванадієм і ніобієм і відповідною кількістю азоту для покращення мікрострою, відрізняються покращеними як механічними властивостями, так і втомними характеристиками.

Компанія Trisco виготовляє високоякісні НШ для різних умов експлуатації [50]. Штанги типу D61 (клас D API Spec 11B) з вуглецево-марганцево-хромисто-молібденової сталі AISI 4142H повністю нормалізованої і відпущеної з високою міцністю на розрив рекомендуються для робіт при великих навантаженнях в некорозійно активних середовищах. Штанги типу T66 виготовляються з спеціальних легованих сталей і можуть витримувати дуже високі навантаження і самі несприятливі свердловинні умови.

Австрійська компанія Schoeller-Bleckmann розробила перші і поки що єдині дійсно нержавіючі корозійностійкі НШ [52]. Штанги дозволяють видобувати висококорозійні агресивні середовища, видобуток яких до даного часу був економічно недоцільним.

Компанія Weatherford виготовляють НШ наступних типів [50]: штанги S88 призначені для проведення спеціальних глибинних робіт в свердловинах з великим навантаженням і середньо корозійним середовищем; штанги S87 призначені для використання в середньо корозійному середовищі або в свердловинах з інгібіторами; штанги S67 призначені для використання з важкими насосними установками і в свердловинах з некорозійним середовищем. Також Weatherford виготовляють надміцні штанги EL, які відносяться до класу «преміум». Ці штанги виготовлені з використанням спеціального компресійного шару на поверхні, який не руйнується під дією нормальних розтягуючих зусиль, і тим самим зменшує ймовірність виникнення втомних тріщин.

Окрім суцільних сталевих НШ, використовуються порожнисті НШ. Порожністі НШ призначені для передачі руху від головки балансира



верстата-качалки плунжеру свердловинного насоса при безперервній або періодичній подачі в порожнину насосних труб інгібіторів корозії, інгібіторів відкладання парафіну, розчинників парафіну, теплоносіїв.

Неперервні штанги широко експлуатуються на промислах США і Канади. Неperервна колона штанг виготовляється з сталей тих же марок, що і звичайні штанги (AISI 1036 і 4621) [54, 55]. Найкращі результати дають рівномічні неперервні колони штанг при збільшенні діаметра послідуєчих ступеней на 1,6 мм. До основних переваг неперервної колони штанг можна віднести: відсутність з'єднань штанг і, відповідно, зменшення ймовірності їх поломок; при достатньо високому запасі міцності суттєве зменшення можливості втомного руйнування; більш правильний підбір конструкції колони, так як використовується більша кількість розмірів штанг; менша вага; зменшення навантаження на верстат-качалку, крутного моменту і потужності електродвигуна. Розробка експериментального зразка неперервної штангової колони проводилась ТатНДЦнафтомашем разом з Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона [2]. Матеріалом служив прутковий прокат з сталі 20Н2М-Ш, який пройшов нормалізацію.

Ефективним методом підвищення надійності деталей свердловинного обладнання (зокрема, підвищення опору корозійно-втомному руйнуванню) є нанесення на їх поверхню покриттів з епоксидних і поліамідних порошкових матеріалів [56]. Технологічний процес формування покриття з порошкових матеріалів включає: підготовку поверхні під покриття; напилення і оплавлення шару порошкового матеріалу; термообробка виробу. Найбільш ефективними способами нанесення порошкових полімерів на деталі типу стержнів є електростатичне напилення і напилення в псевдорідкому шарі з електростатичною зарядкою частинок в ванні з порошком. Оптимальна товщина покриття повинна бути 400...500 мкм.

За кордоном труби НКТ виготовляють як за стандартами API (5A, 5AX, 5AC), так і за іншими нормативними документами [45]. Стандарт API 5A

передбачає виготовлення труб груп міцності H-40, J-55 і N-80, стандарт API 5AX – з високоміцних сталей групи міцності P-105, стандарт API 5AC – з корозійностійких сталей груп міцності C-75 і L-80. Випускаються також нестандартизовані труби груп міцності C-90, Q-125, V-150. Для з'єднання труб застосовують конічні різьби з трикутним (аналоги з'єднань для гладких труб НКТ згідно ГОСТ 633-80) або трапецеїдальним профілем (аналоги з'єднань труб типів НКБ, НКМ згідно ГОСТ 633-80).

Стандартами API [45] передбачені різьбові з'єднання висадкою назовні, гладкі і безмуфтові з'єднання, наприклад, "Інтеграл". Ці різьбові з'єднання взаємозамінні із з'єднаннями по ГОСТ 633-80. Зі з'єднань інших типів можна відмітити з'єднання "Хайдрилл". Характерною особливістю таких з'єднань є двоступінчата різьба, причому з'єднання може бути як муфтове, так і безмуфтове, з висадкою назовні і всередину. Це з'єднання дозволяє отримати три ущільнюючі поверхні - на кінцях труб і сходинках різьб. Виконання з'єднання "Хайдрилл" з висадкою дозволяє отримати міцне і герметичне з'єднання, міцність якого не менше міцності тіла труби.

Фірма "Атлас Брэдфорд" (США) [45] у своїх різьбових з'єднаннях широко застосовує ущільнюючі кільця з тефлону, що дозволяють отримати високогерметичне з'єднання, оскільки ущільнення здійснюється по двох поверхнях: по конічних ущільнюючих поверхнях і ущільнюючому кільці. Фірми "Маннесман" (Німеччина) і "Валурек" (Франція) застосовують у своїх з'єднаннях різьбу "Батресс". Фірма "Маннесман" широко використовує з'єднання типу TDS, ущільнення якого здійснюється за рахунок виконання спеціальної опуклої поверхні на кінці труби, що щільно входить в циліндричне розточування, а фірма "Валурек" – високогерметичне з'єднання типу VAM, ущільнення якого здійснюється за рахунок виконання конічної поверхні на скошеному кінці труби, що дозволяє при згвинчуванні отримувати дві ущільнюючі поверхні.

Використання корозійно-стійких покриттів є одним з ефективних і економічних методів підвищення надійності і для НКТ [57]. Для захисту внутрішньої поверхні НКТ від корозії, зношування, відкладення парафіну і

солей застосовують лакофарбові матеріали на основі епоксидних, фенольних і вінілових смол. Досвід їх використання показав, що найбільш ефективними є покриття з епоксидних лакофарбових матеріалів, які характеризуються високими механічними і фізико-хімічними властивостями, а технологічний процес їх нанесення відрізняється простотою і високою продуктивністю.

Поряд з наведеними вище методами підвищення надійності свердловинного обладнання ШСНУ останнім часом велику увагу приділяють використанню ПКМ для виготовлення НШ і НКТ.

## **2.2 Використання полімерно-композиційних матеріалів для виготовлення свердловинного обладнання**

### **2.2.1 Області застосування виробів нафтового сортаменту з полімерно-композиційних матеріалів**

В розвинутих країнах труби та вироби з ПКМ застосовуються вже довгий час [54, 55, 58, 59, 60]. Завдяки розробленню способу прецезійного намотування (filament winding) відкрилась можливість використання армованих скловолокном пластмасових труб для підвищених тисків. В 1970-х роках в США освоєна технологія виготовлення НШ з ПКМ. Після 15-річного використання та вдосконалення НШ з ПКМ знайшли широке застосування в США, Канаді та інших країнах.

Корозія підземного обладнання та перекриття прохідного простору НКТ відкладами солей є серйозними ускладненнями в роботі свердловини. Існуючі методи їх подолання часто є технічно неефективними та економічно недоцільними. Для уникнення подібних ускладнень провідними нафтовими компаніями світу ще з 70-тих років минулого сторіччя використовуються склопластикові НКТ. Першими почали виготовляти склопластикові НКТ американські компанії, зокрема Ameron [61].

При використанні в колонах НКТ труби з ПКМ спускаються у вільно підвішеному стані всередині обсадної труби до глибини приблизно 1000

метрів. При цьому певна частина власної ваги труби компенсується підйимальною силою, що спричинена стовпом рідини, який знаходиться в нагнітальній свердловині. В цьому відношенні велика аксіальна міцність при розтягу труб, приведена до одиничної ваги труби при порівняно високих номінальних тисках, представляє важливий аргумент для використання волокнонаповнених полімерних матеріалів [59].

При експлуатації в нагнітальних свердловинах склопластикових НКТ в НГВУ "Білоруснафта", згідно з статистикою, середній термін служби звичайних сталевих НКТ складає в середньому 3 роки. Причиною заміни труб є корозія, викликана наявністю сірководню в закачуваній воді. Після використання на чотирьох свердловинах склопластикових НКТ за півтора року вони працювали без проблем. Підйомів їх підвіски не доводилось проводити через відсутність неполадок [61].

Впровадженню склопластикових НКТ в радянській нафтогазовій промисловості заважала відсутність вітчизняних технологій виготовлення відповідних різьбових з'єднань. Піонерами виготовлення склопластикових НКТ на пострадянському просторі є підприємство "Завод склопластикових труб" [61], засноване компанією Татнефть. Це підприємство виготовляє склопластикові НКТ на технологічній лінії EN-TECH (США).

В Україні виробництво склопластикових НКТ започатковано в ТОВ "НВП Пластар", м. Харків. Співробітники цього підприємства ще у 1990-х рр. запатентували власну технологію виготовлення різьб склопластикових труб [63]. Головною відмінністю різьб склопластикових труб, що виготовляються ТОВ "НВП Пластар", є оптимальний профіль різьби з урахуванням особливостей ПКМ. Це дає змогу одержувати рівномічні з тілом труби різьбові з'єднання, виготовлені з склопластику.

Не дивлячись на те, що сталь вже довгі роки служить основним конструкційним матеріалом для НШ, процент їх аварій достатньо високий. В 70-х роках в США була освоєна технологія виготовлення НШ з ПКМ.

Створення нових штанг було викликане необхідністю покращення економічних показників видобування нафти в складних умовах. В 1979 році компанією “Fiber Flex” було розпочато масове виробництво штанг з скловолокна. В перші роки використання склопластикових штанг спостерігалась велика кількість обривів по тілу штанг через погану якість їх виготовлення. Після 1979 року було проведено удосконалення технології виготовлення, яке полягало у використанні смоли для зв’язування скловолоконної основи. Крім того, було вдосконалено з’єднання тіла штанг з сталевими головками [54]. Після 15-ти річного використання та вдосконалення НШ з ПКМ знайшли широке застосування в США, Канаді та інших країнах. Для склопластикових насосних штанг американський нафтовий інститут розробив стандарт API-11С.

Склопластикові НШ випускаються рядом американських компаній [54]. Компанія “Fiber Stress of Gainesville” випускає склопластикові штанги, що виготовляються намотуванням склопластикових волокон на семижильний кабель. Муфти для штанг представляють собою сталеві патрубки з стандартною різьбою за API, покриті шаром склопластика. Штанги можуть з успіхом використовуватись в свердловинах з великим корозійно-агресивним і парафіномістким середовищем.

Компанія “Amoco Production Co.” проводила промислове випробовування склопластикових штанг в свердловинах з висококорозійною продукцією [55]. Міжремонтний період таких штанг в багато разів більший, ніж штанг з сталі самих високих марок. Однак такі штанги мають ряд недоліків: розтріскуються всередині сталевої муфти, розриваються при стискуванні тощо.

Склопластикові штанги компанії “Fiber Flex Production Inc.” не мають вказаних недоліків [55] і з успіхом використовуються з деякими видами нового обладнання. Заміна 70 % звичайних НШ в установці “Alpha 1”

склопластиковими знижує коефіцієнт навантаження на 50 %. В результаті чого термін служби колони штанг зростає в 3 рази.

Імпортувавши з США технологію та обладнання, Китайська Нафтова Корпорація по Техніці та Розробці організувала на Шашийському трубному заводі виробництво НШ з ПКМ, і зареєструвала їх під маркою “Шашиштанга” [64]. Стержень штанги представляє собою велику кількість тонких скляних волокон, просмолених спеціальною пластмасою. З’єднання виготовляються з корозійностійкої та термообробленої сталі, володіють високою точністю та міцністю різьби. Випробовування штанг на втому в лабораторії та результати їх використання в більше як 200 свердловинах, розміщених на 15 нафтопромислах Китаю, довели їх якість, яка вища норм проектування.

Науково-виробничою фірмою "Синтез" (РФ) виготовляються склопластикові НШ на основі американської технології відповідно до специфікацій API 11С і АСТМ з використанням передової технології механічної обробки. Основа композитних НШ нового покоління - виготовлені методом пултрузії стержні на основі наномодифікованої поліуретанової рівниці із склокомпозитним армуючим наповнювачем. Строгий контроль якості включає рентгенівську дефектоскопію кожного з’єднання (за допомогою рентгенівського детектора), випробування на втому в регулярних інтервалах (Центр Випробувань на Втому Instron-8502), випробування на міцність на розтяг для кожної НШ (американський спеціальний тестер випробування на міцність. Патент №. US 4475404).

НШ з ПКМ рекомендовано використовувати в свердловинах з високопульсуючим рівнем флюїду, з перевантаженим режимом роботи наземного обладнання, з корозійноактивною продукцією. Не рекомендується використовувати штанги з ПКМ в свердловинах з високов’язкою нафтою, з недостатнім рівнем рідини, з викривленням свердловини типу “DOG LEG”. Крім цього, у зв’язку з зношуванням по внутрішній поверхні НКТ, що

приводить до збільшення числа обривів колон НШ, їх слід використовувати лишень з спеціальними протекторами та іншими захисними пристроями.

### 2.2.2 Порівняння характеристик труб і виробів з полімерно-композиційних матеріалів зі сталевими

В порівнянні зі сталевими трубами, що застосовуються в нафтовій промисловості, пластмасові волокнонаповнені труби мають наступні переваги: труби з ПКМ відрізняються високою корозійною стійкістю (відпадає необхідність у внутрішніх чи зовнішніх покриттях, як на сталевих трубах); завдяки своїй корозійній стійкості не потребують додаткових засобів по експлуатації у відношенні катодного захисту, повторної ізоляції чи ремонту дефектних внутрішніх лайнерів; невелика вага забезпечує полегшену маніпуляцію та більш економічне транспортування [59].

Робота із трубами, опускання у свердловини, а також підймання зі свердловин можливий за температур навколишнього середовища від  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальна робоча температура труб у свердловинних умовах становить  $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$  (залежно від типу затверджувача). Використання склопластикових НКТ дозволяє вирішувати як проблему корозії, так і відкладання солей.

Дослідженнями В.П. Тронова і його співробітників в ТатНДПІ-нафта були визначені сили зчеплення сольового каменю з поверхнями різної полярності, такими, як окислена сталь, парафін, силікатне скло, органічне скло і поліетилен. Результати досліджень наведені в таблиці 2.1.

**Таблиця 2.1** – Сили зчеплення сольового каменю з різними поверхнями

| Поверхня                     | Адгезія, г/см <sup>2</sup> |
|------------------------------|----------------------------|
| Сталь                        | 2250                       |
| Скло                         | 4100                       |
| Парафін                      | « 0                        |
| Органічне скло (склопластик) | « 0                        |
| Поліетилен                   | « 0                        |

З даних видно, що сили адгезії сольового каменю до гідрофільного скла і окисленої сталі досить великі і складають 4100 і 2250 г/см<sup>2</sup> відповідно. Водночас сили адгезії сольового каменю до гідрофобних поверхонь (органічного скла, поліетилену і парафіну) виявилися настільки низькими, що прилад зареєстрував зусилля, близькі до нуля.

Крім цього, навіть якщо купівельна вартість труб з ПКМ приблизно на 100-150 % вища ніж аналогічних сталевих труб, загальні витрати складають для пластмасових труб тільки біля двох третин від сталевих труб, витрати на експлуатацію труб з ПКМ нижчі, і термін служби, відповідно, значно вищий [58]. Очікувана загальна економічна ефективність труб з ПКМ, таким чином, набагато вища.

**Таблиця 2.2** – Фізико-механічні показники ПКМ для НКТ

| Найменування показника             | Одиниця виміру    | Величина              |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Окружний модуль пружності          | ГПа               | 25,0                  |
| Осьовий модуль пружності           | ГПа               | 17,0                  |
| Осьова міцність                    | МПа               | 220                   |
| Водопоглинання                     | %                 | 0,15                  |
| Номінальна густина                 | кг/м <sup>3</sup> | 1750                  |
| Коефіцієнт запасу по герметичності |                   | 4                     |
| Коефіцієнт теплопровідності        | Вт / (мК)         | 0,45                  |
| Коефіцієнт теплового розширення    | 1 / К             | 19·10 <sup>-6</sup>   |
| Коефіцієнт шорсткості              | мм                | 1524·10 <sup>-6</sup> |

Застосування склопластикових НКТ дає змогу одержувати економічний ефект вже впродовж перших місяців експлуатації, адже на сьогоднішній день склопластикові НКТ вітчизняного виробництва за вартістю співмірні зі звичайними металевими НКТ.

Аналіз конструкцій НШ різних розробників свідчить, що вони виконують різні функції, мають різну форму і технічні характеристики, виготовлені з різного матеріалу, до них застосовують різний спосіб монтажу. На даний час випускаються штанги, розроблені згідно з міжнародним стандартом ГОСТ 13877-96, Держстандарту РФ та Американського нафтового інституту (API).



Матеріалами для виготовлення НШ служать: сталь вуглецева чи легована (сталь 40, нормалізована і нормалізована з подальшим поверхневим зміцненням нагріванням СВЧ); 20Н2М (нікель-молібденова), нормалізована, нормалізована з подальшим поверхневим зміцненням нагріванням СВЧ або нормалізована з подальшим об'ємним гартуванням і високим відпуском; 30ХМА, нормалізована з подальшим високим відпуском і зміцненням нагріванням СВЧ; 15НЗМА, нормалізована з подальшим поверхневим зміцненням нагріванням СВЧ; 15Х2НМФ гартування і високий відпуск або нормалізація і високий відпуск); нержавіюча сталь АRD3. Переваги сталевих штанг: широкий вибір сталей для виготовлення штанг; велика кількість методів зміцнення поверхні штанг; можливість застосування різних методів виготовлення штанг.

НШ з сплавів на основі алюмінію, що випускаються фірмою Mega-Rod, за своїми характеристиками не поступаються сталевим штангам, але не мають поширеного використання внаслідок великої розповсюженості сталевих штанг.

В таблиці 2.3 приведено порівняння технічних характеристик штанг з ПКМ і сталевих штанг.

**Таблиця 2.3** – Фізичні відмінності склопластика і сталі

| Найменування показника         | Значення |                    |
|--------------------------------|----------|--------------------|
|                                | сталь    | склопластик        |
| Густина, кг/м <sup>3</sup>     | 7 850    | 2 000              |
| Міцність на розрив, МПа        | 1 600    | 900                |
| Модулі пружності, МПа          | 50 000   | 210 000            |
| Теплопровідність, Вт/м×К       | 0,15     | 50                 |
| Коефіцієнт шорсткості, ум. од. | 0,03     | 0,0015             |
| Робоча температура, °С         | до 300   | до 130             |
| Морозостійкість, °С            | -60      | —                  |
| Корозійна стійкість            | низька   | дуже висока        |
| Стійкість до кручення          | низька   | висока             |
| Стійкість до стирання          | низька   | висока             |
| Характер деформації            | пружна   | пружна і пластична |

НШ з ПКМ мають ряд переваг в порівнянні з сталевими штангами:

- зниження амплітудних і динамічних навантажень;
- висока міцність на розтяг, яка рівна міцності на розтяг штанг з сталі марки D по API;
- мала густина та значне зменшення маси штангової колони, що знижує експлуатаційні витрати на 40-60 % (зокрема на електроенергію на 25-30 %);
- стійкість до корозійної дії нафти, попутної води з солями, що містяться в них, та кислотами;
- значно менші відкладання парафінів, смол та солей на колоні;
- висока пружність (модуль пружності штанг з ПКМ складає до 25 % сталевих), нижча частота природної вібрації;
- зменшення навантаження на головку балансира, редуктор та систему передач;
- збільшення подачі свердловинного насоса, в середньому до 75 %;
- зниження максимального навантаження на полірований шток, в середньому на 30 %.

Одним з істотних моментів при використанні колон із склопластиковими штангами є ефект суперходу. Модуль пружності при розтягуванні для склопластика в 3,5-4 рази менше, ніж для сталі, а пружна деформація під навантаженням для склопластика відповідно вище. В процесі експлуатації штангової колони відбувається пружна деформація двох видів: 1) початкова – при русі колони вниз, деформація під дією власної ваги колони; 2) робоча – при русі колони вгору, деформація під дією власної ваги колони і ваги рідини. Початкова деформація враховується при розрахунку початкової довжини колони, укомплектованою склопластиковими НШ. Доля робочої деформації, що виникає під дією ваги рідини, може зменшити величину ходу плунжера величиною ходу полірованого штока. При експлуатації штангової колони виникає система, яка характеризується

безрозмірним параметром довжини ходу, який дорівнює відношенню довжини ходу плунжера насоса до довжини ходу полірованого штока.

Недоліком штанг з ПКМ є порівняно низька міцність на стиск, в результаті чого необхідно встановлювати обважнений низ (звичайні сталеві штанги). Крім того, неякісне виготовлення склопластикових штанг обмежує їх використання.

Використання НШ з ПКМ дає значні переваги в порівнянні із звичайними сталевими, проте вони значно дорожчі (вартість штанг з ПКМ становить приблизно 1,3 вартості колони сталевих) і їх не рекомендується використовувати свердловинах із високов'язкою нафтою, з недостатнім забезпеченням рідиною та викривленням свердловини. Тому актуальною залишається проблема вдосконалення конструкції та процесу виготовлення склопластикових штанг в бік зниження їх вартості та подолання приведених недоліків.

### **2.2.3 Технологія виготовлення та матеріали**

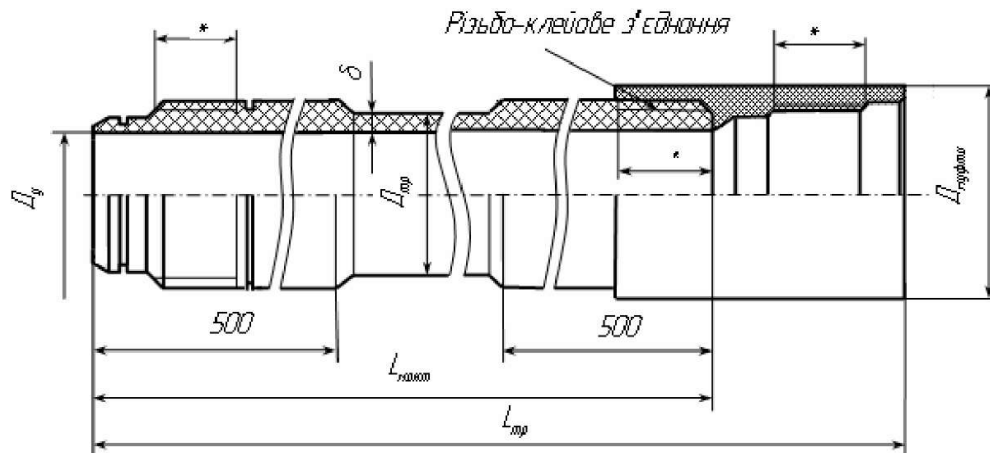
Труби з ПКМ в Україні виготовляються за технічними умовами ТУ У В.2.5-25.2-31800623-002:2009, що пройшли узгодження в Держбуді і можуть використовуватися також для спорудження обсадних і ліфтових колон у водозабірних свердловинах питної води.

Матеріали, з яких виготовляються труби, інертні до сірководню, вуглекислого газу й інших корозійно-активних компонентів нафтопромислових рідин; їхні граничні концентрації в середовищах, що транспортуються трубами, не обмежені. Термін служби труб у цих умовах становить не менше 15 років.

Вихідними матеріалами для виготовлення труб є зв'язувач (епоксидна смола та затверджувач ангідридного або амінного типу) і наповнювач (скловолоконна рівниця). Труби виготовляються методом намотування на самоподаючу оправку склорівниці, просоченої зв'язуючим з подальшим

затверджуванням композиції в безперервному процесі. Цей технологічний процес, крім широких можливостей варіації співвідношень механічних характеристик матеріалу труби, дозволяє виготовляти вироби будь-якої довжини.

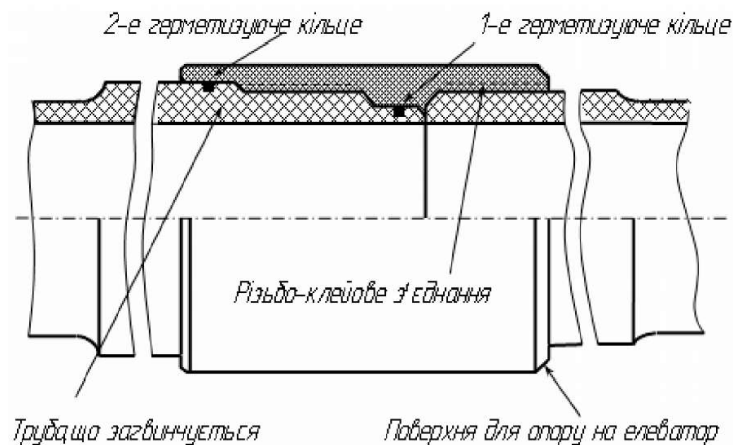
Конструктивно труби складаються з тіла, ніпеля та різьбо-клеювої муфти (рис. 2.1).



**Рисунок 2.1** – Склопластикова НКТ

Різьбові з'єднання виготовляються двох типів: циліндричні з гумовими кільцевими ущільнювачами та конічні. Циліндричні з'єднання використовуються, в основному, в водозабірних свердловинах питного забезпечення, а конічні - в промислових свердловинах.

Схему циліндричного різьбового з'єднання склопластикових труб зображено на рисунку 2.2.



**Рисунок 2.2** – Різьбове циліндричне з'єднання склопластикових труб

З'єднання склопластикових труб з металевими трубами та іншим свердловинним устаткуванням виконується через різьбові металеві перехідники.

Труби з ПКМ можуть виготовлятися методом намотування (неперервного, напівперервного), контактного формування, відцентрового формування. Труби малих діаметрів можуть виготовлятися методом мокрого пресування, причому разом з муфтовими з'єднаннями. Перевага відцентрового методу перед намотуванням полягає в тому, що при першому методі кожне пасмо волокна покривається смолою і пасма розділяються одне від одного (між ними смола), що створює стійкий бар'єрний шар, так як попереджується проникання рідини через стінку труби вздовж волокон чи між ними.

Найбільш ефективним методом виготовлення волокнистих композиційних матеріалів є метод намотування неперервним волокном. Цей метод є досить високопродуктивним і піддається повній автоматизації. Основною перевагою методу намотування є можливість орієнтувати армуючі волокна в заданому напрямку, відповідно з розподілом напружень в елементі конструкції, тобто одержувати матеріали із заданою анізотропією жорсткості та міцності [64].

Найпростішим методом намотування є метод «мокрого» спірального перехресного намотування циліндричних труб. Перевага методу в тому, що він забезпечує одержання більш монолітного в об'ємі матеріалу за рахунок кращої фільтрації рідкого зв'язуючого в намотаному шарі, а також в суміщенні процесів змочування та намотування в одному технологічному циклі (що економічно вигідно).

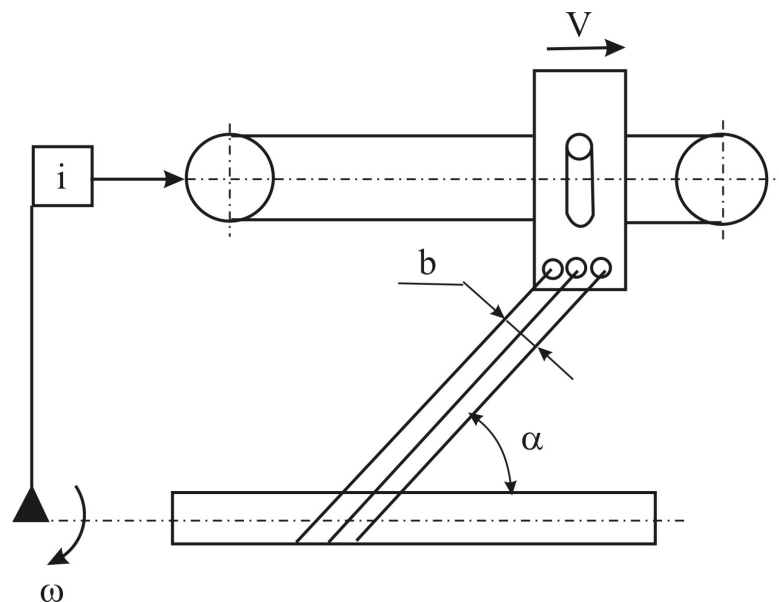
На рисунку 2.3 зображена принципова схема установки для намотування труб. На такій установці необхідний кут армування  $\alpha$  і повне застилення шару забезпечується вибором відповідних значень

передавального числа  $i$  кінематичного ланцюга: «оправка-нитководій» і ширини  $b$  намотувальної стрічки.

Намотування проводять на спеціально сконструйованій в ІППММ НАНУ намотувальній машині, кінематична схема якої показана на рисунку 2.4. Швидкість протягування волокна складає 0,2-0,4 м/с. Для забезпечення сталого коефіцієнта нормування зусилля натягу стрічки  $N$  регулюється виходячи з умов

$$N = pD/2 \sin \alpha, \quad (2.1)$$

де  $p$  – тиск волокна на оправку при намотуванні;  $D$  – поточний діаметр труби.



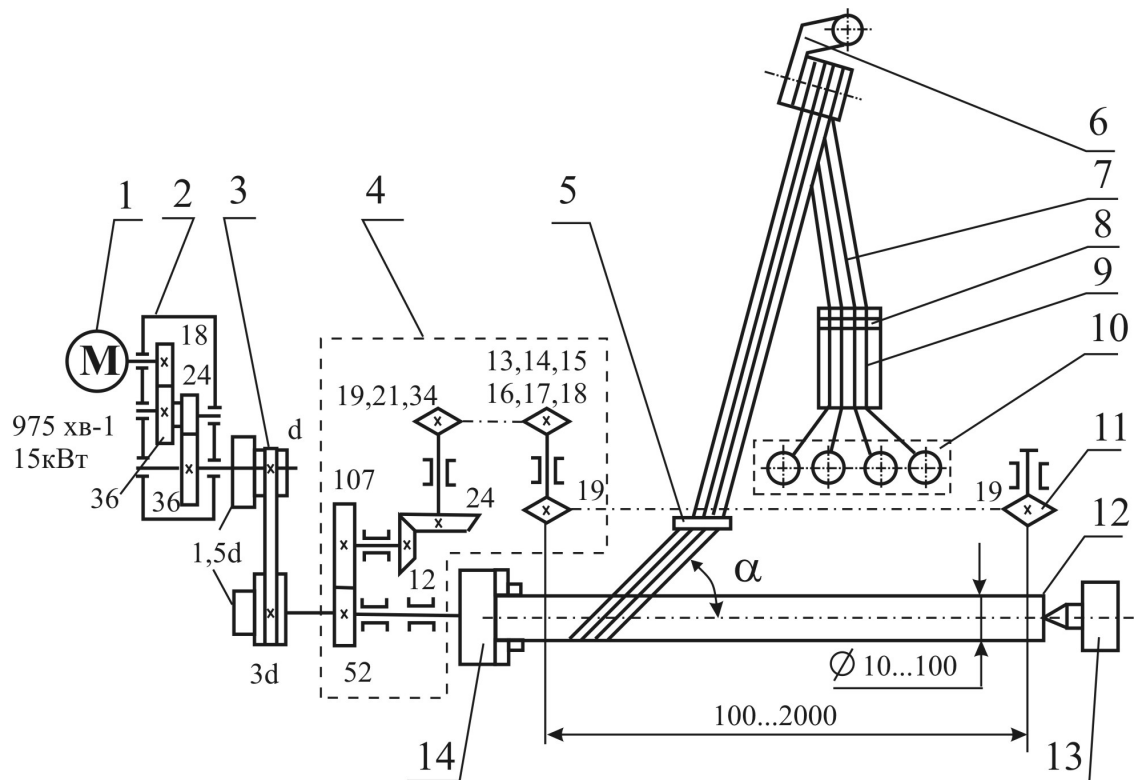
**Рисунок 2.3** – Принципова схема установки для намотування труб з ПКМ

Для армування виробу застосовують скловолокна, вуглецеві волокна, базальтові волокна, борні волокна. Застосування скляного волокна пояснюється його низькою вартістю у порівнянні з іншими і добре налагодженим промисловим випуском [66].

В умовах України більш перспективним є використання базальтових волокон [67, 71]: вони дешевші за скловолокна, оскільки для виготовлення скла необхідні дефіцитні оксид бору та сода, а для виробництва базальтового волокна є практично необмежені запаси сировини у вигляді гірських порід

типу базальту і діабазу. За міцністю базальтові волокна не поступаються скляним, а за термостійкістю і хімічною стійкістю, а також за адгезійною міцністю до зв'язуючого (на основі епоксидних смол) значно переважають їх.

Як армуючу фазу рекомендують використовувати ровінги базальтові ТУ23.0007-89 із комплексу ниток на замаслювачі “парафінова емульсія”.



- 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – пасова передача; 4 – гітара швидкостей;  
 5 – нитководій; 6 – натяжний пристрій; 7 – намотувальна стрічка;  
 8 – віджимний пристрій; 9 – просочувальна ванна; 10 – капюлярник;  
 11 – ланцюгова передача; 12 – оправка; 13 – бабка задня; 14 – патрон трикулачковий

**Рисунок 2.4** – Кінематична схема машини для намотування труб з ПКМ розроблена ІНПММ НАНУ

В якості зв'язуючого (рівниці) використовують наступні типи смол: епоксидні, фуранові, вінілефірні, поліефірні, ортофталеві, суміші на основі ізофталевих з малеїновими смолами. З метою зниження енергетичних витрат при полімеризації і термообробці деталей з ПКМ доцільно застосовувати

зв'язуючі на основі епоксидних смол холодного затвердіння. Таким смолам властиві висока технологічність, мала усадка, високі механічні властивості і адгезія до армуючих волокон, низьке водопоглинання. Оптимальний склад зв'язуючого, при якому реалізується максимальна міцність, ударна в'язкість і демпфуюча здатність ПКМ наступна: епоксидно-поліефірний компаунд K115 – 88 вагових частин (в.ч.), затверджувач поліетилен-поліамін – 12 в.ч. В разі використання смоли ЕД-20 чи ЕД-22 для покращення в'язко-пружних властивостей зв'язуючого слід додати 10 в.ч. пластифікатора дибутилфталата [68].

За кордоном на нафтових родовищах знаходять застосування, в залежності від ступеня агресивного впливу та робочої температури, більш чи менш пластифіковані епоксидні смоли (затверджувачі – аміни чи ангідриди) та вінілові смоли на основі ефірів каніфолі. Існуючі на сучасному ринку труби пропонуються як з антикорозійним, насиченим смолою внутрішнім покриттям і смугою з скловолокна, що служить для переходу до намотувального шарового матеріалу, так і без цього захисного шару. Скловолокна виконання з незахищеним шаровим матеріалом намотані безпосередньо до поверхні труби, що знаходиться зі сторони середовища. У всякому випадку слід запобігати проникненню транспортованого середовища по капілярах вздовж граничних поверхонь волокна/рівниці. Протягом тривалого періоду часу це приведе до пошкодження вузла.

НШ із склопластика зазвичай включає склопластиковий стержень і закріплені на ньому з двох кінців за допомогою адгезиву сталеві головки. Адгезив заповнює простір між поверхнею внутрішньої порожнини установочної частини головки і зовнішньою поверхнею склопластикового стержня з утворенням адгезійного з'єднання.

Великий інтерес представляють гібридні НШ. Гібридна НШ представляє собою гібридний композитний стержень, що складається з однонаправленого осердя з вуглецевого волокна і оболонки зі скловолокна,



та напресованих на обидва торці стержня сталевих головок. Односпрямовані композитні стержні були виготовляються пултрузією (Composite Technology Corporation, Irvine, CA). Стержні складаються з осердя з вуглецевого волокна (CF), оточеного оболонкою зі скловолокна (GF), як описано в [69] і [70]. Ядро складається з армованої вуглецевим волокном епоксидної смоли, в той час як оболонка складається з епоксидної смоли, армованої скловолокном. Епоксидна рівниця розроблена для досягнення високої температури склування ( $T_g=205\text{ }^\circ\text{C}$ ) з використанням відповідної епоксидної композиції і затверджувача.

### 2.3 Висновки до розділу

1. Проведений аналіз існуючих методів підвищення надійності, технології виготовлення та зміцнення колон НШ і НКТ, світового досвіду використання ПКМ для виготовлення НШ та труб нафтового сортаменту показав доцільність застосування свердловинного обладнання з ПКМ на промислах України.

2. НШ та НКТ з ПКМ відрізняються високою корозійною стійкістю, меншою масою, високою міцністю на розтяг та високою пружністю. Застосування штанг з ПКМ дозволяє зменшити навантаження на головку балансира верстата-качалки, використовувати електродвигуни меншої потужності, тим самим зменшуючи експлуатаційні витрати та збільшуючи термін експлуатації обладнання. Невелика вага штанг та НКТ забезпечує полегшену маніпуляцію та більш економічне транспортування.

3. Результати застосування штанг з ПКМ:

- збільшення видобування нафти (“надлишковий хід”, зменшення кількості спуско-підіймальних операцій, збільшення глибини занурення насоса дозволяють збільшити видобування нафти від 20 % до 150 %);

- економія енергії (зменшення навантаження та крутного моменту приводить до зниження витрати енергії на 15 – 20 %);

- зменшення зупинок роботи насосів (все вищенаведене покращує умови роботи системи «верстат-штанги-насос», збільшує термін їх служби, скорочує ремонтно-обслуговуючі роботи в свердловинах);
- економія робочого ресурсу наземного обладнання;
- зниження витрат по видобуванню нафти (не дивлячись на те, що один метр склопластикових штанг на 5,5 долара дорожче одного метра сталевих, додаткові витрати можуть окупитись вже через 6 місяців за рахунок збільшення продуктивності насосних установок).

4. В умовах України для виготовлення ПКМ перспективним є використання скловолокон та базальтових волокон в якості армуючого матеріалу. В якості зв'язуючого (рівниці) доцільно використовувати епоксидні чи фуранові смоли. Найбільш ефективним методом виготовлення НКТ з ПКМ є метод намотування неперервним волокном. НШ з ПКМ виготовляються пултрузією – технологією формування і затвердіння просочених полімерним зв'язуючим волокон стержня протягуванням через систему фільтр з поступово зменшуваним перетином.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### **3.1 Методика, обладнання та зразки для випробовувань насосних штанг з полімерно-композиційних матеріалів на статичну міцність та опір втомі**

Методика хімічних і механічних випробовувань розроблена для проведення досліджень із зразками склопластикових НШ, зразків з базальтопластика. Випробовування проводились в лабораторії кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Проведення хімічних і механічних випробовувань необхідне для визначення хіміко-механічних характеристик штанг з ПКМ і підтвердження можливості заміни ними сталевих штанг.

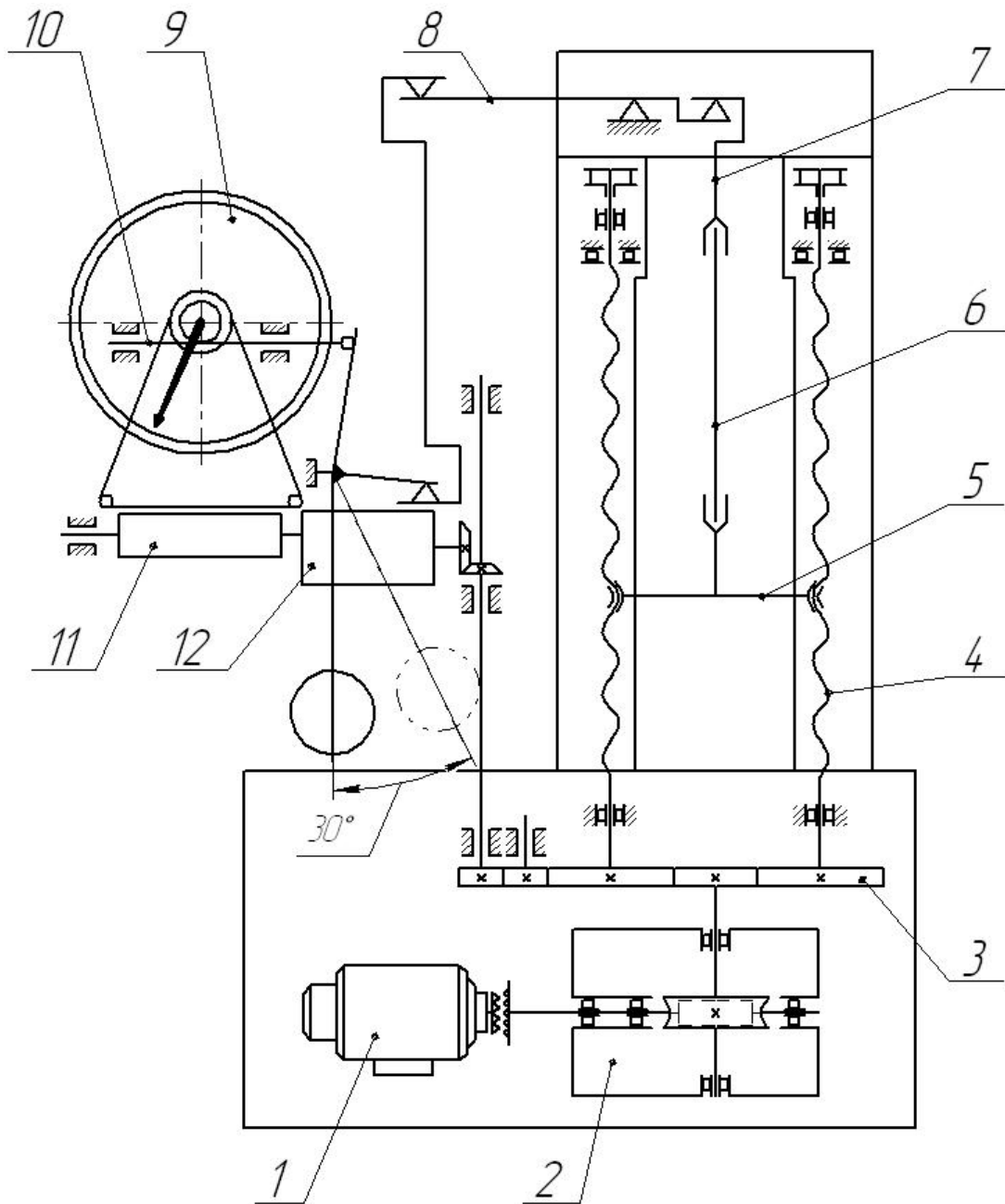
Випробовування проводились:

- на статичну міцність при дії розтягуючих навантажень;
- на витривалість при дії циклічних навантажень;
- на хімічну та корозійну стійкість при дії технологічних рідин з наступним механічними випробовуваннями.

Метою проведення випробовувань є: встановлення величин напружень розтягу, які виникають в поперечному перетині зразків склопластикових НШ і зразків з базальтопластика (в подальшому – зразків з ПКМ) від дії розтягуючих навантажень, в тому числі у місцях з'єднання сталевої головки з склопластиковим тілом; встановлення деформаційних характеристик при розтягу і втомних характеристик при циклічних навантаженнях зразків з ПКМ; визначення характеру руйнування зразків з ПКМ; встановлення впливу хімічного середовища (нафтоводяної суміші, нафтокислотної суміші, кислотних розчинів) на механічні характеристики зразків з ПКМ за нормальних умов та при підвищеній температурі.

Механічні випробовування зразків з ПКМ при статичному навантаженні проводились на розривній машині МР-50 (рис. 3.1). Розривна машина МР-50

призначена для проведення статичних випробувань при нормальній температурі стандартних зразків на розтяг згідно ГОСТ 1497-84.



1 – електродвигун; 2 – редуктор черв'ячний; 3 – передача зубчата;  
4 – гвинт; 5 – затискач активний; 6 – зразок дослідний; 7 – затискач пасивний; 8 – важіль навантаження; 9 – індикатор силовимірювальний; 10 – механізм силовимірювальний; 11 – пристрій записуючий; 12 – блок переміщення і швидкості

**Рисунок 3.1** – Схема принципова розривної машини МР-50 для випробування на статичну міцність

Розривна машина з торсіонним блоком виміру навантаження оснащена вимірювальною системою, яка дозволяє здійснювати випробування із заданою швидкістю навантаження, що забезпечує вимір переміщення активного затискача і його індикацію, запис результату на самописному двокоординатному приладі, включаючи запис деформації зразка з навісного тензометра.

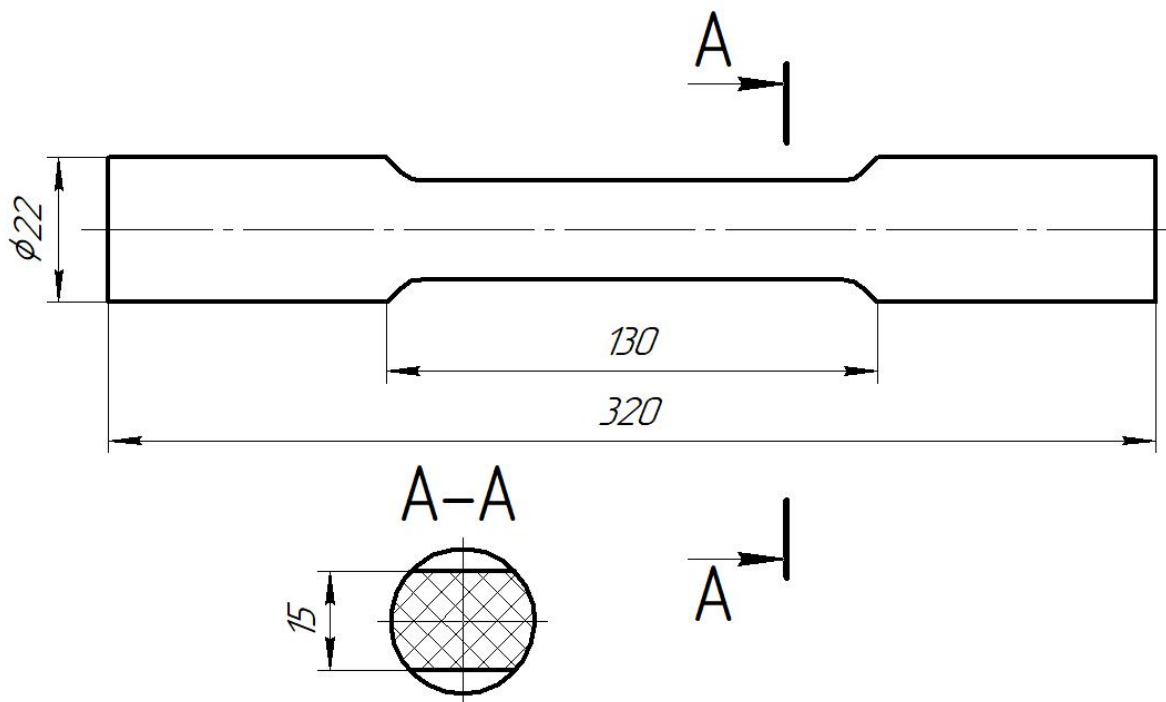
Технічні характеристики:

|   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| Найбільше граничне навантаження, кН   | 500                               |
| Діапазони виміру навантаження, кН   | 20...100<br>40...200<br>100...500 |
| Допустима межа значення погрішності виміру навантаження при прямому ході, % | 1                                 |
| Ширина робочого простору, мм  | 600                               |
| Висота робочого простору, мм  | 400                               |
| Робочий хід активного затискача, мм   | 420                               |
| Маса, кг  | 3600                              |
| Розміри, мм   | 1630×870×220<br>0                 |
| Споживана потужність, кВт   | 3                                 |

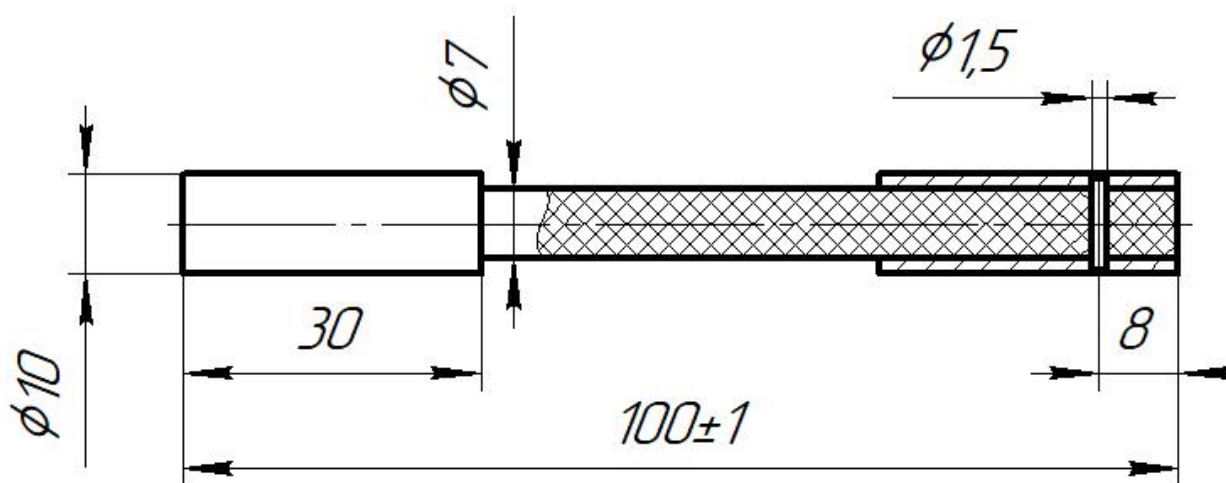
При випробовуванні здійснюється контроль величини деформації і руйнуюче розтягуюче навантаження за допомогою тензодавачів типу 2ПКБ-20-200ГБ і станції «СИИТ-3».

Для випробовувань використовувалися зразки:

- склопластиковий зразок для виробництва штанг діаметром 22 мм фрезерований з двох сторін на довжину 130 мм і товщиною 15 мм (рис. 3.2);
- базальтопластиковий зразок довжиною 100 мм з робочою частиною довжиною 40 мм та діаметром 7 мм (рис. 3.3).



**Рисунок 3.2** – Склопластиковий зразок для випробовування на статичну міцність



**Рисунок 3.3** – Базальтопластиковий зразок для випробовування на статичну міцність

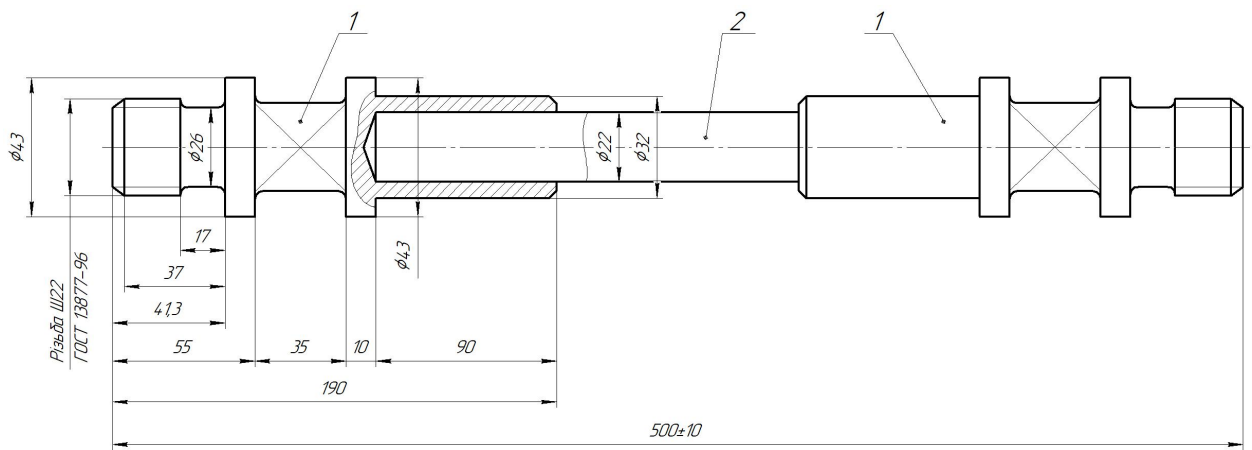
Зразок НШ для випробовувань на статичну міцність на розривній машині та на витривалість при циклічному згині має довжину 500-700 мм і складається з тіла склопластикової штанги, з'єданого зі сталевими головками (рис. 3.4). Сталеві головки в місцях з'єднання з тілом штанги обтискаються певними зусиллями за регламентом заводу-виробника.

Для натурних випробовувань НШ на витривалість при дії циклічних навантажень використовувався стенд ЗКШ-25, який здійснює консольно-поперечний згин зразків довжиною до 500 мм з частотою навантаження 16 Гц [72]. Для імітації нафтоводної суміші в якості корозійного середовища використовується пластова вода та нафтова емульсія, відібрані на родовищах Долинського нафтопромислового району (табл. 3.1).

**Таблиця 3.1** – Характеристика пластових вод Північно-Долинського, Гвіздецького та Битківського родовищ

| Характеристика |                   | Вміст іонів по нафтовим родовищам |            |                 |
|----------------|-------------------|-----------------------------------|------------|-----------------|
|                |                   | Гвіздецьке                        | Битківське | Північна Долина |
| Na+K           | мг/л              | 108585                            | 85993      | 40486           |
|                | мг екв/л          | 4721                              | 3739       | 1756            |
|                | % мг екв          | 41,08                             | 41,90      | 44,12           |
| Ca             | мг/л              | 16629                             | 12100      | 4103            |
|                | мг екв/л          | 829                               | 605        | 205             |
|                | % мг екв          | 7,22                              | 6,80       | 5,14            |
| Mg             | мг/л              | 2373                              | 1441       | 385             |
|                | мг екв/л          | 195                               | 118        | 29              |
|                | % мг екв          | 1,70                              | 1,30       | 0,73            |
| Cl             | мг/л              | 203355                            | 157778     | 70290           |
|                | мг екв/л          | 5734                              | 4449       | 1982            |
|                | % мг екв          | 49,90                             | 49,80      | 49,81           |
| SO             | мг/л              | 130                               | 230        | 115             |
|                | мг екв/л          | 2,7                               | 2,8        | 239             |
|                | % мг екв          | 0,02                              | 0,05       | 0,06            |
| HCO            | мг/л              | 122                               | 170        | 61              |
|                | мг екв/л          | 2                                 | 2,8        | 1               |
|                | % мг екв          | 0,02                              | 0,03       | 0,025           |
| J              | мг/л              | 13                                | -          | 100             |
|                | мг екв/л          | 0,1                               | -          | 0,79            |
|                | % мг екв          | 0,001                             | -          | 0,02            |
| Br             | мг/л              | 511                               | -          | 282             |
|                | мг екв/л          | 6,39                              | -          | 3,52            |
|                | % мг екв          | 0,055                             | -          | 0,09            |
| В О            | мг/л              | 175                               | -          | 300             |
| Мінералізація  | г/л               | 332                               | 258        | 115,7           |
| Густина        | кг/м <sup>3</sup> | 1208                              | 1169       | 1060            |
| pH             |                   | -                                 | 5,5        | 5,23            |

Примітка: хімічний аналіз проведено в ЦНДПІ ВАТ «Укрнафта»



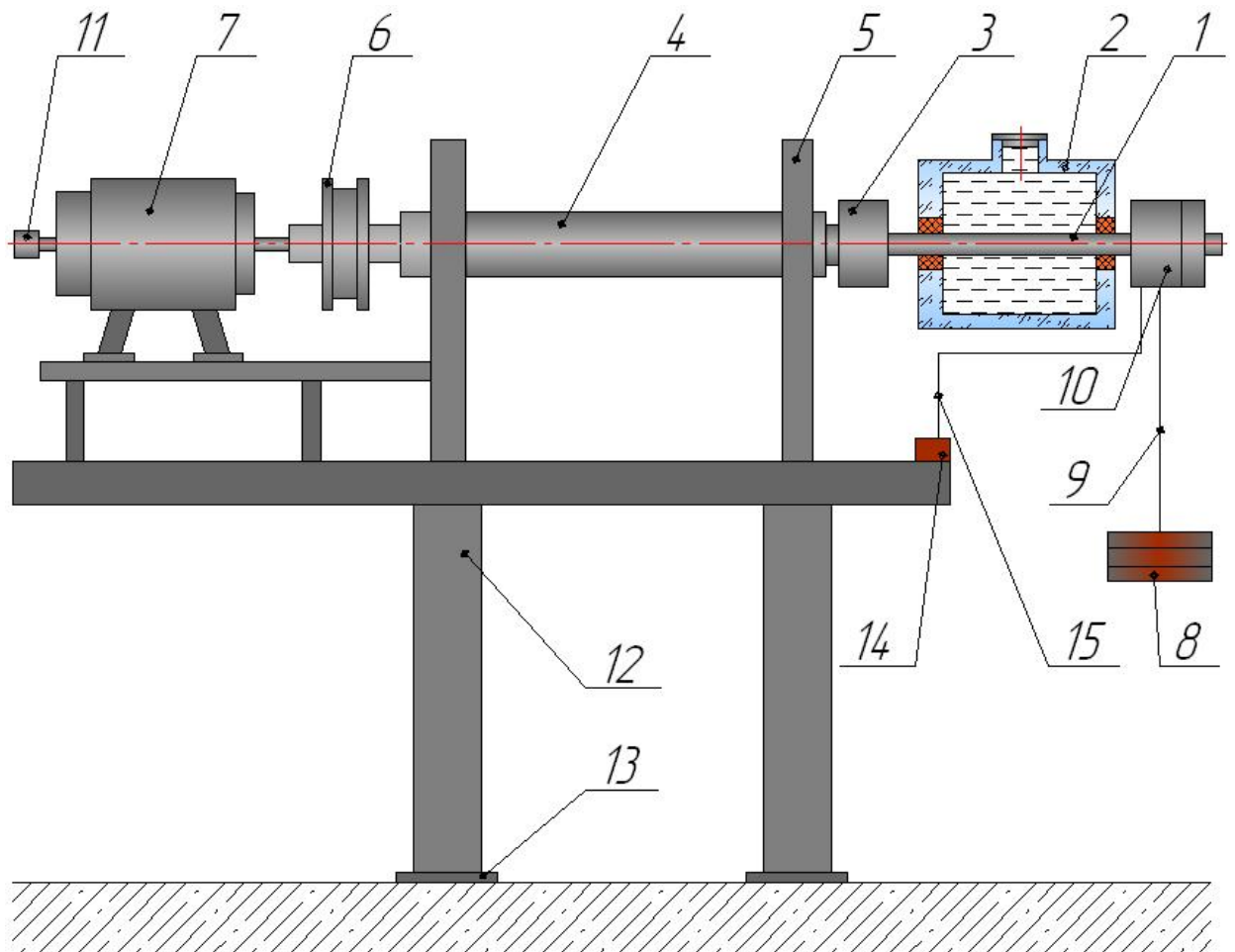
1 – сталевая головка, 2 – тіло з ПКМ

**Рисунок 3.4** – Зразок для випробування на втомну міцність склопластикових НШ

Випробувальний стенд ЗКШ-25 (рис. 3.5) змонтована на рамі 12 і має дві опорні плити (амортизаційні подушки) 12, в яких на підшипниках, закріплених в стійках 5, обертається вал 4, який через пальцеву муфту 6 приводиться в рух від електродвигуна 7.

Кількість циклів навантаження контролюється лічильником 11. До вала 4 через цанговий затискач 3 кріпиться зразок 1, на який одягається електролітна камера для робочого середовища 2. За допомогою цангового затискача 3 можна проводити корозійно-втомні випробовування насосних штанг різного діаметра (16, 19, 22, 25 мм). Консольний згин натурального зразка здійснюється за допомогою системи навантаження, що складається з навантажувальної головки 10 з радіально-сферичним підшипником, який через перехідну втулку кріпиться до штанги. Через тягу 9 за допомогою вантажів 8 здійснюється навантаження на зразок. Для зменшення вібрацій при проведенні випробовувань машина опирається на гумові подушки 13. Установка має систему автоматичного вимкнення електродвигуна при поломці зразка 14, 15.





- 1 – зразок; 2 – камера для робочого середовища; 3 – цанговий затискач;  
 4 – вал; 5 – стояки; 6 – пальцева муфта; 7 – електродвигун; 8 – вантажі;  
 9 – тяга; 10 – навантажувальна головка; 11 – лічильник; 12 – рама;  
 13 – амортизаційні подушки; 14 – вимикач; 15 – важіль

**Рисунок 3.5** – Стенд ЗКШ-25 для випробування НШ на втомну міцність при консольному згині з обертанням

Для випробовування зразків з ПКМ (склопластикових НШ та зразків з базальтопластика) використовувалися наступні середовища: відкрите повітря (дія сонячних променів, опадів, зміни температури та вологості повітря); шар ґрунту; складське приміщення без доступу сонячних та інших променів; нафта Північно-Долинського родовища; пластова вода; розчини соляної кислоти (5 %, 10 %, 15 %); мінералізована пластова вода; комбінування між собою таких середовищ, як нафта Північно-Долинського родовища, пластова вода, розчини соляної кислоти, мінералізована пластова вода.

Випробовування зразків з склопластикових штанг в нафті Північно-Долинського родовища та 10 % розчині соляної кислоти проводилися протягом 7,2 год., 72 год. (3 доби), 720 год. (30 діб), 7200 год. (300 діб); в 5% та 15 % розчині соляної кислоти протягом 720 год. (30 діб) - для подальших статичних випробовувань. Для циклічних випробовувань склопластикових штанг використовувалися такі середовища, як мінералізована пластова вода, нафтова емульсія з пластовою водою, нафтова емульсія з розчинами соляної кислоти.

При циклічних випробуваннях зразків з базальтопластика використовувались такі середовища, як нафтова емульсія з 5 %, 10 %, 15 % розчином соляної кислоти (по 50 % кожного із складників).

### **3.2 Методика, обладнання та зразки для дослідження зношування полімерно-композиційних матеріалів в різних середовищах**

Методика хіміко-трібологічних випробовувань розроблена для дослідження характеру зношування ПКМ, що використовуються для виготовлення труб нафтового сортаменту і НШ, в нафтових середовищах, лабораторією кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Використання ПКМ для НШ і НКТ є одним з шляхів підвищення надійності та довговічності свердловинного обладнання. Проведення хімічних і трібологічних випробовувань необхідне для визначення хіміко-трібологічних характеристик ПКМ, порівняння їх з хіміко-трібологічними характеристиками сталей, що використовуються для виготовлення НШ і НКТ та підтвердження можливості їх використання.

Метою проведення випробовувань є: визначення інтенсивності лінійного і масового зносу при терті сталевих зразків і зразків з ПКМ; визначення характеру зношування зразків з сталей і ПКМ при сухому терті і при терті в корозійно-агресивних середовищах; встановлення впливу хімічного середовища (нафтоводяної суміші, нафтокислотної суміші, кислотних розчинів) на трібологічні характеристики зразків з ПКМ;

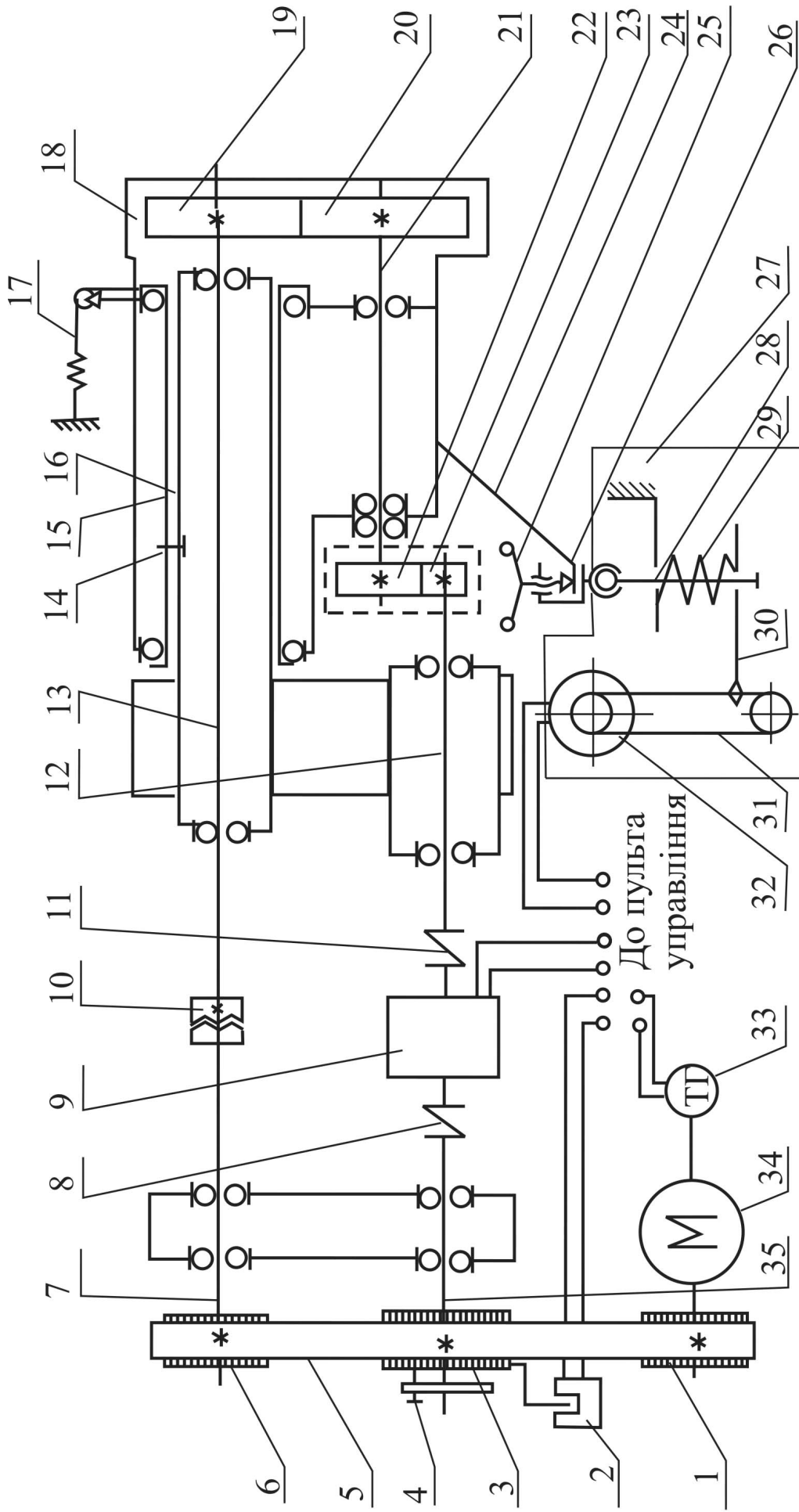
визначення максимальних навантажень, що приводять до катастрофічного зношування при терті зразків з ПКМ; визначення температури в зоні контакту зразків при терті; визначення коефіцієнта тертя ПКМ по ПКМ та сталі по ПКМ при різних умовах роботи; встановлення трібологічних характеристик ПКМ та визначення можливості їх використання для виготовлення НШ і труб нафтового сортаменту.

Дослідження проводились на машині тертя 2070 СМТ-1. Машина тертя 2070 СМТ-1 призначена для дослідження матеріалів на тертя та зношування, для вивчення процесів тертя та зношування металів, сплавів і жорстких конструкційних пластмас. Принцип дії машини полягає в стиранні пари зразків, які притискаються один до одного силою  $P$ . В процесі випробовувань вимірюють момент тертя, фіксують частоту обертання, визначають площу тертя, силу притискання зразків, температуру в зоні тертя.

Взаємозв'язок всіх вузлів і механізмів машини зображено на кінематичній схемі (рис. 3.6). Електродвигун 34 через зубчастий пас 5 обертає шків 3 і 6. Шків 3 через запобіжний штифт 4, вал 35, муфту 8, давач моменту 9, муфту 11 обертає вал бабки 12, на якому встановлюють зразок - «диск» 23. Шків 6 через вал 7, кулачкову муфту 10, вал 13, шестерні 19 і 20 обертає вал каретки 21, на якому встановлюють зразок - «колодка» 22. Зразки притискаються один до одного силою пружини 29 через тягу 28. Величину навантаження регулюють віссю-гвинтом 25, який передає навантаження на зразки через п'яту 26, кронштейн 24 і корпус каретки 18.

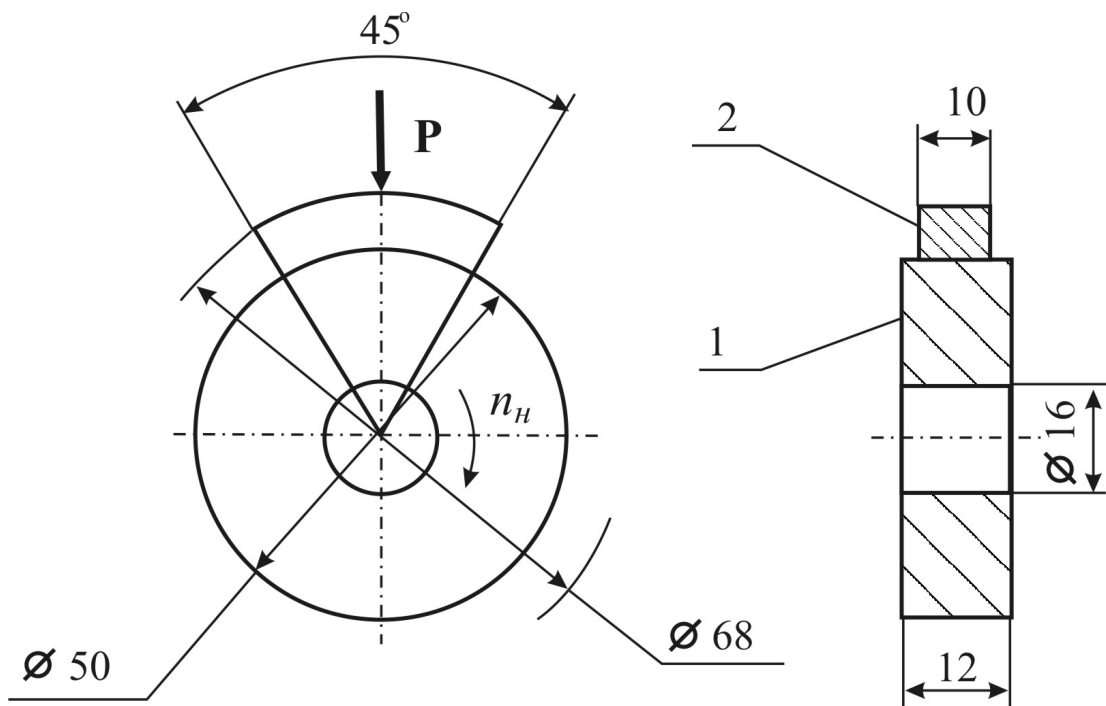
Діапазон частоти обертання вала нижнього зразка міняють, змінюючи діаметр шківа 1. Частоту обертання в межах діапазону змінюють за допомогою електродвигуна постійного струму 34.

Оскільки дана машина дозволяє проводити дослідження по схемах «вал-вулка», «диск-диск», «диск-колодка», слід пам'ятати, що при дослідженні зразків по схемі «диск-колодка» півмуфта 10 повинна бути розімкнута і закріплена в спеціальному пазу. На вал каретки 21 встановлюється тримач для кріплення зразка «колодка», тримач затягується гайкою.

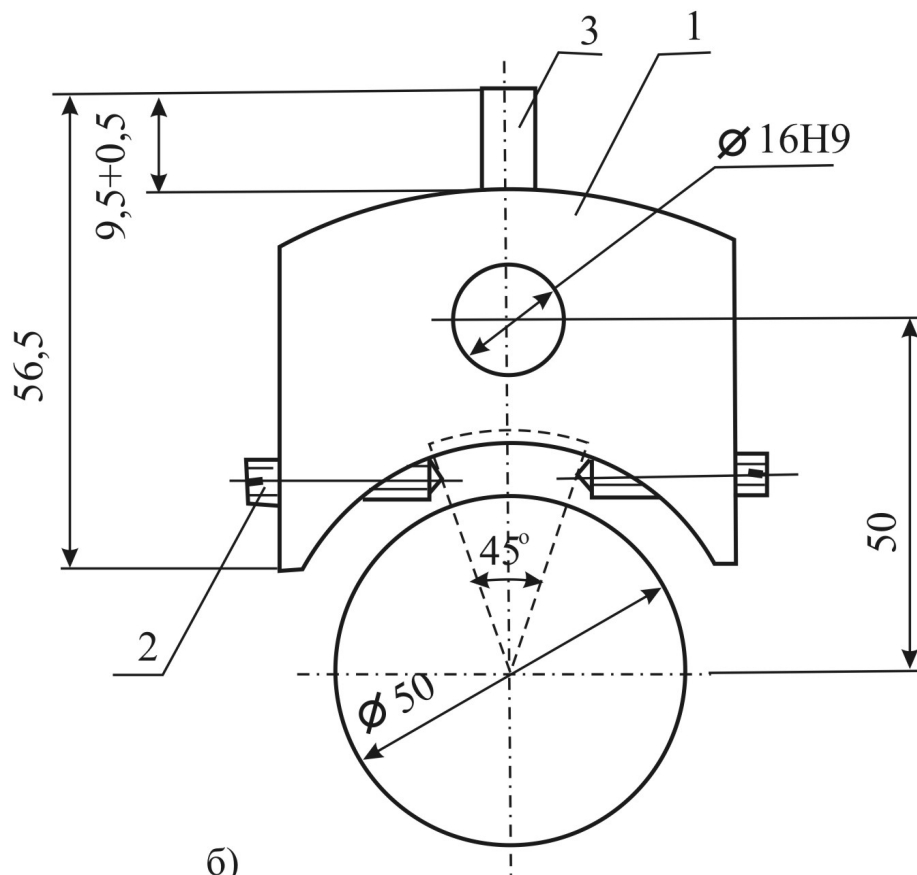


1 - шків змінний; 2 - лічильник числа циклів; 3 - шків; 4 - штифт запобіжний; 5 - ремінь зубчатий; 6 - шків змінний; 7 - вал; 8 - муфта; 9 - моментомір; 10 - муфта кулачкова; 11 - муфта; 12 - вал бабки; 13 - вал; 14 - фіксатор; 15 - стакан; 16 - труба; 17 - пружина зрівноваження; 18 - каретка; 19, 20 - шестерня; 21 - вал каретки; 22 - вал каретки "колодка"; 23 - взірєць "диск"; 24 - кронштейн; 25 - вісь-гвинт; 26 - п'ята; 27 - механізм навантаження; 28 - тяга; 29 - пружина; 30 - планка; 31 - нитка; 32 - давач навантаження; 33 - давач швидкості; 34 - електродвигун; 35 - вал

**Рисунок 3.6** - Кінематична схема машини тертя 2070 СМТ-1



a)



б)

**Рисунок 3.7** – Зразки (а) і тримач (б) для дослідження зношування по схемі "диск-колодка"

Ескізи зразків і тримач показані на рисунку 3.7. Зняття показників давачів і управління машиною проводиться з пульта управління.

В ході проведення лабораторних досліджень на машині тертя здійснюється контроль наступних параметрів:

- момент тертя; одиниця виміру в системі СІ – Н·м. Контроль ведеться по електронному потенціометру, на який сигнали поступають з безконтактного індукційного давача;

- навантаження на зразки; одиниця виміру в системі СІ – Н. Давачем навантаження є прецизійний опір;

- частота обертання рухомого зразка; одиниця виміру –  $\text{хв}^{-1}$ . Контроль ведеться за допомогою тахогенератора;

- число циклів обертання рухомого зразка. Контроль ведеться за допомогою безконтактного вимикача;

- температура в зоні контакту зразків; одиниця виміру –  $^{\circ}\text{C}$ . Контроль ведеться по потенціометру, сигнали на який поступають від термопари.

Товщина зношеного шару визначається за допомогою штангенциркуля і мікрометра. Маса зразків до і після випробовування визначається за допомогою ваг аналітичних ВЛР-200.

Випробовування зразків на машині тертя СМТ-1 проводились по схемі “диск-колодка”.

Зразок “диск” - рухомий, зразок “колодка” - нерухомий. Форма та розміри зразків згідно технічного опису і інструкції по експлуатації машини тертя 2070 СМТ-1.

Матеріал зразків “диск”: сталь 45; термообробка - нормалізація з високим відпуском,  $\sigma_T=340$  МПа,  $\sigma_B=600$  МПа, НВ 207.

Матеріал зразків “колодка”: сталь 20Н2М; термообробка - нормалізація з високим відпуском,  $\sigma_T=550$  МПа,  $\sigma_B=700$  МПа, НВ 192-229; склопластик; базальтопластик.

Для випробовування зразків використовувалися наступні середовища: складське приміщення без доступу сонячних та інших променів; нафта

Північно-Долинського родовища; пластова вода; розчини соляної кислоти (5 %, 10 %, 15 %); комбінування між собою таких середовищ, як нафта Північн-Долинського родовища, пластова вода, розчини соляної кислоти, мінералізована пластова вода.

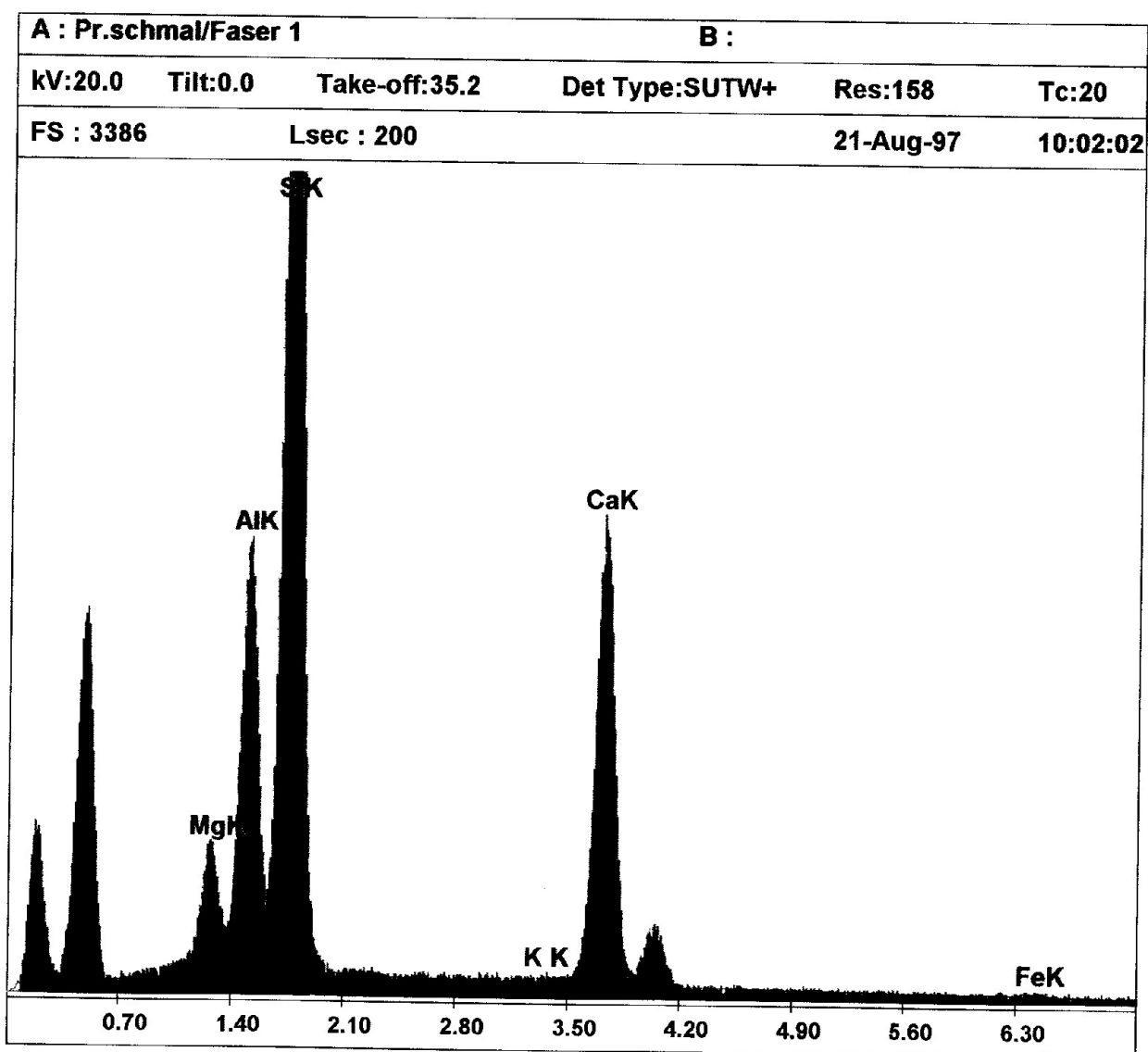
### **3.3 Дослідження мікроструктури полімерно-композиційних матеріалів, що використовуються для виготовлення насосних штанг**

Для дослідження мікроструктури і проведення аналізів на хімічний склад полімерних композиційних матеріалів, що використовуються для виготовлення НШ і НКТ використовувався дифракційний (растровий) електронний мікроскоп (scanning electron microscope) Fa Philips XL30 відбиваючого типу. Дослідження проводились прямим світлопольним методом, тобто досліджувався сам об'єкт, а не відбитки (репліки) з нього, за допомогою потоку електронів, відбитих від поверхні зразка. Дослідження проводились на базі інституту скла і кераміки Гірничої академії м. Фрайберг (Німеччина).

Полімерно-композиційний матеріал складається з армуючої фази (скловолокно) і зв'язуючого (рівниці), в якості якого служить епоксидно-поліефірний компаунд, затверджувач поліетилен-поліамін. Частка армуючої фази складає 55-60 %, а частка зв'язуючого відповідно складає 45-40 %.

Аналіз скловолокон на хімічний склад за допомогою растрового електронного мікроскопа в графічному вигляді представлений на рисунку 3.8.

По осі абсцис відкладена енергія рентгенівського пучка (keV). Тривалість опромінення 200 с. Не виділені суцільною лінією піки належать покриттю, яке наноситься на поверхню проб при їх виготовленні. Два піки кальцію відповідають Ca- $\alpha$  і Ca- $\beta$ . Відсоток масової та атомарної частки оксидів елементів, що входять до складу скловолокна представлено в таблиці 3.2.



**EDAX ZAF Quantification (Standardless)**  
**Oxides**

| Element                        | Wt %   | At %   | K-Ratio | Z      | A      | F      |
|--------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| MgO                            | 5.74   | 8.83   | 0.0187  | 0.9862 | 0.5435 | 1.0080 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.58  | 10.09  | 0.0554  | 0.9572 | 0.6528 | 1.0108 |
| SiO <sub>2</sub>               | 59.76  | 61.71  | 0.1895  | 0.9851 | 0.6878 | 1.0015 |
| K <sub>2</sub> O               | 0.23   | 0.15   | 0.0016  | 0.9344 | 0.8939 | 1.0186 |
| CaO                            | 17.19  | 19.02  | 0.1093  | 0.9565 | 0.9294 | 1.0002 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.49   | 0.19   | 0.0030  | 0.8690 | 0.9889 | 1.0000 |
| Total                          | 100.00 | 100.00 |         |        |        |        |

Рисунок 3.8 – Аналіз армуючої фази на хімічний склад



Таблиця 3.2 – Хімічний склад скловолокна

| Елемент                        | Масова частка,<br>% | Атомарна<br>частка, % | Відносна<br>похибка, % |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| MgO                            | 5,74                | 8,83                  | 1,45                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16,58               | 10,09                 | 0,78                   |
| SiO <sub>2</sub>               | 59,76               | 61,71                 | 0,42                   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,23                | 0,15                  | 10,14                  |
| CaO                            | 17,19               | 19,02                 | 0,70                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,49                | 0,19                  | 10,27                  |
| Всього                         | 100                 | 100                   |                        |

Як видно з аналізу на хімічний склад в скловолокнах відсутній оксид натрію, вміст якого сприяє підвищеній корозійності скловолокон.

На рисунку 3.9 показано зрізи полімерного композиційного матеріалу поперек (а) і повздовж (б) волокон збільшені в 38 разів. На рисунку 3.10(а) і 3.11(б) представлено повздовжні зрізи ПКМ збільшені відповідно в 231 і 386 разів, а на рисунку 3.12(а) і 3.13(б) – повздовжні зрізи ПКМ збільшені відповідно в 773 і 3865 разів. Середній діаметр скловолокон дорівнює  $14 \cdot 10^{-3}$  мм.

Як видно на рисунку 3.7 між волокнами існують в деяких місцях пустоти і ділянки з нерівномірно розподіленим епоксидним компаундом, які свідчать про малу адгезійну міцність волокон до зв'язуючого, що при експлуатації даного матеріалу в важких умовах приведе до розшарування скловолокон і руйнування тіла НШ чи НКТ.

На рисунку 3.8 (б) показано місце вириву скловолокна зі зв'язуючого. Як видно з рисунків велику увагу слід приділяти підвищенню адгезійної міцності скловолокон до зв'язуючого.

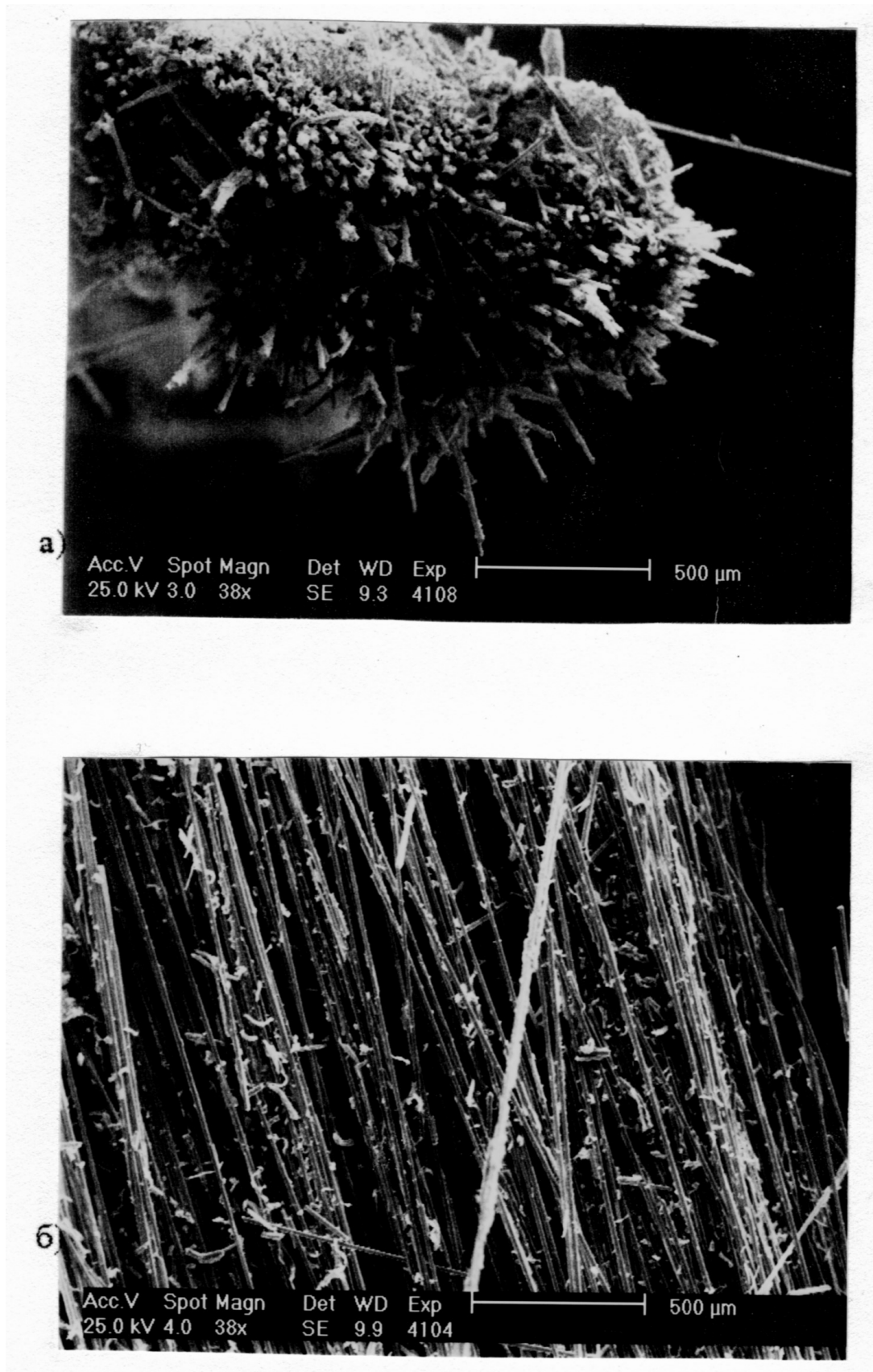


Рисунок 3.9 – Зрізи ПКМ поперек (а) і поздовж (б) волокон ( $\times 38$ )

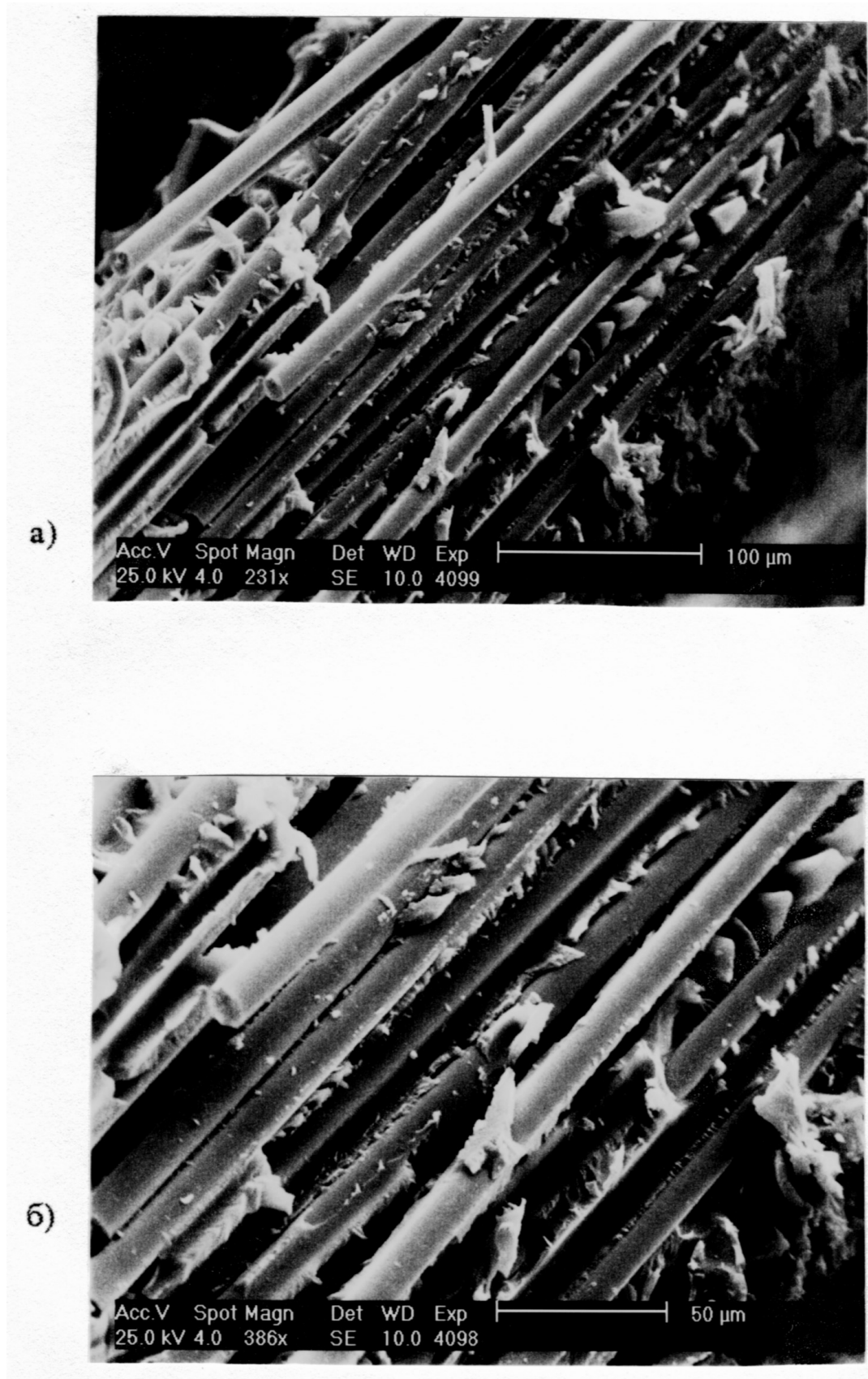


Рисунок 3.10 – Поздовжні зрізи ПКМ а)  $\times 231$ ; б)  $\times 386$

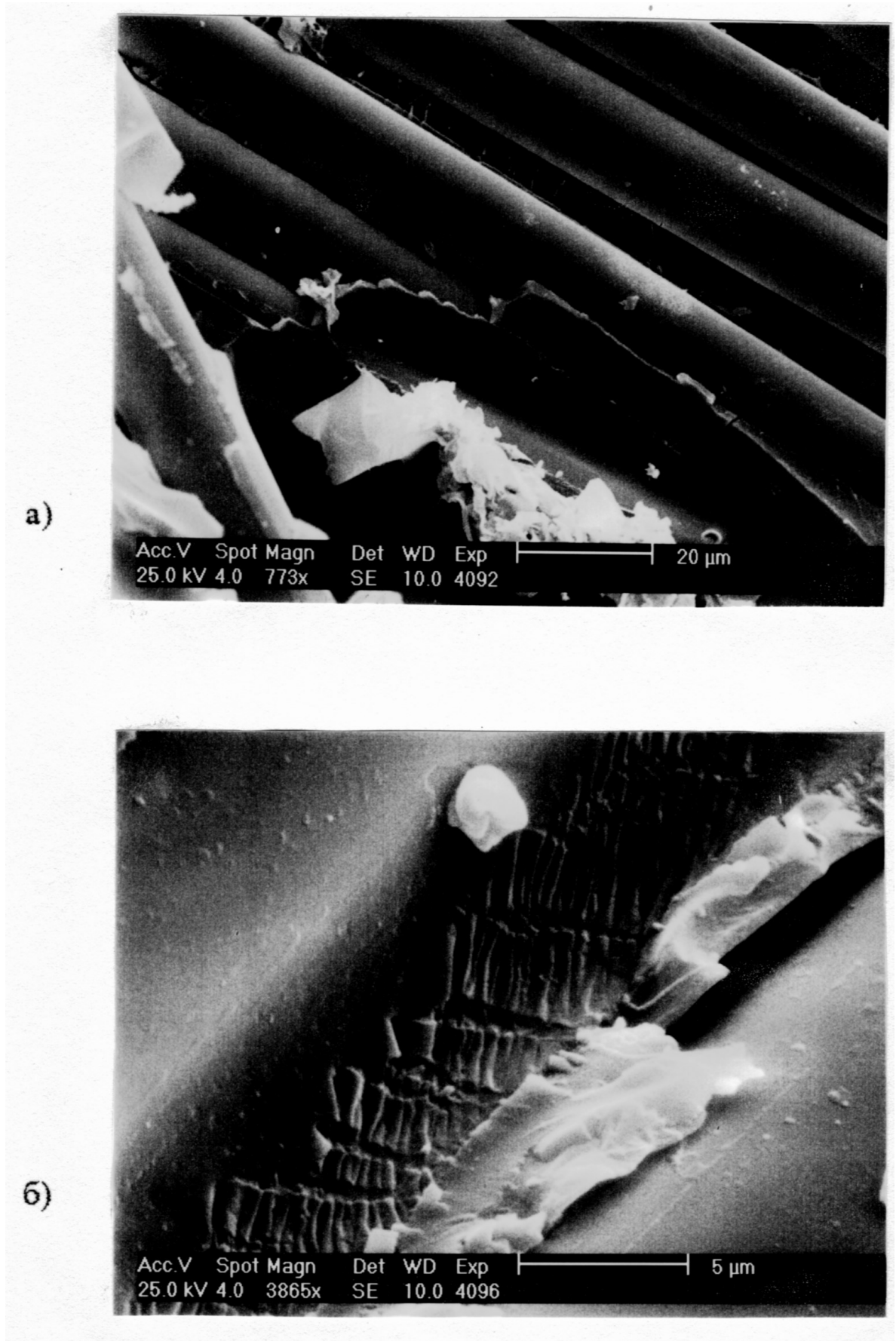


Рисунок 3.11 – Поздовжні зрізи ПКМ а)  $\times 231$ ; б)  $\times 386$

### 3.4 Висновки до розділу

1. Розроблені методики для випробовування склопластикових зразків і зразків з базальтопластика на статичну міцність та на витривалість при дії циклічних навантажень в різних експлуатаційних середовищах, які дають можливість встановити деформаційні характеристики при розтягу, втомні характеристики при циклічних навантаженнях і визначити характер руйнування зразків з ПКМ.

2. Розроблена методика дослідження зношування зразків з ПКМ в різних експлуатаційних середовищах.

3. Проведено мікроструктурний аналіз і аналіз на хімічний склад ПКМ, що використовуються для виготовлення НШ і НКТ, визначено відсоткове співвідношення складників ПКМ.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБЛЕННЯ НАСОСНИХ ШТАНГ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 4.1 Розроблення математичної моделі з'єднання сталеві головки з полімерним композиційним тілом насосної штанги

Широке застосування в інженерній справі армованих, анізотропних, композиційних і інших матеріалів привело до виникнення нових задач математичної фізики. Значний інтерес представляють постановки і розв'язки контактних задач теорії оболонок. Значні результати в цьому напрямку отримані українськими вченими і достатньо повно систематизовані в роботах [73 – 80].

При експлуатації нафтових свердловин НШ перебувають у складних умовах контактної навантаження, тому важливою є задача визначення контактних локальних взаємодій циліндричної оболонки-труби із ПКМ з жорсткими тілами.

В основу досліджень контактних напружень циліндричної труби – склопластикової штанги покладено узагальнену теорію оболонок і стержнів Тимошенка С.П., яка враховує зсувну жорсткість і анізотропію фізико-механічних властивостей матеріалу [78]. Застосовані в даній роботі математична модель контактної взаємодії труби-оболонки та методика дозволяють дослідити розподіл контактних напружень залежно від механічних та геометричних властивостей оболонки при контактній взаємодії, а також при дії зовнішнього навантаження.

**4.1.1 Постановка задачі дослідження.** Враховуючи фізичну сутність проблеми з'єднання сталеві головки з склопластиковою штангою приймається модель осесиметричної контактної взаємодії циліндричної оболонки скінченої довжини  $L$ , радіуса  $R$ , товщиною  $2H$  із жорстким бандажем, ширину якого позначимо через  $a$ . Припускається щільне

прилягання оболонки і бандажа та відсутність дотичних навантажень в області контакту. В даному випадку контактна задача полягає у визначенні нормальних контактних напружень (величина області контакту є відомою *a priori* і характеризується параметром  $\alpha$ ).

Згідно з прийнятою математичною моделлю у випадку осесиметричної задачі ключова система рівнянь має вигляд [78]

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{\omega}}{dx^2} - b^2 \bar{\omega} + \frac{d\gamma}{dx} &= -\bar{\sigma}(x) \\ \frac{d^2 \gamma}{dx^2} - a^2 \left( \gamma + \frac{d\bar{\omega}}{dx} \right) &= -0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

де  $\bar{\omega} = \omega / R$  – безрозмірна величина прогину оболонки;  $\gamma$  – кут повороту нормалі;  $x$  – безрозмірна осьова координата, віднесена до радіуса. Параметри  $a^2$  і  $b^2$  визначаються за формулами

$$a^2 = \Lambda_1 R^2 / D_1 H, \quad b^2 = B_2 (1 - \nu_{12} \nu_{21}) \Lambda_1', \quad (4.2)$$

де  $B_i = 2E_i H (1 - \nu_{12} \nu_{21})$ ;  $D_1 = \frac{B_1 H^2}{3}$ ;  $\Lambda_1' = \frac{5}{3} H G'$ ;  $E_i$ ,  $G = G_{13}$ ,  $\nu_{12}, \nu_{21}$  ( $i = 1, 2$ ) – відповідно модулі Юнга, зсуву, коефіцієнти Пуасона;  $\bar{\sigma} = \sigma R / \Lambda_1'$  – безрозмірне зовнішнє навантаження.

Навантаження, що діє на оболонку, визначається наступним чином:

$$\bar{\sigma}(x) = \begin{cases} q(x), & 0 \leq x \leq \alpha \\ 0, & \alpha \leq x \leq \frac{l}{R} \end{cases}, \quad (4.3)$$

де  $q(x)$  – шуканий безрозмірний контактний тиск.

В області контакту прогин оболонки вважається відомим і з урахуванням ефекту обтискання описується формулою

$$\bar{\omega} = -\bar{\varepsilon} - k q(x), \quad 0 \leq x \leq \alpha, \quad (4.4)$$

де  $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / R$ ,  $\varepsilon$  – осадка штампа;  $k$  – деякий сталий коефіцієнт [78].

У відповідності з конкретними умовами закріплення країв оболонки розв'язок системи рівнянь (4.1) повинен задовольняти наступні граничні умови:

а) край жорстко закріплений

$$\omega = 0, \gamma = 0 \text{ при } x = 0; \quad (4.5)$$

б) край вільний

$$M = 0, Q = 0 \text{ при } x = l/R,$$

або з урахуванням формул для моменту згину  $M$  та перерізуючої сили  $Q$

$$\frac{dy}{dx} = 0, \gamma(x) + \frac{d\omega}{dx} = 0, \left( x = \frac{l}{R} \right).$$

Для знаходження розв'язку сформульованої задачі використовуємо методику, основу на зведенні контактної задачі до відповідного інтегрального рівняння (його тип залежить від прийнятої теоретичної моделі [74, 76, 79]) та застосування числового методу [77] при розв'язуванні крайової задачі (4.1), (4.5) з урахуванням (4.3). Даний підхід відповідає тій категорії методів розв'язання диференціальних рівнянь, в яких будується наближений розв'язок в аналітичній формі. Принагідно зауважимо, що структура загального розв'язку рівнянь осесиметричної деформації ортотропної оболонки, отриманого аналітичним методом [75], може бути різною залежно від співвідношення між параметрами  $a^2$  і  $b^2$ . Дослідивши

умову  $b^2 \begin{cases} > \\ = \\ < \end{cases} a^2$ , для реальної оболонки можна встановити, яким зображенням

розв'язку потрібно користуватися. Застосування методу інтегрального перетворення Лапласа до побудови розв'язку також передбачає попередній аналіз співвідношення вказаних величин, окрім того, не завжди легко реалізувати цей метод. Натомість використання методу [77] не вимагає такого аналізу та дозволяє одразу багатопараметричне дослідження механічної поведінки оболонки безвідносно до співвідношення між величинами  $a^2$  і  $b^2$ . З таких міркувань вибрано саме цей метод, хоча, як вказувалось вище, існують і альтернативи [70, 74, 75, 78].

Систему диференціальних рівнянь (4.1) можна звести до нормальної форми Коші



$$\frac{dZ}{dx} = AZ(x) + F(x), \quad (4.6)$$

де  $Z(x) = (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)^T = \left( \bar{\omega}, \gamma, \frac{d\omega}{dx}, \frac{d\gamma}{dx} \right)^T$  – вектор невідомих  $F(x) = (0, 0, -\bar{\sigma}(x), 0)^T$ .

Квадратна матриця  $A$ , елементи якої визначаються через пружні та геометричні характеристики оболонки, має вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ b^2 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & a^2 & a^2 & 0 \end{bmatrix}.$$

Використовуючи методику побудови розв'язку двоточної крайової задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь [77], розв'язок задачі (4.6), (4.5) записується у вигляді

$$Z_i(x) = Z_i^{(0)}(x) + \sum_{k=1}^4 c_k q_{ik}(x), \quad (4.7)$$

де  $Z_i^{(0)}(x) = - \left( \int_0^x q_{i3}(x-\tau) \bar{\sigma}(\tau) d\tau \right)$ ,  $(i=1, 2, 3, 4)$ .

Функції  $q_{ij}(x)$  визначаються через  $a_{ij}^{(m)}$  –  $(i, j)$  та елемент матриці  $A^m$  за формулами

$$\begin{aligned} q_{ij}(x) &= \sum_{m=1}^N a_{ik}^{(m)} \frac{x^m}{m!} \quad (i \neq k) \\ q_{kk}(x) &= 1 + \sum_{m=1}^N a_{kk}^{(m)} \frac{x^m}{m!} \end{aligned}, \quad (4.8)$$

де  $N$  – параметр методу [80], вибір якого залежить від конкретної задачі. При практичних розрахунках  $N$  вибирають з умови збігу з потрібною точністю результатів обчислень для послідовних значень  $N$  (можна з деяким кроком, наприклад,  $N=10, 25, \dots$ ).

Згідно з (4.7) для обчислення прогину оболонки в області  $0 \leq x \leq l/R$  одержимо формулу

$$\bar{\omega}(x) = Z_1(x) = \sum_{k=1}^4 c_k g_{1k}(x) - \int_0^x g_{13}(x-\tau) \bar{\sigma}(\tau) d\tau. \quad (4.9)$$

Невідомі сталі  $c_k$  знаходяться в результаті розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь, отриманої при задоволенні граничних умов (4.5).

**4.1.2 Інтегральне рівняння контактної задачі взаємодії.** Реалізація умови контактної взаємодії (4.4), враховуючи при цьому (4.9) та (4.3), дає наступне інтегральне рівняння контактної задачі для визначення контактного тиску  $q(x)$ :

$$\begin{aligned} fq(x) + \int_0^x g_{13}(x-s)q(s)ds = \bar{\varepsilon} + y_1(x) \int_0^a g_{43}(L-s)q(s)ds + \\ + y_1(x) \int_0^a (g_{23}(L-s) + g_{33}(L-s))q(s)ds, \end{aligned} \quad (4.10)$$

де  $L=l/R$ ,  $y_1(x)$ ,  $y_2(x)$  – функції, що виражаються, зокрема, через  $g_{13}(x)$ ,  $g_{14}(x)$  та знайдені сталі  $c_1, \dots, c_4$  (через громіздкість вирази для них не наведено).

Інтегральне рівняння (4.10) не вписується у відому класифікацію інтегральних рівнянь [81]. Однак його можна звести до лінійного неоднорідного перетворення рівняння Фредгольма II роду з розривним ядром

$$q(x) + \int_0^a K(x,s)q(s)ds = \frac{\bar{\varepsilon}}{k}, \quad (4.11)$$

де

$$K(x,s) = \frac{1}{k} \begin{cases} K_1(x,s) - K_2(x,s) & \text{при } 0 \leq s \leq x, \\ -K_2(x,s) & \text{при } x \leq s \leq a, \end{cases} \quad (4.12)$$

$$K_1(x,s) = g_{13}(x-s),$$

$$K_2(x,s) = y_1(x)g_{43}(L-s) + y_1(x)(g_{23}(L-s) - g_{33}(L-s)).$$

Вимога, що накладається на розривне ядро інтегрального рівняння Фредгольма II роду [81], у даному випадку виконується в силу властивостей функцій  $g_{ij}(x)$ . Для розв'язування одержаного інтегрального рівняння (4.11) з ядром (4.12) використовуємо метод квадратурних формул, що дозволяє звести задачу розв'язування інтегрального рівняння до знаходження розв'язку апроксимуючої системи алгебраїчних рівнянь. Наприклад, при

застосуванні формули трапецій з постійним кроком ( $h_i=h=const$ ) розбиття проміжку інтегрування  $[0, \alpha]$  отримується наступна система рівнянь для значень  $q(x_i)=q_i$  розв'язку  $q(x)$  у вузлах  $x_1, x_2, \dots, x_n$ :

$$q_i - h \sum_{j=1}^n A_j K_{ij} q_j = f_i \quad (i=1, \dots, n), \quad (4.13)$$

де 
$$n = \frac{\alpha}{h} + 1, \quad f_i = \frac{\bar{\varepsilon}}{k} = const, \quad A_j = \begin{cases} 0,5 & \text{при } j=1 \text{ і } j=n, \\ 1 & \text{при } j \neq 1 \text{ і } j \neq n \end{cases},$$

$$K_{ij} = K(x_i, x_j).$$

В результаті розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (4.13) отримуємо значення  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , за якими шляхом інтерполяції знаходимо наближений розв'язок інтегрального рівняння (4.11) на всьому відрізку  $[0, \alpha]$ . Отже, за аналітичний вираз наближеного розв'язку поставленої контактної задачі приймається функція

$$q(x) \approx \frac{\bar{\varepsilon}}{k} + \sum_{j=1}^n A_j K(x, x_j) q_j, \quad (4.14)$$

яка у вузлах  $x_1, x_2, \dots, x_n$  приймає відповідно значення  $q_1, q_2, \dots, q_n$ .

**4.1.3 Чисельний аналіз інтегрального рівняння контактної задачі взаємодії.** Аналіз впливу пружних характеристик матеріалу оболонки (стержня) та особливостей контактної взаємодії її з бандажем на величину та розподіл тиску і, як наслідок цього, на міцність та працездатність розглянутого конструктивного з'єднання має практичний інтерес при проектуванні. Розглянуто два варіанти контактної взаємодії оболонки з бандажем.

а) уздовж оболонки при  $0 \leq x \leq L, \alpha=L$  (симетрична задача) за умов жорсткого защемлення країв, тобто  $\bar{w} = 0, \gamma = 0$  при  $x=0$  і  $x=L$ ;

б) на її частині при  $0 \leq x \leq \alpha$  (несиметрична задача).

Обчислення проведені з допомогою програми prg500 (Додаток В). Програма написана на мові Turbo Pascal 7.0 і призначена для реалізації матричного методу розрахунку контактних напружень у з'єднанні сталеві

голівки з склопластиковою штангою (Додаток Г). Програма складається з наступних частин:

а) константи:

$n$  – розмірність вихідної матриці  $AA$  пружних і геометричних характеристик оболонки;

$m$  – константа, яка вказує кількість членів матричного ряду (взято  $m=200$ );

$z$  – кількість точок розбиття проміжку інтегрування (включаючи кінці) при розв’язуванні інтегрального рівняння Фредгольма II роду;

б) описи:

$AA$  – вихідна матриця пружних і геометричних характеристик оболонки;

$A$  – тривимірний масив, кожний «зріз» якого  $A[i, j, l_0]$  при фіксованому  $l_0$  є відповідним степенем матриці  $AA$ :  
 $A[l_0=1]=AA, A[l_0=2]=AA^2, \dots, A[l_0=m]=AA^m$ ;

решта – глобальні змінні різного використання;

в) процедури:

$MLT$  – формує масив  $A$  степенів вихідної матриці;

function  $g$  – обчислення елементів матриці  $G$ :  $g_{k,i}(\varphi)$ ;

procedure  $linequ$  – розв’язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь;

function  $ker$  – обчислення ядра інтегрального рівняння;

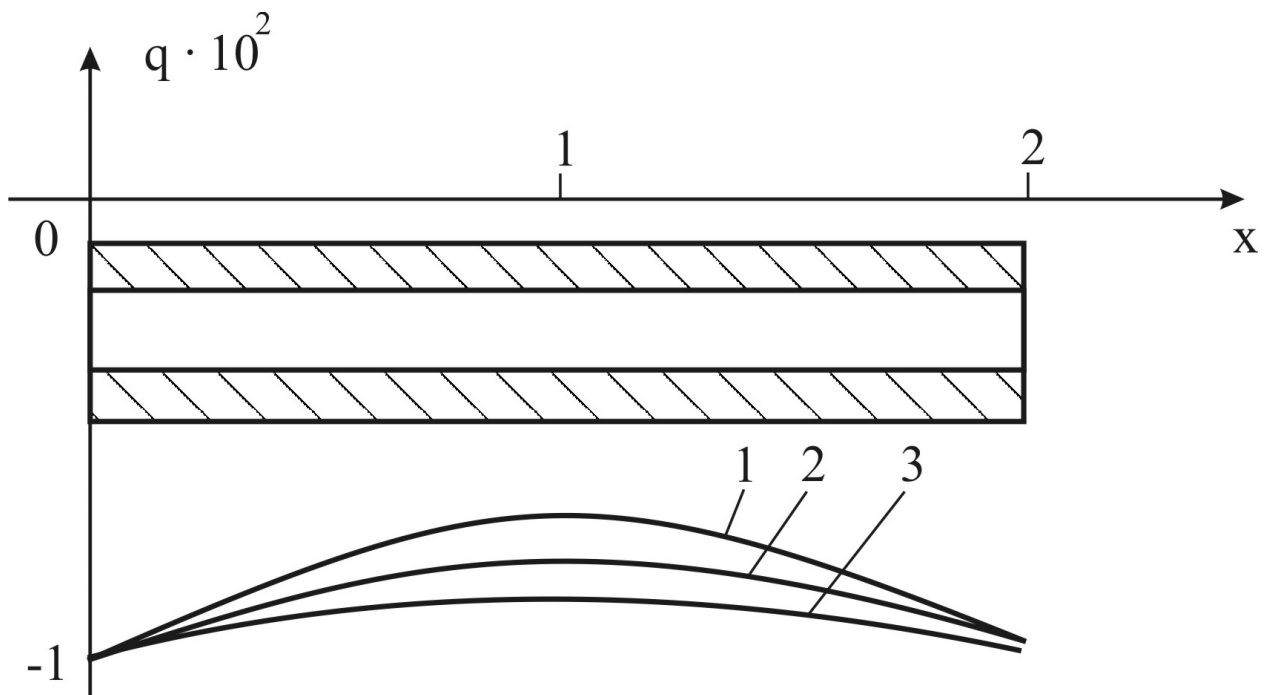
procedure  $IE$  – розв’язування інтегрального рівняння Фредгольма II роду.

В програмі використаний тип дійсних величин *Double*. Якщо є потреба збільшити константу  $m$  (кількість членів матричного ряду), то можливе переповнення. У такому випадку в описі типів потрібно взяти *Float=Extended*.

Після введення початкових даних здійснюється розрахунок і видається таблиця з двох колонок. У першій колонці – значення безрозмірної осьової координати  $x$ , а у другій – відповідні значення контактної тиску  $q(x)=y$  (безрозмірна величина). Під цими колонками друкується значення шуканої сили  $Q$  (розмірна величина).

Обчислення здійснювалися при фіксованих характеристиках з'єднання:  $E_1/G = 7$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $l/R = 2$ ;  $H/R = 1$ ;  $k = 1$ ;  $\bar{\varepsilon} = 0,01$ .

На рисунку 4.1 наведено графіки залежності контактної тиску від величини параметра ортотропії матеріалу  $E_1/E_2$  при  $\alpha=1$ . Криві 1-3 відповідають:  $E_1/E_2=0,5$ ; 1; 2. З порівняльного аналізу чисельних результатів (табл. 4.1) випливає, що контактний тиск помітно залежить від властивостей матеріалу, а саме: збільшується при зростанні відношення  $E_1/E_2$ .

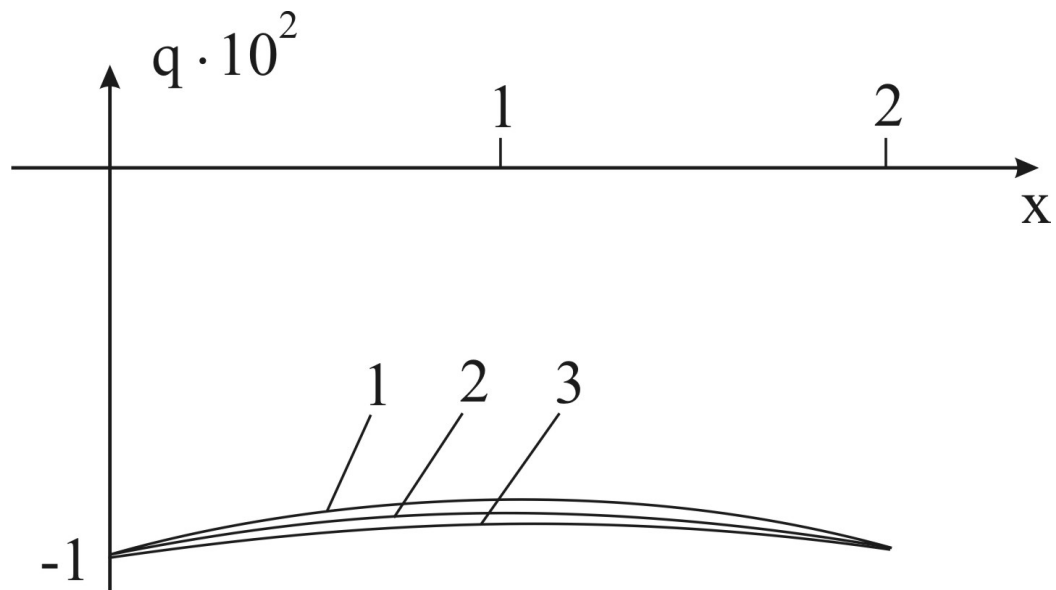


**Рисунок 4.1** – Залежність величини контактної тиску від величини параметра ортотропії матеріалу

Пружні параметри композитної оболонки можна виразити через механічні характеристики складових матеріалів (сполучника і арматури) та коефіцієнт армування, що описує структуру матеріалу [82]. Здійснивши у конкретному випадку такий перерахунок фізико-механічних характеристик

оболонки, на основі знайденого розв'язку контактної задачі проаналізовано залежність контактної тиску від величини структурних параметрів  $\xi = E_a / E_c$  ( $E_a$  і  $E_c$  – модулі пружності армованих волокон і сполучника),  $\eta = V_a / V$  – коефіцієнт армування ( $V_a$  – об'єм армованих волокон в об'ємі композиту).

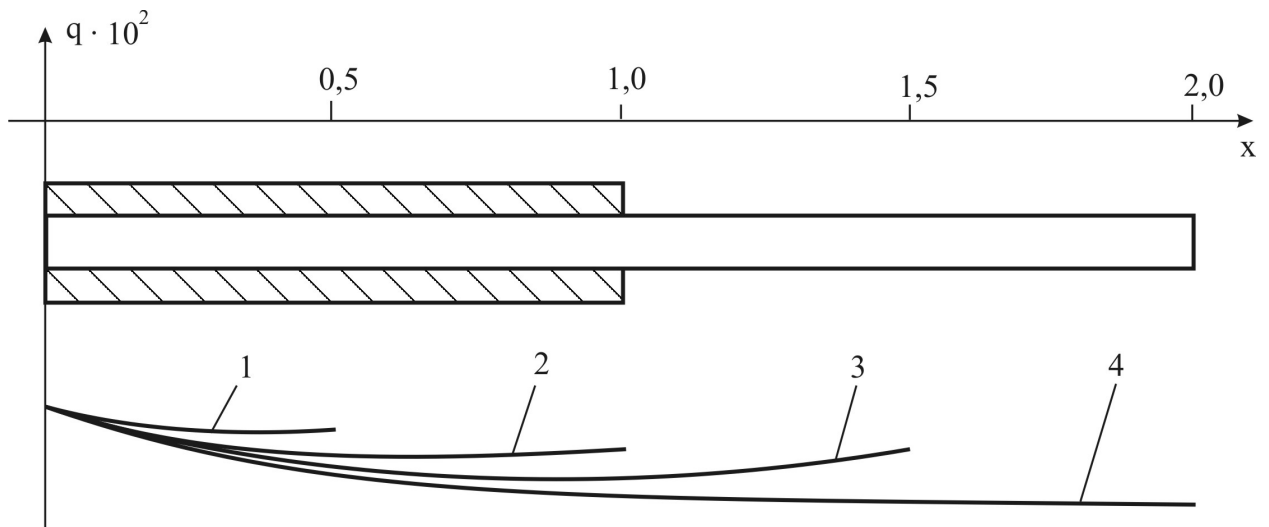
На рисунку 4.2 зображені графіки контактної тиску  $q(x)$  для різних значень параметра  $\xi = E_a / E_c = 10, 12, 15$  (криві 1-3 відповідно).



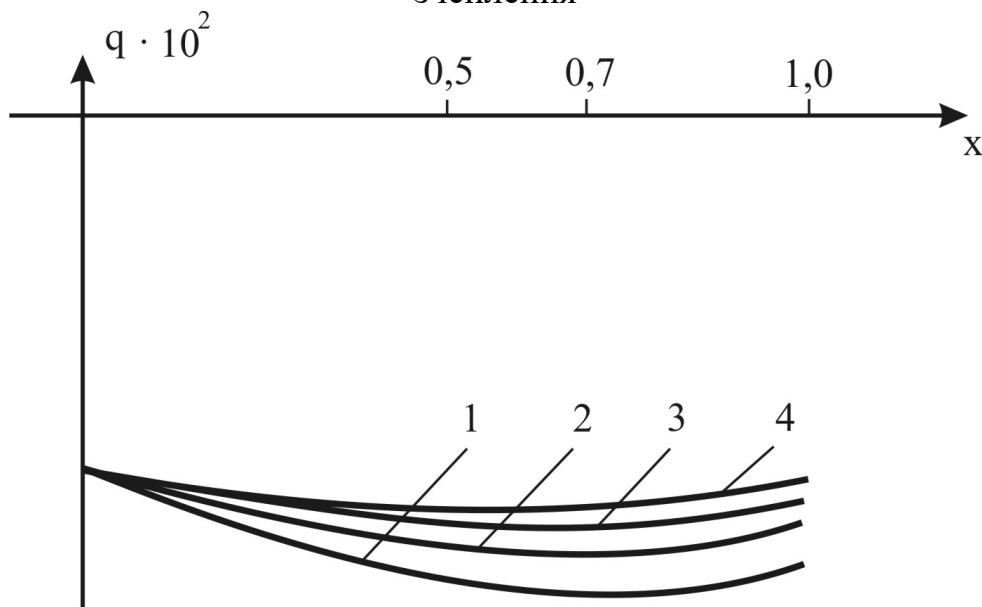
**Рисунок 4.2** – Залежність величини контактної тиску від величини структурних параметрів

Зі збільшенням структурного параметра  $\xi$  контактний тиск  $q(x)$  зростає (табл. 4.2). Подібна тенденція спостерігається і при збільшенні коефіцієнта формування  $\eta$ . Відзначимо, що інтегральна характеристика  $\tilde{Q} = \int_0^a q(x) dx$  при цьому зростає також. Шукана сила  $Q$  розраховується за формулою  $Q = \frac{10}{3} \tilde{Q} \pi \frac{f H R E_1}{E_1 / G'}$  (коефіцієнт  $f$  характеризує величину зчеплення композитної оболонки з жорстким бандажем [83]).

Результати розрахунку контактної тиску для несиметричної задачі наведені у вигляді графіків на рисунках 4.3 і 4.4.



**Рисунок 4.3** – Залежність величини контактної тиску від величини зчеплення



**Рисунок 4.4** – Залежність величини контактної тиску від зсувної податливості матеріалу оболонки

Вплив величини області контакту на розподіл контактної тиску ілюструє рисунок 4.3, де цифри 1-4 біля кривих вказують на ширину бандажа  $\alpha=0,5; 1; 1,5; 2$ . При  $\alpha=2$  отримаємо контактну взаємодію бандажа по всій довжині оболонки. З результатів числового аналізу (табл. 4.3) випливає, що найбільш істотно впливає на величину зчеплення ширина бандажа.

На рисунку 4.4 показано залежність величини контактної тиску від зсувної податливості матеріалу оболонки, яку характеризує параметр  $E_I/G'$ . Криві 1-4 побудовані при  $E_I/G'=2,6; 5; 10; 20$  відповідно. З результатів

числового аналізу (табл. 4.4) впливає, що величина контактної тиску зменшується при зростанні величини зсувної податливості матеріалу.

**Таблиця 4.1** – Залежність величини контактної тиску від величини параметра ортотропії матеріалу

| $E_1/E_2$ | $q \cdot 10^2$ |
|-----------|----------------|
| 0,5       | -1,782         |
| 1         | -1,858         |
| 2         | -1,916         |

**Таблиця 4.2** – Залежність величини контактної тиску від величини структурного параметра

| $E_a/E_c$ | $q \cdot 10^2$ |
|-----------|----------------|
| 10        | -1,93          |
| 12        | -1,94          |
| 15        | -1,96          |

**Таблиця 4.3** – Залежність величини контактної тиску від величини зчеплення

| $\alpha$ | $q \cdot 10^2$ |
|----------|----------------|
| 0,5      | -0,517         |
| 1        | -1,067         |
| 1,5      | -1,630         |
| 2        | -2,218         |

**Таблиця 4.4** – Залежність величини контактної тиску від зсувної податливості матеріалу оболонки

| $E_1/G'$ | $q \cdot 10^2$ |
|----------|----------------|
| 2,6      | -1,130         |
| 5        | -1,086         |
| 10       | -1,052         |
| 20       | -1,030         |

Як показують результати обчислень, цілеспрямованою зміною, зокрема, розглянутих пружних характеристик оболонки параметра ортотропії (рис. 4.1), параметра зсувної податливості (рис. 4.4), величини зчеплення (рис. 4.3), можна істотно впливати на міцність з'єднання сталеві головки з склопластиковою штангою.

## 4.2 Рациональні конструкції з'єднання сталеві головки з полімерним композиційним тілом насосної штанги

На основі методики розрахунків контактних напружень при взаємодії циліндричної труби-оболонки із жорсткими бандажами [84, 85] запропоновано ряд конструктивних рішень, які можуть бути реалізовані в з'єднанні сталеві головки з полімерним композиційним тілом НШ (рис. 4.5).



Рисунок 4.5, а. Конструкція з'єднання використовується в даний час при виробництві склопластикових штанг. В головці просвердлюється (розточується) отвір, дещо більший, ніж діаметр тіла штанги (рівний 12, 16, 19, 22, 25 мм). Пізніше тіло штанги вставляється в цей отвір і обтискається (за допомогою преса) по діаметру головки в 12-ти місцях. Для того, щоб зафіксувати тіло штанги в головці, на кінці штанги робиться конус, а в головці - отвір під цей конус. До переваг цього з'єднання слід віднести простоту виготовлення і надійність конструкції.

Рисунок 4.5, б. Фіксування тіла штанги в головці виконується наступним чином: в головці розточується отвір, дно отвору виконується у вигляді конуса і біля конуса отвір дещо розширюється. Кінець склопластикового стержня розпушується і вкладається в гніздо до упору, після чого проводиться обтискання головки ззовні. Перевагами з'єднання є простота виготовлення і підвищення міцності порівняно з попереднім з'єднанням.

Рисунок 4.5, в. На тілі стержня штанги нарізується або формується спіраль, подібна до Архімедової, а в гнізді головки нарізується канавка під цю спіраль. Між ними вставляють сталевий виток. Після встановлення стержня в гніздо (можна загвинтити по спіралі) головка обтискається ззовні. Недоліками запропонованого з'єднання є складність виготовлення, підвищені вимоги до точності виготовлення, окрім цього спіраль є концентратором напружень.

Рисунок 4.5, г. Характерним для з'єднання є те, що в головці виточуються по колу трикутні пази, які заповнюються епоксидною смолою, після чого в головку встановлюється тіло штанги і обтискається. Епоксидна смола виступає в ролі клину, стопорить склопластикове тіло штанги. Аналогічне з'єднання використовується в США, і воно себе добре зарекомендувало. Недоліком такого з'єднання є складність виготовлення пазів в головці штанги.

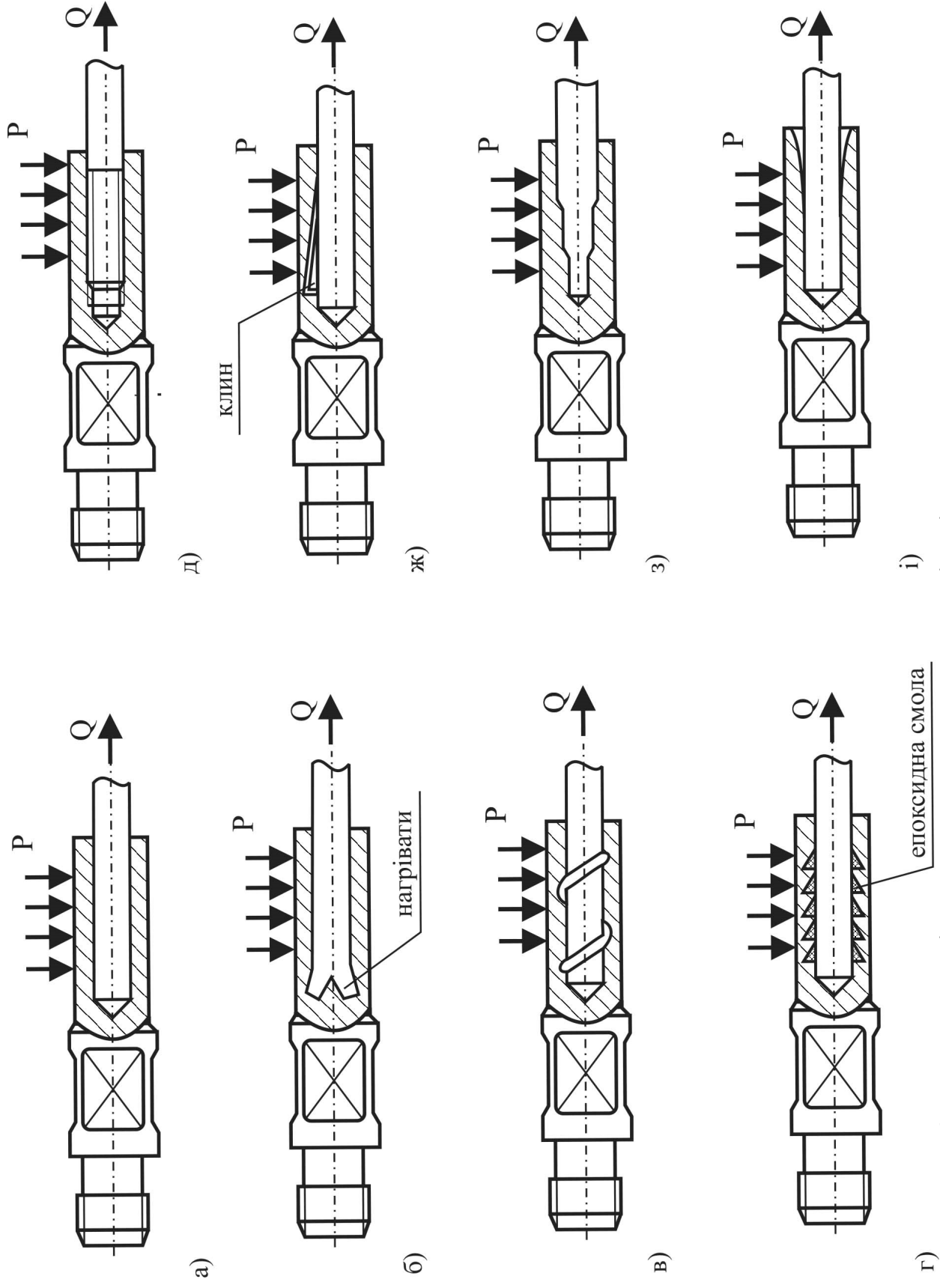


Рисунок 4.5 – Конструкції з'єднань склопластикового тіла зі сталевую головкою НШ

Рисунок 4.5, *д*. Різьбове з'єднання просте у виготовленні, але різьба є концентратором напружень, і, як наслідок, з'єднання можна використовувати для штанг, що експлуатуються на відносно малих глибинах.

Рисунок 4.5, *ж*. В головці просвердлюється отвір дещо більший, ніж діаметр штанги. В гнізді головки виконані пази під клин трикутної форми. Після того, як пази будуть готові, встановлюються в них клини, вставляється тіло штанги в гніздо головки і обтискається. Поряд з підвищеною міцністю на розтяг дане з'єднання має ряд недоліків. Недоліком є складність виготовлення пазів під клини. Ці пази послаблюють саму головку і саме з'єднання може бути концентратором напружень.

Рисунок 4.5, *з*. В з'єднанні кінець тіла штанги робиться ступінчастим і завершується конусом для фіксації тіла штанги в головці. В самій головці висвердлюються або розточуються ступінчасті отвори. Тіло штанги вставляється в головку до упору і обтискається, як в попередньому з'єднанні. Така конструкція сприяє більш рівномірному розподілу навантажень, що діють на з'єднання. Недоліком такого з'єднання є те, що ступені є концентраторами напружень.

Рисунок 4.5, *і*. Це з'єднання може бути найоптимальнішим варіантом. Поверхня, що контактує з тілом штанги, виконується у вигляді плавної лінії. Тіло штанги вставляється в отвір в головці і обтискається. Епюра контактних напружень буде мати більш рівномірний характер.

Найбільш раціональною конструкцією, що використовується в даний час для з'єднання тіла НШ у вигляді стержня, виготовленого з ПКМ (армованого однонаправленими волокнами пластика) з сталевими головками, закріпленими на обох кінцях тіла штанги, є клейове з'єднання [86], в якому суцільний кінець тіла штанги заходить в гніздо сталевій головки, на внутрішній поверхні якої є три кільцеві проточки, утворені парами направлених одна до одної конічних поверхонь, перша з яких має менший, а друга – більший кут конусності. Кути конусності цих поверхонь послідовно

збільшуються в напрямку від отвору гнізда до його дна. Порожнина, яка утворюється між внутрішньою поверхнею гнізда та поверхнею пластикового стержня, заповнюється епоксидним клеєм.

Проте така штанга є недостатньо надійною в роботі через незначну міцність клейового з'єднання у порівнянні з міцністю на розрив тіла штанги. В склеюванні приймає участь тільки незначна кількість волокон на поверхні тіла штанги. Міцність такого з'єднання можна підвищити шляхом збільшення поверхні контакту спряжених деталей, однак це вимагатиме в свою чергу збільшення габаритних розмірів сталеві головки і відповідно її ваги.

НШ працює в складних експлуатаційних умовах і зазнає змінних навантажень із значним коефіцієнтом асиметрії. А це вимагає проектування колон НШ з великим коефіцієнтом запасу міцності. Із збільшенням глибини спуску колони НШ зростає навантаження на штангу, а, отже, і на клейове з'єднання головки із стержнем. Необхідно підвищити міцність такого з'єднання та його надійність. Крім того, при роботі сталевих головок проходить зношування різьб, стирання бокових поверхонь по внутрішній поверхні НКТ і часто виникає необхідність в заміні головки.

Задачу підвищення надійності роботи полімерної композиційної НШ шляхом створення з'єднання полімерного композиційного тіла штанги з сталевією головою підвищеної міцності і забезпечення можливості заміни зношених сталевих головок можна вирішити наступним чином [86]: спосіб з'єднання сталевієї головки з полімерним композиційним тілом НШ полягає у фіксуванні за допомогою клею кінця полімерного композиційного тіла штанги в циліндричному гнізді сталевієї головки, на кінці полімерного композиційного тіла і на внутрішній циліндричній поверхні сталевієї головки виконують асиметричну трикутну різьбу з великим кроком таким чином, щоб профільна сторона різьби зі сторони дії осьового навантаження була довша за іншу, крім цього на внутрішній циліндричній поверхні гнізда

сталевій головці виконують виточку, розміщену біля дна гнізда, дно гнізда зроблено у формі направляючого конуса з кутом конусності  $100...120^\circ$ , а кінець полімерного композиційного тіла розпушений на довжину виточки і просочений клеєм.

Для збільшення міцності різьбового з'єднання на внутрішній циліндричній поверхні сталевій головці і на кінці полімерного композиційного тіла штанги виконують різьбу з великим кроком. Для запобігання зрізання різьби при дії осьового навантаження застосовано принцип заклинювання, згідно з яким профільну сторону різьби зі сторони дії осьового навантаження виконують довшою за іншу.

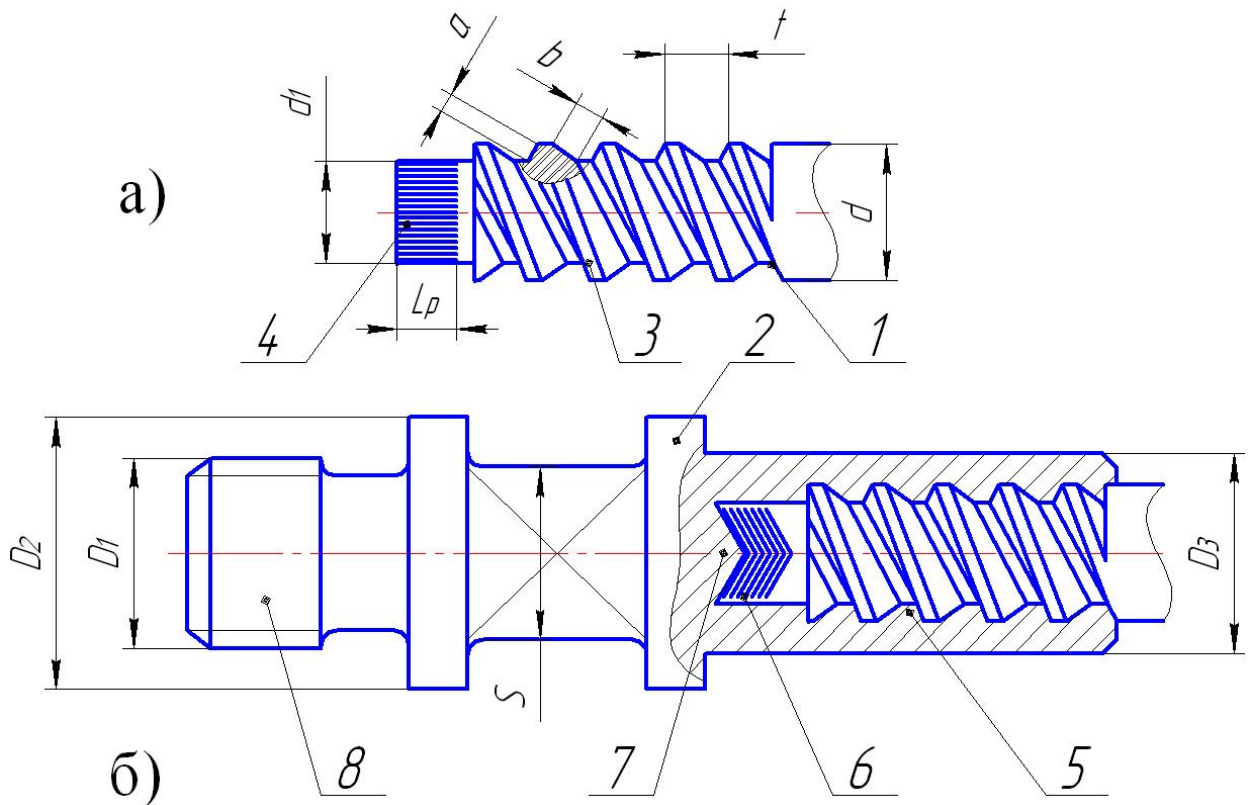
Виточку на внутрішній циліндричній поверхні сталевій головці виконують між різьбою і дном гнізда сталевій головці для заповнення її клеєм і розміщення в ній розпушеного кінця полімерного композиційного тіла штанги.

Дно гнізда сталевій головці виконують у формі направляючого конуса з кутом конусності  $100...120^\circ$  для розпирання розпушеного кінця полімерного композиційного тіла штанги при закручуванні його в гніздо сталевій головці. Кути конусності менші за  $100^\circ$  можуть приводити до розшарування тіла штанги. Кути конусності більші за  $120^\circ$  не сприяють достатньому розпиранню розпушеного кінця тіла штанги.

Кінець полімерного композиційного тіла звільняють від зв'язуючого на довжину виточки в сталевій головці і розпушують для збільшення площі контакту при склеюванні полімерних волокон з дном і виточкою сталевій головці.

На рисунку 4.6, а наведено кінець полімерного композиційного стержня НШ; на рисунку 4.6, б - з'єднання сталевій головці з полімерним композиційним тілом. З'єднання складається з полімерного композиційного тіла штанги 1 діаметром  $d$  і сталевій головці 2. На кінцях полімерного композиційного тіла виконана асиметрична трикутна різьба 3 з зовнішнім

діаметром  $d_1$  і великим кроком  $t$ . Профільна сторона різьби зі сторони дії осьового навантаження  $b$  довша за іншу  $a$ .



**Рисунок 4.6** – З'єднання сталевій головки з полімерним композиційним тілом

Кінець 4 полімерного композиційного тіла штанги розпушений на довжину  $L_p$ . На внутрішній циліндричній поверхні гнізда сталевій головки виконані різьба 5 такого ж профілю, як і на кінці полімерного композиційного тіла штанги, виточка 6, а дно гнізда зроблено у формі направляючого конуса 7 з кутом конусності  $100...120^\circ$ . Розмір  $D_2$  з відповідним допуском на обробку є основним для вибору круглого прокату, з якого нарізаються заготовки сталевих головок і відповідає стандартному. Розмір під елеватор  $D_3$  та розмір під ключ  $S$  приймаються, як розміри для стандартної штанги, умовний діаметр якої на один порядок вищий. Це дозволить зменшити вихід металу при виготовленні сталевій головки. Приєднувальна різьба 8 діаметром  $D_1$  сталевій головки відповідає стандарту за ГОСТ 13877-96 [88].

Порожнина між внутрішньою поверхнею виточки 6 та зовнішньою поверхнею стержня 1 в розпушеній ділянці 4 заповнюється клеєм, наприклад, епоксидним. При згвинчуванні головки з стержнем окремі волокна полімерного композиційного стержня, просочені клеєм, входять в виточку 6 за допомогою направляючого конуса 7, що сприяє заклинюванню кінця тіла штанги в простір виточки гнізда при дії на нього навантажень розтягу. Клейове з'єднання деталей використано для запобігання взаємному відгвинчуванню сталевій головці і тіла штанги.

При проведенні заміни спрацьованих сталевих головок зовнішню частину сталевій головці в місці склеювання попередньо нагрівають струмами високої частоти, що сприяє деструкції і пом'якшенню поверхневого шару клею і полегшує розгвинчування полімерного композиційного тіла штанги і сталевій головці.

Міцність ПКМ залежить від матеріалів, що беруть участь в процесі створення композиту. Склопластик – це композиційний матеріал, що складається з скловолокнистого наповнювача (склониток) і полімерного зв'язуючого (смоли), та володіє високою корозійною стійкістю в сірководневому і лужному середовищах, а також високими механічними характеристиками. Технологія виробництва склопластикових стержнів дає змогу регулювати анізотропію їх механічних властивостей. Епоксидні зв'язуючі мають високу міцність взаємодії з армуючим наповнювачем. В процесі затвердіння полімерне зв'язуюче набуває когезійної міцності (міцність зчеплення полімерних речовин одна з одною). У епоксидних матеріалів висока когезійна міцність ( $\sigma_{вр}=4 - 10$  МПа).

Склопластиковий стержень виготовляють методом пултрузії (протягування). При цьому методі відбувається неперервний процес протягування композиційного матеріалу через систему фільтр з поступово зменшуваним перерізом. Швидкість процесу складає до 6 метрів за хвилину. Волокна пропускаються через полімерну ванну, де просочуються

зв'язуючим, після чого проходять через преформовочний пристрій, отримуючи кінцеву форму. Далі в прес-формі матеріал нагрівається, і на виході отримуємо остаточно готовий виріб.

Асиметричну трикутну різьбу на кінцях склопластикового стержня можна отримати наступними способами: рідиннофозове «мокре» намотування волокон; контактне формування роликками; нарізання різьби.

Технологічні схеми формування виробів з ПКМ передбачають роботу з оправками у формі як поверхонь обертання (армування методом намотування), так і поверхонь більш складних геометричних форм. Якість виробничого процесу залежить від точності позиціонування робочих органів намотувального верстата [89, 90].

Контактне формування роликками відноситься до методу надання форми викладуванням препрегів на поліефірних чи епоксидних зв'язуючих холодного затвердіння. Суть методу полягає в тому, що кожний шар препрегу, укладений у форму, прокатується роликком. За рахунок цього ущільнюються шари препрегу, видаляються бульбашки повітря і зайве зв'язуюче.

Обробка різанням полімерних композиційних матеріалів має низку особливостей, що відрізняють його від аналогічної обробки різанням металів. Ці особливості пояснюється головним чином специфічними властивостями самих оброблюваних матеріалів: анізотропією їхніх властивостей, їх відносно низькою твердістю і дуже низькою в порівнянні з металами теплопровідністю. Наявність полімеру в матеріалі і його неминуча деградація під дією механічних і термічних навантажень призводять до специфічних явищ у зоні різання, які відсутні при різанні металів [91]. Для оптимізації процесу різання ПКМ, досягнення максимальної продуктивності та необхідної якості поверхні є необхідним всебічне врахування особливостей процесу різання цих матеріалів, процесу стружкоутворення та зношування інструмента, силових і теплових явищ, якості обробленої



поверхні. Тільки на цій основі є можливим розроблення нормативів режимів різання для різних видів обробки ПКМ.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, виконання різьб у виробках із ПКМ із задовільними показниками якості викликає значні труднощі, обумовлені низькою оброблюваністю матеріалів. Проблему частково вирішує правильний вибір інструменту та призначення раціональних режимів обробки. При цьому найбільш перспективним методом обробки ПКМ є обробка з використанням алмазних інструментів.

Точність геометричних параметрів деталей з ПКМ характеризуються точністю розмірів їх елементів, точністю форми, якості поверхонь та їх взаємне розташування, відхилення яких виникає у процесі обробки [92].

Відомі методи механічної обробки сполучуваних поверхонь виробу, виготовленого із ПКМ, полягають у тому, що одночасно обробляють сполучувані поверхні з'єднаних деталей, закріплених на одному шпинделі, зв'язаними між собою ріжучими інструментами з одним напрямком подачі уздовж утворюючої, причому кожную поверхню обробляють окремим ріжучим інструментом. Цей метод висвітлений у патенті на винахід [93] при виконанні обробки сполучуваних конічних поверхонь.

В ТОВ "НВП Пластар" (м. Харків) ще у 1990-х рр. запатентували власну технологію виготовлення різьб склопластикових виробів [94]. Головною відмінністю різьб склопластикових виробів є оптимальний профіль різьби з урахуванням особливостей полімерно-композиційного матеріалу. Це дає змогу одержувати рівномірні з тілом різьбові з'єднання, виготовлені з склопластику.

#### **4.3 Випробовування зразків з полімерно-композиційних матеріалів на статичну міцність**

Статичними випробуваннями на розтяг визначають показники пружності, міцності, пластичності. Для цього виготовляють стандартні

зразки найчастіше круглого поперечного перерізу, закріплюють їх в затискачах розривної машини і поступово розтягують, плавно збільшуючи навантаження. Спеціальний прилад машини записує діаграму розтягу – графік залежності деформації (абсолютного видовження зразка  $\Delta l$ ) від прикладеного зусилля  $P$ .

Механічні випробовування зразків з ПКМ при статичному навантаженні були проведені згідно методики, представленої в п. 3.1.

Для випробовувань використані зразки НШ діаметром 22 мм і довжиною 300 мм з фрезерованою частиною і без неї. Зразки мали два виконання: звичайної та підвищеної міцності.

На зразки з фрезерованою частиною наклеювали поздовжні тензодавачі базою 20 мм та поперечні базою 5 мм. Повздовжні працювали на розтяг, а поперечні – на стиск. Результати випробовувань наведені в таблиці 4.5.

**Таблиця 4.5** – Результати тензометрування зразків насосних штанг

|                                  |         |          |           |           |
|----------------------------------|---------|----------|-----------|-----------|
| Зусилля $P$ , кН                 | 10      | 20       | 50        | 100       |
| Напруження $\sigma$ , МПа        | 33,1    | 66,2     | 165,5     | 331,0     |
| Відносні одиниці давача (в.о.д.) |         |          |           |           |
| поздовжні                        | 20 - 50 | 75 - 130 | 325 - 375 | 700 - 780 |
| поперечні                        | 5       | 20       | 75        | 175       |

Випробування на статичний розтяг включали використання гідравлічної рами з силою навантаження 180 кН. Тест на статичний розтяг був проведений на зразках, користуючись спеціально замовленими тестовими приладами. Середня максимальна сила розтягу (MCP) створювала напруження 2,24 ГПа, Катастрофічний розрив відбувся коли розтяг композиту досяг деформації розриву вуглецевого волокна  $\approx 2\%$ .

Процес випробування розпочинається із встановлення зразка у випробувальній машині і прикладання до нього зростаючого розтягувального зусилля аж до руйнування зразка. Під час випробування

визначається абсолютний приріст деформації на розрахунковій довжині відповідно до величини прикладеного зусилля.

Виміряне зусилля  $P$  використовується для обчислення напруження  $\sigma$

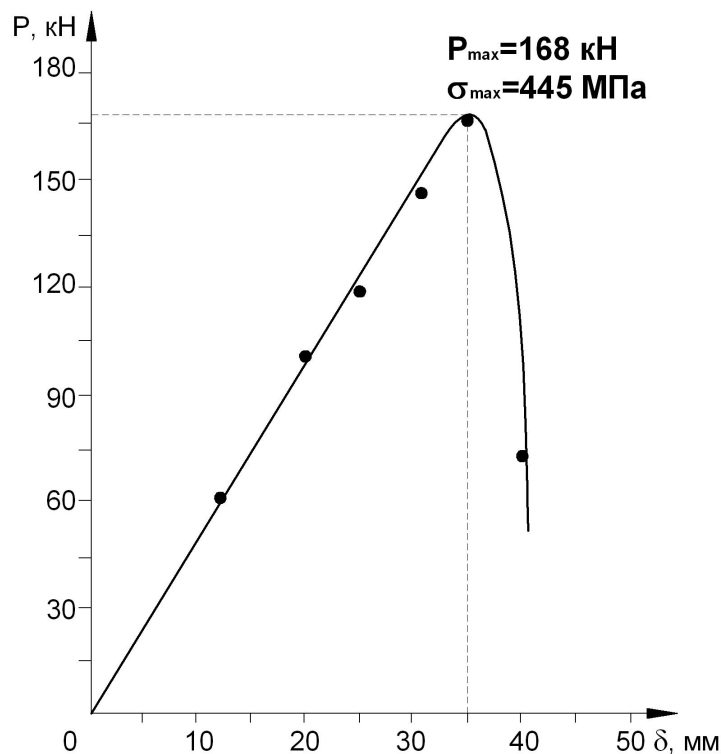
$$\sigma = P / A_0, \quad (4.15)$$

де  $A_0$  – площа поперечного перетину зразка.

Результати випробовувань на розрив зразків звичайної міцності показують, що границя міцності склопластика досягає 445 МПа. Характер руйнування зразків наступний. В місцях закріплення спостерігається зсув пластика, а в середній частині - розщеплення волокон. Розриву по тілу не спостерігали.

При досягненні напруження порядку 330-350 МПа в місцях закріплення зразка в машині спостерігали розшарування склопластика.

Діаграма розтягу склопластикової насосної штанги з лискою діаметром 22 мм представлена на рисунку 4.7. При випробовуванні насосних штанг з склопластика підвищеної міцності отримали максимальні зусилля, які досягали 226 та 210 кН, що відповідає границі міцності 592 та 553 МПа.



**Рисунок 4.7** – Діаграма розтягу склопластикової НШ з лискою діаметром 22 мм

#### **4.4 Випробовування зразків з полімерно-композиційних матеріалів на опір втомі та концепція їх втомного руйнування**

При видобуванні нафти ШСНУ трапляється велика кількість обривів НШ, обумовлених процесами корозійної втоми, які приводять до зародження та подальшого росту тріщин в тілі штанги. Поєднання дії змінних напружень з руйнівним впливом мінералізованих пластових вод на сталеві штанги веде до катастрофічного пониження їх несучої здатності. Заміна сталевих штанг на штанги з ПКМ дозволить повністю нейтралізувати вплив корозійного середовища. Крім того, НШ з ПКМ значно легше сталевих, і при однаковій компоновці колони навантаження на головку балансира може бути зменшене в 3-4 рази.

Виконані дослідження витривалості як склопластикових штанг та зразків з них діаметром 5 мм, так і базальтопластикових зразків.

Випробування базальтопластикових стержнів проводились на повітрі та в емульсіях різного складу: 5 %, 10 %, 15 % розчини соляної (HCl) кислоти разом із нафтовою емульсією (50% пластової води) навпіл. На підставі аналізу побудованих кривих Велера можна зробити висновок, що на витривалість базальтопластику практично не впливає зміна вказаних середовищ. Виявлено, що криві Велера для склопластиків та базальтопластиків практично співпадають.

За більших навантажень місце руйнування склопластикових штанг знаходиться на віддалі 8–10 см від кромки сталевий головки та характеризується інтенсивним розшаруванням склопластику. У разі пониження амплітуди змінних напружень місце поломки локалізується безпосередньо в місце з'єднання тіла з головкою (під сталевий бандаж на 3–5 см) і зумовлене протіканням інтенсивних процесів фреттінга із-за різниці модулів пружності сталі і композиту. При цьому розщеплення волокон не спостерігається. Поверхні зламу горбисті. За напружень, які дорівнюють границі витривалості, руйнування тіла штанг не спостерігалось.

Наведемо границі витривалості при базовому числі циклів 10 млн. та 50 % ймовірності неруйнування для базальтопластикових стержнів у таких робочих середовищах: повітря – 60 МПа; нафтова емульсія з 5 % розчином HCl – 60 МПа; нафтова емульсія з 10 % розчином HCl – 60 МПа; нафтова емульсія з 15 % розчином HCl – 60 МПа.

Оскільки корозійна втома є основною причиною руйнування НШ, великий інтерес представляють теоретичні і експериментальні дослідження витривалості НШ з ПКМ (зокрема склопластикових) при дії напружень згину, які більш небезпечні з точки зору розшаровування волокон внаслідок втрати стійкості штангової колони при ході плунжера вниз. Відомі роботи [95-104], в яких досліджувалось втомне руйнування і механізм росту пошкоджень волоконних композиційних матеріалів. Однак в цих роботах не досліджувалась втома волоконних композитів, обтиснутих з обох кінців сталевим бандажем.

Розроблені конструкції НШ, які складаються з сталеві головки і склопластикового тіла. Зразки штанг діаметром 22 мм довжиною 500 мм випробовували при дії змінного кругового згину на повітрі і в нафтових емульсіях.

Для визначення працездатності склопластикових НШ в умовах дії навантажень циклічного згину проведені натурні випробування на втому. Пошкодження оцінювали, контролюючи втрату жорсткості залежно від кількості циклів, а згинальну втомну міцність визначали з точки зору появи тріщин і руйнування. Число циклів до відмови залежало від прикладеного рівня напруження, двопараметричний аналіз Вейбула використовувався для визначення ймовірності відмови згідно кривої  $\sigma-N$ .

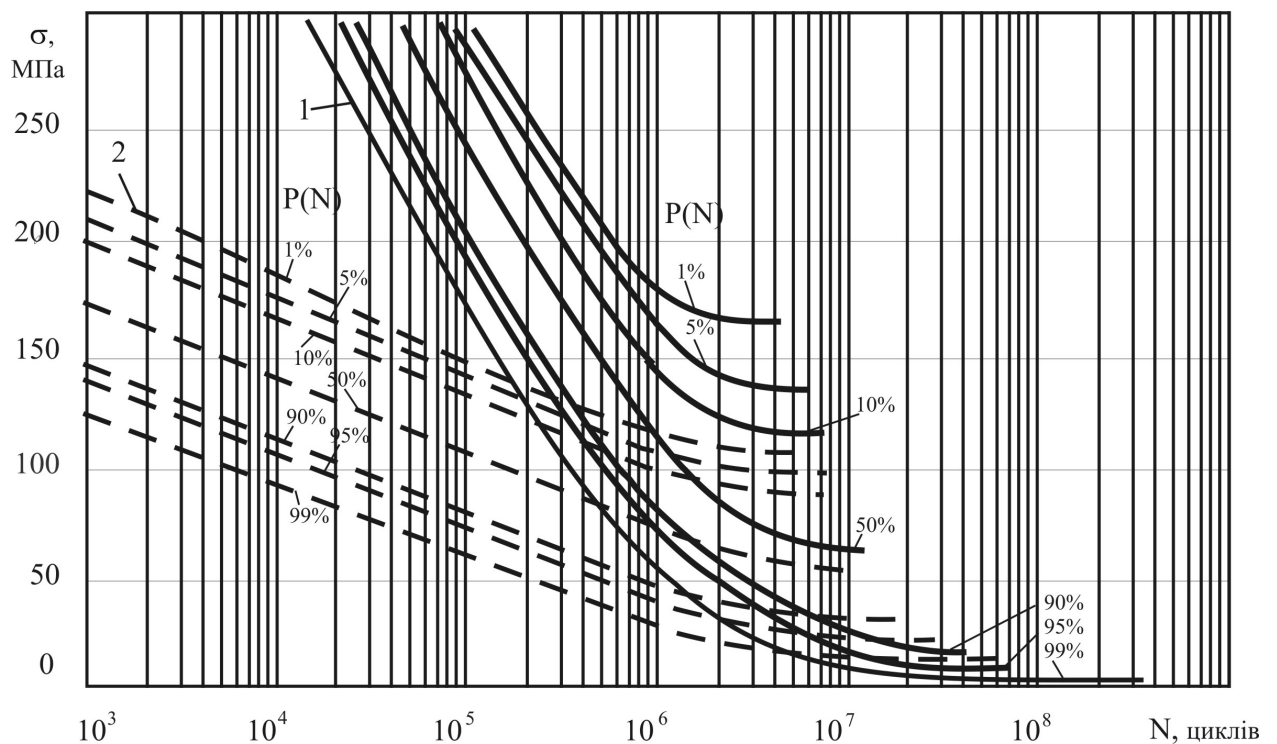
Результати випробувань зразків склопластикових НШ на втомну міцність при змінному циклічному консольному згині в різних експлуатаційних середовищах представлені в таблиці 4.6.

**Таблиця 4.6** – Результати випробувань зразків склопластикових насосних штанг при змінному циклічному консольному згині

| Середовище                                    | Напруження, МПа | Кількість циклів до поломки |
|---|-----------------|-----------------------------|
| Повітря                                       | 150             | 3300                        |
|   | 100             | 54100                       |
|   | 70              | 340000                      |
|   | 70              | 4177000                     |
|   | 60              | 17138000                    |
|   | 55              | 50000000                    |
| Нафтокислотна емульсія (5% кислотний розчин)  | 131             | 77000                       |
|   | 100             | 1100000                     |
|   | 90              | 839000                      |
|   | 80              | 332000                      |
|   | 80              | 2260000                     |
|   | 60              | 50000000                    |
| Нафтокислотна емульсія (10% кислотний розчин) | 100             | 300000                      |
|   | 90              | 1000000                     |
|   | 80              | 94300                       |
|   | 80              | 5362000                     |
| Нафтокислотна емульсія (15% кислотний розчин) | 131             | 35000                       |
|   | 100             | 584000                      |
|   | 80              | 127000                      |
|   | 80              | 812000                      |
|   | 80              | 2770000                     |
|   | 60              | 4780000                     |
|   | 50              | 30000000                    |

В результаті випробувань встановлено, що штанги з ПКМ мають більш високі характеристики витривалості, ніж сталеві, і ця перевага проявляється при числі циклів навантаження, які перевищують 2-5 млн. На рисунку 4.8 представлені криві витривалості різної ймовірності неруйнування сталевих і склопластикових НШ при циклічному консольному згині. При високих напруженнях згину руйнування штанг проходить на відстані 80 - 100 мм від головки і характеризується інтенсивним розшаруванням склопластика. З пониженням амплітуди змінних напружень згину місце поломки локалізується безпосередньо в місці з'єднання тіла з

головкою і обумовлено перетіканням інтенсивних процесів фретінгу через різницю модулів пружності сталі і композита. При напруженнях, рівних границі витривалості, поломки тіла штанг не спостерігали (при базі випробувань 50 млн. циклів), хоча в окремих місцях штанги появились повздовжні тріщини. Витривалість НШ в нафтовій емульсії на 15-25 % вища, ніж при роботі в пластовій мінералізованій воді [105].



**Рисунок 4.8** – Криві витривалості різної ймовірності неруйнування  $P(N)$  сталевих (1) (сталь 20Н2М) та склопластикових (2) НШ діаметром 22 мм при циклічному консольному згині в пластовій воді (% ймовірності неруйнування)

Сформульована і розвинута концепція руйнування ПКМ з врахуванням ефектів поглинання енергії на міжфазових границях [106]. Вихідним при цьому є узагальнений енергетичний критерій поширення (гальмування і зупинки) тріщини.

$$\frac{\partial}{\partial l}(U_n - \Gamma_n - \Delta E_s) \geq 0, \quad (4.16)$$

тут  $U_n, \Gamma_n$  – потенціальна і поверхнева енергія,

$$\Gamma_n = 2\gamma_n \ell_n,$$

де  $\gamma_n$  – відносна поверхнева енергія;  $\ell_n$  – довжина крихкої тріщини;  $\Delta E_s$  – енергія поглинання, рівна роботі сил адгезії на відповідних зміщених точках армуючих (а) і матричних (м) шарах в структурі ПКМ.

$$\Delta E_s = \int_0^t \iint_{S_e} \tau_s \Delta U_s ds dt,$$

де  $t$  – час процесу;  $\tau_s = f_k P_k$  – дотичне напруження на поверхнях розділення фаз;  $\Delta U_s = U_a - U_m$  – скачок міжфазних зсувів;  $f_k, P_k$  – коефіцієнт міжфазного тертя і міжфазний тиск.

В стержневому наближенні для функції  $\Delta E_s$  отримана формула:

$$\Delta E_s = (n - 1) \frac{\tau_s^2 \cdot l_s^3}{6B_m}, \quad (4.17)$$

де  $l_s$  – довжина зон пластичного проковзування в парі «волокно – рівниця»;  $n$  – кількість шарів ПКМ.

Жорсткість шару рівниці товщиною  $h_m$ :

$$B_m = \frac{2E_m h_m}{1 - \gamma_m^2}, \quad (4.18)$$

де  $E_m, \gamma_m$  – модуль пружності і коефіцієнт Пуасона полімерної рівниці.

Критичне напруження руйнування для циліндричної деталі буде визначене:

$$\sigma_s^{kp} = \sqrt{\frac{4E \cdot \gamma}{\pi \cdot \ell_n (1 - \gamma^2)} [1 + n \cdot (n - 1) \cdot \eta^2]}, \quad (4.19)$$

або 
$$\sigma_{kp} = \sigma_{kp}^0 \sqrt{1 + n \cdot (n - 1) \cdot \eta^2}, \quad (4.20)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт міжшарової пластичної дії;

$$\eta = P_n \cdot f_n \cdot \ell \sqrt{\frac{1 - \gamma^2}{4E \cdot \gamma \cdot H}},$$



$\sigma_{kr}^0$  – відповідне критичне напруження деталі з квазіоднорідного матеріалу.

Збільшення критичних напружень в ПКМ можна досягнути за рахунок збільшення параметрів  $n$  або  $\eta$ . Ймовірно, існують оптимальні проекти ПКМ – структури, для яких вибором відповідного способу  $n$  і  $\eta$  можна досягнути максимальної тріщиностійкості.

Зокрема, показано, що при певних умовах підвищеного опору руйнуванню структури можна досягнути максимальної тріщиностійкості, вибираючи рівень зчеплення, рівний половині ідеальної адгезійної міцності

$$\tau = \frac{1}{2} \tau_0 .$$

#### **4.5 Зношування зразків з полімерно-композиційних матеріалів в різних середовищах**

Систематичне вивчення властивостей ПКМ ведеться з 1963 р. [107]. На даний час досить повно висвітлені питання міцності та деформаційних властивостей композиційних матеріалів при різних видах навантаження: розтяг, стиск, згин, удар; впливу температури на фізичні, механічні та електричні властивості ПКМ; природи поверхні розділу наповнювачів та зв'язуючого. Значно менше робіт присвячувалось вивченню трибологічних властивостей ПКМ, зокрема склопластиків, базальтопластиків, вуглепластиків.

По проблемі тертя та зношування зібраний і узагальнений великий експериментальний матеріал, на основі якого зроблені важливі теоретичні висновки та пропозиції. Достатньо, наприклад, звернутися до відомих монографій І.В. Крагельського [108, 109], А.С. Ахматова [110]. Питаннями тертя та зношування композиційних матеріалів займалися В.Н. Протасов [111], А.К. Погосян [112].

На основі аналізу джерел інформації [68, 106, 107] по питаннях тертя та зношування ПКМ можна зробити наступні узагальнення:

- поведінка різних ПКМ при терті не завжди може бути достовірно передбачена;
- ПКМ з волоконними наповнювачами мають високу зносостійкість тільки при низьких швидкостях ковзання (до 50 м/с);
- при збільшенні об'ємного вмісту наповнювача в ПКМ при сухому терті коефіцієнт тертя знижується;
- на характер зносу значно впливає форма і розташування наповнювача;
- зносостійкість волоконних ПКМ можна підвищити при утворенні поперечних зв'язків між полімером і наповнювачем.

В роботах І.В. Крагельського визначені основні фактори, що впливають на трибологічну взаємодію твердих тіл. Вхідними факторами є природа тіл тертя, проміжне середовище, навантаження, швидкість, температура. Вихідними факторами є сила тертя, яка залежить від коефіцієнту тертя, та інтенсивність зношування.

Трибологічні випробовування зразків з ПКМ були проведені згідно методики, представленої в п. 3.2 з урахуванням вище перелічених факторів.

При терті ПКМ по жорстких поверхнях в умовах малого тепловиділення в основному спостерігався втомний механізм зносу, обумовлений дискретним характером фрикційного контакту поверхонь. Реальні поверхні твердих тіл завжди хвилясті та шорсткі. Тому їх контакт відбувається на окремих малих площадках, так званих плямах контакту. Число плям контакту і їх розмір залежать від навантаження, деформаційних властивостей поверхневого шару, шорсткості. Під дією нормального навантаження нерівності більш жорсткої поверхні входять в поверхневий шар менш жорстких поверхонь і в області плям контакту виникають напруження і деформації [107].

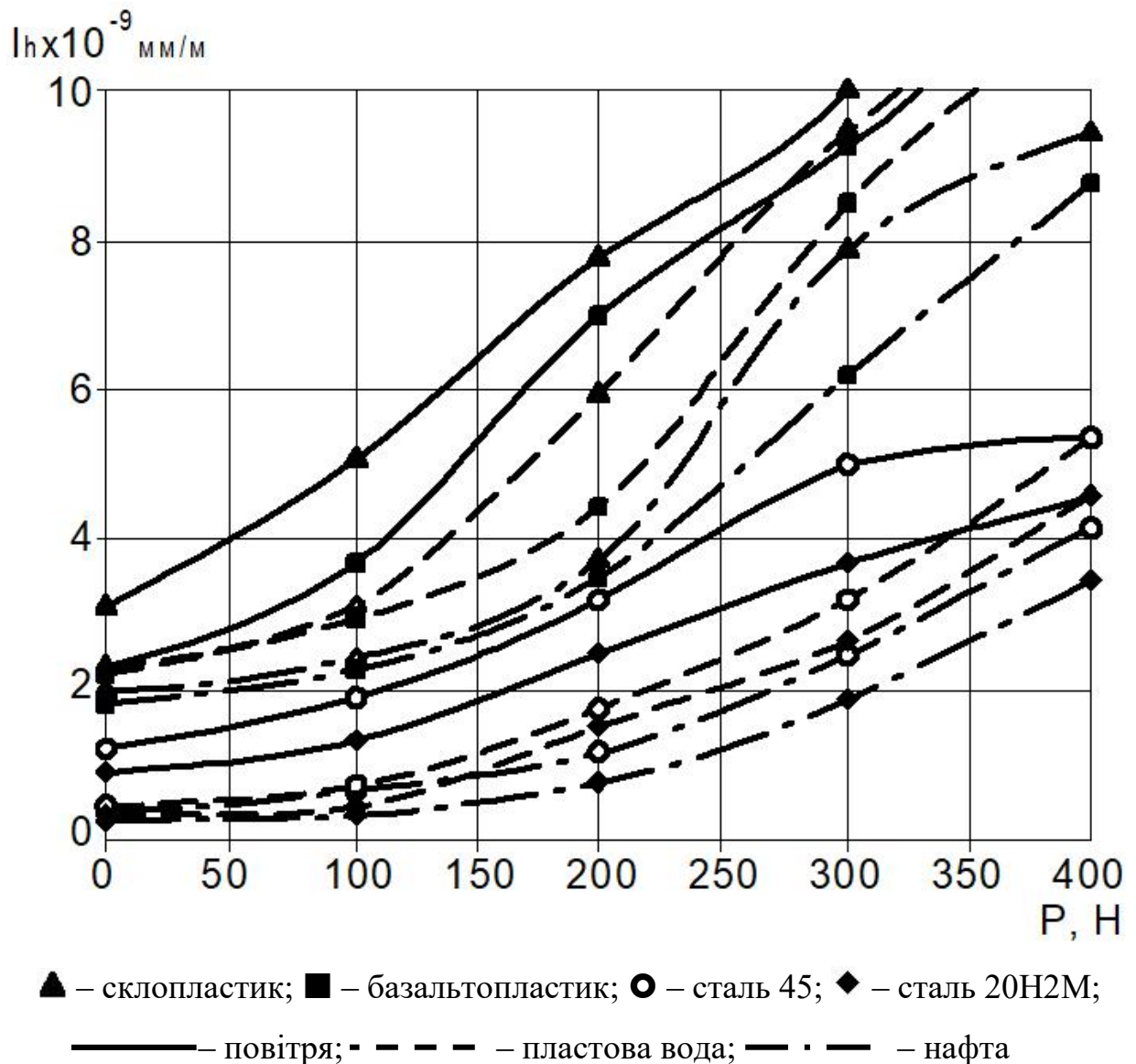
Руйнування поверхонь тертя як правило проявлялось у відділенні частинок матеріалу. Розмір частинок змінюється в межах від долей мікрметра до декількох мікрметрів. Відділення цих частинок пов'язане з багатократним впливом навантажень, температурних імпульсів на одиничні нерівності. В результаті постійного накопичення незворотних змін виникає неоднорідність структури, напруженого стану, тобто утворюються концентратори, виникають тріщини, які змикаючись, утворюють продукти зносу.

При терті ПКМ по шорстких жорстких поверхнях виникає і абразивне зношування, яке проявляється в мікрорізанні поверхневого шару композиційного матеріалу. Абразивний знос викликаний також наявністю твердих частинок, які можуть міститися в навколишньому середовищі.

Залежність інтенсивності лінійного зношування (відношення висоти зношеного шару до шляху тертя) від навантаження (контактного тиску) сталевих зразків та зразків з ПКМ при терті в різних середовищах представлена на рисунку 4.9. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження при терті в різних середовищах сталевих зразків по сталі та зразків з ПКМ по сталі представлена на рисунку 4.10.

З збільшенням контактного тиску інтенсивність зношування зростає. Залежність має нелінійний характер, що обумовлено впливом контактного тиску на ряд параметрів, які визначають інтенсивність зношування: площу фактичного контакту, діаметр плям контакту, розмір зони деформації [108]. Інтенсивність зношування зразків з склопластика і базальтопластика при терті в нафті наближається до інтенсивності зношування сталі при сухому терті. Підвищення коефіцієнта тертя викликає різке збільшення інтенсивності зношування. З ростом міцності інтенсивність зношування зменшується. З зменшенням модуля пружності ПКМ інтенсивність зношування зменшується.

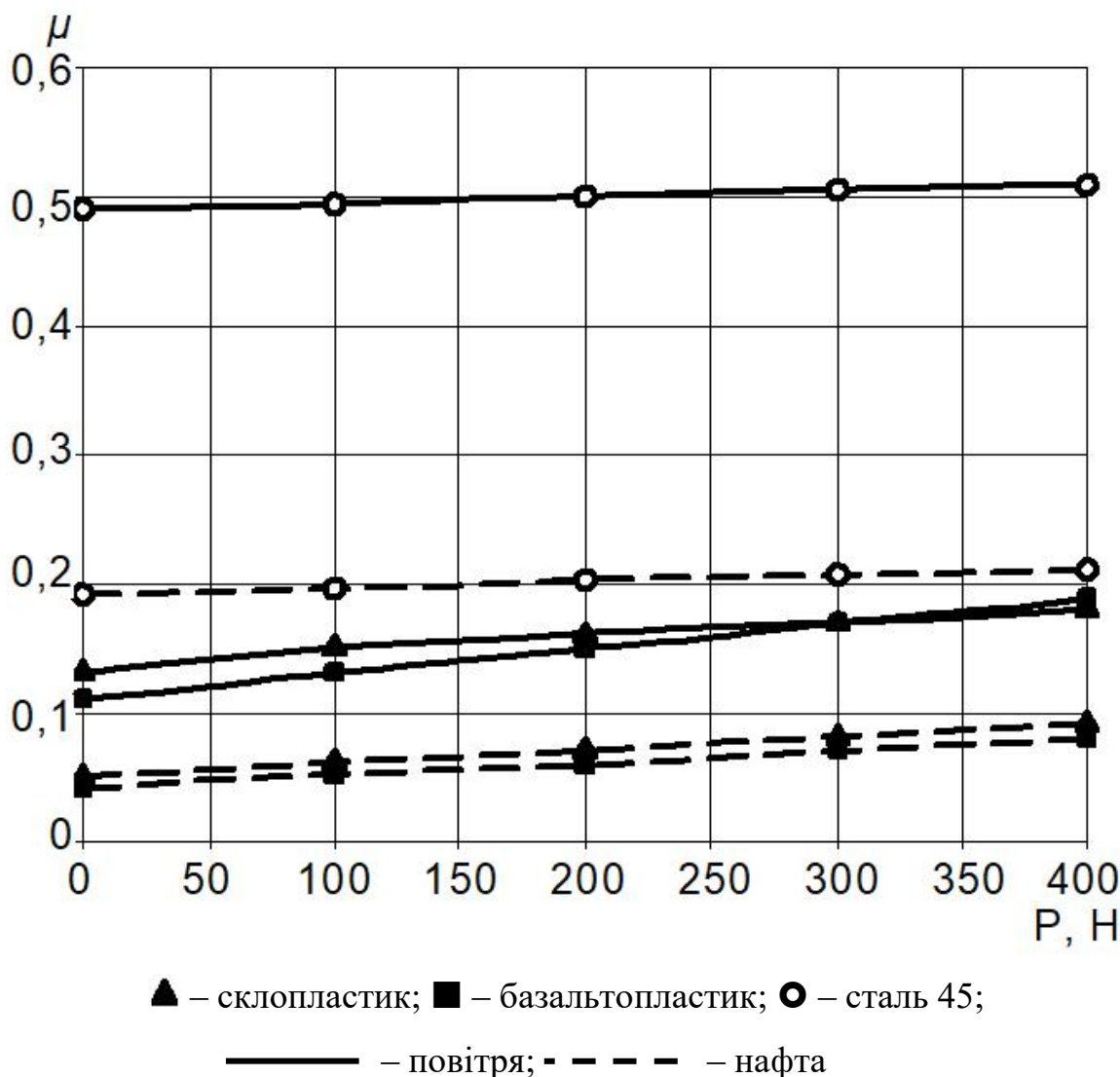
Для ПКМ характерні підвищені антифрикційні властивості. Коефіцієнт тертя ПКМ при сухому терті менший ніж коефіцієнт тертя сталі в нафтовому середовищі. Найменший коефіцієнт тертя мають композиційні матеріали при орієнтації волокон на поверхні тертя в напрямку дії сили тертя.



**Рисунок 4.9** – Залежність інтенсивності лінійного зношування ( $I_h$ ) від навантаження в різних середовищах

На механізм зносу ПКМ і інтенсивність зношування при терті по твердих поверхнях суттєвий вплив мають температура в зоні тертя і швидкість ковзання.

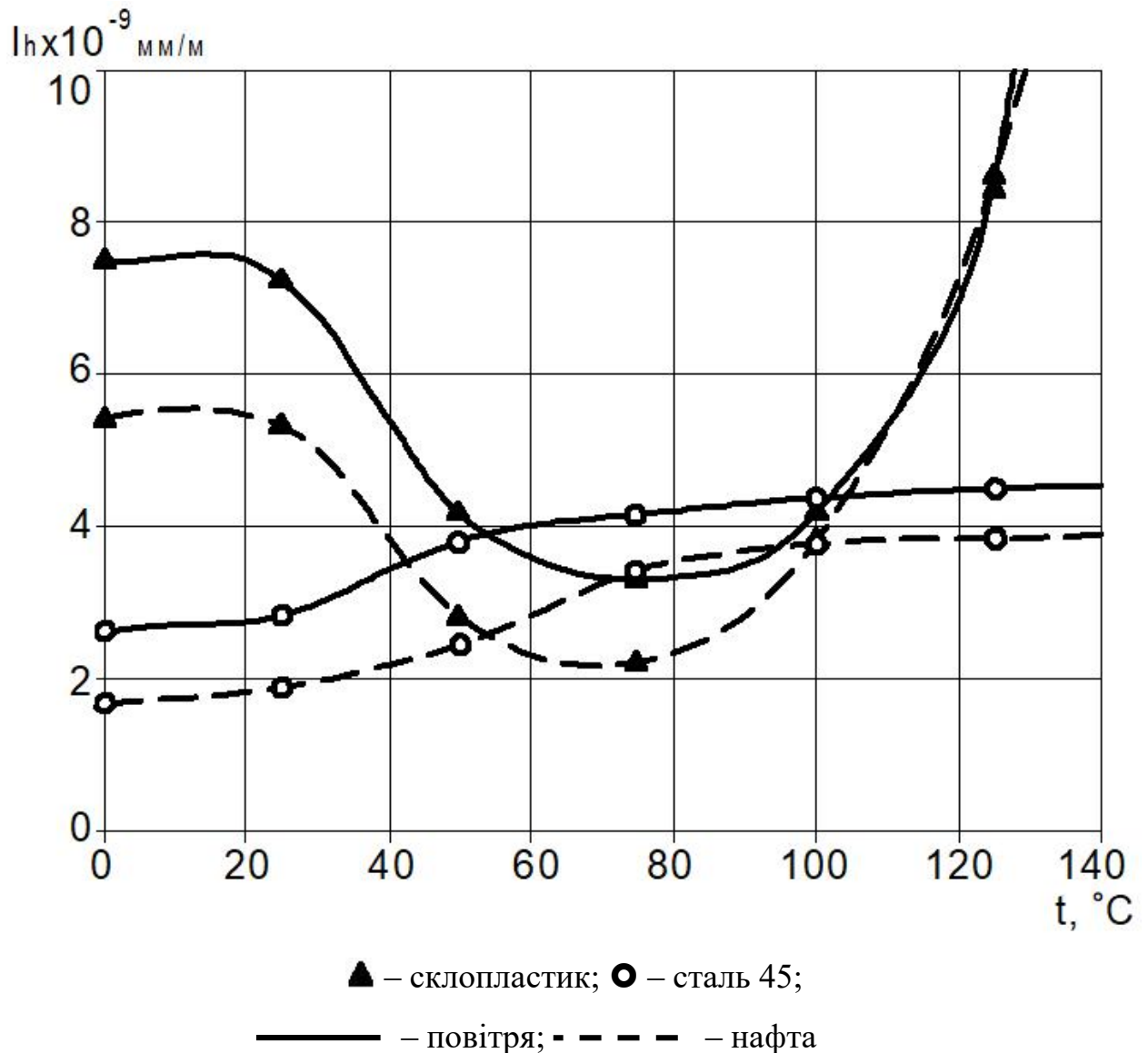
Залежність інтенсивності лінійного зношування від температури в зоні контакту сталевих зразків та склопластикових зразків при сухому терті та терті в рідинному середовищі (нафта) представлена на рисунку 4.11.



**Рисунок 4.10** – Залежність коефіцієнта тертя від навантаження

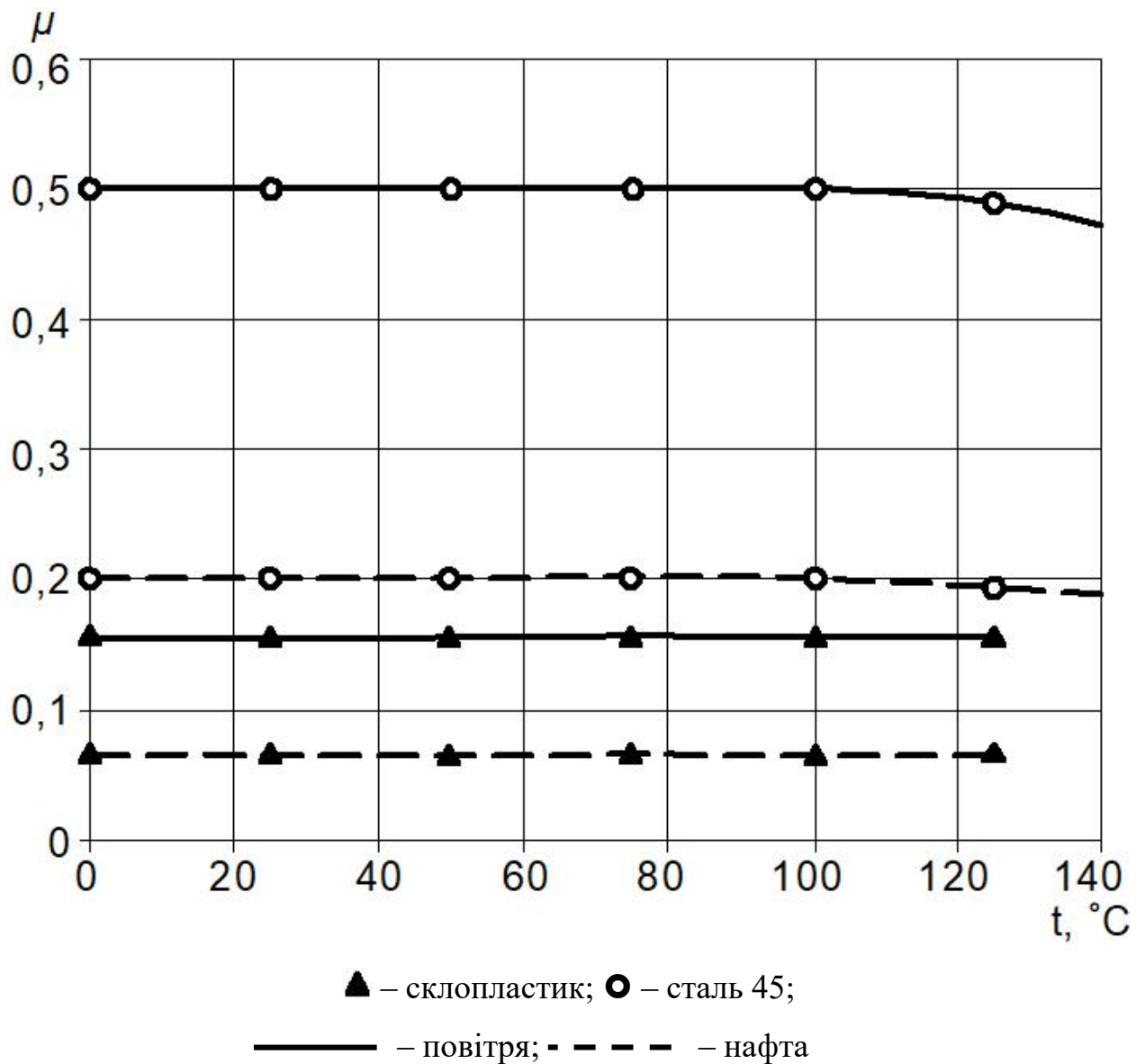
Висока температура у поєднанні з високими тисками, які виникають в зонах контакту, приводять до значної зміни властивостей поверхневих шарів, викликають значні температурні напруження. Вплив температури на інтенсивність зношування проявляється побічно через зміну пружно-міцнісних (руйнуюче напруження, модуль пружності, відносне видовження при розриві) і фрикційних властивостей (коефіцієнт тертя) ПКМ. Під дією температури змінюються фізичний стан ПКМ, його структура. Експлуатаційне середовище має суттєвий вплив на інтенсивність зношування

ПКМ. Рідинне середовище, вступаючи у взаємодію з тілами тертя, викликає зміну їх деформаційних та фрикційних властивостей. Адсорбуючись на поверхні тертя, середовище виконує роль мастила. Ефективність мастильної дії середовища визначається його хімічним складом і фізико-хімічними властивостями. При терті в рідинних середовищах знижується температура в зоні контакту за рахунок більш інтенсивного тепловідведення.



**Рисунок 4.11** – Залежність інтенсивності лінійного зношування від температури в зоні тертя при навантаженні 200 Н

Залежність коефіцієнта тертя від температури в зоні контакту сталевих зразків та склопластикових зразків при сухому терті та терті в рідинному середовищі (нафта) представлена на рисунку 4.12.



**Рисунок 4.12** – Залежність коефіцієнта тертя від температури в зоні тертя при навантаженні 200 Н

У склопластика сила тертя і площа контакту мало залежать від температури на поверхні тертя. Після 120 °С відбувається руйнування склопластикового зразка.

В області малих швидкостей ковзання коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування практично не змінюються. В області великих швидкостей знижується коефіцієнт тертя і зменшується інтенсивність зношування (при умові, що температура не змінюється). Однак при збільшенні швидкості ковзання температура в зоні контакту зростає, тому зростає й інтенсивність зношування.

В результаті проведених досліджень встановлено, що із збільшенням навантаження в зоні контакту інтенсивність зношування зразків з ПКМ збільшується по нелінійній залежності. При випробовуваннях встановлено, що значення коефіцієнтів тертя як склопластикових, так і базальтопластикових зразків по сталі знаходяться в межах від 0,11-0,19 (при випробовуванні в складському приміщенні без доступу сонячних променів) до 0,05 (при випробовуванні в нафті Північно-Долинського родовища) і можна говорити про збіг цих величин для скло- і базальтопластиків. Встановлено, що критична температура на поверхні тертя 120 °С, максимальне навантаження на номінальну площу контакту 1 см<sup>2</sup> при нульовій швидкості ковзання 7000 Н. Вище цих меж відбувалось руйнування матеріалу полімерного композиційних зразка, яке проявлялося у вигляді виривання окремих армуючих волокон, розшаровувань, викришування. На основі проведених досліджень виявлено, що процеси, які відбуваються при терті і зношуванні композиційних матеріалів відрізняються від аналогічних процесів для сталевих зразків, вони не є стійкими і залежать від багатьох зовнішніх факторів.

#### **4.6 Висновки до розділу**

1. Розроблені математична модель з'єднання сталеві головки з склопластиковим тілом НШ і методика розрахунку контактних напружень дозволяють дослідити розподіл контактних напружень залежно від механічних та геометричних властивостей оболонки при контактній взаємодії, а також при дії зовнішнього навантаження.

2. На основі розробленої математичної моделі запропоновано ряд конструктивних рішень, які можуть бути реалізовані в з'єднанні сталеві головки з полімерним композиційним тілом НШ.



3. Експериментальні дослідження НШ з ПКМ на статичну міцність показали, що границя міцності на розрив зразків зі склопластика звичайної міцності досягає 445 МПа, підвищеної міцності 555 МПа. Досліджено характер руйнування склопластику при розтягу.

4. В результаті випробовувань на втому при циклічному консольному згині встановлено, що склопластикові НШ мають більш високі характеристики витривалості, ніж сталеві, і ця перевага проявляється при числі циклів навантаження, які перевищують 2-5 млн. Сформульована і розвинута концепція руйнування ПКМ з врахуванням ефектів поглинання енергії на міжфазних границях.

5. Механізм зносу ПКМ має втомний характер. Інтенсивність зношування зразків з склопластика і базальтопластика при терті в нафті наближається до інтенсивності зношування сталі при сухому терті. Для ПКМ характерні підвищені антифрикційні властивості. На механізм зносу ПКМ і інтенсивність зношування при терті по твердих поверхнях суттєвий вплив мають температура в зоні тертя і швидкість ковзання.

## РОЗДІЛ 5

### МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВИХ СВЕРДЛОВИННИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

#### **5.1 Розроблення діагностичного комп'ютерного комплексу штангових свердловинних насосних установок**

Створення сучасних мобільних вимірювальних систем контролю (МВСК) для діагностування параметрів ШСНУ вимагає не просто заміни колишніх аналогових давачів, приладів і систем на цифрові, такі, що мають безперечні переваги з точки зору забезпечення візуалізації процесу, графічного інтерфейсу оператора, самоконтролю, зберігання і архівації інформації і тому подібне, але і повинно припускати істотне підвищення точності контролю, наприклад, за рахунок використання високоефективних методів, що застосовуються в передових науковомкх галузях промисловості [46].

Ефективність процесу розробки МВСК для ШСНУ залежить від концепції роботи в цілому, від її комплексності і системності. Основними показниками, по яких можна оцінити етапи розробки і використання технічних рішень МВСК, є час, вартість і надійність. Основним показником, що характеризує процес створення МВСК, є час. Оскільки складність МВСК безперервно зростає, звідси збільшення терміну розробки, зростає час налагоджування (обслуговування).

Ставиться задача розробити способи та комплекс апаратних і програмних засобів МВСК для діагностування, аналізу та визначення технічного стану ШСНУ. Проблеми, що виникали при вирішенні поставленої задачі, детально розглядалися в роботах [115 - 126].

Вибір оптимального складу МВСК для ШСНУ в класичній постановці призводить до фільтрації за методом найменших квадратів, при якому будь-яке залучення додаткових вимірювань покращує точність оцінювання. Тому

оптимальним є використання усіх можливих елементів вимірювань, але при цьому завдання не має розв'язку на безлічі усіх скінченномірних векторів вимірювань  $d$

$$d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}, \quad (5.1)$$

де  $n$  - число вимірювань.

Вибір оптимального складу МВСК набуває сенсу тоді, коли на вектори  $d$  накладаються обмеження по числу вимірювань. Така неklasична постановка завдання вибору оптимального складу некорельованих вимірювань при обмеженні їх числа поставлена в задачі Ельвінга [126]. У рішенні задачі Ельвінга оптимальний склад вимірювань включає  $m$  значень  $\tilde{d}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), кожне з яких повторюється  $n_i$  разів. У МВСК для побудови алгоритму фільтрації завдання Ельвінга використовується метод найменших квадратів.

Розглянемо застосування задачі Ельвінга при визначенні руху плунжера ШСН по вимірюваннях пройденого ним шляху  $s = a + vt$ . Вимірювання проводяться в довільні моменти часу  $t$ . Залежність між величинами  $s(t)$  і вектором стану  $q = \{a, v\}$  визначається вимірюваною функцією. Необхідно вибрати з нескінченної безлічі можливих  $n$  вимірювань, які б забезпечували досягнення мінімумів дисперсій оцінок  $\hat{a}$  і  $\hat{v}$ . В задачі Ельвінга існує оптимальний вимірювальний базис, що відповідає вимірюванням в моменти часу  $t_1 = t_n$  і  $t_2 = t_k$ . Знаходимо з задачі Ельвінга відповідні оптимальні кількості вимірювань для моментів  $t_1$  і  $t_2$ :

$$n_1 = n \cdot |t_k| / (|t_k| + |t_n|), \quad n_2 = n \cdot |t_n| / (|t_n| + |t_k|) \quad \text{при } l = a. \quad n_1 = n_2 = n/2 \quad \text{при } l = v \quad (5.2)$$

Навіть за наявності універсального оптимального вимірювального базису  $d_m$  відповідний цьому базису оптимальний розподіл кількостей  $n_i$  вимірювань не є універсальним і залежить від вибору параметра  $l$ , який оцінюється. Однаковий для визначення обох оцінок і оптимальний склад МВСК виходить при  $t_n = -t_k$ . Мінімальні значення дисперсій оцінок отримані при оптимальному складі МВСК

$$D_{\min}(\hat{a}) = \sigma^2/n \times (|t_n| + |t_k|)^2/T^2, D_{\min}(\hat{v}) = \sigma^2/n \times 4/T^2, \quad (5.3)$$

де  $T = t_k - t_n$  - тривалість мірного інтервалу МВСК.

У тому випадку, коли

$$t_n \leq 0, t_k \geq 0, \quad (5.4)$$

вираз (5.3) набирає вигляду

$$D_{\min}(\hat{a}) = \sigma^2/n, \quad (5.5)$$

тобто не залежить від часу  $t_n$  і  $t_k$ . Пояснюється це тим, що величина  $a$  визначає положення плунжера у момент часу  $t=0$ . В цьому випадку оптимальним є проведення усіх вимірювань при  $t=0$ , що безпосередньо призводить до виразу (5.5). Проте при такому складі МВСК величина  $\hat{v}$  не визначається.

Коли обидві залежності (5.4) є строгими нерівностями, то, зосередивши усі виміри на обох кінцях інтервалу, отримаємо оптимальне значення  $D(\hat{a})$  при одночасному визначенні оцінки  $\hat{v}$ .

Порівняємо дисперсії  $D_{\min}(\hat{a})$  і  $D_{\min}(\hat{v})$ , що отримуються в МВСК при оптимальному виборі  $n$  вимірювань зі значеннями  $D_{pi6}(\hat{a})$  і  $D_{pi6}(\hat{v})$ , що відповідають рівномірному розподілу часу вимірювань. З (5.3) і (5.5) при досить великому  $n$  знаходимо

$$\begin{cases} D_{pi6}(\hat{a}) \approx 4D_{\min}(\hat{a}) \\ D_{pi6}(\hat{v}) \approx 3D_{\min}(\hat{v}) \end{cases} \quad (5.6)$$

З виразу (5.6) видно, що при прийнятих допущеннях оптимальний склад МВСК забезпечує істотну точність вимірювань в порівнянні з рівномірним розподілом.

Вважаємо мірний інтервал МВСК симетричним відносно початку відліку часу  $-T \leq t \leq T$ , де  $T = 1/2(t_n - t_k)$ .

В якості оцінюваного параметра ШСНУ  $l$  прийемо швидкість плунжера  $v$ . Тоді

$$q = \{a, v\}, \psi_1 = t, \psi_2 = 1. \quad (5.7)$$

Використовуємо наведене вище рішення задачі Ельвінга для ШСНУ, для якого оптимальні часи  $t_1$ ,  $t_2$  і відповідні числа вимірювань  $n_1$  і  $n_2$  визначаються рівністю

$$t_1 = -T, \quad t_2 = T, \quad n_1 = n_2 = n/2. \quad (5.8)$$

З виразів (5.7) і (5.8) і матриці задачі Ельвінга для фільтрації по методу найменших квадратів знаходимо

$$v_1 = 1, \quad v_2 = 0, \quad x(t) = t^2. \quad (5.9)$$

Характеристика густини вимірювань  $x(t) = t^2$  є параболою. З (5.9) витікає, що при оптимальному розподілі вимірювань їх загальне число  $n$  має бути розбите на дві рівні групи, розміщені з максимальною густиною по краях інтервалу вимірювань  $T$ . Виграш вимірювань МВСК по точності від використання отриманого оптимального розподілу в порівнянні з рівномірним розподілом приблизно триразовий.

У випадку, коли цікавить точність оцінювання кількох скалярних параметрів ШСНУ, кожному з них буде відповідати свій оптимальний склад МВСК. У зв'язку з цим представляє інтерес вибір універсального складу МВСК, що оптимізує одночасно точність оцінки кількох параметрів, що утворюють  $l = \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ .

У теорії оптимального планування експериментів для цієї мети використовуються різні універсальні критерії оптимальності. Недоліком цих критеріїв є те, що вони не завжди характеризують точність оцінювання параметрів ШСНУ, що цікавлять дослідника.

Більш вдалим є універсальний критерій оптимальності, використовуваний в роботі В.Г. Єршова [127]. При цьому відшукується мінімум числа вимірювань за умови, що

$$D(\hat{l}_i) \leq \sigma_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.10)$$

де  $\sigma_i^2$  – задане позитивне число.

У роботі [127] завдання вибору оптимального складу вимірювань за цим критерієм розглядається при постановці задачі Ельвінга. При цьому

доведено, що в числі оптимальних складів вимірювань  $\epsilon$ , принаймні, один, відповідний проведенню  $\gamma$  різних вимірювань, кожне з яких повторюється  $n$  разів. При цьому

$$\gamma = [m(m+1) - (m-r)(m-r+1)]/2, \quad \sum_{i=1}^{\gamma} n_i = n, \quad (5.11)$$

де  $r = D_{\text{pis}}(\hat{v})/D_{\text{min}}(\hat{v})$ .

При  $r=1$   $\gamma=m$ , що відповідає результату, отриманому при рішенні задачі Ельвінга.

Дане рішення дозволяє істотно уточнити результати вимірювань МВСК для ШСНУ, що покращує метрологічну точність і підвищує достовірність отриманої інформації.

При виборі оптимального складу МВСК ШСНУ необхідно дотримуватись наступних вимог:

- оптимізацію необхідно проводити на базі "задачі Ельвінга";
- для побудови алгоритму фільтрації завдання Ельвінга використовується метод найменших квадратів;
- коли обидві залежності (5.4) є строгими нерівностями то, зосередивши усі вимірювання на обох кінцях інтервалу, набудемо оптимального значення  $D(\hat{a})$  при одночасному визначенні оцінювання  $\hat{v}$ ;
- при оптимальному розподілі вимірювань їх загальне число  $n$  має бути розбите на дві рівні групи, розміщені з максимальною густиною по краях інтервалу вимірювань  $T$ ;
- в разі необхідності підвищення точності оцінювання кількох скалярних параметрів ШСНУ, кожному з них відповідатиме свій оптимальний склад МВСК;
- при постановці завдання необхідно врахувати залежність граничних значень модуля коефіцієнта кореляції між двома вимірюваннями від проміжку часу, що розділяє ці вимірювання за залежностями (5.8) і (5.9);
- вибір універсального складу МВСК необхідно проводити за універсальним критерієм В.Г. Єршова за залежностями (5.10) і (5.11);

– при плануванні експерименту, що має на меті визначення параметрів стану реальної ШСНУ, необхідно в першу чергу визначити відповідну вирішуваній задачі систему допущень про характер помилок початкових даних і вибрати на основі цих допущень оптимальну стратегію проведення і обробки вимірювань МВСК.

В ІФНТУНГ розроблений якісно новий програмний комплекс діагностування свердловин, що експлуатуються ШСНУ [128].

Комплекс складається із двох самостійних вимірювальних систем, загальними елементами яких є персональний комп'ютер і електронний блок-перетворювач сигналів з давачів.

Живлення перетворювача і давачів, управління режимами роботи, прийом поступаючої з давачів інформації здійснюється через штатні порти комп'ютера. Електричні напруги і струми штучно обмежені величинами  $U < 5\text{В}$  і  $I < 10\text{ мА}$  і тому не можуть привести у випадку поганого контакту до іскроутворення, а у випадку несправності елементів до їх розігріву до температури спалахування попутних газів.

Програмне забезпечення комплексу дозволяє отримати результати вимірювань в графічному і цифровому вигляді на екрані комп'ютера. Підключивши до комп'ютера графопобудовувач або друкуючий пристрій, можна протокол вимірювань вивести на папір. Система автоматично веде архів вимірювань, де реєструється: дата вимірювання, номер свердловини, продуктивність насоса.

Оскільки реєстрація результатів в графічній формі є більш інформативною і більш зручна для суб'єктивного сприймання, ніж цифрова форма, але, одночасно, вона незручна для наступної математичної обробки, розроблюваний прилад повинен забезпечувати вивід і зберігання результатів вимірювань в графічному і цифровому вигляді.

Виходячи з амплітуди та частоти руху колони НШ, аналізу існуючих приладів, які переслідують аналогічну мету, а також враховуючи

необхідність підвищення інформативності даних про роботу обладнання, прийнято рішення дискретизувати вхідні дані з максимальною частотою 50 Гц.

Математична обробка результатів досліджень в теперішній час здійснюється з використанням електронно-обчислювальної техніки. Існує велика кількість спеціалізованих і універсальних програмних пакетів для такої обробки. Таким чином, прилад повинен забезпечувати вивід результатів досліджень в формі, зручній для вводу в ЕОМ.

Визначено наступні вимоги до приладу:

- канал вводу аналогової інформації, сумісний з типовими тензодавачами;
- канал вводу цифрової інформації;
- частота досліджуваного сигналу до 50 Гц;
- можливість розширення частотного діапазону до 3 кГц;
- вивід і зберігання результатів вимірювань в графічному і цифровому вигляді;
- сумісність з ЕОМ.

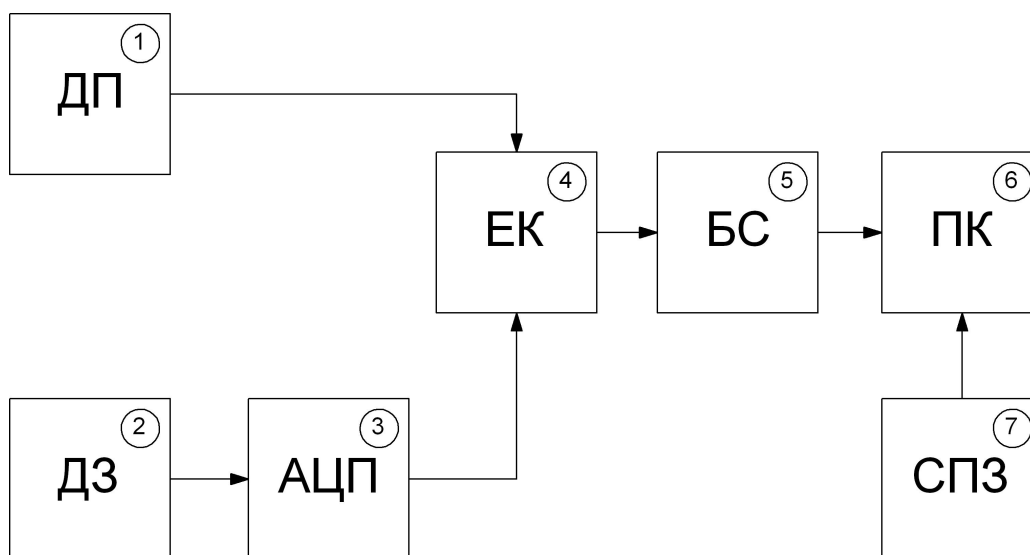
Для реалізації поставлених завдань було вирішено виконати пристрій у вигляді мікропроцесорної обчислювальної системи. Організація всього дослідницького комплексу у вигляді мікропроцесорної системи є найбільш доцільною за сучасних умов розвитку техніки і забезпечує простоту компоновки та експлуатації, зручність у користуванні, точність та швидкість обробки результатів досліджень, можливість функціонального розширення за рахунок розроблення додаткового програмного забезпечення. Для спрощення конструкції всього комплексу і ліквідації проміжних ланок було вирішено в якості мікропроцесорного контролера використати персональний комп'ютер. Комп'ютери даного типу найбільше поширені в даний час в Україні. Стикування комп'ютера з давачами було вирішено організувати через зовнішній блок спряження. Зовнішній блок може бути під'єднаний до



будь-якого комп'ютера на місці проведення експериментів, що не потребує для цього спеціальних навичок.

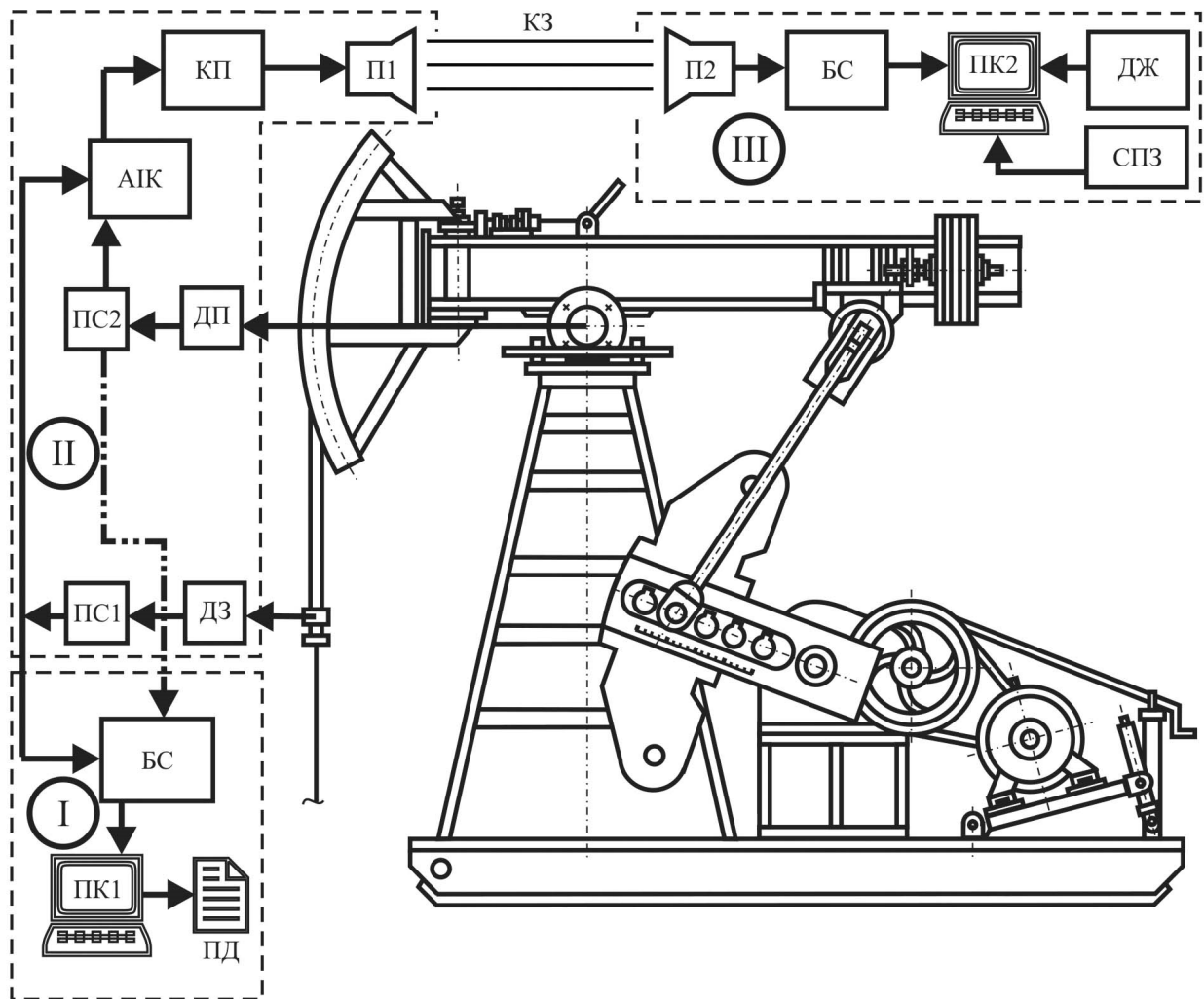
На рисунку 5.1 представлено принципову схему розробленого діагностичного комп'ютерного комплексу. Пристрій складається з цифрового давача переміщень (ДП) полірованого штока, аналогового давача зусиль (ДЗ) на полірованому штоці, аналого-цифрового перетворювача (АЦП), електронного комутатора вхідних сигналів (ЕК), зовнішнього блоку спряження (БС), персонального комп'ютера (ПК). Невід'ємною частиною приладу є спеціальне програмне забезпечення (СПЗ). Розміщення основних елементів діагностичного комп'ютерного комплексу на ШСНУ і взаємозв'язок між ними показаний на рисунку 5.2.

Підключення блоку спряження з комп'ютером здійснюється через стандартний паралельний інтерфейс «Centronics», USB чи інші. Порівняно з наявним в кожному комп'ютері інтерфейсом RS-232, ці інтерфейси простіші в експлуатації і, головне, забезпечують більшу швидкість передачі даних.



1 – цифровий давач переміщень; 2 – аналоговий давач зусиль; 3 – аналого-цифровий перетворювач; 4 – електронний комутатор вхідних сигналів; 5 – зовнішній блок спряження; 6 – персональний комп'ютер; 7 – спеціальне програмне забезпечення

**Рисунок 5.1** – Принципова схема діагностичного комп'ютерного комплексу



I – пункт контролю; II – диспетчерський пункт; III – малогабаритна вантажівка;

АИК – аналогово-імпульсний комутатор; БС – блок спряжень; ДЖ – джерело живлення і блок підключення; ДЗ – давач зусиль; ДП – давач переміщень;

КЗ – канал зв'язку; КП – кодуєчий пристрій; П1 – передавач; П2 – приймач;

ПД – пристрій друкуючий; ПК – персональний комп'ютер;

ПС1 – підсилювач сигналу зусиль; ПС2 – підсилювач сигналу переміщень;

СПЗ – спеціальне програмне забезпечення

**Рисунок 5.2** – Схема діагностичного комп'ютерного комплексу ШСНУ

На прилад в приведеній схемі організації вимірювальної системи покладено виконання наступних функцій:

- прийом аналогових сигналів від первинного перетворювача;
- приведення сигналів до нормалізованого вигляду;

- прийом цифрових сигналів від первинного перетворювача;
- аналогово-цифрове перетворення сигналу;
- комутація аналогових та цифрових сигналів на вході в ПК;
- подача цифрового коду на вхід комп'ютера;
- прийом і передача керуючих сигналів комп'ютера.

Для виконання динамометрування на свердловині, що експлуатується з ШСНУ, встановлюється два давача: давач навантаження на головку балансира і давач переміщення штока.

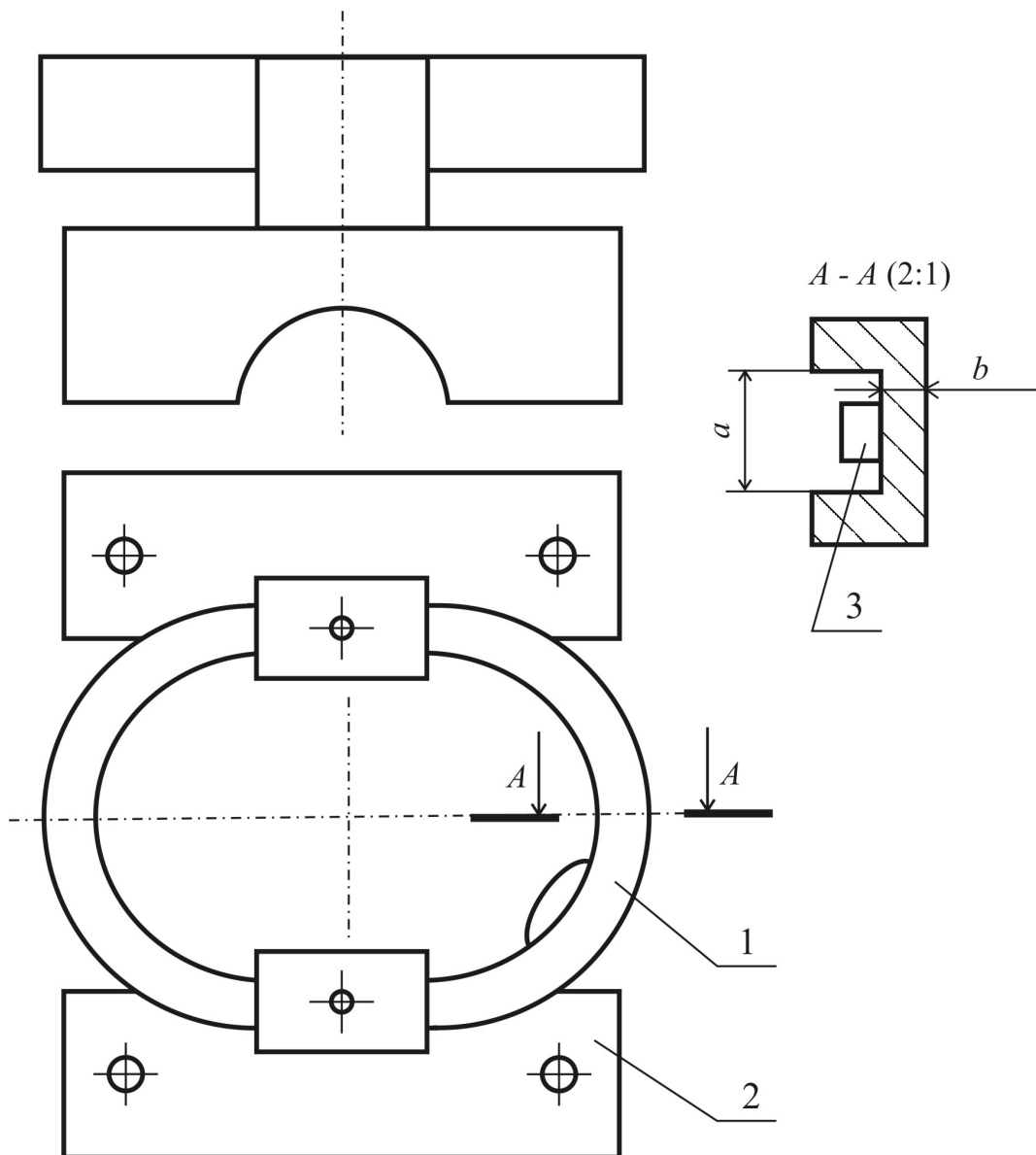
Відомий давач навантаження, виконаний як універсальний підковоподібний кількісний давач навантаження. Найбільш близьким до нього є давач навантаження, розроблений Київським політехнічним інститутом. Дані давачі є давачами стиску, і суттєвим недоліком їх є недостатня точність вимірювання зусиль, що виникають при роботі ШСНУ в устьовому штоку при стисканні підвіски. Відома конструкція тензометричного давача, який нечутливий до зміни температури полірованого штока [41].

Для розробленого діагностичного комп'ютерного комплексу запропонований давач зусиль, що працює на розтяг [129]. Давач містить пружний чутливий елемент 1 (рис. 5.3, рис. 5.4), який виконаний у вигляді кільця, струбцини 2 для кріплення давача до устьового штока, тензорезисторний перетворювач 3, роз'єм. Пружний чутливий елемент має кільцеву виточку, змінюючи розміри  $a$  і  $b$  якої можна змінювати чутливість пристрою та межі його вимірювань. Робочий орган, тобто пружне кільце закривається з обох сторін кришками, тензорезисторний перетворювач провідниками під'єднаний до роз'єму. Струбцини приварені до пружного кільця. Зусилля, яке виникає в устьовому штоку здійснює деформацію чутливого елемента, що приводить до зміни опору тензорезисторів.

Одночасно з сигналом про зусилля на полірованому штоку, прилад повинен фіксувати величину його переміщення. Після ряду експериментів

було розроблено і виготовлено цифровий фазочутливий давач переміщення на основі оптоелектронних приладів, який працює в широкому діапазоні довжин переміщень з точністю 5 мм і реагує на напрям руху полірованого штока.

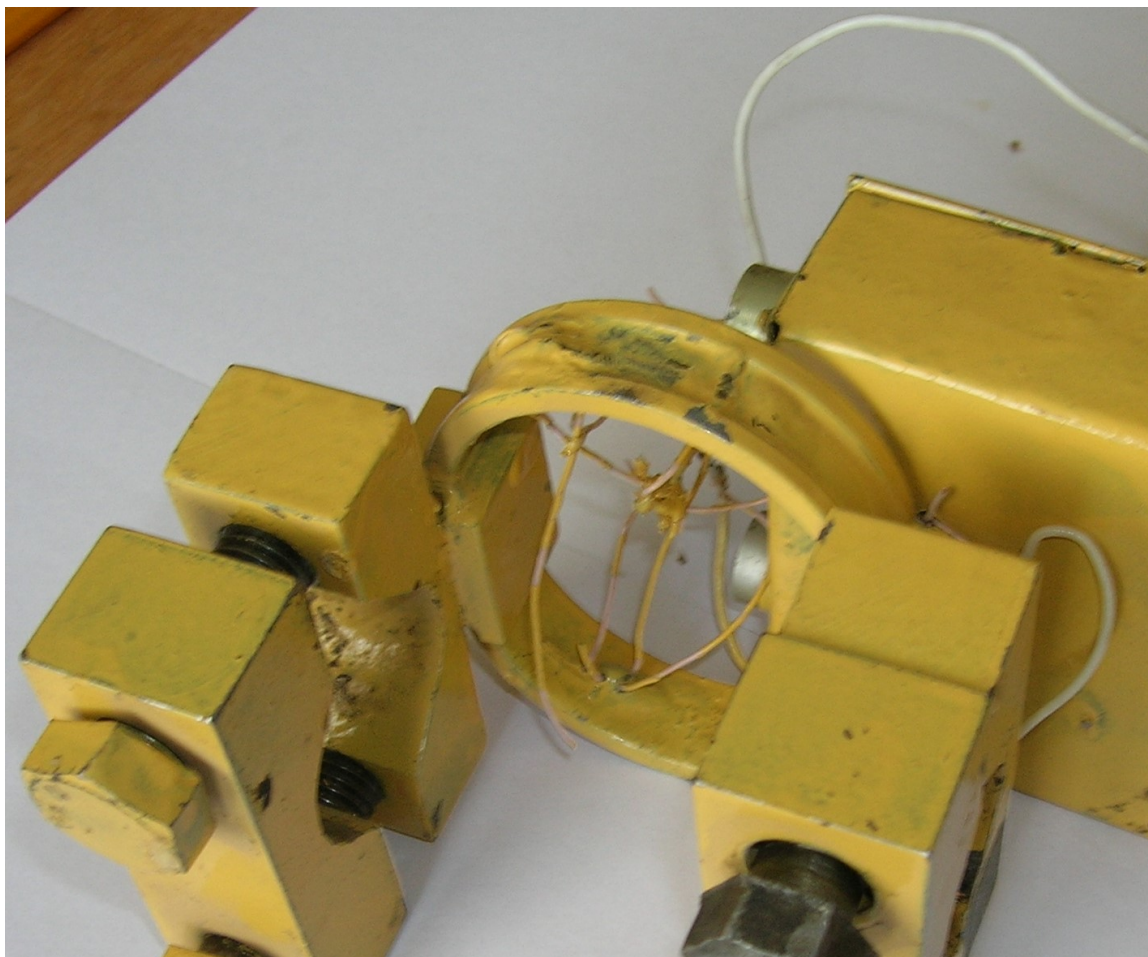
В силовому давачі містяться чотири первинних тензорезисторних перетворювача зусилля в електричні сигнали. Ці сигнали підсилюються і приводяться до напруги 0...10 В.



1 – пружний чутливий елемент; 2 – трубка; 3 – тензодавач

**Рисунок 5.3** – Пристрій для вимірювання навантажень  
на головку балансира ШСНУ

Підсилені сигнали подаються на входи АЦП. АЦП перетворює цей сигнал в цифрову форму і передає його на вхід цифрового комутатора, на другий вхід якого одночасно подаються сигнали від давача переміщень. Вибір сигналів керовано здійснюється комп'ютером, після чого вибраний сигнал передається на інтерфейс «Centronics» комп'ютера.



**Рисунок 5.4** – Загальний вигляд давача навантаження

Інтерфейс «Centronics» призначений для організації прийому і передачі інформації в паралельному коді. Це забезпечується шиною, яка складається із 17 сигнальних ліній. Через цей інтерфейс комп'ютер здійснює прийом числового значення амплітуди вхідного сигналу або переміщення штока, керування комутатором та АЦП, а також прийом і видачу сигналів для керування зовнішнім технологічним обладнанням.

Організація роботи елементів блока спряження, зчитування і передача керуючих сигналів та цифрових даних з АЦП здійснюється програмним

шляхом і, як результат, може бути легко адаптована до конкретних умов експерименту.

Вся інформація зчитується в пам'ять комп'ютера або виводиться на екран у вигляді графіка. Входи і виходи інтерфейсу використовуються для вводу і виводу керуючих дискретних сигналів, що дозволяє використовувати прилад в якості системи автоматичного регулювання або керування. Електричні рівні дискретних сигналів відповідають рівням ТТЛ.

Макетування розробленого пристрою показало правильність вибору основних положень щодо проектування та працездатність розроблених вузлів.

## **5.2 Визначення оптимального наробітку деталей та вузлів штангових свердловинних насосних установок**

Ефективна організація ремонтних робіт, що забезпечують мінімальний рівень простоїв бурового та нафтопромислового обладнання та мінімальну величину витрат підприємства на забезпечення працездатності обладнання, можливі при відомих значеннях наробітку деталей до відмови або між відмовами. Завдання вибору величини наробітку ускладнюється тим, що розподіл відмов за часом носить ймовірнісний характер. Звідси і величина наробітку деталей в однотипному обладнанні між відмовами не має однозначної величини.

Відомі роботи [13, 14], де проведені випробовування за визначенням фактичного наробітку між відмовами з метою оцінки надійності роботи нафтопромислового обладнання.

В роботі [13] випробовування відмов обладнання проведено двома методами: розглянуті наробітки між відмовами окремих вузлів та деталей і наробітку між відмовами обладнання в цілому незалежно від того, яка з деталей прийшла в несправність.

Обидва автори ставлять та вирішують завдання визначення оптимальних значень основних показників надійності обладнання. Надійність нафтопромислових насосів розглядається по-детально з визначенням усереднених значень наробітку між відмовами, ймовірності відмов [14]. Однак, викладений в роботі методичний підхід визначення оптимальної величини наробітку між відмовами для вирішення справжнього завдання не підходить за двома причинами:

– для вибору оптимального значення наробітку між відмовами в умовах експлуатації обладнання немає необхідності порівнювати цей показник для базового і нового обладнання із збільшеним наробітком;

– з точки зору ефективної організації ремонтного обслуговування необхідно із ряду фактичних значень наробітків між відмовами вибрати оптимальне, що не передбачено методичним підходом, що аналізується. Технічна документація заводів-виробників обладнання, а також діюче "Положення про систему технічного обслуговування і планового ремонту бурового та нафтопромислового обладнання" регламентує терміни проведення змащування обладнання, технічного обслуговування, поточного і капітального ремонту. Однак, терміни заміни окремих деталей, як правило, не встановлюються.

Таким чином, для нафтопромислового обладнання на даний час відсутні достатньо обгрунтовані величини наробітків деталей між відмовами, а також методичні підходи для їх визначення, що стримує широке і ефективне застосування системи планових ремонтів, призводить до значних простоїв виробничих об'єктів в зв'язку з несправністю обладнання.

Методичний підхід, що пропонується, полягає в наступному. Аналіз фактичних даних по заміні деталей та вузлів верстатів-качалок в процесі експлуатації показав, що 30-40 % випадків заміни були виконані при близьких за величиною наробітках. Решта 60-70 % випадків розподілені в обидві сторони, причому, з наближенням до мінімального і максимального

значення наробітку кількість випадків зменшується. Якщо в якості граничного наробітку, при якому відбувається заміна деталі, прийняти фактичне мінімальне її значення, тоді всі ремонтні роботи будуть виконані в запланований термін. При цьому скорочуються простой виробничих об'єктів НГВУ в зв'язку з несправністю обладнання. Як показав аналіз фактичного стану організації ремонтних робіт в НГВУ "Долинанафтогаз", таке скорочення складає, як правило, близько 24 годин.

З іншого боку, заміна деталі при наробітку, рівному мініимальному, призводить в більшості випадків (понад 90%) до недовикористання ресурсу деталей, що викликає збільшення витрати запасних частин, збільшення кількості виконаних ремонтів.

При призначенні величини граничного наробітку, рівного максимально зареєстрованому в практиці, більшість деталей буде замінено після повної відробки. В цьому випадку збільшуються простой об'єктів, але при цьому буде повне використання ресурсу деталей, скоротиться кількість ремонтів.

З цього судження видно, що існує найбільш доцільне, оптимальне значення наробітку, при якому сума витрат з одного боку в зв'язку з простоями об'єктів та з іншого - через недовикористання ресурсу деталей та збільшення кількості ремонтів буде мініимальною. Це положення можна записати у вигляді:

$$\Pi = \Pi_{\text{п}} + \Pi_{\text{р}} + \Pi_{\text{д}} \rightarrow \min, \quad (5.12)$$

де  $\Pi$  – сумарні витрати;  $\Pi_{\text{п}}$  – витрати підприємства в зв'язку з простоями об'єктів;  $\Pi_{\text{р}}$  – витрати підприємств в зв'язку із збільшенням кількості ремонтів;  $\Pi_{\text{д}}$  – витрати підприємства в зв'язку з недовикористанням ресурсу деталей.

Перша із складових сумарних витрат – витрати підприємства в зв'язку з недобором нафти за час додаткових простоїв, що викликані проведенням ремонтних робіт після виходу обладнання з ладу. Ці витрати можна подати виразом:



$$\Pi_n = n \cdot \Delta t \cdot q \cdot (C_T - C_C), \quad (5.13)$$

де  $n$  – кількість ремонтів, що виконані після відмови обладнання в рік;  $\Delta t$  – різниця часу простоїв об'єктів при виконанні ремонтів після відмови і в плановому порядку, діб;  $q$  – середній дебіт свердловин, що обладнані ШСНУ, т/добу;  $C_T$  – вартість однієї тонни нафти за цінами підприємства з врахуванням прибутку, грн.;  $C_C$  – собівартість однієї тонни нафти, грн.

Витрати підприємства в зв'язку із збільшенням кількості ремонтів обладнання можуть бути визначені з виразу:

$$\Pi_p = \left( \frac{a_{n+1}}{A_n} K_1 + \frac{a_{n+2}}{A_n} K_2 + \dots + \frac{a_{n+m}}{A_m} K_m \right) \cdot C_p, \quad (5.14)$$

де  $a_{n+1}, a_{n+2}, \dots$  – фактичний наробіток деталей між відмовами, що перевищує її граничне значення;  $K_1, K_2, \dots$  – фактична кількість заміни деталей при відповідних наробітках;  $C_p$  – вартість заміни деталі, грн.

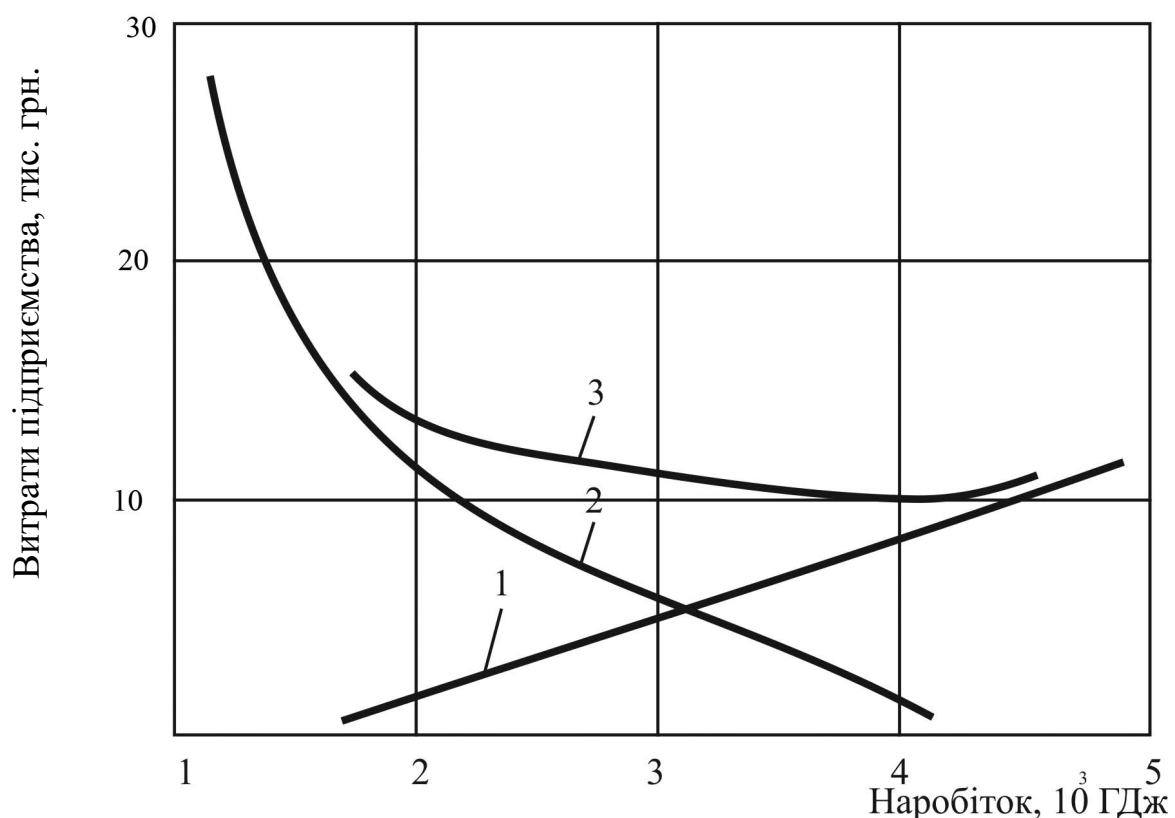
Витрати в зв'язку з недовикористанням ресурсу деталі можуть бути визначені як частина його вартості. Тут варто врахувати ступінь дефіцитності конкретних деталей і витрати на їх отримання. Частина вартості деталей, пропорційна недовикористаному ресурсу, за своєю величиною незначна по відношенню до інших видів витрат, тому цим видом витрат можна знехтувати. Другий вид витрат визначити не є можливим в зв'язку з відсутністю відповідного рахунку.

Таким чином, рівняння оптимізації наробітку деталей до відмови або між відмовами має вигляд:

$$n \cdot \Delta t q \cdot (C_T - C_C) + \left( \frac{a_{n+1}}{A_n} K_1 + \frac{a_{n+2}}{A_n} K_2 + \dots + \frac{a_{n+m}}{A_m} K_m \right) \cdot C_p \rightarrow \min, \quad (5.15)$$

Оскільки ні один із членів першої складової рівняння оптимізації не пов'язаний фундаментально з наробітком, мінімізувати рівняння аналітично відомими математичними методами не є можливим. Тому рішення задачі слід проводити графічно.

Як приклад, на рисунку 5.5 представлено графічне визначення оптимальної величини наробітку шатуна верстата-качалки СК8-3,5-4000 [130]. Крива 1 відображає першу складову рівняння, крива 2 - витрати НГВУ в зв'язку зі збільшенням кількості ремонтів при недовикористанні ресурсу шатунів, крива 3 сумуюча, мінімум сумарних витрат відповідає нижній точці кривої 3. Оптимальна величина наробітку шатуна, яку слід використовувати при плануванні та виконанні ремонтів, складає  $4 \cdot 10^3$  ГДж. Криві побудовані за фактичними даними НГВУ "Долинанафтогаз" ПАТ «Укрнафта». Наробіток шатуна виражений через об'єм роботи верстата-качалки, метод визначення якого викладений в [15].



1 – зміна величини прибутку НГВУ за рахунок проведення ремонтів в плановому порядку при різних значеннях граничного наробітку; 2 – витрати НГВУ в зв'язку зі збільшенням кількості ремонтів при недовикористанні ресурсу деталей; 3 – сумарні витрати

**Рисунок 5.5** – Визначення оптимальної величини наробітку шатуна верстата-качалки СК8-3,5-4000

Застосування викладеного методу дозволяє більш ефективно здійснювати ремонт обладнання, розраховувати потрібну кількість запасних частин, збільшити ефективність системи планових ремонтів, якість виготовлення обладнання та його ремонту, що в кінцевому рахунку призводить до зниження простоїв об'єктів видобування нафти.

### **5.3 Створення банку даних по наробітках деталей та вузлів штангових свердловинних насосних установок**

В основу оптимальної стратегії технічного обслуговування і ремонту ШСНУ покладено співставлення фактичного значення обсягу роботи, виконаної певним вузлом чи деталлю з гранично допустимим наробітком, який визначається шляхом обробки статистичної інформації [131, 132].

Використання ЕОМ в організації планування ремонтних робіт ШСНУ дасть можливість:

- зберігати в пам'яті комп'ютера дані про характеристику і параметри роботи обладнання, стан вузлів і деталей;
- швидко і з необхідною точністю обчислювати наробіток вузла чи деталі і порівнювати його з граничним значенням;
- розраховувати параметри надійності ШСНУ і його деталей;
- розробляти графіки заміни відпрацьованих вузлів і деталей.

**5.3.1 Опис бази даних.** Програмне забезпечення персональних комп'ютерів містить значну кількість програм, які дозволяють ефективно обробляти великі масиви інформації. Серед них вигідно відрізняється пакет dBase. Він характеризується високою швидкістю, зручний, порівняно простий у користуванні, має багато можливостей для маніпуляції даними. На основі dBase створено нові, потужніші пакети програм (наприклад Foxbase). Пакет програм Foxbase орієнтований на обробку реляційних баз даних, які представляють собою інформацію у вигляді таблиць. Окрему таблицю,

записану у зовнішню пам'ять ЕОМ, можна розглядати, як файл. Файл ідентифікується іменем, яке складається з назви та виділеного від неї крапкою розширення. Рядки таблиці розглядають як записи файлу. Вертикальні графи таблиці можна представити як поля записів файлу. В кожне поле можна записати дані різних типів (символи, числа, дату).

В основу роботи по створенню баз даних для ведення обліку виробництва деталей верстата-качалки покладено 4 файли, які несуть інформацію про стан і адресні характеристики верстата-качалки. Вся необхідна інформація вміщується в основній базі даних під назвою `base.dbf` і трьох допоміжних: `work.dbf`, `info.dbf`, `archive.dbf`.

Основна база даних `base.dbf` (Додаток Г) складається з 13 полів, в яких вміщується інформація, необхідна для обчислення виробництва деталі. Опис полів:

- 1) TR – тип родовища;
- 2) TS – тип свердловини;
- 3) KD – код деталі;
- 4) TU – тип установки;
- 5) TV – тип вузла;
- 6) TD – тип деталі;
- 7) DV – дата встановлення деталі;
- 8) KG – кількість годин роботи;
- 9) KH – кількість ходів головки балансира на годину;
- 10) DSN – дійсний середній виробіток;
- 11) MX – масштаб ходу верстата-качалки;
- 12) MY – масштаб зусиль верстата-качалки;
- 13) S – площа, яка обчислюється по графіку динамограми.

Допоміжна база даних `info.dbf` (Додаток Г) вміщує в собі інформацію про назви деталі, вузла, установки, свердловини і родовища, пов'язану з їх типами. Опис полів:

- 1) TD – тип деталі;
- 2) ND – назва деталі;
- 3) TV – тип вузла;
- 4) NV – назва вузла;
- 5) TU – тип установки;
- 6) NU – назва установки;
- 7) TS – тип свердловини;
- 8) NS – назва свердловини;
- 9) TR – тип родовища;
- 10) NR – назва родовища.

Зв'язок з основною базою даних відбувається за допомогою ключових полів: TD,TV,TU,TS,TR.

Допоміжна база даних work.dbf (Додаток Г) вміщує в собі інформацію про середній допустимий наробіток, який порівнюється з дійсним середнім наробітком. Опис полів:

- 1) KD – код деталі;
- 2) SN – середній наробіток.

Ключове поле – KD.

Допоміжна база даних archive.dbf (Додаток Г) призначена для дублювання основної бази даних на випадок зміни середнього допустимого наробітку. Опис полів:

- 1) TR – тип родовища;
- 2) TS – тип свердловини;
- 3) KD – код деталі;
- 4) TU – тип установки;
- 5) TV – тип вузла;
- 6) TD – тип деталі;
- 7) SON – середній обчислюваний наробіток;
- 8) ET – коефіцієнт ета;

9) BT – коефіцієнт бета;

10) KL – коефіцієнт лінійної кореляції.

Зв'язок з основною базою даних і іншими допоміжними базами даних здійснюється за ключовими полями: TR,TS,KD,TU,TV,TD.

**5.3.2 Опис програми «Program».** Дана програма записана на мові Foxbase. При запуску програми на екрані ПЕОМ користувача з'являється меню – вибір режимів роботи, який складається з 4-х пунктів:

1. Створення план-графіку ремонтів.
2. Формування бази даних.
3. Створення бази даних для інших установок.
4. Вихід з програми.

Програма меню складається з 4-х перемикачів: 3-х програмних модулів і команди виходу з програми, які завантажуються і виконуються в залежності від вибору користувача.

При запуску 1-го програмного модуля на екрані ПЕОМ користувача з'являється новий перелік виконуваних робіт:

- ввід вірної дати;
- продовження роботи;
- перехід до попереднього меню.

Ввід вірної дати забезпечує встановлення дати.

Вибір режиму "Продовження роботи" зумовлює появу нового переліку режимів видачі план-графіку ремонтів і вихід в меню:

- на дисплей;
- на принтер;
- вихід.

Перехід до попереднього меню повертає користувача в головне меню.

При запуску 2-го програмного модуля користувач на екрані ПЕОМ одержує запрошення:

## ВИБЕРІТЬ СВЕРДЛОВИНУ

і перелік всіх свердловин, які є у даній програмі. Якщо всі свердловини не вміщуються на екрані ПЕОМ – знизу висвічується повідомлення:

## НАСТУПНІ СВЕРДЛОВИНИ

Вибравши потрібну свердловину, користувач в такий самий спосіб вибирає вузол і деталь, щоб одержати дані про їх дійсний наробіток.

При запуску 3-го програмного модуля користувач одержує повідомлення:

## ВВІД ДАНИХ ПРО НАРОБІТКИ ДЕТАЛЕЙ

і після запуску – запрошення:

ВВЕДІТЬ ДАНІ,

ДЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ ВВОДУ НАТИСНІТЬ – 0.

Після закінчення вводу і обчислення даних користувач одержує запрошення ввести час безвідмовної роботи:

ЧАС БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ.....

і після його введення розрахунок:

## РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ ДАНИХ:

БЕТА ..... \* \* \* \* \*

ЕТА ..... \* \* \* \* \*

КОЕФІЦІЄНТ ЛІНІЙНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ..... \* \* \* \* \*

Далі обраховується:

## РОЗРАХУНОК МАТЕМАТИЧНОГО ОЧІКУВАННЯ

## ЧАСУ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ

ТАК

НІ

При виборі «НІ» знову з'являється перелік свердловин для вибору нового вузла або деталі, при виборі «ТАК» з'являється повідомлення про готовність обчислення  $P(t)$  і  $F(t)$ , і знову вибір: «ТАК», «НІ». При виборі «НІ» з'являється перелік свердловин, при виборі «ТАК» користувач одержує запрошення:

## ВВЕДІТЬ ЧАС РОБОТИ

після вводу якого одержує розрахунок  $P(t)$  і  $F(t)$  для заданого часу.

ДЛЯ  $t =$  .....

$P(t) =$  .....

$F(t) =$  .....

де  $P(t)$  і  $F(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи і ймовірність відмови деталі.

Після завершення даного розрахунку користувач може ввести нові дані для обчислення  $P(t)$  і  $F(t)$ , або вибрати нову свердловину для виконання аналогічних розрахунків.

### **5.4 Оцінка надійності обладнання штангових свердловинних насосних установок і розроблення оптимальних план-графіків ремонту**

Один з шляхів досягнення високого рівня надійності ШСНУ – використання ефективної системи технічного обслуговування і ремонту обладнання. Розробка теоретичних основ такої системи вимагає рішення певних теоретичних і практичних задач по оцінці надійності відновлюваних складових частин насосної установки і розроблення стратегії призначення періодів технічного обслуговування і ремонту обладнання [133].

На основі аналізу експлуатаційної надійності верстатів-качалок проведемо визначення найбільш раціонального інтервалу їх технічного обслуговування і ремонту. Вирішимо це завдання використовуючи стратегію строгого періодичного відновлення [134]. Ця стратегія передбачає відновлення системи після відмови, тобто так зване аварійне відновлення. Якщо ж система відпрацювала без відмов заданий інтервал часу  $t$ , то проводиться профілактичне обслуговування із заміною вузла.

Визначення оптимального міжремонтного періоду ґрунтоване на мінімізації питомих витрат на відновлення працездатного стану ШСНУ у випадку її відмови. В таблиці 5.1 приведені результати розрахунку параметрів надійності верстатів-качалок, виконані за допомогою розробленої

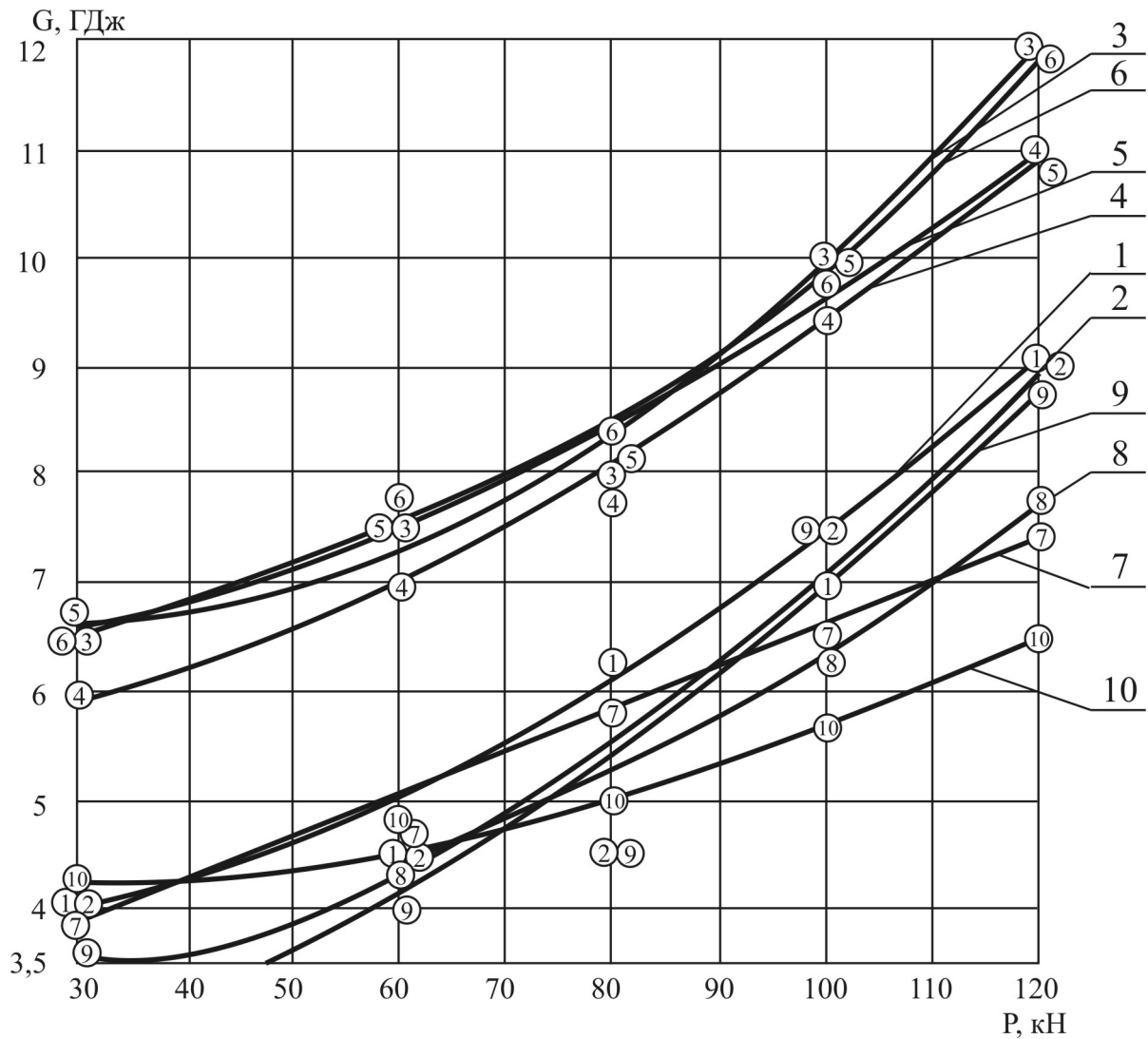


бази даних на основі зібраної статистичної інформації. В таблиці вказано середній наробіток на відмову  $T_{ср}$ , параметр форми розподілу  $\beta$ , масштабний параметр  $\eta$ , коефіцієнт лінійної кореляції  $R$ . Таблиця включає перелік основних вузлів ШСНУ, які максимально відповідають за працездатність установки в цілому. Дана таблиця може бути розширена за рахунок збільшення числа вузлів ШСНУ.

**Таблиця 5.1** – Параметри надійності основних вузлів і деталей ШСНУ

| № п/п | Вузол чи деталь ШСНУ                                  | Параметри надійності |         |        |       |
|-------|---|----------------------|---------|--------|-------|
|       |   | $T_{ср}$             | $\beta$ | $\eta$ | $R$   |
| 1     | Насосні штанги (млн. циклів): $\sigma_{пр}=50-60$ МПа | 10,83                | 1,09    | 13,1   | 0,967 |
|       | $\sigma_{пр}=70-90$ МПа                               | 9,72                 | 1,02    | 11,6   | 0,973 |
|       | $\sigma_{пр}=90-100$ МПа                              | 9,32                 | 0,79    | 10,5   | 0,978 |
|       | $\sigma_{пр}=110-140$ МПа                             | 5,81                 | 0,66    | 5,92   | 0,952 |
| 2     | Свердловинні насоси (діб):вставні НВ1Б-32             | 118                  | 3,37    | 137    | 0,930 |
|       | НВ1-32  | 117                  | 1,87    | 132    | 0,970 |
|       | НВ1-38  | 110                  | 1,67    | 129    | 0,940 |
|       | НВ1-43  | 104                  | 1,55    | 120    | 0,990 |
|       | НВ1-56  | 62                   | 1,35    | 70     | 0,960 |
|       | невставні НН2-56                                      | 102                  | 2,63    | 121    | 0,960 |
|       | ННА-68  | 84                   | 2,38    | 94     | 0,980 |
|       | ННА-93  | 70                   | 1,30    | 84     | 0,940 |
| 3     | НКТ (діб): до першої відмови                          | 2646                 | 1,89    | 2987   | 0,956 |
|       | між відмовами при обводненості продукції 40%          | 1474                 | 0,59    | 935    | 0,962 |
|       | 70%   | 593                  | 0,96    | 599    | 0,959 |
|       | 90%   | 389                  | 1,06    | 399    | 0,955 |
| 4     | Канатна підвіска (діб)                                | 1249                 | 1,08    | 1291   | 0,993 |
| 5     | Канат (діб)   | 1290                 | 1,13    | 1354   | 0,994 |
| 6     | Балансир (діб)  | 2020                 | 1,04    | 2065   | 0,968 |
| 7     | Палець кривошипа (діб)                                | 1611                 | 1,10    | 1676   | 0,993 |
| 8     | Клинопасова передача (діб)                            | 1381                 | 0,99    | 1386   | 0,984 |

На рисунку 5.6 більш повно представлена залежність оптимального наробітку вузлів і деталей верстата-качалки від навантаження на головку балансира. Відмовою установки прийнято відмову хоча б одного вузла, згаданого в таблиці 5.1.



1 – опора балансира; 2 – канатна підвіска; 3 – підшипник траверси; 4 – вісь балансира; 5 – палець головки; 6 – тіло головки; 7 – шатун; 8 – гайка (ліва – права); 9 – плашка полірованого штока; 10 – стакан

**Рисунок 5.6** – Залежності оптимального наробітку вузла чи деталі верстата-качалки від навантаження на головку балансира

Нехай  $C_a$  і  $C_n$  – середні витрати на аварійне і профілактичне відтворення і при цьому  $C_a > C_n$ . Якщо інтервал відтворення дорівнює  $t$ , то інтенсивність експлуатаційних витрат

$$R(t) = \frac{C_a \cdot F(t) + C_n \cdot P(t)}{\int_0^t P(t) \cdot dt}, \quad (5.16)$$

де  $F(t)$  – функція ймовірності відмови:  $F(t) = 1 - P(t)$ .

При збільшенні інтервалу відновлення  $t$  витрати, викликані аварійними відмовами, зростають, а витрати на профілактику зменшуються. Необхідно вибрати такий інтервал відновлення, який враховує ці дві протилежні у відношенні загальних витрат тенденції. Таким чином, шуканий інтервал відновлення  $t$ , що володіє властивістю

$$R(t') = \min R(t), \text{ при } 0 < t < \infty . \quad (5.17)$$

При цьому  $t'$  є результатом розв'язку рівняння

$$\lambda(t) \int_0^t P(t) dt - F(t) = C / (1 - C), \quad (5.18)$$

де  $C = C_n / C_a$ .

Застосуємо експоненціальний закон розподілу, для якого

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t > 0, \quad \lambda > 0, \quad (5.19)$$

де  $\lambda = 1/t_{cp}$ .

Густина відмов  $f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$ .

Ймовірність безвідмовної роботи  $P(t) = e^{-\lambda t}$

Підставляючи ці умови у формулу (5.17), знайдемо  $t'$

$$\lambda(t) \int_0^t e^{-\lambda t} dt - e^{-\lambda t} = C / (1 - C), \quad (5.20)$$

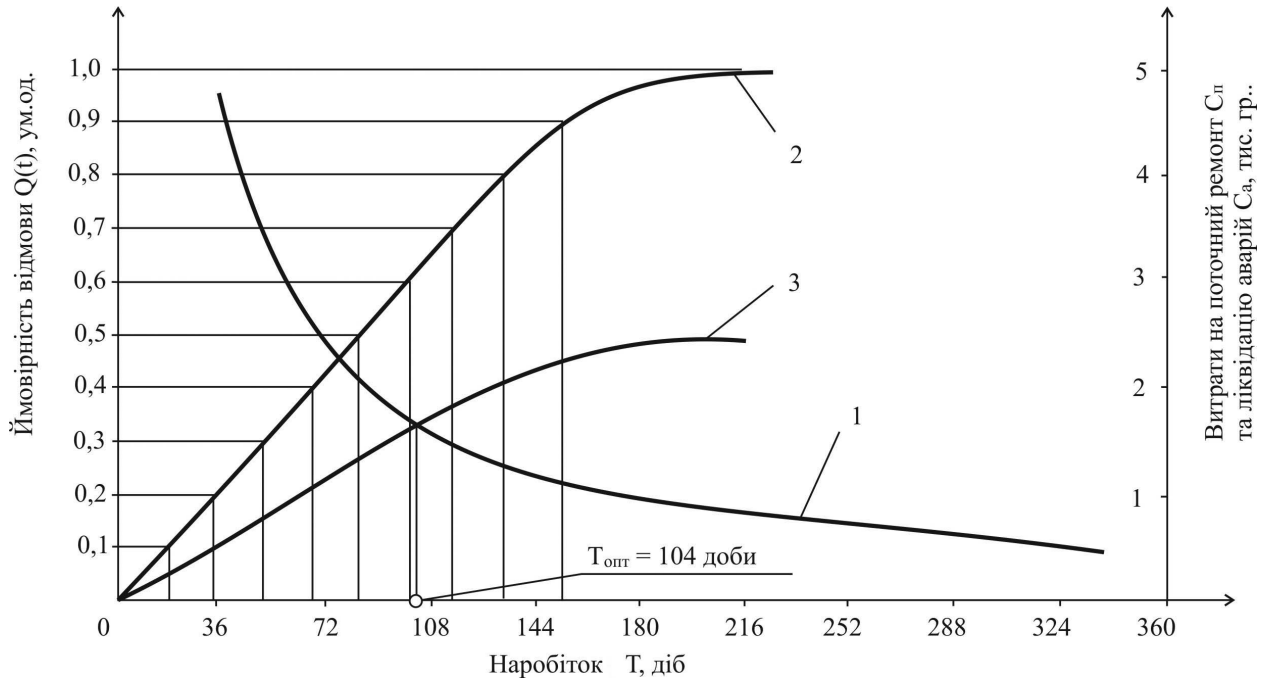
$$-2 \cdot e^{-\lambda t} + 1 = C / (1 - C). \quad (5.21)$$

Звідки

$$t' = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1 - C / (1 - C)}{2}. \quad (5.22)$$

Для прикладу визначимо оптимальний інтервал відновлення верстата-качалки СК8-3,5-4000 (див. п. 1.5). Підставивши в формулу (5.22)  $\lambda = 1,25 \cdot 10^4 \text{ год}^{-1}$  при відношенні  $C = C_n / C_a = 1/3$ , отримаємо оптимальний термін (інтервал) відновлення верстата-качалки – 1200 год. При цьому  $P(t)$  досягає 0,2-0,22, тобто до 80% вузлів верстата-качалки вичерпує свій ресурс.

Міжремонтний період ШСНУ можна визначити і графічним методом: по осі абсцис відкладається плин часу (наробіток ШСНУ), а по осі ординат – витрати підприємства на поточний і аварійний ремонт та ймовірність відмови насосної установки (рис.5.7).



1 – крива витрат видобувного підприємства на проведення поточного ремонту; 2 – крива розподілу ймовірності відмови ШСНУ в цілому; 3 – крива витрат на ліквідацію аварій

**Рисунок 5.7** – Знаходження оптимального періоду технічного обслуговування ШСНУ

Будуються наступні криві (криві побудовані по статистичних даних НГВУ «Долинаназфтогаз»):

1 – крива витрат видобувного підприємства на проведення поточного ремонту однієї установки; якщо ремонт здійснюється кожний день, витрати управління складатимуть:

$$W = \frac{T_p}{n} \cdot 3, \quad (5.23)$$

де  $T_p$  – вибраний розрахунковий період тривалістю 365 діб (один рік);  $n$  – періодичність ремонту (через день, через два дні, через три і т.д.);  $T_p/n$  – кількість ремонтів в розрахунковому періоді; 3 – середні витрати на проведення одного поточного ремонту.

2 – крива розподілу ймовірності відмови ШСНУ в цілому. Для її побудови необхідно знати ймовірність відмови ШСНУ при заданому наробітку.

3 – крива витрат на ліквідацію аварій, пов'язаних з відмовою ШСНУ; дану криву можна побудувати двома методами: графічним або розрахунковим.

Графічний метод полягає в проведенні горизонтальних ліній при ймовірності 0,1, 0,2, 0,3 і т.д. до перетину їх з кривою 2. Далі опускаються перпендикуляри через точки перетину. Відповідно на кожному перпендикулярі відкладаємо вартість аварійного ремонту.

Розрахунковий метод проводиться по точкам згідно з формулою:

$$W_a = Q(t) \cdot W_{a'}, \quad (5.24)$$

де  $W_{a'}$  – середня вартість ліквідації однієї свердловино-аварії.

Криві 1 та 3 перетинаються. Точка перетину вказує на те, що витрати НГВУ при даному наробітку будуть мінімальними. Отже, в даному випадку технічний огляд ШСНУ пропонується проводити через кожних 104 доби експлуатації свердловини, або через кожних 2496 машино-годин.

Викладені вище методи знаходження оптимального терміну відновлення обладнання дозволяють більш точно визначати ресурс роботи нафтогазового обладнання та розробляти раціональну стратегію їх технічного обслуговування і ремонту.

## **5.5 Стратегія оновлення елементів колони насосних штанг на основі ланцюгів Маркова**

Так як насосні штанги випадковим чином змінюють свій стан то можна стверджувати, що процес оновлення носить випадковий характер. А раз це так, то математично дану операцію поновлення в умовах стохастичною невизначеності можна розглядати, як Марковський випадковий процес – для

будь-якого моменту часу імовірнісні характеристики процесу оновлення в майбутньому залежать тільки від його стану в даний момент і не залежать від того, коли штанга прийшла в цей стан [135, 136].

Тому цілком справедливо ми можемо будувати модель на основі Марківського випадкового процесу з дискретним часом в заданому вимірному просторі, тобто ланцюг Маркова (*Markov Chain*) [135].

Зробимо припущення, що в колоні НШ періодично оновляють певну кількість штанг при початковій кількості штанг в колоні, рівній 100 штук. Працездатними залишились в колоні  $n$  штук штанг. Результати відробки штанг в свердловині представлені в таблиці 5.2.

**Таблиця 5.2** – Дані по відбракуванню насосних штанг в свердловині

|                     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Дата $t$            | 0  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Кількість штанг $n$ | 10 | 99 | 98 | 97 | 94 | 87 | 79 | 70 | 55 | 31 | 13 | 4  | 3  | 2  | 1  |

Відсоткове відношення кількості насосних штанг  $n(t)$ , що залишились працездатними до моменту часу  $t$ , до кількості штанг в комплекті в початковому стані  $n(0)$  представляє собою закон розподілу безвідмовної роботи колони в часі

$$P(t) = \frac{n(t)}{n(0)}. \quad (5.25)$$

При великій кількості НШ можна припустити, що ймовірність функціонування штанги до часу  $t$

$$P_r(T > t) = P(t), \quad (5.26)$$

де  $T$  – випадкова змінна, в даному випадку наробіток штанги на відмову.

Ймовірність, що штанга відмовить між  $t-1$  та  $t$ , рівна

$$P_r(t-1 < T \leq t) = \frac{n(t-1) - n(t)}{n(0)}, \quad (5.27)$$

а умовна ймовірність  $P_c(t)$ , що штанга, відпрацювавши до моменту часу  $t-1$ , зруйнується між  $t-1$  та  $t$  буде визначена

$$P_r(t-1 < T \leq t) = P_r(T > t) \cdot P_c(t), \quad (5.28)$$

звідки

$$P_c(t) = \frac{n(0)}{n(t)} \cdot \frac{n(t-1) - n(t)}{n(0)} = \frac{n(t-1) - n(t)}{n(t)}. \quad (5.29)$$

Визначимо наробіток штанги з моменту вводу в експлуатацію величиною  $\tau$  і відмітимо величиною  $n_\tau(t)$  кількість штанг, що мають наробіток  $\tau$  в момент часу  $t$ .

Вектор стану

$$N(t) = [n_0(t), n_1(t), n_2(t)]^t \quad (5.30)$$

дає таким чином розподіл наробітків штанг до моменту часу  $t$ .

Отже, використовуючи дані таблиці, маємо:

$$\begin{aligned} N(0) &= [100 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ N(1) &= [0 \quad 99 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ N(2) &= [0 \quad 0 \quad 98 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ &\dots \end{aligned} \quad (5.31)$$

Допустимо, що на промислі використовують аварійне технічне обслуговування [137, 138], тобто заміну в момент часу  $t$  штанг, які відмовили в інтервалі  $[t-1, t]$ . Тоді маємо

$$\begin{aligned} N(0) &= [100 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ N(1) &= [1 \quad 99 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ N(2) &= [2 \quad 1 \quad 98 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ N(3) &= [3 \quad 2 \quad 1 \quad 97 \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ N(4) &= [6 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 94 \quad 0 \quad \dots \quad 0] \\ &\dots \end{aligned} \quad (5.32)$$

Ймовірність відмови штанги, яка відпрацювала строк  $t-1$  в інтервалі  $[t-1, t]$  буде  $P_c(t)$ , а ймовірність безвідмовної роботи  $1-P_c(t)$ . Штанга, яка відмовила в момент часу  $t$  і систематично була заміненою, розглядається як елемент, що має наробіток, рівний нулю.

Таким чином, загальна кількість штанг, підлягаюча переходу їх наробітку  $t$  до наробітку  $0$  в інтервалі часу  $[T-1, T]$  рівна

$$n_o(T) = n_1(T-1)P_c(1) + n_2(T-1)P_c(2) + \dots$$

$$n_o(T) = \sum_{t=1}^T n(T-1)P_c(t), \quad (5.33)$$

де  $T$  – найбільший наробіток штанги.

Кількість старіючих штанг, які перейшли від наробітку  $t$  до наробітку  $t+1$ , буде рівна

$$n_{t+1}(T) = n_t(T)[1 - P_c(t)], \quad (t = 0, 1, 2, \dots, m-1). \quad (5.34)$$

Можна згрупувати рівняння (5.33) і (5.34) в ймовірнісну матрицю

$$p = \begin{bmatrix} P_c(1) & 1 - P_c(1) & - & - & \dots & 0 \\ P_c(2) & - & 1 - P_c(2) & - & \dots & \\ P_c(3) & - & - & 1 - P_c(3) & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \\ P_c(m-1) & - & - & - & \dots & 1 - P_c(m-1) \\ 1 & - & - & - & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.35)$$

отримаємо вираз, що представляє собою Марковський ланцюг першого порядку [136].

$$N(T) = N(T-1)P \quad (T = 1, 2, 3, \dots), \quad (5.36)$$

Розглянемо дану методику на прикладі розрахунку необхідного запасу НШ  $\rho(t)$ , який необхідно мати, щоб відновити обірвані елементи колони.

Кількість штанг  $\rho(t)$ , замовлених до моменту  $t$ , рівна кількості нових штанг (нульового наробітку) до цього моменту часу. Тоді маємо

$$\rho(t) = n_o(t). \quad (5.37)$$

Досить, таким чином, поррахувати послідовність векторів станів  $N(1)$ ,  $N(2)$ ,  $N(3)$  і т.д. Це можна зробити, застосувавши рівняння (5.36), але з пустотілою матрицею  $P$ , яка відповідала б безладному займанню пам'яті машини і, особливо, часу розрахунку на ЕОМ. Рівняння (5.33) і (5.34) складають алгоритми складності  $2m$ , тоді як рівняння (5.36) відповідає  $m^2$ .



За допомогою вищенаведених розрахунків можна підготувати замовлення на необхідну кількість НШ для свердловини. Відповідь  $\rho(t)$  коливається в деяких межах і необхідно робити невелику корекцію, щоб врахувати похибку дискретизації.

## **5.6 Промислові випробування насосних штанг з полімерно-композиційних матеріалів**

Промислові випробування насосних штанг з склопластику були проведені ІФНТУНГ на промислах НГВУ «Долинанафтогаз» на замовлення Дніпропетровського відділення Української академії наук національного прогресу (Додатки Е, Є, Ж).

30.05.1996 року дослідна партія склопластикових НШ ШНП-40Х-22-8-С була спущена в свердловини №40 і №753-Д згідно «Порядку виконання робіт по спуску дослідної партії насосних штанг з скловолокна» та «Інструкції по експлуатації дослідної партії насосних штанг із скловолокна».

Протягом першого півроку не відбулося жодного обриву штанги. На даних свердловинах проводились такі технологічні операції, як соляна обробка пласта та пропарювання НКТ (температура пару 70 °С) без підймання колони штанг на поверхню. Теоретично розраховані напруження у верхніх перетинах колони штанг складають  $\sigma_{\max}=152$  МПа,  $\sigma_{\text{пр}}=152$  МПа (свердловина №753-Д), складають  $\sigma_{\max}=95$  МПа,  $\sigma_{\text{пр}}=53$  МПа (свердловина №40), коефіцієнти асиметрії відповідно 0,44 та 0,37.

08.02.1998 року з свердловини №40 підняли свердловинне обладнання в зв'язку з проведенням поточного ремонту з метою заміни насоса і заміру пластового тиску. При зовнішньому огляді склопластикових штанг дефектів (вм'ятин, протирання, розщеплення волокон, тріщин та ін.) на тілі не виявлено. Сталеві головки, муфти штанг та їх різьби нормальні. До зазначеного часу період експлуатації склопластикових штанг на даній

свердловині склав 712 діб (інтервал експлуатації 580-628 м). Відкладення парафіну на склопластикових штангах становлять від 1 до 2 мм, в той час як на сталевих штангах від 2 до 3 мм. Досліджувані штанги знову були спущені в свердловину для подальшого проходження промислових випробувань з метою визначення ресурсу їх роботи.

Отримані позитивні результати випробувань свідчать про доцільність масового випуску склопластикових НШ на виробництві та впровадження їх на промислах з насосним способом видобування.

Розроблені та затверджені технічні умови на насосні штанги з склопластика [139] (Додатки 3 і И).

## **5.7 Висновки до розділу**

1. Розроблено якісно новий простий і зручний в користуванні діагностичний комп'ютерний комплекс, який дозволяє отримати результати заміру зусиль та переміщень штока верстата-качалки, здійснює вивід і зберігання результатів вимірювань в графічному і цифровому вигляді, забезпечує можливість подальшої математичної обробки отриманих результатів за допомогою електронно-обчислювальної техніки. Крім цього система автоматично веде архів вимірювань.

2. Розроблено конструкцію давача для вимірювання зусиль, що діють на полірований шток верстата-качалки, який характеризується високою точністю і широким діапазоном вимірювання.

3. Запропонований метод визначення оптимального наробітку деталей і вузлів, яка дозволяє зменшити кількість ремонтів, скоротити простої виробничих об'єктів НГВУ в зв'язку з несправністю обладнання, разом з тим зменшуючи суму витрат через недовикористання ресурсу деталей.

4. Створено банк даних по наробітках вузлів і деталей ШСНУ, який зберігає дані про характеристику і параметри роботи обладнання, стан вузлів і деталей і дозволяє швидко і з необхідною точністю обчислювати наробіток вузла чи деталі і порівнювати його з граничним значенням.

5. Запропоновано аналітичний і графічний метод визначення оптимального міжремонтного періоду, який оснований на мінімізації питомих витрат на відновлення працездатного стану ШСНУ у випадку її відмови, що дозволить розробляти раціональні план-графіки ремонту обладнання.

6. Запропоновано застосування теорії ланцюгів Маркова для визначення необхідної кількості НШ при оновленні штангової колони в зв'язку з відпрацюванням певної частини штанг в процесі експлуатації.

7. Проведені промислові випробування склопластикових НШ свідчать про доцільність їх масового випуску на виробництві та впровадження на промислах з насосним способом видобування.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну задачу створення та розвитку методів забезпечення надійності роботи обладнання ШСНУ та розроблено необхідний комплексний підхід до оцінювання та прогнозування показників надійності з концентрацією зусиль на розробленні ресурсного проектування деталей і вузлів, програмно-технологічних комплексів з використанням інформаційного масиву і даних промислових випробовувань.

Основні результати та висновки зводяться до наступного:

1. Статистичний аналіз показників надійності обладнання ШСНУ за допомогою мобільного діагностичного комп'ютерного комплексу на свердловинах західноукраїнського регіону, де одним з основних факторів, що впливає на надійність обладнання, є обводненість продукції свердловин, показав, що 48 % відмов пов'язано з насосними штангами, з яких 37 % є обривами по тілу штанг. Отримані графічні залежності та рівняння регресії для визначення оптимального наробітку вузлів і деталей ШСНУ дозволяють з певною ймовірністю прогнозувати ресурс роботи обладнання та використовувати результати розрахунків під час складання план-графіків ремонту обладнання. На основі аналізу існуючих методів підвищення надійності колон НШ і НКТ обґрунтовано доцільність застосування ПКМ для виготовлення насосних штанг в наступному складі: 55-60% армуючої фази (скловолокно) і 45-40% зв'язуючого, в якості якого служить епоксидно-поліефірний компаунд та затверджувач поліетилен-поліамін. Під час використання насосних штанг з ПКМ необхідно використовувати штангові центратори.

2. Розроблена математична модель і методика розрахунку контактних напружень з'єднання сталеві головки з склопластиковим тілом НШ дозволяє дослідити розподіл контактних напружень залежно від механічних та геометричних властивостей оболонки під час контактної взаємодії та під

час дії зовнішнього навантаження. Показано, що зміною пружних характеристик оболонки (таких як параметр ортотропії, параметр зсувної податливості, величини зчеплення, структурних параметрів) можна істотно впливати на міцність з'єднання сталеві головки з полімерно-композиційним тілом. За результатами випробовувань на статичну міцність зразків із склопластику встановлено, що границя міцності досягає 445 МПа. За результатами випробовувань зразків насосних штанг з ПКМ встановлено, що штанги з ПКМ мають більш високі характеристики витривалості в корозійних середовищах, ніж сталеві, і ця перевага проявляється, якщо число циклів навантаження перевищує 2-5 млн. Показано, що для певних умов підвищеного опору руйнуванню структури, можна досягнути максимальної тріщиностійкості шляхом вибору рівня зчеплення рівному половині ідеальної адгезійної міцності. Під час тертя ПКМ із жорсткими поверхнями в умовах малого тепловиділення в основному спостерігався втомний механізм зносу.

3. За результатами діагностування параметрів технічного стану реальної ШСНУ вибрано оптимальну стратегію проведення і обробки вимірювань за допомогою мобільного діагностичного комп'ютерного комплексу. У разі необхідності підвищення точності оцінювання кількох скалярних параметрів ШСНУ, кожному з них відповідатиме свій оптимальний склад комплексу. Оптимізацію необхідно проводити на базі побудови алгоритму фільтрації задачі Ельвінга з використанням методу найменших квадратів. Для вимірювання зусиль, що виникають під час роботи ШСНУ в гирловому штоку, розроблено давач, який працює на розтяг. Перевагою давача є менша похибка вимірювань у порівнянні з давачами, що працюють на стиск.

4. Запропонований метод визначення оптимального наробітку деталей і вузлів та метод визначення раціонального міжремонтного періоду, які ґрунтуються на мінімізації питомих витрат на відновлення працездатного стану ШСНУ у випадку її відмови, що дозволяє розробляти раціональні план-

графіки ремонтів обладнання, зменшити кількість ремонтів, зменшити суми витрат через недовикористання ресурсу деталей.

5. Розроблена математична модель оновлення елементів колони насосних штанг з дискретним часом в заданому просторі на основі Марковського випадкового процесу дозволить нафтовидобувним підприємствам підготувати замовлення на необхідну кількість штанг для кожної конкретної свердловини.

Експериментальні дослідження НШ з ПКМ, представлені в роботі, підтверджені промисловими випробуваннями. Розроблені, затверджені та впроваджені технічні умови на склопластикові НШ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Протасов В.Н., Султанов Б.З., Кривенков С.В. Эксплуатация оборудования для бурения скважин и нефтегазодобычи: Учебник для вузов. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 691 с.
2. Протасов В.Н. Повышение надежности оборудования скважин при насосном способе добычи нефти. *Обзорная информация. Серия: «Машины и нефтяное оборудование»*. М.: ВНИИОЭНГ, 1986, №4(62). 68 с.
3. Лепехин Ю.Н. Повышение надежности скважинной штанговой установки и штанговых колонн, работающих в наклонно-направленных скважинах. *Сб. научн. трудов "Повышение эффективности использования бурового и нефтепромыслового оборудования в экстремальных условиях"*. Свердловск, УНЦ АН СССР, 1987, С.37-52.
4. Дьяков В.Г., Медведев Ю.С., Шибряев Б.Ф., Шрейдер А.В. Зарубежный опыт выбора оптимальных сталей и сплавов для изготовления нефтегазового оборудования. *Обзорная информация. Технология химического и нефтяного машиностроения и новые материалы. Серия: ХМ-9*. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1984. 35 с.
5. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: *Справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп.* М.: Машиностроение, 1981. 391 с.
6. Копей Б.В. Науково-технологічні методи комплексного підвищення ресурсу деталей свердловинного нафтогазового обладнання: *дис.: докт. техн. наук: ІФДТУНГ*. Ів.-Франківськ, 1996. 478 с.
7. Нассонов В.В. Надежность колонн штанг глубинных насосов в наклонно направленных нефтяных скважинах Западной Сибири: *автореф. дис. канд. техн. наук*. М.: МИНХ и ГП им.Губкина, 1989. 23 с.
8. Петросянц А.А., Белоусов В.Я., Саркисов В.С. Повышение долговечности деталей газонефтепромыслового оборудования. М.: Недра, 1976. 211 с.

9. Адонин А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами: *Учебное пособие*. Под ред. В.М.Муравьева. М.: Недра, 1979. 213 с.
10. Сароян А.Е., Суботин М.А. Эксплуатация колон насосно-компрессорных труб. М.: Недра, 1985. 216 с.
11. Максutow Р.А., Джавадян А.А., Шкадов Я.Я., Воробьев В.Д., Смирнова Н.М. Современные глубинонасосные установки в нефтяной промышленности. *Обзорная информация. Серия: "Машины и нефтяное оборудование"*. М.: ВНИИОЭНГ, №5/15, 1982. 36 с.
12. Воробьев В.Д., Смирнова Н.М. Технический уровень штанговых глубинных насосов за рубежом. *Обзорная информация. Серия: "Машины и нефтяное оборудование"*. М.: ВНИИОЭНГ, №7/17, 1982. 16 с.
13. Литвинов В.М. Повышение надежности нефтепромысловых насосов. М.: Недра, 1978. 282 с.
14. Зазовский Ф.Я., Солтысяк Т.И., Пиксин Ю.П. Оценка работы станков-качалок. *РТСМ: Машины и нефтяное оборудование*. М.: ВНИИОЭНГ, №11, 1983. 12 с.
15. Ишмурзин А.А., Гумеров Р.Р. Сравнение фактических показателей надежности штанговых скважинных насосов с втулочным и цельным цилиндрами. *Экспресс-информация. Серия: "Машины и нефтяное оборудование"*. М.: ВНИИОЭНГ, 1984, №12. С.16.
16. Копей І. Б. Аналіз використання штангових глибинних насосів виробництва ТОВ «Магістраль» на родовищах ПАТ «Укрнафта». *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1(66). С. 76-80.
17. Копей И. Б. Преимущества применения штанговых насосов производства ООО «Магистраль» на месторождениях ПАО «Укрнефть». *Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2017: сборник тезисов Международной научно-практической Интернет-конференции (10 - 17 октября 2017 г)*. URL:



<https://www.sworld.com.ua/index.php/technical-sciences-317/mining-and-geodesy-317/29532-317-012..>

18. Бабаев С.Г. Надежность нефтепромыслового оборудования. М.: Недра, 1987. 263 с.
19. Бабаев С.Г., Габибов И.А., Меликов Р.Х. Основы теории надежности нефтепромыслового оборудования: Учебное пособие для вузов. Баку, изд. АГНА, 2015. 400 с.
20. Копей Б. В., Копей И. Б. Аналіз надійності штангових свердловинних вставних і невставних насосів різного діаметра. *Державний міжвідомчий наук.-техн. збірник «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. Серія: *Нафтопромислова механіка*. Івано-Франківськ, вип. 32, 1995. С.49-56.
21. Круман Б.Б. Глубиннонасосные штанги. М.: Недра, 1977. 181 с.
22. Круман Б.Б. О конструкции колонн насосных штанг. *Нефтяное хозяйство*. 1975, №2. С.55-58.
23. Адонин А.Н., Мамедов Н.Я. К расчету нагрузок, действующих на штанги глубинного насоса. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*. 1973, №7. С. 44-46.
24. Адонин А.Н. Процессы глубиннонасосной нефтедобычи. М.: Недра, 1964. 263 с.
25. Фаерман И.Л. Штанги для глубинных насосов. Баку: Азнефтьиздат, 1955. 323 с.
26. Копей Б.В., Тараевский С.И. Защитные покрытия для глубиннонасосных штанг. *Обзор. информация. Сер.: «Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности»*. М., ВНИИОЭНГ, 1982. 36 с.
27. Тараевский С.И., Копей Б.В., Коваль В.П. Защита глубиннонасосных штанг от коррозионно-механического разрушения при эксплуатации в сероводородсодержащих средах. *Обзорная информация: Сер.: «Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности»*. М.: ВНИИОЭНГ, 1981. 36 с.

28. Федорович Я.Т. Оцінка роботоздатності та способи підвищення довговічності насосних штанг з врахуванням їх корозійної тріщиностійкості: *дис.: канд. техн. наук*: ІФДТУНГ, Ів.-Франківськ, 1995. 196 с.
29. Вирновский А.С. Теория и практика глубинонасосной добычи нефти: *Избранные труды*. М.: Недра, 1971. 183 с.
30. Копей Б.В., Міхненко Л.І., Копей І.Б. Аналіз обривів та надійність колони насосних штанг. *Деп. в ДНТБ України 11.11.96. №2216 Ук96*. ІФДТУНГ, Івано-Франківськ, 1996. 30 с.
31. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.
32. Трубы нефтяного сортамента: Справочник./ Под общей ред. А.Е.Сарояна. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1987. 488 с.
33. Молчанов А.Г. Подземный ремонт скважин: *Учеб. пособие для учащихся профтехобразования и рабочих на производстве*. М.: Недра, 1986. 208 с.
34. Селезнёва В.Н., Лаврушин Ф.Г., Иноземцева В.Д. Применение лакокрасочных покрытий для повышения работоспособности НКТ. *Повышение работоспособности бурильных, обсадных и насосно-компрессорных труб: Тр.ВНИИТнефть. Куйбышев, 1982. С.139-143.*
35. Копей Б.В., Кіндрачук С.М. Аналіз надійності НКТ в свердловинах з обводненою продукцією. *Деп. в ДНТБ України 25.11.95. №2492 Ук95*. ІФДТУНГ, Івано-Франківськ, 1995. 11 с.
36. Копей И.Б. Определение оптимального срока восстановления станков-качалок на основании анализа надежности их узлов и деталей. *«Нефтепромысловое дело»*. 1998. № 2. С.26–28.
37. Глазунов Л.П., Грабовецкий В.П., Щербаков О.В. Основы теории надежности автоматических систем управления: *Учеб. пособие для вузов*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. 208 с.

38. Копей Б. В., Стефанишин О. І., Копей І. Б. Аналіз надійності редукторів верстатів-качалок. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2006. №4(21). С. 96-99.
39. Заміховський Л.М., Ровінський В.А., Євчук О.В. Діагностика технічного стану глибинно-насосних установок. *Івано-Франківськ: Симфонія форте*, 2006. 308 с.
40. Абрамов Г.С., Барычев А.В., Чураков В.В. Ваттметрические методы контроля за работой скважин. *Нефтегаз*. 2003. № 3. С. 87-89.
41. МИКОН-К [Электронный ресурс]: При-боры и оборудование для нефтегазовой промышленности / ООО "МИКОН-К". *Электрон. дан. Набережные Челны*, 2005. Режим доступа: <http://www.mikon-k.ru/ed.shtml>. – Загл. с экрана.
42. Заміховський Л.М., Ровінський В.А., Васьків О.В. Вдосконалення тензOMETричного давача автоматизованої системи діагностування штангових глибинно-насосних установок. *Методи та прилади контролю якості*, № 8, 2002. С.19-21.
43. Карпаш О.М. Неруйнівний контроль та технічна діагностика нафтогазового обладнання та інструменту. *Неруйнівний контроль та технічна діагностика: Матеріали 2-ї укр. наук.-техн. конф. Дніпропетровськ*, 1997. С. 36.
44. Лопатін В. В., Копей Б. В., Копей І. Б. Промышленные испытания метода ватметрирования станка-качалки штанговой насосной установки. *Инновационная наука, образование, производство и транспорт: техника и технологии: за результатами симпозиума (30-31 октября 2018 г., Одесса)*. Одесса: КУПРИЕНКО СВ, 2018. С. 170-178. (Серия «Инновационная наука, образование, производство и транспорт»; №1). ISBN 978-617-7414-51-2.
45. Ивановский В. Н., Дарищев В. И., Сабиров А. А., Каштанов В. С., Пекин С.С. Оборудование для добычи нефти и газа: В 2 ч. М: «Нефть и газ», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. Ч. 1. 768 с.

46. Копей Б.В., Лопатін В.В., Стефанишин О.І. Мобільні вимірювальні системи в нафтогазовій та гірничій промисловості. *Монографія. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2010. 392 с.*
47. Алиев Т.М., Надеин В.А., Рысикин Л.М., Тер-Хачатуров А.А. Методы и средства контроля технического состояния глубиннонасосного оборудования. *Нефтяная промышленность: Обзор. инф. Сер.: Автоматиз. и телемех. нефт. пром. М.: ВНИИОЭНГ, 1981. 57 с.*
48. Копей Б.В., Андрушко М.Р., Копей І.Б. Використання баз даних для розробки стратегії ремонту ШСНУ. *Деп. в ДНТБ України 29.05.96 №1319 Ук96. ІФДТУНГ, Івано-Франківськ, 1996. 12 с.*
49. Composite catalog of Oil Well Equipment. *Gulf Publishing Houston. 1990-1991.*
50. Composite catalog of Oil Well Equipment. *Gulf Publishing Houston. 1995-1996.*
51. Norris Sucker Rod: Проспект компанії / 100964-02 (1) [Електронний ресурс]. 1994. 12 с. Доступ: <http://промкаталог.рф/PublicDocuments/100964-02.pdf>
52. Rischmüller H. Oil production with subsurface sucker rod pumps / Heinrich Rischmüller, Horst Meie [Електронний ресурс]. *Schoeller-Bleckmann (SBS), 1989.* Доступ: [https://books.google.com/books/about/Oil\\_production\\_with\\_subsurface\\_sucker\\_rod.html?id=hunqMwEACAAJ](https://books.google.com/books/about/Oil_production_with_subsurface_sucker_rod.html?id=hunqMwEACAAJ)
53. API Spec. 11 B. Sucker rods, 26<sup>th</sup> Edition. 1998. 58 p.
54. Трахтман Г.И. Новое оборудование для глубиннонасосной эксплуатации нефтяных скважин. *Обзорная информация. Серия: «Машины и нефтяное оборудование». М.:ВНИИОЭНГ, 1978. 52 с.*
55. Трахтман Г.И. Повышение надежности глубиннонасосного оборудования за рубежом. *Обзорная информация. Серия: "Машины и нефтяное оборудование". М.: ВНИИОЭНГ, 1983, №6/31. 43 с.*
56. Протасов В.Н., Чернова Т.А. Применение покрытий из порошковых полимеров для повышения качества глубиннонасосных штанг.

*ЦНИИТЭнефтехиммаш. М.: НТРС: Химическое и нефтяное машиностроение, 1981, №2.*

57. Протасов В.Н., Степанянц В.Г. Применение эпоксидных покрытий для повышения долговечности насосно-компрессорных труб. М., ВНИИОЭНГ, 1977.

58. Шрейбер Г.К., Шибряев Б.Ф., Полферов А.П., Перлин С.М. Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности: *Справочное руководство. М.: Гостоптехиздат, 1962. 382 с.*

59. Хаферкамп Х., Шульц В. Пластмассовые трубы, армированные стекловолокном, для эксплуатации на нефтяных месторождениях. *Сообщение из института по материаловедению при университете. Ганновер, 1992. 11 с.*

60. Эфендизаде С.М. Применение пластмассовых и стеклопластиковых труб в нефтяной промышленности. *Обзор. информ. «Применение полимерных материалов и стеклопластиков в нефтяной промышленности». Сер.: Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. М: ВНИИОЭНГ, 1983. №10. С. 7-20.*

61. Використання склопластикових насосно-компресорних труб в газових свердловинах / Копей Б. В., Шопен О. Б., Кузьмін О. О., Ківіренко О. Б., Копей І. Б., Боднарук В. Б. *Нафтогазова енергетика. 2010. №2(13). С. 23-29.*

62. Садыков Р.С., Матвеев Ю.М., Новиков В.Г. Промысловые испытания стеклопластиковых насосно-компрессорных труб (НКТС). *Нефтепромысловые трубы. Куйбышев, 1975. 238 с.*

63. Shopen A., Kivirenko O., Savchuk V., Lipinsky V., Golovanevskiy V. Continuous Manufacturing Technology for Manufacture of FRP Pipes With Joints. *International Journal of Materials & Product Technology, Volume 2002, 17, Number 1/2, pp. 62-67.*

64. Насосные штанги из пластмассы, усиленной волокнами. *Китайская Нефтяная Корпорация по Технике и Разработке. Проспект фирмы*. Шаший, 1994. 8 с.
65. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: *Машиностроение*, 1988. 296 с.
66. Карпинос Д.М. Композиционные материалы: *Справочник*. Киев: *Наукова думка*, 1985. 588 с.
67. Пелех Б.Л. Базальтоволокнисті композиційні матеріали і конструкції. Київ, *Наукова думка*, 1980. 198 с.
68. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Сапожникова А.Б. и др. Композиционные материалы в технике. Київ, *Техніка*, 1985. 152 с.
69. Tsai Y.I., Tsai Y.I., Bosze E.J., Barjasteh E., Nutt S.R. Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiber glass composites. *Compos Sci Technol*, 69 (3–4) (2009). pp. 432–437.
70. Barjasteh E., Bosze E.J., Nutt S.R. Thermal aging of fiberglass/carbon-fiber hybrid composites. *Composites Part: A*, 40 (12) (2009), pp. 2038–2045.
71. Копей Б.В., Копей І.Б., Порайко Ю.І. Технологія і властивості труб і виробів нафтового сортаменту з ПКМ. *Деп. в ДНТБ України 29.04.96. №1046 Ук96*. ІФДТУНГ, Івано-Франківськ, 1996. 22 с.
72. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на многоцикловую усталость деталей машин, элементов конструкций и полуфабрикатов. *Методические рекомендации МР 55-82*. М.: *ВНИИНМАШ*, 1982.
73. Will P., Helbig S. Модель разрушения кромпозита на основе стохастического анализа накопления повреждений. *Material wiss. und Werkstofftechn.* 1992. 23, №10, С. 368-374. Нем.
74. Григолюк З.И., Толкачев В.М. Контактные задачи теории пластин и оболочек. М.: *Машиностроение*, 1980. 416 с.

75. Пелех Б.Л. Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. *К.: Наук. думка*, 1978. 248 с.
76. Пелех Б.Л., Максимук А.В., Коровайчук И.М. Контактные задачи для слоистых элементов конструкций и тел с покрытиями. *К.: Наук. думка*, 1988. 280 с.
77. Пелех Б.Л., Максиму А.В., Щербина Н.Н. Контактная жесткость слоистых цилиндрических оболочек. Матричный метод решения контактных задач для многослойных оболочек. *Механика композитных материалов*, 1986, № 2, С. 276-280.
78. Пелех Б.Л., Сухорольский М.А. Контактные задачи теории упругих анизотропных оболочек. *К.: Наук. думка*, 1980. 216 с.
79. Попов Г.Я., Толкачев В.М. Проблема контакта тел с тонкостенными элементами. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*. 1980. №4. С.192-206.
80. Щербина Н.М. Методи розв'язування контактних задач для пружних анізотропних шаруватих циліндричних оболочок. *Препр. НАН України. Ін-т прикл. проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача*, №7, 1994. 58 с.
81. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Методы решения интегральных уравнений с программами для ЭВМ. *К.: Наук. думка*, 1978. 292 с.
82. Малмейстер А.К. Тамуж В.П., Теперс Г.А. Сопротивление жестких полимерных материалов. *Рига: Зинатне*, 1972. 498 с.
83. Закономірності руйнування нафтового обладнання з полімерних композиційних матеріалів під дією експлуатаційних чинників / Крижанівський Є. І., Копей Б. В., Шкіца Л. Є., Копей І. Б. *Некласичні проблеми теорії тонкостінних елементів конструкцій та фізико-хімічної механіки композиційних матеріалів: (матеріали доповідей III Міжнародного симпозіуму. Івано-Франківськ, 15 – 16 листопада 1995 р.)* Т1. Івано-Франківськ: Факел, 1996. С. 89-90.
84. Дослідження контактних напружень у з'єднанні сталеві головки з склопластиковою штангою / Копей Б. В., Максимук О. В., Щербина Н. М.,

- Копей І. Б. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 1996. №33. С. 166 – 178.
85. Development of steel head joints with fiberglass sucker rod on the base of contact stresses investigation / Kopey B. V., Kopey I. B., Maksymuk A. V., Shcherbyna N. M. *VTT SYMPOSIUM : Proceedings of Int. Symp. Fatigue Design 1998*. (Espoo, Finland. 26-29 May 1998). 1998. 182. Vol. II. P. 603-612. ISSN 0357-9387.
86. Пат.США N 4919560, кл. F16B 11/00 28.04.89.
87. Копей Б.В., Копей В.Б., Копей І.Б. Спосіб з'єднання сталльної головки з полімерно-композиційним тілом глибинонасосної штанги: пат. 35751А Україна: МПК E21B17/00, E16B11/00; заявлено 22.04.1998; опубл. 16.04.2001, Бюл. №3.
88. ГОСТ 13877-96. Штанги насосные и муфты штанговые. Технические условия. Минск: Изд-во стандартов, 1996.
89. Ванін В.В., Грязнова Г.П. Моделювання намотки по траєкторії заданої геодезичної кривини на поверхнях оправок виробів з композитів // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Випуск 4, т. 57 «Прикладна геометрія та інженерна графіка»*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2013. – с.48-51.
90. Куценко Л.М., Руденко С.Ю. Поверхні обертання зі змінної уздовж осі кривиною меридіанів та їх зміцнення шляхом намотування кевларової нитки // *Міжвузівський збірник "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво"*. – Вип. 6. – Луцьк: ЛНТУ, 2011 р. - с. 148-153.
91. Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю.В. Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Електронні текстові данні (1 файл: 22,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 379 с.



92. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных полимерных композитов [Текст]. – Л.: Машиностроение, Ленинград, 1987. – 176 с.
93. Мелай А.М., Ямников А.С. Способ обработки сопрягаемых конических поверхностей [Текст]: пат. RU 2022721 С1 Рос. Федерация: МПК В23В 5/38; заявитель и патентообладатель Тульский государственный технический университет; заявл. 17.10.1991; Опуб. 15.11.1994. – 2с.
94. Shopen A., Kivirenko O., Savchuk V., Lipinsky V., Golovanevskiy V.. Continuous Manufacturing Technology for Manufacture of FRP Pipes With Joints. // *International Journal of Materials & Product Technology, Volume 2002, 17, Number 1/2, pp. 62-67.*
95. Подстригач Я.С., Пелех Б.Л., Джигирис Д.Д., Махова М.Ф., Тутаков О.В., Помылуйко А.П., Медведский А.Л. Композиционные материалы на основе высокопрочных базальтовых волокон: Физико-механические свойства. *Композиционные материалы и новые конструкции. К.:Наукова думка, 1977. С. 13-16.*
96. Тамуж В.П. Усталость и разрушение полимерных композитных материалов. 7 Всес.съезд по теор.и прикл.мех., Москва, 15-21 авг., 1991: Аннот. докл. М., 1991. С. 332-333.
97. Механизм роста повреждений в гибридных пластинах из угле- и органопластика при усталостном изгибе / Hayashi Ikuhiko, Asanuma Kenich, Niwa Kelta, Iukano Masaki, Maruyama Motake// *JSME Int.J..Ser.1. 1991, 34, №2. С. 240-248.*
98. Johannesson Th. Усталостная прочность эпоксидного стеклопластика косоугольного армирования с матрицами различной жесткости. *Мех. композит. матер. 1992. № 5. С. 632-638.*
99. Gibson Ronald F. Динамические механические свойства композиционных материалов и конструкций. *Proc. 18th Int. Conf. Veh Struct. Mech. and SAE, Traverse City, Mich., June 3-5, 1992. Warrendale, 1992. С. 315-331. Англ.*

100. Bathias C. Усталость высокопрочных композитных материалов. *Mater. et techn.* 1990. 78, №5.-С. 11-17. Фр.
101. Мельничук П.П., Колодий М.А., Грабар И.Г. Влияние соленой воды на статическую прочность крупногабаритных образцов из стеклопластика. 4 *Респ. науч.-техн. конф. "Повышение надеж. и долговеч. машин и сооруж."*, Одесса, 24-26 сент., 1991. Тез. докл. Ч.2.-Киев, 1991. С. 18.
102. Ivaschenko J.G., Polyakov U.I., Jeltov P.K., Solomatov U.I. Самоорганизация структуры полимерных композитов при деструкции в коррозионной среде. *Fract.Mech.:Successes and Probl.: 8 Int. Conf. Fract., Kiev*, 8-14 June, 1993. Англ.
103. Олик А.П. Сопротивление коррозионной усталости композиционного материала на основе алюминия. 4 *Респ.науч.-техн.конф. "Повыш. надеж. и долговечн. машин и сооруж."*, Одесса, 24-26 сент., 1991.:Тез. докл. Ч.2.-Киев, 1991. С. 31-32.
104. Komai Kenjiro, Minoshima Kohji, Miki Toyiji. Статическое и усталостное разрушение армированного углеродными волокнами эпоксидного композита при комбинированном кручении с растяжением и влияние абсорбции воды. *Nihonikai gakkai ronbunshu. A=Trans.Jap.Soc.Mech.Eng.A.* 1992. 58, №550. С. 830-836.
105. Насосные штанги из полимерных композиционных материалов / Крижанивский Е. И., Копей Б. В., Парайко Ю. И., Малый Н. А., Копей И. Б. *Полимерные композиты-95 (Поликом-95)* : тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. (12-13 сент. 1995 г, Солигорск). г. Гомель: издательство ИММС АН Б и ООО «Инфто-Трибо», 1995. С. 73-74.
106. Копей Б. В., Копей И. Б. Витривалість насосних штанг з склопластика в нафтоемулсійних середовищах та концепція їх втомного руйнування. *Матеріали наук.-практ. конф. «Нафта і газ України-96»*. Харків, 1996. С. 104-106.

107. Композиционные материалы. В восьми томах. Под ред. Л.Браутмана, Р.Крока / Т1. Поверхности раздела в металлических композитах. Под ред. А.Меткалфа. *Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 295 с.*
108. Крагельский И.В. Трение и износ. *М.: Машиностроение, 1968. 430 с.*
109. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. *М.: Машиностроение, 1977. 526 с.*
110. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. *М.: Физматгиз, 1963, 472 с.*
111. Протасов В.Н. Полимерные покрытия в нефтяной промышленности. *М.: Недра, 1985. 192 с.*
112. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. *М.: Наука, 1977. 138 с.*
113. Копей І. Б., Гладкий С. І. Результати досліджень зношення полімерно-композиційних матеріалів насосних штанг і насосно-компресорних труб. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2008. №4(29). С. 58-62.*
114. Шведков Е.Л., Ровенский Д.Я., Зозуля В.Д., Браун Э.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. *Київ: Наукова думка, 1990. 188 с.*
115. Оптимізація технічного обслуговування і ремонту ШСНУ за допомогою комп'ютерних баз даних та діагностичних комп'ютерних комплексів / Копей Б. В., Андрушко М. Р., Ільїн С. Р., Лопатін В. В., Копей І. Б. *Проблеми і перспективи наук.-техн. прогресу АТ "Укрнафта" в умовах ринку: матеріали науково-практичної конф. (Івано-Франківськ, 27 – 29 вересня 1995 р.). Івано-Франківськ, 1996. С. 192-193.*
116. Копей Б. В., Лопатін В. В., Копей І. Б. Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2003. №1(6). С. 129-133.*
117. Korey V. V., Lopatin V. V, Korey I. B. Transducers for mobile information-measuring systems of mine elevating complexes. *Special Methods of Deposit*

*Utilization* : Transactions of 3<sup>rd</sup> International Conference (Ostrava, October 6-7, 2005). Ostrava: VSB-TU, 2005. P. 409-413.

118. Копей Б.В., Лопатин В.В., Копей И.Б. Датчики привязки регистрируемых параметров для мобильных информационно-измерительных систем. *Методы и средства технической диагностики*: сб. научных статей. Вып. XXIII. Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т., 2006. С. 59-65.

119. Копей Б.В., Лопатин В.В., Копей И.Б. Помехоустойчивость низкопотенциальных электрических измерений в штанговых скважинных насосных установках и горных выработках. *Методы и средства технической диагностики*: сб. научных статей. Вып. XXIII. Йошкар-Ола: Марийский гос. ун-т., 2006. С. 127-132.

120. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Копей Б. В., Бобошко Ю. А., Лопатин В. В., Копей И. Б. *Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці „ІФНТУНГ-40”*: анотації Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 16-20 квітня 2007 р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2007. С. 269.

121. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Копей Б. В., Бобошко Ю. А., Лопатин В. В., Копей И. Б. *Нафтогазова енергетика*. 2007. №3(4). С. 47-54..

122. Kopey B., Kopey I. Diagnostic computer system for pumping units. *Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems* / ed. Daizhong Su : Proceedings of International Conference (3-6 July, 2000, Nottingham Trent University, UK). Bury St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2000. P. 825-834. ISBN 978-1-860-58260-8.

123. Optimization of pumping units performances with fiberglass sucker rod strings / Kopey B., Mal'ko B., Kindrachuk S., Kharun V., Kopey I. *Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems* / ed. Daizhong Su : Proceedings of International Conference (3-6 July, 2000, Nottingham Trent University, UK). Bury

St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2000. P. 835-844. ISBN 978-1-860-58260-8.

124. Копей Б.В., Лопатін В.В., Копей І.Б. Надійність мобільних інформаційно-вимірювальних систем ШСНУ та шахтних підйомних комплексів *Нафтогазова енергетика*. №4(5), 2007.

125. Копей Б. В., Лопатін В. В., Копей І. Б. Нормуючий підсилювач для вимірювального давача випробувального комплексу дослідження деформації і руйнування гірських порід і навантажень на СШНУ. *Нафтогазова енергетика*. 2007. №4(5). С. 47-50.

126. Копей Б. В., Лопатін В. В., Копей І. Б. Оптимізація вибору складу мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексів у нафтогазовій промисловості. *Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи* : анотації Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. С. 93.

127. Ершов В.Г. Оптимальная программа траекторных измерений/*Космические исследования, т.9*, вып. 1, 1971, С.46-55.

128. Копей Б. В., Копей І. Б. Розробка комп'ютерного діагностичного комплексу верстата-качалки. *Оглядова інформація наук.-техн. розробок в галузі бур. і нафтопром. обладн. Вип.2*. Івано-Франківськ: УНГА, Відділ «Нафтогаз. обл. і механізми», 1999. С. 25-32.

129. Копей Б.В., Копей І.Б., Євчук О.В., Лопатін В.В., Стефанишин О.І. Давач для вимірювання навантажень, що діють на колону насосних штанг: пат. 49754 U Україна: МПК E21B 19/00; заявлено 16.11.2009; опубл 11.05.2010, Бюл. №9.

130. Лопатін В. В., Копей Б. В., Копей І. Б. Оцінка надійності обладнання штангової насосної установки та розробка оптимальних план-графіків ремонтів. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38) С. 274-283.

131. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 томах. Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности. Под ред. Гнеденко В.В. М.: *Машиностроение*, 1987 г. 280 с.
132. Проников А.С. Надежность машин. М.: *Машиностроение*, 1978. 590 с.
133. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. М.: *Радио и связь*, 1988. 392 с.
134. Копей И. Б., Драгомирецкий Я. Н., Копей Б. В. Определение оптимальной величины наработки между отказами деталей нефтепромыслового оборудования. *Нефтепромысловое дело*. 1997. №10-11. С. 30-32.
135. Faure R. *Precis de recherche operationnelle*. Dunod, Paris, 1975.
136. Гнеденко В.В. Курс теории вероятностей: Учебник. М.: *Наука*, 1988. 448 с.
137. Лопатін В. В., Копей Б. В., Копей І. Б. Стратегія оновлення елементів колони насосних штанг на основі теорії ланцюгів Маркова. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38). С. 53-56.
138. Копей Б. В., Копей В. Б. Копей І. Б. Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. *Монографія*. Івано–Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. 406 с.
139. ТУ У 29.5-13741713-002:2006. Штанги насосні металопластикові. Технічні умови. Введ. 19.04.2007. Без обмеження терміну дії. Івано-Франківськ, 2006.

## **ДОДАТКИ**

## Додаток А

## Список публікацій здобувача

## Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. **Копей І. Б.** Аналіз використання штангових глибинних насосів виробництва ТОВ «Магістраль» на родовищах ПАТ «Укрнафта». *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1(66). С. 76-80. (фахове).
2. Лопатін В. В., Копей Б. В., **Копей І. Б.** Оцінка надійності обладнання штангової насосної установки та розробка оптимальних план-графіків ремонтів. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38) С. 274-283. (фахове).
3. Лопатін В. В., Копей Б. В., **Копей І. Б.** Стратегія оновлення елементів колони насосних штанг на основі теорії ланцюгів Маркова. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38). С. 53-56. (фахове).
4. Копей Б. В., Копей В. Б. **Копей І. Б.** Насосні штанги свердловинних установок для видобування нафти. *Монографія*. Івано–Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. 406 с. (розділ монографії).
5. **Копей І. Б.**, Гладкий С. І. Результати досліджень зношення полімерно-композиційних матеріалів насосних штанг і насосно-компресорних труб. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. №4(29). С. 58-62. (фахове).
6. Копей Б. В., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** Нормуючий підсилювач для вимірювального давача випробувального комплексу дослідження деформації і руйнування гірських порід і навантажень на СШНУ. *Нафтогазова енергетика*. 2007. №4(5). С. 47-50. (фахове).
7. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Копей Б. В., Бобошко Ю. А., Лопатин В. В., **Копей И. Б.** *Нафтогазова енергетика*. 2007. №3(4). С. 47-54. (фахове).



8. Копей Б. В., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2003. №1(6). С. 129-133. (фахове).
9. Optimization of pumping units performances with fiberglass sucker rod strings / Копей В., Mal'ko В., Kindrachuk S., Kharun V., **Копей І.** *Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems* / ed. Daizhong Su : Proceedings of International Conference (3-6 July, 2000, Nottingham Trent University, UK). Bury St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2000. P. 835-844. ISBN 978-1-860-58260-8. (розділ монографії, *Web of Science*).
10. Копей В., **Копей І.** Diagnostic computer system for pumping units. *Gearing, Transmissions, and Mechanical Systems* / ed. Daizhong Su : Proceedings of International Conference (3-6 July, 2000, Nottingham Trent University, UK). Bury St Edmunds : Professional Engineering Publishing, 2000. P. 825-834. ISBN 978-1-860-58260-8. (розділ монографії, *Web of Science*).
11. Development of steel head joints with fiberglass sucker rod on the base of contact stresses investigation / Копей В. В., **Копей І. В.**, Maksymuk A. V., Shcherbyna N. M. *VTT SYMPOSIUM* : Proceedings of Int. Symp. Fatigue Design 1998. (Espoo, Finland. 26-29 May 1998). 1998. 182. Vol. II. P. 603-612. ISSN 0357-9387. (стаття у періодичному виданні держави ЄС).
12. Дослідження контактних напружень у з'єднанні сталевій головки з склопластиковою штангою / Копей Б.В., Максимук О.В., Щербина Н.М., **Копей І.Б.** *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 1996. №33. С. 166 – 178. (фахове).
13. Копей Б. В., **Копей І. Б.** Аналіз надійності штангових свердловинних вставних і невставних насосів різного діаметра. *Державний міжвідомчий наук.-техн. збірник «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ»*. Серія: *Нафтопромислова механіка*. Івано-Франківськ, вип. 32, 1995. С.49-56. (фахове).

### Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

14. Лопатін В. В., Копей Б. В., **Копей І. Б.** Промышленные испытания метода ватметрирования станка-качалки штанговой насосной установки. *Инновационная наука, образование, производство и транспорт: техника и технологии* : за результатами симпозиума (30-31 октября 2018 г., Одесса). Одесса : КУПРИЕНКО СВ, 2018. С. 170-178. (Серия «Инновационная наука, образование, производство и транспорт»; №1). ISBN 978-617-7414-51-2. (РИНЦ, *Index Copernicus*, розділ монографії).
15. **Копей І. Б.** Преимущества применения штанговых насосов производства ООО «Магистраль» на месторождениях ПАО «Укрнефть». *Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2017* : сборник тезисов Международной научно-практической Интернет-конференции (10 - 17 октября 2017 г). URL: <https://www.sworld.com.ua/index.php/technical-sciences-317/mining-and-geodesy-317/29532-317-012>. (РИНЦ, *Index Copernicus*).
16. Копей Б. В., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** Оптимізація вибору складу мобільних інформаційно-вимірювальних системних комплексів у нафтогазовій промисловості. *Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи* : анотації Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р.). Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. С. 93.
17. Датчики ускорений в мобильных информационно-измерительных системах / Копей Б. В., Бобошко Ю. А., Лопатин В. В., **Копей І. Б.** *Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці „ІФНТУНГ-40”* : анотації Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 16-20 квітня 2007 р.). Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2007. С. 269.
18. Kopey B. V., Lopatin V. V, **Kopey I. B.** Transducers for mobile information-measuring systems of mine elevating complexes. *Special Methods of Deposit Utilization* : Transactions of 3<sup>rd</sup> International Conference (Ostrava, October 6-7, 2005). Ostrava: VSB-TU, 2005. P. 409-413.

19. Закономірності руйнування нафтового обладнання з полімерних композиційних матеріалів під дією експлуатаційних чинників / Крижанівський Є. І., Копей Б. В., Шкіца Л. Є., **Копей І. Б.** *Некласичні проблеми теорії тонкостінних елементів конструкцій та фізико-хімічної механіки композиційних матеріалів* : (матеріали доповідей III Міжнародного симпозіуму. Івано-Франківськ, 15 – 16 листопада 1995 р.) Т1. Івано-Франківськ: Факел, 1996. С. 89-90.

20. Копей Б. В., **Копей І. Б.** Витривалість насосних штанг з склопластика в нафтоемультійних середовищах та концепція їх втомного руйнування. *Матеріали наук.-практ. конф. «Нафта і газ України-96»*. Харків, 1996. С. 104-106.

21. Оптимізація технічного обслуговування і ремонту ШСНУ за допомогою комп'ютерних баз даних та діагностичних комп'ютерних комплексів / Копей Б. В., Андрушко М. Р., Ільїн С. Р., Лопатін В. В., **Копей І. Б.** *Проблеми і перспективи наук.-техн. прогресу АТ "Укрнафта" в умовах ринку*: матеріали науково-практичної конф. (Івано-Франківськ, 27 – 29 вересня 1995 р.). Івано-Франківськ, 1996. С. 192-193.

22. Насосные штанги из полимерных композиционных материалов / Крижанивский Е.И., Копей Б.В., Парайко Ю.И., Малый Н.А., **Копей И.Б.** *Полимерные композиты-95 (Поликом-95)* : тез. докл. Межд. науч.-техн. конф. (12-13 сент. 1995 г, Солигорск). г. Гомель: издательство ИММС АН Б и ООО «Инфто-Трибо», 1995. С. 73-74.

#### **Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

23. Використання склопластикових насосно-компресорних труб в газових свердловинах / Копей Б. В., Шопен О. Б., Кузьмін О. О., Ківіренко О. Б., **Копей І. Б.**, Боднарук В. Б. *Нафтогазова енергетика*. 2010. №2(13). С. 23-29. (фахове).

24. Копей Б. В., **Копей І. Б.**, Євчук О. В., Лопатін В. В., Стефанишин О. І. Давач для вимірювання навантажень, що діють на колону насосних штанг : пат. 49754 У Україна : МПК E21B 19/00 ; заявлено 16.11.2009 ; опубл 11.05.2010, Бюл. №9.
25. Копей Б. В., Лопатин В. В., **Копей І. Б.** Помехоустойчивость низкопотенциальных электрических измерений в штанговых скважинных насосных установках и горных выработках. *Методы и средства технической диагностики* : сб. научных статей. Вып. XXIII. Йошкар-Ола : Марийский гос. ун-т., 2006. С. 127-132. (РИНЦ).
26. Копей Б. В., Лопатин В. В., **Копей І. Б.** Датчики привязки регистрируемых параметров для мобильных информационно-измерительных систем. *Методы и средства технической диагностики* : сб. научных статей. Вып. XXIII. Йошкар-Ола : Марийский гос. ун-т., 2006. С. 59-65. (РИНЦ).
27. Копей Б. В., Стефанишин О. І., **Копей І. Б.** Аналіз надійності редукторів верстатів-качалок. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2006. №4(21). С. 96-99. (фахове).
28. Копей Б. В., Копей В. Б., **Копей І. Б.** Спосіб з'єднання стальної головки з полімерно-композиційним тілом глибинонасосної штанги : пат. 35751А Україна : МПК E21B17/00, E16B11/00 ; заявлено 22.04.1998 ; опубл. 16.04.2001, Бюл. №3.
29. Копей Б.В., **Копей І.Б.** Розробка комп'ютерного діагностичного комплексу верстата-качалки. *Оглядова інформація наук.-техн. розробок в галузі бур. і нафтопром. обладн. Вип.2*. Івано-Франківськ : УНГА, Відділ «Нафтогаз. обл. і механізми», 1999. С. 25-32.
30. **Копей І.Б.** Определение оптимального срока восстановления станков-качалок на основании анализа надежности их узлов и деталей. *«Нефтепромысловое дело»*. 1998. № 2. С.26–28.

31. **Копей И.Б.**, Драгомирецкий Я.Н., Копей Б.В. Определение оптимальной величины наработки между отказами деталей нефтепромыслового оборудования. *Нефтепромысловое дело*. 1997. №10-11. С. 30-32.

## Додаток Б

Програма *epk1* для визначення виду залежності методом найменших квадратів

```

print"ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ ЗАЛЕЖНОСТІ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ"
open "epk1.dat" for output as#1
PRINT #1,"ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ ЗАЛЕЖНОСТІ МЕТОДОМ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ"
DATA "Y=A+B*X","Y=A+B*X^2","Y=SQR(A+B*X^2)","Y=A+B*X^3"
DATA "Y=A+B/X","Y=1/(A+B*X)","Y=A+B*SQR(X)","Y=(A+B*X)^2"
DATA "Y=(A+B*SQR(X))^2","Y=A+B*LOG(X)","Y=A*EXP(B*X)"
DATA "Y=A*EXP(B*X^2)","Y=A*X^B","Y=X/(A*X+B)"
PRINT "ВВЕДІТЬ КІЛЬКІСТЬ ТОЧОК";
INPUT N
PRINT #1,"КІЛЬКІСТЬ ТОЧОК N=";N
DIM X(100),Y(100),X1(100),Y1(100),SK(100),F$(100)
PRINT "ВВЕДІТЬ ЧЕРЕЗ КОМУ ПОПАРНО ЗНАЧЕННЯ X,Y"
FOR I=1 TO N
INPUT X1(I),Y1(I)
X(I)=X1(I)
Y(I)=Y1(I)
NEXT I
PRINT "ПЕРЕВІРТЕ ДАНІ"
PRINT #1,"ВХІДНІ ДАНІ"
PRINT
TAB(3);"X";TAB(12);"Y";TAB(22);"X";TAB(32);"Y";TAB(42);"X";TAB(52);"Y"
PRINT
#1,TAB(3);"X";TAB(12);"Y";TAB(22);"X";TAB(32);"Y";TAB(42);"X";TAB(52);"Y"
FOR I=1 TO N STEP 3
PRINT TAB(1);X(I);TAB(11);Y(I);
PRINT #1,TAB(1);X(I);TAB(11);Y(I);
IF I<N THEN PRINT TAB(21);X(I+1);TAB(31);Y(I+1);
IF I<N THEN PRINT #1,TAB(21);X(I+1);TAB(31);Y(I+1);
IF I<N-1 THEN PRINT TAB(41);X(I+2);TAB(51);Y(I+2)
IF I<N-1 THEN PRINT #1,TAB(41);X(I+2);TAB(51);Y(I+2)
NEXT I
PRINT
REM РОЗРАХУНОК СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
K=N:L=0
GOSUB 30
XC=S1/N
YC=S2/N
SX=SQR((S3-S1^2%/N)/(N-1))
SF=SQR((S4-S2^2%/N)/(N-1))
MX=SX/SQR(N)
MY=SF/SQR(N)
VX=SX/XC*100
VY=SF/YC*100
R=(S5-S1*S2/N)/(N-1)/SX/SF
SR=(1-R^2%)/SQR(N-1)
PRINT
PRINT "СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦІЇ АРГУМЕНТА"
PRINT #1,
PRINT #1,"СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФУНКЦІЇ АРГУМЕНТА"
print "МАТЕМАТИЧНЕ ОЧІКУВАННЯ" ;YC,XC

```

```

PRINT #1,"МАТЕМАТИЧНЕ ОЧІКУВАННЯ" ;YC,XC
PRINT "СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНЕ ВІДХИЛЕННЯ" ;SF,SX
PRINT #1,"СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНЕ ВІДХИЛЕННЯ" ;SF,SX
PRINT "ПОМИЛКА СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО ВІДХИЛЕННЯ" ;MY,MX
PRINT #1,"ПОМИЛКА СЕРЕДНЬОКВАДРАТИЧНОГО ВІДХИЛЕННЯ";MY,MX
PRINT "КОЕФІЦІЄНТ ВАРІАЦІЇ" ;VY,VX
PRINT #1,"КОЕФІЦІЄНТ ВАРІАЦІЇ" ;VY,VX
PRINT "КОЕФІЦІЄНТ ПАРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ" ;R
PRINT #1,"КОЕФІЦІЄНТ ПАРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ" ;R
PRINT "ПОМИЛКА КОЕФІЦІЄНТА ПАРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ" ;SR
PRINT #1,"ПОМИЛКА КОЕФ.ПАРНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ" ;SR
REM РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ В РІВНЯННЯХ І СЕР.КВ.ВІДХИЛЕННЯ
PRINT
PRINT TAB(2);"N";TAB(6);"ВИД ЗАЛЕЖНОСТІ";TAB(24);"A";TAB(35);"B",TAB(46);
PRINT "СЕР.КВ.ВІДХ.";tab(59);"K"
PRINT #1,TAB(2);"N";TAB(6);"ВИД ЗАЛЕЖНОСТІ";TAB(24);"A";TAB(35);"B";
PRINT#1,TAB(46);"СЕР.КВ.ВІДХ.";TAB(59);"K"
FOR L=1 TO 14
READ F$(L)
K=0
FOR I=1 TO N
IF L=14 THEN 1
ON L GOSUB 9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21
1 IF L=14 THEN GOSUB 22
NEXT I
IF K>=2 THEN GOSUB 30
NEXT L
REM ПОШУК КРАЩОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ
MIN=SK(1)
IM=1
FOR I=2 TO 14
IF SK(I)>=MIN THEN 2
MIN=SK(I)
IM=I
2 NEXT I
PRINT
PRINT "КРАЩА ЗАЛЕЖНІСТЬ ";F$(IM)
PRINT #1,"КРАЩА ЗАЛЕЖНІСТЬ";F$(IM)
END
9 REM *** Y=A+B*X ***
K=K+1
RETURN
10 REM *** Y=A+B*X^2 ***
K=K+1
X(K)=X1(I)^2%
RETURN
11 REM *** Y=SQR(A+B*X^2) ***
K=K+1
Y(K)=Y1(I)^2%
X(K)=X1(I)^2%
RETURN
12 REM *** Y=A+B*X^3 ***
K=K+1
Y(K)=Y1(I)
X(K)=X1(I)^3%
RETURN

```

```

13 REM   ***   Y=A+B/X   ***
    IF X1(I)=0 THEN 3
    K=K+1
    X(K)=1/X1(I)
    Y(K)=Y1(I)
3 RETURN
14 REM   ***   Y=1/(A+B*X)   ***
    IF Y1(I)=0 THEN 4
    K=K+1
    X(K)=X1(I)
    Y(K)=1/Y1(I)
4 RETURN
15 REM   ***   Y=A+B*SQR(X)   ***
    IF X1(I)<0 THEN 5
    K=K+1
    X(K)=SQR(X1(I))
    Y(K)=Y1(I)
5 RETURN
16 REM   ***   Y=(A+B*X)^2   ***
    IF Y1(I)<0 THEN 6
    K=K+1
    X(K)=X1(I)
    Y(K)=SQR(Y1(I))
6 RETURN
17 REM   ***   Y=(A+B*SQR(X))^2   ***
    IF X1(I)<0 OR Y1(I)<0 THEN 7
    K=K+1
    X(K)=SQR(X1(I))
    Y(K)=SQR(Y1(I))
7 RETURN
18 REM   ***   Y=A+B*LOG(X)   ***
    IF X1(I)<= 0 THEN 8
    K=K+1
    X(K)=LOG(X1(I))
    Y(K)=Y1(I)
8 RETURN
19 REM   ***   Y=A*EXP(B*X)   ***
    if y1(i)<=0 then 195
    k=k+1
    x(k)=x1(i)
    y(k)=log(y1(i))
195 return
20 rem   ***   y=a*exp(b*x^2)   ***
    if y1(i)<=0 then 205
    k=k+1
    x(k)=x1(i)^2%
    y(k)=log(y1(i))
205 return
21 rem   ***   y=a*x^b   ***
    if x1(i)<=0 or y1(i)<=0 then 215
    k=k+1
    x(k)=log(x1(i))
    y(k)=log(y1(i))
215 return
22 rem   ***   y=x/(a*x+b)   ***
    if x1(i)=0 or y1(i)=0 then 225

```



```

k=k+1
x(k)=1/x1(i)
y(k)=1/y1(i)
225 return
30 s1=0
s2=0
s3=0
s4=0
s5=0
for j=1 to k
s1=s1+x(j)
s2=s2+y(j)
s3=s3+x(j)^2%
s4=s4+y(j)^2%
s5=s5+x(j)*y(j)
next j
if l=0 then return
b=(s5*k-s1*s2)/(s3*k-s1^2%)
a=(s2-b*s1)/k
if l=11 or l=12 or l=13 then a=exp(a)
if l=3 or l=6 or l=8 or l=9 or l=11 or l=12 or l=13 or l=14 then 32
sk(l)=sqr((s4-a*s2-b*s5)/k)
goto 332
32 si=0
ni=0
for j=1 to k
if l=3 and a+b*x(j)>=0 then si=si+(sqr(y(j))-sqr(a+b*x(j)))^2%
if l=3 and a+b*x(j)<=0 then ni=ni+1
if l=6 then si=si+(1/y(j)-1/(a+b*x(j)))^2%
if l=8 then si=si+(y(j)^2%-(a+b*x(j))^2%)^2%
if l=9 then si=si+(y(j)^2%-(a+b*x(j))^2%)^2%
if l=11 then si=si+(exp(y(j))-a*exp(b*x(j)))^2%
if l=12 then si=si+(exp(y(j))-a*exp(b*x(j)))^2%
if l=13 then bb=b
if l=13 then si=si+(exp(y(j))-a*exp(x(j))^b)^2%
if l=13 then b=bb
if l=14 then si=si+(1/y(j)-(1/x(j))/(a/x(j)+b))^2%
next j
sk(l)=sqr(si/(k-ni))
332 print tab(2);l;tab(6);f$(l);tab(23);fix(a*1000)/1000;tab(34);b;
print tab(46);fix(sk(l)*10000)/10000;tab(58);k
print #1,tab(2);l;tab(6);f$(l);tab(23);fix(a*1000)/1000;tab(34);b;
print #1,tab(46);fix(sk(l)*10000)/10000;tab(58);k
return
close #1
end

```

## Додаток В

**Програма *prg 500* для чисельного аналізу інтегрального рівняння контактної задачі взаємодії сталеві головки - склопластикової штанги**

### Пояснення до програми *prg 500*

Програма написана на мові Паскаль (*Turboo Pascal 6.0-7.0*) і призначена для реалізації матричного методу для задачі розрахунку контактних напружень у з'єднанні сталеві головки з склопластиковою штангою. Для інших задач, що розв'язуються матричним методом, потрібна певна переробка (адаптація) програми, але процедури 3.1, 3.2, 3.3, 3.5 використовуються без змін.

**Програма складається з таких частин.**

#### 1. Константи.

$n$  – розмірність вихідної матриці  $AA$  пружних і геометричних характеристик оболонки.

$m$  – константа, яка вказує кількість членів матричного ряду (взято  $m = 200$ ).

$z$  – кількість точок розбиття проміжку інтегрування (включаючи кінці) при розв'язуванні інтегрального рівняння Фредгольма II роду.

#### 2. Описи.

2.1.  $AA$  – вихідна матриця пружних і геометричних характеристик оболонки.

2.2.  $A$  - тривимірний масив, кожний "зріз" якого  $A(i,j,l_0)$  при фіксованому  $l_0$  є відповідним степенем матриці  $AA$ .

$A(l_0=1)=AA, A(l_0=2)=AA^2, \dots, A(l_0=m)=AA^m$ .

2.3. Решта – глобальні змінні різного використання.

#### 3. Процедури.

3.1.  $MLT$  – формує масив  $A$  степенів вихідної матриці.

3.2. *function*  $g$  – обчислення елементів матриці  $G: g_{k,i}(\varphi)$ .

3.3. *procedure*  $linequ$  – розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

3.4. *function*  $ker$  – обчислення ядра інтегрального рівняння.

3.5. *procedure*  $IE$  – розв'язування інтегрального рівняння Фредгольма II роду.

У цьому варіанті програми використаний тип дійсних величин *Double*. Якщо є потреба збільшити константу  $m$  (кількість членів матричного ряду), то можливе переповнення. У такому випадку в описі типів потрібно взяти *Float = Extended*.

**Інструкція.**

Після трансляції програми запустити її на обчислення. На екрані з'являться запити на ввід конкретних значень величин початкових даних (див. роздрук програми, стор. 204).

Після вводу початкових даних здійснюється розрахунок (від 0,5 с до 4 хв. у залежності від потужності комп'ютера) і видається таблиця з двох колонок. У першій колонці – значення безрозмірної осьової координати  $X$ , у другій – відповідні значення контактного тиску  $q(X)=Y$  (безрозмірна величина). Під цими колонками друкується значення шуканої сили  $Q$  (розмірна величина).

**Список позначень.**

|               |  |
|---------------|--|
| <i>rh</i>     | $R/H$  |
| <i>ee</i>     | $E_2/E_1$  |
| <i>G13</i>    | $G_{13}=G'$  |
| <i>ge</i>     | $G_{13}/E_1$   |
| <i>un</i>     | $\nu$  |
| <i>un1</i>    | $\nu'$   |
| <i>alp</i>    | $\alpha$ – величина області контакту віднесена до $R$  |
| <i>eps</i>    | $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / R$  |
| <i>A2</i>     | } параметри, які входять в систему рівнянь (1)   |
| <i>B2</i>     |  |
| <i>lr</i>     | $l/R$  |
| <i>y</i>      | $q$ – контактний тиск  |
| <i>kk</i>     | коефіцієнт $k$ у формулі (4) обчислений за формулою  |
|               | $k = 2 \cdot \left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot \left[ \left(\frac{E_1}{E_2}\right) \cdot \frac{1-\nu-2\cdot(\nu')^2\cdot(E_1/E_2)}{(1+\nu)\cdot(1-\nu)^2} + \lambda^2 \right],$ |
|               | де $\lambda = \frac{\nu'}{1-\nu} \cdot \left(\frac{E_1}{E_2}\right)$   |
|               | $\nu$ – коефіцієнт Пуассона в напрямку ізотропії;  |
|               | $\nu'$ – коефіцієнт Пуассона у трансверсальному напрямку   |
| <i>lambda</i> | позначає вираз $\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \cdot \frac{1-\nu-2\cdot(\nu')^2\cdot(E_1/E_2)}{(1+\nu)\cdot(1-\nu)^2}$   |
| <i>Q</i>      | $Q = (10/3) \cdot \pi \cdot R \cdot H \cdot f \cdot R1 \cdot E1 / (E1/G13)$ - реальна шукана сила  |
| <i>R1</i>     | $\int_0^{\alpha} q(x) dx$  |

```
{ $A+, B-, D+, E-, F-, G-, I+, L+, N+, O-, P-, Q-, R-, S+, T-, V+, X+ }
{ $M 65520, 0, 655360 }
```

```
uses Crt;
```

```
const
```

```
  n = 4; m=200; z=21;
```

```
type
```

```
  Float = Double ;
```

```
  ar = array[1..n, 1..n] of Float;
```

```
  arm = array[1..n, 1..n, 1..m] of Float;
```

```
  ar1 = array[1..z, 1..z+1] of Float;
```

```
  ar3 = array[1..z] of Float;
```

```
var
```

```
  AA : ar; A : arm;
```

```
  ii, jj : Integer;
```

```
  alp, A2, B2, D11, D12, D21, D22, DELTA, h1, R1 : Float;
```

```
  x, y : ar3;
```

```
  lr, eps, rh, ee, ge, kk,      un, un1,
```

```
  omega, lambda,
```

```
  L, R, epsilon, H, e1e2, E1, G13, f, Q : Float;
```

```
-----
procedure MLT;
```

```
var
```

```
  i, j, l, k : Integer; s : Float;
```

```
begin
```

```
  for i := 1 to n do
```

```
    for j := 1 to n do
```

```
      A[i, j, 1] := AA[i, j];
```

```
  for l := 2 to m do
```

```
    for i := 1 to n do
```

```
      for j := 1 to n do
```

```
        begin
```

```
          s := 0;
```

```
          for k := 1 to n do
```

```
            s := s + A[i, k, l - 1] * A[k, j, 1];
```

```
            A[i, j, l] := s;
```

```
          end;
```

```
end;
```

```
function g(fi : Float; k, i : Integer) : Float;
```

```
var
```

```
  u, s : Float; l : Integer;
```

```
begin
```

```
  s := 0; u := 1;
```

```
  for l := 1 to m do
```

```
    begin
```

```
      u := u * fi / l;
```

```
      s := s + A[k, i, l] * u;
```

```
    end;
```

```

    if i = k then g := s + 1 else g := s;
end;

procedure linequ(a : ar1; nn : Integer; ee : Float; var x : ar3);
var
    i, j, k : Integer; y, w : Float;
begin
    for i := 1 to nn do
        begin
            k := i; y := a[i, i];
            for j := i + 1 to nn do
                begin
                    w := a[j, i];
                    if Abs(w) > Abs(y) then
                        begin
                            k := j; y := w;
                        end;
                end;
            if abs(y) < ee then
                begin
                    Writeln('Розв'язок СЛАР не визначений');
                    Halt;
                end;
            for j := i to nn + 1 do
                begin
                    w := a[k, j]; a[k, j] := a[i, j]; a[i, j] := w / y;
                end;
            for k := i + 1 to nn do
                for j := nn + 1 downto i + 1 do
                    a[k, j] := a[k, j] - a[i, j] * a[k, i];
                end;
            end;
            for i := nn downto 1 do
                begin
                    w := 0;
                    for j := i + 1 to nn do w := w + a[i, j] * x[j];
                    x[i] := a[i, nn + 1] - w;
                end;
            end;
end;

function ker (x,s: Float): Float;
var y1,y2,y3,y4: Float;
begin
y1:= (D22*g(x,1,3)-D21*g(x,1,4))/DELTA;
y2:= (D11*g(x,1,4)-D12*g(x,1,3))/DELTA;
y3:= y1*g(lr-s,4,3)+y2*(g(lr-s,2,3)+g(lr-s,3,3));
y4:= -y3/kk;
if s<=x then y4:=y4+g(x-s,1,3)/kk;
ker:= y4;
end;

```

```

procedure IE (z:Integer; a,b: Float; var y : ar3);
var x,s,h: Float;
r: ar1;
i,j: Integer;
begin
h:= (b-a)/(z-1);
for i:= 1 to z do
  begin
  x:= a+(i-1)*h;
  r[i,z+1]:=eps/kk;
  for j:=1 to z do
    begin
    s:= a+(j-1)*h;
    r[i,j]:=-ker(x,s)*h;
    if (j=1) or (j=z) then r[i,j]:=0.5*r[i,j];
    if i=j then r[i,j]:=1+r[i,j];
    end;
  end;
end;
linequ (r, z, 0.000001, y);
end;

```

*Початок основної програми*

```

-----
begin
ClrScr;

```

```

writeln('ввести довжину оболонки L');
read(L); writeln('L=',L:12);
writeln('ввести радіус оболонки R');
read(R); writeln('R=',R:12);

lr:=L/R;

writeln('ввести величину області контакту віднесену до R alp');
read(alp); writeln('alp=',alp:12);
if alp>lr then
  begin
  writeln('величина області контакту alp');
  writeln('перевищує відношення L/R');
  writeln('поміняйте початкові дані');
  writeln('і почніть виконання програми спочатку');
  Halt;
  end;

writeln('ввести осадку бандажу epsilon');
read(epsilon); writeln('epsilon=',epsilon:12);
writeln('ввести товщину оболонки H');
read(H); writeln('H=',H:12);
writeln('ввести модуль пружності матеріалу E1');
read(E1); writeln('E1=',E1:12);
writeln('ввести відношення модулів пружності E1/E2');
read(e1e2); writeln('E1/E2=',e1e2:12);
writeln('ввести модуль зсуву G13');

```

Від початкових даних

```

read(G13); writeln('G13=',G13:12);
writeln('ввести модуль Юнга un');
read(un); writeln('un=',un:12);
writeln('ввести модуль Юнга un1');
read(un1); writeln('un1=',un1:12);
writeln('ввести експериментальний коефіцієнт f');
read(f); writeln('f=',f:12);

eps:=epsilon/R;
rh:=R/H;
ee:=1/e1e2;
ge:=G13/E1;
lambda:=un1*e1e2/(1-un);
omega:=e1e2*(1-un-2*sqr(un1)*e1e2)/((1+un)*sqr(1-un));
kk:=2*sqr(H/L)*(omega+sqr(lambda));
kk:=-kk;
{writeln('lr=',lr:12,'eps=',eps:12,'kk=',kk:12,'alp=',alp:12);
writeln('rh=',rh:12,'ge=',ge:12,'ee=',ee:12,'un=',un:12);}

```

```

A2:= 2.5*ge*(1-sqr(un))*sqr(rh);
B2:= 3.0*(1-sqr(un))*sqr(rh)*ee/A2;

```

Обчислення параметрів

```

for ii:=1 to n do
  for jj:=1 to n do
AA[ii,jj]:=0;
AA[1,3]:=1;
AA[2,4]:=1;
AA[3,1]:=B2;
AA[3,4]:=-1;
AA[4,2]:=A2;
AA[4,3]:=A2;

```

Формування матриці крайової задачі

MLT; \_\_\_\_\_ Формування масиву матриці  $A^1, A^2, A^3, \dots, A^m$ 

```

D11:=g(lr,4,3);
D12:=g(lr,4,4);
D21:=g(lr,2,3)+g(lr,3,3);
D22:=g(lr,2,4)+g(lr,3,4);
DELTA:= D11*D22-D12*D21;

```

Обчислення робочих параметрів

IE (z,θ,alp,y); Розв'язування інтегрального рівняння Фредгольма II роду

```

for ii:=1 to z do y[ii]:=-y[ii];

h1:=alp/(z-1);
for ii:=1 to z do
  x[ii]:=(ii-1)*h1;
ClrScr;
writeln('          x          ',' ',' ',' q          ');
for ii:=1 to z do

```

```
writeln (x[ii]:19, ' ',y[ii]:19);  
R1:=0;  
for ii:=1 to z-1 do  
    R1:=R1+0.5*(y[ii]+y[ii+1])*h1;  
Q:=(10/3)*pi*R*H*f*E1*R1*ge;  
writeln('      Q =      ',Q:19);  
end.
```

*Розрахунок шуканої сили*



## Додаток Г

## Опис бази даних

## 1. Структура бази base.dbf

| Field    | Field | Name | Type    | Width | Deo |
|----------|-------|------|---------|-------|-----|
| 1.1      | TR    |      | Numeric | 4     |     |
| 1.2      | TS    |      | Numeric | 4     |     |
| 1.3      | KD    |      | Numeric | 9     |     |
| 1.4      | TU    |      | Numeric | 3     |     |
| 1.5      | TV    |      | Numeric | 3     |     |
| 1.6      | TD    |      | Numeric | 6     |     |
| 1.7      | DV    |      | Date    | 8     |     |
| 1.8      | KG    |      | Numeric | 4     | 2   |
| 1.9      | KH    |      | Numeric | 6     | 1   |
| 1.10     | DSN   |      | Numeric | 19    |     |
| 1.11     | MX    |      | Numeric | 1     |     |
| 1.12     | MY    |      | Numeric | 6     |     |
| S        |       |      | Numeric | 5     |     |
| ** Total | a*    |      |         | 78    |     |

## 2. Структура бази info.dbf

| Field    | Field | Name | Type      | Width | Deo |
|----------|-------|------|-----------|-------|-----|
| 2.1      | TD    |      | Numeric   | 6     |     |
| 2.2      | ND    |      | Character | 30    |     |
| 2.3      | TV    |      | Numeric   | 4     |     |
| 2.4      | NV    |      | Character | 30    |     |
| 2.5      | TU    |      | Numeric   | 4     |     |
| 2.6      | NU    |      | Character | 30    |     |
| 2.7      | TS    |      | Numeric   | 4     |     |
| 2.8      | NS    |      | Character | 30    |     |
| 2.9      | TR    |      | Numeric   | 4     |     |
| 2.10     | NR    |      | Character | 30    |     |
| ** Total | **    |      |           | 173   |     |

## 3. Структура бази work.dbf

| Field    | Field | Name | Type    | Width | Deo |
|----------|-------|------|---------|-------|-----|
| 3.1      | KD    |      | Numeric | 9     |     |
| 3.2      | SN    |      | Numeric | 10    |     |
| ** Total | **    |      |         | 20    |     |

## 4. Структура бази archive.dbf

| Field | Field | Name | Type    | Width | Deo |
|-------|-------|------|---------|-------|-----|
| 4.1   | TR    |      | Numeric | *     |     |
| 4.2   | TS    |      | Numeric | 4     |     |
| 4.3   | KD    |      | Numeric | 9     |     |
| 4.4   | TU    |      | Numeric | 4     |     |
| 4.5   | TV    |      | Numeric | 4     |     |
| 4.6   | TD    |      | Numeric | 6     |     |
| 4.7   | SON   |      | Numeric | 10    |     |
| 4.8   | ET    |      | Numeric | 19    | 9   |
| 4.9   | BT    |      | Numeric | 19    | 9   |

```

4.10KL          Numeric          19          9
** Total **          99
clear all
CLOSE ALL
set status off
set scoreboar off
set device to screen
set date german
do WHILE .T.
    set color to w/b
    clear
    set color to gr+/b,gr+,b
    @ 3,37 say "М Е Н Ю"
    @ 1,18 TO 20,63 DOUBLE
    set color to w,w+i
    @ 7,25 PROMPT "СТВОРЕННЯ ПЛАНУ-ГРАФІКУ РЕМОНТІВ"
    @ 10,30 PROMPT "ФОРМУВАННЯ БАЗИ ДАНИХ"
    @ 13,21 PROMPT "СТВОРЕННЯ БАЗИ ДАНИХ ДЛЯ ІНШИХ УСТАНОВОК"
    @ 16,32 PROMPT "ВИХІД З ПРОГРАМИ"
    MENU TO R
    do case
        case r=1
set procedure to proc1
do proc1
        case r=2
set procedure to proc2
do proc2
        case r=3
set procedure to proc3
do proc3
        case r=4
            &&          set status on
            &&          set scoreboar on
            &&          cancel
    quit
    endcase
enddo

set talk off
set date german
select 3
    use _info alias ps3
select 2
    use _work index _w_kd alias ps2
select 1
    use _base alias ps1
set relation to kd into ps2
    today=date()
do while .t.
    set color to w/bg,bg,bg

```

```

clear
set color to w/n
@ 1,18 clear to 22,67
set color to gr/w
@ 0,16 clear to 21,65
@ 1,18 to 20,63 double
set color to w+/w
@ 3,25 say "СТВОРЕННЯ ПЛАНУ-ГРАФІКУ РЕМОНТІВ"
@ 5,31 say "СЬОГОДНІ - "
set color to gr+/w
@ 5,42 SAY today picture "xxxxxxxx"
set color to n/w,W+/n
@ 9,32 PROMPT "ВВІД ВІРНОЇ ДАТИ"
@ 11,31 PROMPT "ПРОДОВЖЕННЯ РОБОТИ"
@ 13,27 prompt "ПЕРЕХІД ДО ПОПЕРЕДНЬОГО МЕНЮ"
MENU TO R1
do case
  CASE r1=1
    set color to w+/w,b/w
    @ 15,36 get today
    read
  case r1=2
    i=1
    count all to kz
    go top
    SET COLOR TO W+/BG
    clear
    set color to r+/bg
    DO WHILE .NOT. EOF()
      pr=int(i/kz*100)
      @ 11,32 say "ОБРОБКА БАЗИ ДАНИХ"
      @ 12,39 say pr picture "###"
      @ 12,42 say "%"
      i=i+1
      TW=TODAY-DV+7
      AT=0.001*MY*MХ*S
      AH=0.001*60*KH*AT
      A=KG*AH*TW
      replace dsn with a
      SKIP
    ENDDO
do while .t.
  clear
  set color to w/n
  @ 1,25 clear to 12,59
  set color to GR/w,gr+,bg
  @ 0,23 clear to 11,57
  @ 1,25 to 10,55 double
  SET COLOR TO w+/w
  @ 3,30 say "ВИБЕРІТЬ РЕЖИМ ВИВОДУ:"
  SET COLOR TO N/w,W+/n

```

```

@ 5,36 PROMPT "НА ДИСПЛЕЙ"
@ 7,36 PROMPT "НА ПРИНТЕР"
@ 9,36 prompt "ВИХІД      "
MENU TO R2
DO CASE
  CASE R2=1
    SET DEVICE TO SCREEN
  CASE R2=2
    CLEAR
    set color to gr/bg
    @ 11,15 to 13,63 double
    SET COLOR TO GR+/BG,GR+,BG
    @ 12,16 say "ПІДГОТУЙТЕ ПРИНТЕР І НАТИСНІТЬ БУДЬ-ЯКУ
КЛАВІШУ"
    WAIT ''
    SET DEVICE TO PRINT
  CASE R2=3
    EXIT
ENDCASE
set color to n/bg
clear
go top
do while .not. eof()
  if dsn>=ps2->sn .and. dsn<>0
    SET COLOR TO N/BG
    @ 6,7 SAY "НАЗВА РОДОВИЩА....."
    @ 7,7 say "НАЗВА СВЕРДЛОВИНИ....."
    @ 8,7 SAY "НАЗВА УСТАНОВКИ....."
    @ 9,7 SAY "НАЗВА ВУЗЛА....."
    @ 10,7 SAY "НАЗВА ДЕТАЛІ....."
    @ 11,7 say "НАРОБІТОК....."
    SET COLOR TO W+/BG
    select 3
    go top
    locate all for tr=ps1->tr
    @ 6,40 SAY NR picture 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
    locate all for ts=ps1->ts
    @ 7,40 SAY NS PICTURE 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
    locate all for tu=ps1->tu
    @ 8,40 SAY NU picture 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
    locate all for tv=ps1->tv
    @ 9,40 SAY NV PICTURE 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
    locate all for td=ps1->td
    @ 10,40 SAY ND PICTURE 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
    @ 11,40 SAY ps1->DSN
    SELECT 1
    wait 'НАТИСНІТЬ БУДЬ-ЯКУ КЛАВІШУ ДЛЯ ПРОДОВЖЕННЯ'
  endif
  skip
enddo
WAIT 'ВИВІД ЗАКІНЧЕНО, НАТИСНІТЬ БУДЬ-ЯКУ КЛАВІШУ'

```

```
    enddo
    set device to screen
    clear memory
    close all
    exit
CASE R1=3
    close all
    EXIT
ENDCASE
enddo

&&set status off
&&set scoreboar off
set TALK OFF
SEt device to screen
set date german
close all
clear all
nAZVA= '
cdate='01.01.01'
date=ctod(cdate)
NMY=0
NMX=0
NKH=0.0
NKG=0.0
NSs=0.0
trod=0
tsw=0
tust=0
tvuz=0
tdet=0
select 2
    use _info alias ps2
select 1
    use _base alias ps1
select 2
K=0
GO TOP
DO WHILE .T.
    SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
    CLEAR
    set color to w/n
    @ 1,30 clear to 5,54
    SET COLOR TO gr/w,BG,BG
    @ 0,28 clear to 4,52
    @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
    SET COLOR TO W+/w,BG,BG
    @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ РОДОВИЩЕ"
    I=0
    J=0
```

```

SET COLOR TO N/BG,W+/n,BG
DO WHILE I<10
  IF tr<>0 .and. .NOT. EOF()
    @ I+7,24 PROMPT NR
    J=J+1
    SKIP
  ENDIF
  I=I+1
ENDDO
@ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ РОДОВИЩА"
MENU TO R22
IF R22=J+1
  IF tR=0 .or. eof()
    set color to w/n
    @ 8,26 clear to 19,57
    SET COLOR TO w+/R,R,BG
    @ 7,24 CLEAR TO 18,55
    @ 8,25 TO 17,54 DOUBLE
    @ 10,32 SAY "СПИСОК РОДОВИЩ"
    @ 11,35 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
    @ 14,27 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    @ 14,38 PROMPT "НОВЕ РОДОВИЩЕ"
    MENU TO R22
    IF R22=1
      go top
      K=-1
      L=1
    ELSE
      set color to bg/bg,bg,bg
      CLEAR
      set color to w/n
      @ 10,23 clear to 17,57
      set color to w/w
      @ 9,21 clear to 16,55
      SET COLOR TO gr/w,BG,BG
      @ 10,22 TO 15,54 DOUBLE
      SET COLOR TO W+/w,Gr+/w,BG
      @ 12,27 SAY "ВВЕДІТЬ НАЗВУ РОДОВИЩА"
      @ 14,23 GET NAZVA
      READ
      skip -1
      TRod=tr+1
      skip
      if eof()
        append blank
      endif
      REPLACE TR WITH TRod,NR WITH NAZVA
      go top
    endif
  endif
endif

```

```

else
    TROD=K*10+R22
    go tROD
    TROD=TR
    EXIT
endif
k=k+1
enddo
K=0
GO TOP
DO WHILE .T.
    SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
    CLEAR
    set color to w/n
    @ 1,30 clear to 5,54
    SET COLOR TO gr/w,BG,BG
    @ 0,28 clear to 4,52
    @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
    SET COLOR TO W+/w,BG,BG
    @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ СВЕРДЛОВИНУ"
    I=0
    J=0
    SET COLOR TO N/BG,W+/n,BG
    DO WHILE I<10
        IF tS<>0 .and. .NOT. EOF()
            @ I+7,24 PROMPT NS
            J=J+1
            SKIP
        ENDIF
        I=I+1
    ENDDO
    @ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ СВЕРДЛОВИНИ"
    MENU TO R22
    IF R22=J+1
        IF tS=0 .or. eof()
            set color to w/n
            @ 8,26 clear to 19,57
            SET COLOR TO w+/R,R,BG
            @ 7,24 CLEAR TO 18,55
            @ 8,25 TO 17,54 DOUBLE
            @ 10,32 SAY "СПИСОК СВЕРДЛОВИН"
            @ 11,35 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
            SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
            @ 14,27 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
            @ 14,38 PROMPT "НОВА СВЕРДЛОВИНА"
            MENU TO R22
            IF R22=1
                go top
                K=-1
                L=1
            ELSE

```

```

    set color to bg/bg,bg,bg
    CLEAR
    set color to w/n
    @ 10,23 clear to 17,57
    set color to w/w
    @ 9,21 clear to 16,55
    SET COLOR TO gr/w,BG,BG
    @ 10,22 TO 15,54 DOUBLE
    SET COLOR TO W+/w,Gr+/w,BG
    @ 12,27 SAY "ВВЕДИТЬ НАЗВУ СВЕРДЛОВИНИ"
    @ 14,23 GET NAZVA
    READ
    skip -1
    TSW=tS+1
    skip
    if eof()
        append blank
    endif
    REPLACE TS WITH TSW,NS WITH NAZVA
    go top
endif
endif
else
    TSW=K*10+R22
    go tSW
    TSW=TS
    EXIT
endif
k=k+1
enddo
&&-----
select 1
GO TOP
LOCATE ALL FOR TR=TRod .and. ts=tsw
tust=tu
tvuz=tv
tdet=td
DO WHILE .T.
    IF EOF()
        APPEND BLANK
        REPLACE TR WITH TRod,ts WITH tsw
        LOCATE rest FOR TR=TRod .and. ts=tsw
    ENDIF
    SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
    CLEAR
    set color to w/n
    @ 0,24 clear to 6,58
    set color to w/w
    @ 0,22 clear to 5,56
    SET COLOR TO gr/w,BG,BG
    set color to w+/w

```



```

@ 0,23 TO 5,55 DOUBLE
@ 1,25 SAY "РЕДАКТУЮТЬСЯ ДЕТАЛІ РОДОВИЩА"
SET COLOR TO GR+/w,BG,BG
&&@ 4,25 SAY NR
SET COLOR TO N/BG,BG,BG
@ 8,7 SAY "НАЗВА РОДОВИЩА....."
@ 9,7 SAY "НАЗВА СВЕРДЛОВИНИ....."
@ 10,7 SAY "НАЗВА УСТАНОВКИ....."
@ 11,7 SAY "НАЗВА ВУЗЛА....."
@ 12,7 SAY "НАЗВА ДЕТАЛІ....."
@ 13,7 SAY "ДАТА ВСТАНОВЛЕННЯ....."
@ 14,7 SAY "К-СТЬ ГОДИН РОБОТИ....."
@ 15,7 SAY "К-СТЬ ХОДІВ НА ГОДИНУ....."
@ 16,7 SAY "МАШТАБ ХОДУ....."
@ 17,7 SAY "МАШТАБ ЗУСИЛЬ....."
@ 18,7 SAY "ПЛОЩА....."
SET COLOR TO W+/BG,BG,BG
select 2
locate all for tr=trod
@ 8,40 SAY nr picture 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
locate all for ts=tsw
@ 9,40 SAY ns picture 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
locate all for tu=ps1->tu
@ 10,40 SAY PS2->NU picture 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
locate all for tv=ps1->tv
@ 11,40 SAY PS2->NV PICTURE 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
locate all for td=ps1->td
@ 12,40 SAY PS2->ND PICTURE 'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
select 1
@ 13,40 SAY DV PICTURE 'XXXXXXX'
@ 14,40 SAY KG PICTURE '##.##'
@ 15,40 SAY KH PICTURE '####.#'
@ 16,40 SAY MX PICTURE '#'
@ 17,40 SAY MY PICTURE '#####'
@ 18,40 SAY S PICTURE '#####'
SET COLOR TO N/BG,W+I,BG
@ 20,10 PROMPT "НАСТУПНУ ДЕТАЛЬ"
@ 20,28 PROMPT "ПОПЕРЕДНІ"
@ 20,40 PROMPT "РЕДАКТУВАТИ"
@ 20,55 PROMPT "ВИДАЛИТИ"
@ 20,70 PROMPT "ВИХІД"
MENU TO R21
DO CASE
CASE R21=1
CONTINUE
CASE R21=2
go top
loCATE ALL FOR TR=TRod .and. ts=tsw
CASE R21=4
DELETE
CASE R21=5

```

```

PACK
EXIT
CASE R21=3
  SELECT 2
  go top
  K=0
  DO WHILE .T.
    SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
    CLEAR
    set color to w/n
    @ 1,30 clear to 5,54
    set color to w/w
    @ 0,28 clear to 4,52
    SET COLOR TO gr/w,BG,BG
    @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
    SET COLOR TO W+/w,BG,BG
    @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ УСТАНОВКУ"
    I=0
    J=0
    SET COLOR TO n/BG,W+I,BG
    DO WHILE I<10
      IF tu<>0 .and. .not. eof()
        @ I+7,24 PROMPT NU
        J=J+1
        SKIP
      ENDIF
      i=i+1
    ENDDO
    @ 19,22 PROMPT "НАСТУПНІ УСТАНОВКИ"
    MENU TO R22
    IF R22=J+1
      IF tu=0 .or. eof()
        set color to w/n
        @ 8,26 clear to 19,57
        set color to w+/r
        @ 7,24 clear to 18,55
        @ 8,25 to 17,54 double
        @ 10,31 SAY "СПИСОК УСТАНОВОК"
        @ 11,34 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
        SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
        @ 14,27 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
        @ 14,39 PROMPT "НОВА УСТАНОВКА"
        MENU TO R23
        IF R23=1
          K=-1
          GO TOP
        ELSE
          SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
          CLEAR
          set color to w/n
          @ 10,23 clear to 17,57

```

```

        set color to w/w
        @ 9,21 clear to 16,55
        SET COLOR TO gr/w,BG,BG
        @ 10,22 TO 15,54 DOUBLE
        SET COLOR TO W+/w,gr+/w,BG
        @ 12,27 SAY "ВВЕДІТЬ НАЗВУ УСТАНОВКИ"
        @ 14,23 GET NAZVA
        READ
        SKIP -1
        TUST=TU+1
        skip
        if eof()
            APPEND BLANK
        endif
        REPLACE TU WITH TUST,NU WITH NAZVA
    ENDIF
ENDIF
ELSE
    TUST=K*10+R22
    go tust
    TUST=TU
    EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
SELECT 2
K=0
GO TOP
DO WHILE .T.
    SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
    CLEAR
    set color to w/n
    @ 1,30 clear to 5,54
    SET COLOR TO gr/w,BG,BG
    @ 0,28 clear to 4,52
    @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
    SET COLOR TO W+/w,BG,BG
    @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ ВУЗОЛ"
    I=0
    J=0
    SET COLOR TO N/BG,W+/n,BG
    DO WHILE I<10
        IF tv<>0 .and. .NOT. EOF()
            @ I+7,24 PROMPT NV
            J=J+1
            SKIP
        ENDIF
        I=I+1
    ENDDO
    @ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ ВУЗЛИ"
    MENU TO R22

```

```

IF R22=J+1
  IF tv=0 .or. eof()
    set color to w/n
    @ 8,26 clear to 19,57
    SET COLOR TO w+/R,R,BG
    @ 7,24 CLEAR TO 18,55
    @ 8,25 TO 17,54 DOUBLE
    @ 10,34 SAY "СПИСОК ВУЗЛІВ"
    @ 11,35 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
    @ 14,27 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    @ 14,39 PROMPT "НОВИЙ ВУЗОЛ"
    MENU TO R23
    IF R23=1
      K=-1
      GO TOP
    ELSE
      SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
      CLEAR
      set color to w/n
      @ 10,23 clear to 17,57
      set color to gr/w
      @ 9,21 clear to 16,55
      @ 10,22 TO 15,54 DOUBLE
      SET COLOR TO W+/w,gr+/w,BG
      @ 12,27 SAY "ВВЕДІТЬ НАЗВУ ВУЗЛА"
      @ 14,23 GET NAZVA
      READ
      SKIP -1
      TVUZ=TV+1
      skip
      if eof()
        APPEND BLANK
      endif
      REPLACE TV WITH TVUZ,NV WITH NAZVA
    ENDIF
  ENDIF
ELSE
  TVUZ=K*10+R22
  go tvuz
  TVUZ=TV
  EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
SELECT 2
use _info index _i_td
go top
locate all for td>tvuz*1000 .and. td<(tvuz+1)*1000
z=recno()-1
K=0

```

```

DO WHILE .T.
  SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
  CLEAR
  SET COLOR TO W/N
  @ 1,30 CLEAR TO 4,54
  SET COLOR TO gr/W,BG,BG
  @ 0,28 CLEAR TO 4,52
  @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/W,BG,BG
  @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ ДЕТАЛЬ"
  I=0
  J=0
  SET COLOR TO n/BG,W+I,BG
  DO WHILE I<10
    IF td<>0 .and. td<(tvuz+1)*1000 .and. .not. eof()
      @ I+7,24 PROMPT ND
      J=J+1
      skip
    ENDIF
    i=i+1
  ENDDO
  @ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ ДЕТАЛІ"
  MENU TO R22
  IF R22=J+1
    IF td=0 .or. td>(tvuz+1)*1000 .or. EOF()
      SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
      CLEAR
      SET COLOR TO W/N
      @ 8,26 CLEAR TO 19,57
      SET COLOR TO w+/R,R,BG
      @ 7,24 CLEAR TO 18,55
      @ 8,25 to 17,54 double
      @ 10,31 SAY "СПИСОК ДЕТАЛЕЙ"
      @ 11,34 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
      SET COLOR TO W/R,W+/N,BG
      @ 14,27 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
      @ 14,39 PROMPT "НОВА ДЕТАЛЬ"
      MENU TO R23
      IF R23=1
        K=-1
        GO TOP
        locate all for td>tvuz*1000 .and. td<(tvuz+1)*1000
      ELSE
        SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
        CLEAR
        SET COLOR TO W/N
        @ 10,23 CLEAR TO 16,56
        SET COLOR TO GR/W,BG,BG
        @ 9,21 CLEAR TO 16,55
        @ 10,22 TO 15,54 DOUBLE
        SET COLOR TO W+/W,GR+/W,BG
    
```

```

        @ 12,27 SAY "ВВЕДІТЬ НАЗВУ ДЕТАЛІ"
        @ 14,23 GET Nazva
        READ
        skip -1
        tdet=td+1
        skip
        if eof()
            append blank
        endif
        REPLACE Td WITH tdet,Nd WITH Nazva
        reindex
    ENDIF
ENDIF
ELSE
    tdet=k*10+r22+z
    go tdet
    tdet=td
    exit
ENDIF
k=k+1
ENDDO
use _info alias ps2
&&-----
    set color to bg/bg,bg,bg
    clear
    set color to w/n
    @ 5,8 clear to 20,66
    set color to w/w
    @ 4,6 clear to 19,64
    set color to gr/w,gr+/w,bg
    @ 5,7 to 18,64 double
    set color to w+/w,bg,bg
    @ 8,20 say "ЗАПОВНІТЬ ДАНІ ПРО УСТАНОВКУ"
    SET COLOR TO N/w,GR+/w,BG
    @ 10,9 SAY "ДАТА ВСТАНОВЛЕННЯ....."
    @ 11,9 SAY "К-СТЬ ГОДИН РОБОТИ....."
    @ 12,9 SAY "К-СТЬ ХОДІВ НА ГОДИНУ....."
    @ 13,9 SAY "МАШТАБ ХОДУ....."
    @ 14,9 SAY "МАШТАБ ЗУСИЛЬ....."
    @ 15,9 SAY "ПЛОЩА....."
    @ 10,46 GET Date picture 'XXXXXXXX'
    @ 11,46 GET nKG PICTURE '##.##'
    @ 12,46 GET nKH PICTURE '####.#'
    @ 13,46 GET nMX PICTURE '#'
    @ 14,46 GET nMY PICTURE '#####'
    @ 15,46 GET nSs PICTURE '#####'
    read
&&-----
    SELECT 1
    KDET=TUST*1000000+TDET
    replace kd with kdet,tu with tust,tv with tvuz,td with tdet

```

```

        replace dv with date,kg with nkg,kh with nkh,mx with nmx
        replace my with nmy,s with nss
    endcase
ENDDO
close all
clear all
^#&

x=0
close all
set talk off
select 3
    use _info alias ps3
select 2
    use _work alias ps2
select 1
    use _archive alias ps1
set color to gr/bg
clear
set color to gr/n
@ 7,16 clear to 19,68
set color to gr/w
@ 6,14 clear to 18,66
@ 7,15 to 17,65 double
set color to w+/bg
@ 12,25 say "ВВІД ДАНИХ ПРО НАРОБІТКИ ДЕТАЛЕЙ"
WAIT ''
set color to gr/bg
clear
set color to n/n
@ 2,24 clear to 9,48
set color to gr/w
@ 1,22 clear to 8,46
@ 2,23 to 7,45 double
set color to w+/w
@ 3,29 say "ВВЕДІТЬ ДАНІ"
@ 4,25 SAY "ДЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ ВВОДУ"
@ 5,29 SAY "НАТИСНІТЬ -0"
SET COLOR TO N/w,GR+/w
DIMENSION T(100)
A=0
I=0
DO WHILE .T.
    I=I+1
    @ 13,7 SAY 'ЧАС БЕЗВІДКАЗНОЇ РОБОТИ'
    @ 13,40 GET A PICTURE '#####'
    READ
    T(i)=A
    IF A=0
        EXIT

```

```

    ENDIF
ENDDO
N=I
I=0
T1=0
F=0
T2=0
F2=0
F5=0
CLEAR
I=1
DO WHILE I<=(N-1)
    T1=T1+LOG(T(I))
    F1=1/(1-I/N)
    F3=LOG(F1)
    F=F+LOG(F3)
    T2=T2+LOG(T(I))^2
    F2=F2+LOG(F3)^2
    F4=LOG(T(I))*LOG(F3)
    F5=F5+F4
    I=I+1
ENDDO
N=N-1
B=(F5-T1*F/N)/(T2-T1*T1/N)
E=T1/N-F/N/B
E1=EXP(E)
R1=F5-T1*F/N
R2=(T2-T1*T1/N)*(F2-F*F/N)
R3=SQRT(R2)
R=R1/R3
set color to w+/bg
CLEAR
set color to n/n
@ 3,8 clear to 12,78
set color to gr/w
@ 2,6 clear to 11,76
@ 3,7 TO 10,75 DOUBLE
SET COLOR TO W+/bg
@ 5,30 SAY 'РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ ДАНИХ'
set color to n/w
@ 6,10 SAY 'БЕТА =.....'
@ 7,10 SAY 'ЕТА =.....'
@ 8,10 SAY 'КОЕФІЦІЄНТ ЛІНІЙНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ..'
set color to w+/w
@ 6,40 SAY B PICTURE '@B'
@ 7,40 SAY E1 PICTURE '@B'
@ 8,40 SAY R PICTURE '@B'
set color to w+/bg
@ 16,8 SAY 'РОЗРАХУНОК МАТЕМАТИЧНОГО ОЧІКУВАННЯ ЧАСУ БЕЗВІДКАЗНОЇ РОБОТИ'
SET COLOR TO N/bg,W+I/N

```



```

@ 18,25 prompt "    TAK    "
@ 18,45 PROMPT "    HI     "
MENU TO R31
CLEAR
SET COLOR TO N/BG
IND=1
IF R31=1
  SET COLOR TO GR/n
  @ 8,30 clear to 17,52
  set color to gr/w
  @ 7,28 clear to 16,50
  @ 8,29 TO 15,49 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/w
  @ 9,31 SAY "ІТЕРАЦІЙНИЙ ЦИКЛ"
  @ 10,32 SAY "ЧИСЛО ІТЕРАЦІЙ"
  SET COLOR TO N/w
  G=0
  X=0
  P=0.001
  DO WHILE .T.
    @ 12,39 SAY IND PICTURE "###"
    X=X+P
    G=G+ABS(LOG(1/X))^(1/B)*P
    IF X>=1
      X=E1*G
      EXIT
    ENDIF
    IND=IND+1
  ENDDO
  set color to w/bg
  CLEAR
  SET COLOR TO GR/n
  @ 6,6 clear to 12,77
  set color to gr/w
  @ 5,4 clear to 11,75
  @ 6,5 TO 10,74 DOUBLE
  SET COLOR TO N/w
  @ 8,7 SAY 'СЕРЕДНІЙ ЧАС БЕЗВІДКАЗНОЇ РОБОТИ.....'
  SET COLOR TO W+/w
  @ 8,42 SAY X PICTURE '#####.#'
  WAIT ''
  DO WHILE .T.
    CLEAR
    SET COLOR TO GR/BG
    clear
    set color to w/n
    @ 6,25 clear to 12,59
    set color to gr/w
    @ 5,23 clear to 11,57
    @ 6,25 TO 10,55 DOUBLE
    SET COLOR TO W+/w

```

```

@ 7,27 SAY 'ПОЗПАХУНОК P(t) i F(t)'
SET COLOR TO N/BG,W+/N
@ 15,25 PROMPT "          TAK    "
@ 15,45 PROMPT "          HI     "
MENU TO R33
IF R33=1
  SET COLOR TO GR/BG
  clear
  set color to w/n
  @ 6,20 clear to 12,64
  set color to gr/w
  @ 5,18 clear to 11,62
  @ 6,20 TO 10,60 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/BG,GR+/BG
  @ 8,22 SAY "ВВЕДИТЬ ЧАС РОБОТИ....."
  T3=0
  @ 8,48 GET T3
  READ
  R1=(T3/E1)^B
  R2=EXP(-R1)
  R4=1-R2
  SET COLOR TO GR/BG
  clear
  set color to w/n
  @ 6,25 clear to 15,59
  set color to gr/w
  @ 5,23 clear to 14,57
  @ 6,25 TO 13,55 DOUBLE
  SET COLOR TO N/w
  @ 7,30 SAY 'ДЛЯ t=.....'
  @ 9,30 SAY 'P(t)=.....'
  @ 11,30 SAY "F(t)=....."
  SET COLOR TO W+/w
  @ 7,40 SAY T3 PICTURE '@B'
  @ 9,40 SAY R2 PICTURE '@B'
  @ 11,40 SAY R4 PICTURE '@B'
  wait ''
else
  exit
endif
ENDDO
ENDIF
select 3
K=0
GO TOP
DO WHILE .T.
  SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
  CLEAR
  set color to w/n
  @ 1,30 clear to 5,54
  SET COLOR TO gr/w,BG,BG

```

```

@ 0,28 clear to 4,52
@ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
SET COLOR TO W+/w,BG,BG
@ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ РОДОВИЩЕ"
I=0
J=0
SET COLOR TO N/BG,W+/n,BG
DO WHILE I<10
  IF tr<>0 .and. .NOT. EOF()
    @ I+7,24 PROMPT NR
    J=J+1
    SKIP
  ENDIF
  I=I+1
ENDDO
@ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ РОДОВИЩА"
MENU TO R22
IF R22=J+1
  IF tr=0 .or. eof()
    set color to w/n
    @ 8,26 clear to 19,57
    SET COLOR TO w+/R,R,BG
    @ 7,24 CLEAR TO 18,55
    @ 8,25 TO 17,54 DOUBLE
    @ 10,34 SAY "СПИСОК ВУЗЛІВ"
    @ 11,35 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
    @ 14,35 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    MENU TO SS
    K=-1
    GO TOP
  ENDIF
ELSE
  TROD=K*10+R22
  go tROD
  TROD=TR
  EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
K=0
GO TOP
DO WHILE .T.
  SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
  CLEAR
  set color to w/n
  @ 1,30 clear to 5,54
  SET COLOR TO gr/w,BG,BG
  @ 0,28 clear to 4,52
  @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/w,BG,BG

```

```

@ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ СВЕРДЛОВИНУ"
I=0
J=0
SET COLOR TO N/BG,W+/n,BG
DO WHILE I<10
  IF tS<>0 .and. .NOT. EOF()
    @ I+7,24 PROMPT NS
    J=J+1
    SKIP
  ENDIF
  I=I+1
ENDDO
@ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ СВЕРДЛОВИНИ"
MENU TO R22
IF R22=J+1
  IF tS=0 .or. eof()
    set color to w/n
    @ 8,26 clear to 19,57
    SET COLOR TO w+/R,R,BG
    @ 7,24 CLEAR TO 18,55
    @ 8,25 TO 17,54 DOUBLE
    @ 10,34 SAY "СПИСОК СВЕРДЛОВИН"
    @ 11,35 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
    @ 14,35 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    MENU TO SS
    K=-1
    GO TOP
  ENDIF
ELSE
  TSVR=K*10+R22
  go tSVR
  TSVR=TS
  EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
go top
K=0
&& K к-сть вик. внутр. циклів
DO WHILE .T.
  SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
  CLEAR
  set color to w/n
  @ 1,30 clear to 5,54
  set color to w/w
  @ 0,28 clear to 4,52
  SET COLOR TO gr/w,BG,BG
  @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/w,BG,BG
  @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ УСТАНОВКУ"

```

```

I=0
&& I к-сть записів для виводу
J=0
&& J к-сть виведених установок
SET COLOR TO n/BG,W+I,BG
DO WHILE I<10
  IF tu<>0 .and. .not. eof()
    @ I+7,24 PROMPT NU
    J=J+1
    SKIP
  ENDIF
  i=i+1
ENDDO
@ 19,22 PROMPT "НАСТУПНІ УСТАНОВКИ"
MENU TO R22
IF R22=J+1
  IF tu=0 .or. eof()
    set color to w/n
    @ 8,26 clear to 19,57
    set color to w+/r
    @ 7,24 clear to 18,55
    @ 8,25 to 17,54 double
    @ 10,31 SAY "СПИСОК УСТАНОВОК"
    @ 11,34 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
    @ 14,35 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    MENU TO SS
    K=-1
    GO TOP
  ENDIF
ELSE
  TUST=K*10+R22
  go tust
  TUST=TU
  && TUST вибрана установка
  EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
K=0
GO TOP
DO WHILE .T.
  SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
  CLEAR
  set color to w/n
  @ 1,30 clear to 5,54
  SET COLOR TO gr/w,BG,BG
  @ 0,28 clear to 4,52
  @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/w,BG,BG
  @ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ ВУЗОЛ"

```

```

I=0
J=0
SET COLOR TO N/BG,W+/n,BG
DO WHILE I<10
  IF tv<>0 .and. .NOT. EOF()
    @ I+7,24 PROMPT NV
    J=J+1
    SKIP
  ENDIF
  I=I+1
ENDDO
@ 19,32 PROMPT "НАСТУПНІ ВУЗЛИ"
MENU TO R22
IF R22=J+1
  IF tv=0 .or. eof()
    set color to w/n
    @ 8,26 clear to 19,57
    SET COLOR TO w+/R,R,BG
    @ 7,24 CLEAR TO 18,55
    @ 8,25 TO 17,54 DOUBLE
    @ 10,34 SAY "СПИСОК ВУЗЛІВ"
    @ 11,35 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO w/r,W+/n,BG
    @ 14,35 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    MENU TO SS
    K=-1
    GO TOP
  ENDIF
ELSE
  TVUZ=K*10+R22
  go tvuz
  TVUZ=TV
  EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
use _info index _i_td
go top
locate all for td>tvuz*1000 .and. td<(tvuz+1)*1000
z=recno()-1
K=0
locate all for td>tvuz*1000 .and. td<(tvuz+1)*1000
DO WHILE .T.
  SET COLOR TO BG/BG,BG,BG
  CLEAR
  SET COLOR TO W/N
  @ 1,30 CLEAR TO 5,54
  SET COLOR TO gr/W,BG,BG
  @ 0,28 CLEAR TO 4,52
  @ 1,29 TO 3,51 DOUBLE
  SET COLOR TO W+/W,BG,BG

```

```

@ 2,31 SAY "ВИБЕРІТЬ ДЕТАЛЬ"
I=0
J=0
SET COLOR TO n/BG,W+I,BG
DO WHILE I<10
  if td<>0 .and. td<(tvuz+1)*1000 .and. .not. eof()
    @ I+7,24 PROMPT ND
    J=J+1
    skip
  ENDIF
  i=i+1
ENDDO
@ 18,32 PROMPT "НАСТУПНІ ДЕТАЛІ"
MENU TO R22
IF R22=J+1
  IF td=0 .or. td>(tvuz+1)*1000 .or. EOF()
    SET COLOR TO W/N
    @ 8,26 CLEAR TO 19,57
    SET COLOR TO w+/R,R,BG
    @ 7,24 CLEAR TO 18,55
    @ 8,25 to 17,54 double
    @ 10,31 SAY "СПИСОК ДЕТАЛЕЙ"
    @ 11,34 SAY "ВИЧЕРПАНО!"
    SET COLOR TO W/R,W+/N,BG
    @ 14,35 PROMPT "ПОВТОРИТИ"
    MENU TO SS
    K=-1
    GO TOP
    locate all for td>tvuz*1000 .and. td<(tvuz+1)*1000
  ENDIF
ELSE
  tdet=k*10+r22+z
  go tdet
  TDET=TD
  EXIT
ENDIF
k=k+1
ENDDO
use _info alias ps3
KDET=TUST*1000000+TDET
set color to w/n
@ 6,17 clear to 20,67
set color to gr/w
@ 5,15 clear to 19,65
@ 6,16 to 18,64 double
SET COLOR TO w+/W,W+/N
@ 8,18 say "РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ СЕРЕДНЬОГО ЧАСУ РОБОТИ"
@ 10,25 PROMPT "ЗАПИСАТИ В ОСНОВНУ БАЗУ ДАНИХ"
@ 12,30 PROMPT "ЗАПИСАТИ В АРХІВ"
MENU TO R34
IF R34=1

```

```
select 2
locate all for kd=kdet
replace sn with x
else
select 1
append blank
replace kd with kdet,tu with tust,tv with tvuz,td with tdet,son with x
replace et with e1,bt with b,kl with r,tr with trod,ts with tsVr
ENDIF
```



## Додаток Д

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
ТОВ «Західтехногаз»  
Р.В.Храбатин  
«18» листопада 2016 р.



АКТ

м. Івано-Франківськ

Ми, що нижче підписалися, комісія в складі: головний інженер ТОВ «Західтехногаз» Возний В.М. - голова комісії, головний механік ТОВ «Західтехногаз» Кернякевич І.Я., директор ТОВ «НВП «Магістраль Сервіс» Лялюк М.Я., головний механік ТОВ «НВП «Магістраль Сервіс» Копей І.Б. - члени комісії, склали цей акт про наступне:

Дослідження в свердловині № 6-Чечва Вільхівського родовища проводяться для можливості оцінки надійності роботи штангового свердловинного насоса ТОВ «Магістраль» в умовах високої мінералізації пластової води (203,8 г/л) і значного вмісту механічних домішок (0,08-0,3 %).

01.03.2016 р. на свердловині №6-Чечва Вільхівського родовища введено в експлуатацію штанговий свердловинний насос НВ1Б-38-35 виробництва ТОВ «Магістраль». Насос спущено на глибину 2345 м. Насос укомплектовано пісковим фільтром.

Контрольні заміри продуктивності насоса (через місяць роботи) проводились в присутності представників ТОВ «НВП «Магістраль Сервіс». 09.04.2016 р. на свердловині №6-Чечва проводились дослідження статичного та динамічного рівнів. 20.04.2016 р на свердловині №6-Чечва проводились динамографічні дослідження роботи глибинного насосного обладнання.

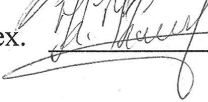
15.05.2016 р. насос був піднятий на поверхню з метою проведення капітального ремонту свердловини, пов'язаного з утворенням піщаної пробки. При огляді встановлено, що насос знаходиться в доброму стані, зовнішні пошкодження відсутні. 20.05.2016 р. насос спущений в свердловину для подальшої експлуатації.

По стану на 16.11.2016 р. насос продовжує працювати.

Таким чином, отримані позитивні результати випробувань свідчать про доцільність впровадження штангових свердловинних насосів ТОВ «Магістраль» на промислах з глибиннонасосним способом видобутку.

Від ТОВ «Західтехногаз»

Від ТОВ «НВП «Магістраль Сервіс»

Гол. інж.  В.М.ВознийДиректор  М.Я.ЛялюкГол. мех.  І.Я.КернякевичГол. мех.  І.Б.Копей

## Додаток Е

ЗАТВЕРДЖУЮ



В.А. ПЕТРИНЯК  
"Долина нафтогаз"

В.А. ПЕТРИНЯК

" 09 лютого 1998 р.

## А К Т

м. Долина

09.02.98 р.

Ми, що нижче підписалися, комісія в складі : начальника ВВ Костура Б.М. - голова комісії, начальника ЦВНГ-І Юрчишина Д.І., інж. I кат. ВВ Цап М.М. технолога ЦВНГ-І Гуньки Р.Н. - члени комісії, склали цей акт про наступне :

06.06.96 р. на свердловині № 40 Долинського родовища, для проведення промислових досліджень, було спущено 7 шт. метало-пластикових штанг, виготовлених Дніпропетровським відділенням Української академії наук національного прогресу.

08.02.98 р. на свердловині проводився поточний ремонт з метою заміни насоса і заміру пластового тиску.

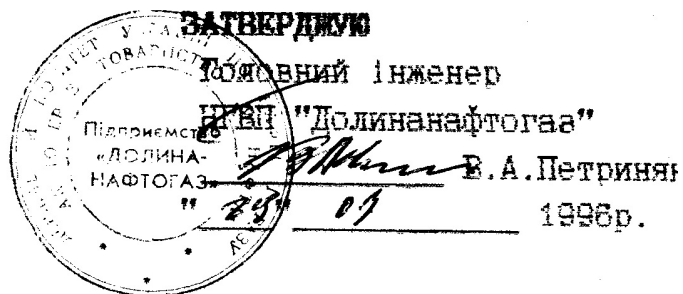
Із свердловини підняли глибинно-насосне обладнання. При зовнішньому огляді металопластикових штанг пошкоджень на тлі /вм"ятин, протирання, розщеплення волокон, тріщин та інш./ не виявлено. Сталеві головки, муфти штанг та їх різьби нормальні. Метало-пластикові штанги працювали в інтервалі: 580 + 628 м. Станом на 08.02.98 р. штанги відпрацювали 712 діб.

Відклади парафіну на металопластикових штангах становлять  $S \approx 1 + 2$  мм. Відклади парафіну на сталевих штангах  $S \approx 2 + 3$  мм. Металопластикові штанги знову спущені в свердловину для подальшого проходження промислових випробувань. Інтервал спуску - 580 + 628 м.

Вважаємо, що попередні випробування штанги пройшли успішно. Тепер залишилось визначити ресурс їх роботи.

*В.М. Костур*  
В.М. КОСТУР  
*Д.І. Юрчишин*  
Д.І. ЮРЧИШИН  
*М.М. Цап*  
М.М. ЦАП  
*Р.Н. Гунька*  
Р.Н. ГУНЬКА

## Додаток Є



## А К Т

спуску дослідної партії насосних штанг із скловолокна,  
 складений 30 травня 1996 року

Найменування етапу робіт :  
 Попередні експлуатаційні випробування дослідної партії  
 НШП 22 в НГВП "Долина нафтогаз"

Ми, нижчепідписані, представники виконавця ІФДТУНГ доцент кафедри нафтового обладнання Копей Б.В., інженери Н Кіндрачук С.М., Копей І.Б., Гуменюк С.Б. а однієї сторони представники замовника ДВ УАННП ведучий конструктор Заворітько І.О., ведучий інженер Глушко Ю.Ф. а другої сторони склали а про те, що в свердловину N40 спущена дослідна партія НШП для перевірки їх роботоздатності в промислових умовах. Всі роботи проведені агідно "Порядку виконання робіт по спуску дослідної партії насосних штанг із скловолокна" та "Інструкції по експлуатації дослідної партії насосних штанг із скловолокна".

к.т.н., доцент Копей Б.В.

вед. констр. Заворітько І.О.

вед. інж. Глушко Ю.Ф.

## Додаток Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ

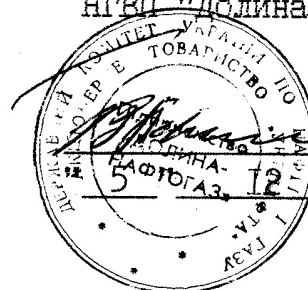
Проректор з наукової роботи  
Івано-Франківського Державного  
технічного університету нафти



М. Кондрат  
1996 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер  
НГВП "Долина нафтогаз"



В. А. Петр  
1996 р.

АКТ

випробування дослідної партії насосних штанг  
металопластикових ШНП-40Х-22-8-С

Цей акт засвідчує про те, що з 30.05.96 р. до цього Івано-Франківським Державним технічним університетом нафти та газу (ІФДТУНГ) на промислах НГВП "Долина нафтогаз" проводився випробування дослідної партії ШНП-40Х-22-8-С, які показали хорошу їх роботоздатність в промислових умовах (свердловина N753 та N40). Протягом цього терміну не відбулось жодного риву штанги. Крім того у свердловинах проводились такі технологічні операції, як соляна обробка пласта та пропарка НКТ (температура пару 70 °С) без підймання колони штанг на верхню. Теоретично розраховані напруження у верхніх січех ШНП складають  $\sigma_{max}=152$  МПа,  $\sigma_{бр}=80$  МПа (свердловина N 7)  $\sigma_{max} = 95$  МПа,  $\sigma_{бр}=53$  МПа (свердловина N40), коефіцієнти метрії відповідно 0.44 та 0.37.

Таким чином, отримані позитивні результати випробування свідчать про доцільність масового випуску ШНП на виробництво та впровадження їх на промислах з глибиннонасосним способом видобутку.

Від ІФДТУНГ

Керівник теми 366/2-94  
канд.техн.н., доцент  
Колей Б.В.

Від НГВП "Долина нафтогаз"

Зав. виробн. відділом  
Костур Б.М.

Додаток 3

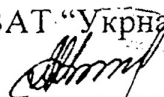
ДКПІ 29.52.12.

ЗАК  
ЗАРЕЄ

**ПОГОДЖЕНО**

Заступник Голови Правління-  
технічний директор  
ВАТ „Укрнафта”

ЗАК  
Генера  
Заводу

  
М.П. Гнип



" 26 " 12. 2006

**ШТАНГИ НАСОСНІ МЕТАЛОПЛАСТИКОВІ**

Технічні умови

ТУ У 29.5-13741713-002:2006

(Замість ТУ У 13741713.001-2000)

Введені з 19.04.2007р

Без обмеження строку дії

**ПОГОДЖЕНО**

Держгірпромнагляд  
Лист №01/712 від  
" 13 " 12 2006 р

**РОЗРОБЛЕНО**

Проректор з наукових робіт  
Івано-Франківського національного  
технічного університету

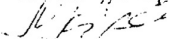


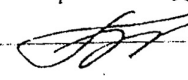
**ПОГОДЖЕНО**

Начальник технічного управління  
ВАТ „Укрнафти”

**РОЗРОБЛЕНО**

Керівник напрямку Івано  
національного технічного  
нафти та газу

  
Літоцький М.В.

  
Б.В.Копей

" 26 " 12. 2006

" 12 " 12

**ПОГОДЖЕНО**

Директор „КОМПЛАСТ”  
  
А.С.Шевченко

" 15 " 12 2006

|               |  |
|---------------|--|
| Підпис і дата |  |
| Інв. № дуб    |  |
| м. Інв. №     |  |

## Додаток И



МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА СИСТЕМА СЕРТИФІКАЦІЇ УкрСЕПРО

Серія ВГ

## СЕРТИФІКАТ ВІДПОВІДНОСТІ

Зареєстровано в Реєстрі за № UA1.007.0028361-15  
Зареєстровано в Реєстрі

Термін дії з 27 травня 2015 р. до 26 травня 2016 р.  
Срок действия с

Продукція **Штанги насосні металопластикові**  
Продукция

код УКТ ЗЕД, ТН ЗЕД  
**22.21.21**  
код ДКПП, ОКП

Відповідає вимогам  
Соответствует требованиям  
ТУ У 29.5-13741713-002:2006 'Штанги насосні металопластикові. ТУ' п.п. 2.1-2.5, 2.9 табл. 1, 2

Виробник продукції  
Изготовитель продукции  
ТОВ НВП 'Укрізоліт', 27507, Кіровоградська область, м. Світловодськ, вул. Чубаря, 33А, код ЄДРПОУ 31972600

Сертифікат видано  
Сертификат выдан  
ТОВ НВП 'Укрізоліт', 27507, Кіровоградська область, м. Світловодськ, вул. Чубаря, 33А, код ЄДРПОУ 31972600

Додаткова інформація  
Дополнительная информация  
штанги насосні металопластикові, що виготовляються серійно з 27.05.2015 р. до 26.05.2016 р., з урахуванням гарантійного терміну зберігання, технічний нагляд за сертифікованою продукцією один раз на рік

Сертифікат видано органом з сертифікації  
Сертификат выдан органом по сертификации  
ДП 'Харківстандартметрологія', м. Харків, вул. Мироносицька, 36 №UA.P.007 від 04.04.2014р. тел./факс (057) 700-37-02; 756-37-58; 756-37-84

На підставі  
На основании  
випробувань, що були проведені: ДВЦ електротехнічної та машинобудівної продукції 'Електромаш' ДП 'Харківстандартметрологія', 61002, м. Харків, вул. Мироносицька, 36, атестат №2Н819 від 05.02.2012 р. Протокол №65.05.15.071 від 27.05.2015 р. Висновок щодо можливості видачі сертифіката відповідності від 27.05.2015 р.

Заступник  
Керівник органу з сертифікації  
Руководитель органа по сертификации



підпис **В.В. Агарков**  
инициалы, прізвище

М.П.

Чинність сертифіката відповідності можна перевірити в Реєстрі системи УкрСЕПРО за тел. (044) 537-35-76

№ 338662





ТОВ 'Укрлітографія', зам. 13-147, 2013 р. II кв.