

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ГОНЧАРУК ІРИНА ПАВЛІВНА

УДК 629.5.081.2:656.627.4

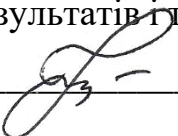
**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ І ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ  
СПОРУД**

Спеціальність 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»

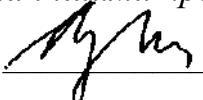
Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання  
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

  
Гончарук І.П.

Науковий керівник Головань Андрій Ігорович, кандидат технічних наук,  
доцент

*Перший примірник дисертації є ідентичним  
за змістом зі всіма іншими примірниками*

Учений секретар  О.Л. ДРОЖЖИН

Одеса – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Гончарук І.П.* Методи діагностики і підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – «Експлуатація та ремонт засобів транспорту». – Одеський національний морський університет, Одеса, 2021.

Дисертація присвячена розробленню методів і засобів діагностування та контролю технічного стану елементів і агрегатів суднопіднімальних гідротехнічних споруд (СГТС). Виявлено недоліки існуючих систем контролю, які полягають у неспроможності контролювати удари по спусковим доріжкам сліпа, що виникають в момент проходження судна при спуску на воду. Проведений аналіз показав, що існуючі методи визначення основних параметрів технічного стану вузлів і агрегатів сліпів, які є основою для достовірної діагностики технічного стану потребують вдосконалення.

Вирішення цього актуального науково-практичного завдання полягає у розробленні методів і засобів діагностування та підвищення ефективності контролю технічного стану транспортної техніки, зокрема елементів і агрегатів СГТС, за рахунок впровадження автоматизованої системи діагностики і контролю технічного стану Distributed Measurement System, що забезпечує підвищення достовірності діагностування, зменшення часу та зниження витрат на проведення діагностування.

В якості основних завдань дослідження були виділені наступні:

- проведення аналізу існуючих методів контролю технічного стану елементів і агрегатів СГТС;
- розробка методу контролю цілісності елементів СГТС на основі параметрів їх вібрації;

- удосконалення методу вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок, як обладнання сліпа, шляхом застосування гармонійного аналізу;
- удосконалення методу діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом, як елементів механічного обладнання сліпа, шляхом застосування спектрального аналізу;
- створення експериментальної установки з метою вивчення параметрів вібрації елементів СГТС.

**У першому розділі** подано аналіз стану проблеми контролю технічного стану СГТС на підприємствах розташованих в Україні і виконано аналіз наукової літератури з досліджуваного напрямку. Розглянуто стан та перспективи розвитку методів контролю технічного стану СГТС. Виявлено недоліки існуючих систем контролю, які полягають у неспроможності контролювати удари по спусковим доріжкам сліпа, що виникають в момент проходження судна при спуску на воду. Вибрано напрямок, поставлені цілі і завдання дослідження.

**Другий розділ** роботи присвячений розробці моделей контролю технічного стану вузлів і агрегатів СГТС. На підставі проведених розрахунків залежності частоти власних коливань від зміни температури і щільності елементів СГТС з використанням програмного забезпечення для аналізу методом кінцевих елементів і мультифізичного моделювання, була отримана аналітична модель залежності фактору цілісності основних несучих елементів СГТС від двох параметрів - температури та частоти власних коливань. Фактор цілісності основних несучих елементів СГТС – це кількісна характеристика технічного стану, яка характеризує фізичне зношення споруди та є співвідношенням фактичної частоти власних коливань та очікуваної частоти власних коливань для цілісного елемента при заданій температурі.

**У третьому розділі** представлена реалізація методу діагностування на основі отриманої аналітичної моделі та методи контролю технічного стану

елементів і агрегатів СГТС. Подано процедуру діагностування та обробки результатів вимірювання сигналів.

Для забезпечення безперервного контролю за елементами та агрегатами СГТС розроблено метод діагностики на основі автоматизованої системи діагностики і контролю технічного стану DMS, яка встановлюється на контрольованому об'єкті.

**У четвертому розділі** наведена реалізація експериментальних досліджень вібраційного стану палі після удару, взаємодії паль-оболонки з відкритим нижнім кінцем і піщаної основи з аналізом отриманих результатів. Створена експериментальна установка та наведено її опис. Розроблено модель палі-оболонки та методику проведення випробувань. Обрано контрольовану вимірювальну апаратуру, складено методику та план проведення експериментальних досліджень. Наведені результати випробувань дослідження взаємодії паль-оболонки з піщаною основою.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

вперше розроблено метод контролю цілісності основних елементів СГТС на основі аналізу температури та частоти власних коливань елементів СГТС, який на відміну від існуючих методів дає суттєво меншу похибку вимірювання частоти сигналів, що дозволяє визначати дефекти на ранніх стадіях;

удосконалено метод вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок, який, для підвищення точності гармонійного аналізу вібраційного сигналу, використовує передискретизацію та децимацію з дробовим коефіцієнтом; на відміну від існуючих методів він має суттєво меншу похибку визначення віброшвидкості, що дозволяє якісніше визначати фізичний знос підшипників;

удосконалено метод діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом, який, за рахунок інтерполяції фільтрованого вібраційного сигналу, підвищує точність і надійність контролю основних гармонік коливань,

що дозволяє проводити якіснішу оцінку радіального і кутового зміщення осей насосів та силових агрегатів СГТС.

Виконана робота відповідає паспорту спеціальності "05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту":

– **за формулою спеціальності:** «Галузь науки і техніки, яка займається проблемами створення методологічних основ оптимального технічного використання засобів транспорту (обладнання та засобів забезпечення транспортних робіт), їх технічної експлуатації, технічного обслуговування і ремонту, ... створення умов для високоефективного використання засобів транспорту...», завдяки розробленню та удосконаленню методів діагностики та визначення технічного стану вузлів і агрегатів суднопіднімальних гідротехнічних споруд, що дозволяє підвищити ефективність діагностики і контролю технічного стану транспортної техніки, зокрема елементів і агрегатів суднопіднімальних гідротехнічних споруд.

– **за напрямками досліджень:**

– «Теоретичні основи виробництва, експлуатації, технічного обслуговування, **ремонтів та відновлення засобів транспорту. Стратегія розвитку, реконструкції та переоснащення підприємств** виробництва, експлуатації, **ремонтів та зберігання засобів транспорту**»;

– «Дослідження, розроблення та прогнозування методів удосконалення тактико-технічних і експлуатаційних характеристик засобів транспорту, обґрунтування експлуатаційних вимог до їх ремонтпридатності та технологічності обслуговування, **підвищення ефективності контролю технічного стану транспортної техніки, встановлення закономірностей змінювання параметрів технічного стану у процесі експлуатації, впровадження методів і засобів діагностування та прогнозування технічного стану засобів транспорту**, що забезпечують високу ефективність їх використання та надійність роботи.»

– «Розроблення методів експлуатації захисних, причальних і обмежувальних споруд морських і річкових портів і судноремонтних заводів, підхідних каналів, шлюзів і інших гідротехнічних споруд, що забезпечують необхідні умови функціонування морського та річкового флоту (для дослідження в галузі водного транспорту)».

**Практична реалізація** одержаних в роботі результатів дисертаційного дослідження полягає в розробленні нових методів і засобів діагностування та контролю технічного стану елементів і агрегатів СГТС. Отримані в роботі результати доцільно використовувати в математичному та програмному забезпеченні DMS - автоматизованої системи контролю технічного стану транспортної техніки.

За результатами теоретичних досліджень створено контрольно-діагностичний обчислювальний комплекс, який дозволяє вирішувати наступні завдання:

- вібраційний контроль цілісності основних елементів СГТС;
- діагностичний контроль технічного стану елементів механічного обладнання;
- дистанційний централізований контроль технічного стану СГТС з використанням мережі Інтернет.

Результати досліджень за темою дисертаційної роботи були впроваджені: в освітній процес Одеського національного морського університету протягом 2017 – 2020 навчальних років, освітній процес Одеського державного екологічного університету, у виробничій діяльності ПРАТ «ДУНАЙСУДНОРЕМОНТ» (м. Ізмаїл), у виробничій діяльності МНВП «ЛЕПТОН» (м. Одеса).

У результаті дисертаційних досліджень, виконаних автором, вирішене нове актуальне наукове завдання створення методів і засобів діагностування та підвищення ефективності контролю технічного стану транспортної техніки, зокрема елементів і агрегатів суднопіднімальних гідротехнічних споруд, за

рахунок впровадження автоматизованої системи діагностики і контролю технічного стану DMS, що забезпечує підвищення достовірності діагностування, зниження витрат та зменшення часу необхідного на проведення діагностування. Відсутність аналогічних рішень в нашій країні та за кордоном робить результати досліджень пріоритетними.

**Ключові слова:** оперативний контроль, надійність, технічний стан, суднопіднімальні гідротехнічні споруди, ремонт, судноремонтний завод, суднобудівний завод, засіб водного транспорту.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Дубровський М.П. (глава 1, 2), Рогачко С.І. (глава 3), Бугаєва С.В., Гончарук І.П. (глава 4), Хонелія Н.Н. (глава 5), та ін., всього 15 авторів Розвиток методів проектування, будівництва та реконструкції гідротехнічних споруд Глава 4. Експериментальні дослідження взаємодії паль-оболонки з відкритим нижнім кінцем і піщаної основи Монографія Рекомендовано до видання: Протокол №9 засідання Вченої ради ОНМУ від 27 березня 2019 року Розглянуто та схвалено: Протокол №6 засідання Вченої ради факультету водотранспортних та шельфових споруд від 26 лютого 2019 року
2. S.V. Bugaeva, I.P. Goncharuk Determination of the interaction of piles - shells with open bottom end with ground base / Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und Innovative Technologien, Karlsruhe, Germany, December 2018, pp. 56-60 <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view.meit06-01-019> DOI: 10.30890/2567-5273.2018-06-01-019 УДК 624.012.45
3. Golovan, A., Gritsuk, I., Honcharuk, I. et al., "Features of Mathematical Modeling in the Problems of Determining the Power of a Turbocharged Engine According to the Characteristics of the Turbocharger," SAE Int. J. Engines 13(1):5-16, 2020, <https://doi.org/10.4271/03-13-01-0001>.
4. Бугаєва С.В., Гончарук І.П. Повышение несущей способности спусковых дорожек слипа на свайном основании / «Практическое значение современных научных исследований, 2017», Одесса, 2017, С.62-67 ЦИТ: ua117-021DOI: 10.21893/2415-7538.2016-06-5-021 УДК 624.012.45 (Фахове видання, яке індексується у наукометричних базах даних: РИНЦ SCIENCE INDEX та INDEX COPERNICUS)
5. Дели О.К., Костенко О.А., Гончарук І.П., Сторчак О.О. Системи і засоби



транспорту Проблеми експлуатації і діагностики Глава 16. Особенности мониторинга выбросов двуокиси углерода энергетической установкой грузового судна в условиях эксплуатации Монографія Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації і діагностики: монографія/ Vlatnický Miroslav, Dizo Jan, Gerlici Juraj та ін.; за наук. ред. проф. Грицука Ігоря. – Херсон: ХДМА, 2019. – 442 с.: іл.,табл.. (укр., рос., англ. мова) ISBN 978-966-224553-0 УДК 656.017

6. Дубровський М.П., Рогачко С.І., Бугаєва С.В. Гончарук І.П. та ін. всього 15 авторів. Розвиток методів проектування, будівництва та реконструкції гідротехнічних споруд Серія монографій. Частина 2. Математичне моделювання взаємодії ґрунтом основи з врахуванням властивостей їх матеріалів (глава 6) Рекомендовано до видання: Протокол №9 засідання Вченої ради ОНМУ від 27 травня 2020 року Розглянуто та схвалено: Протокол №6 засідання Вченої ради факультету водотранспортних та шельфових споруд від 5 березня 2020 року ISSN 2663-9742, DOI: 10.30888/2663-9742.2020-01 УДК:627.2
7. Бугаєва С.В., Головань А.І., Гончарук І.П. Експериментальні методи визначення взаємодії паль-оболонки і ґрунту основи споруди / «SWorld Journal, №4, май 2020», Svishtov, Bulgaria, 2020, С.81-87, DOI: 10.30888/2410-6615.2020-04-01-036

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

8. Головань А.І., Гончарук І.П. Современные требования к системам мониторинга выбросов диоксида углерода морским транспортом / Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С., Одеса – Стамбул – Одеса, 2019 с.138-139 <https://drive.google.com/file/d/1NZ-G27Z8o5nLQjVpoEasBMWXx1e4pwUY/view>
9. Головань А.І., Гончарук І.П., Делі А.К., Костенко А.А. Современные

методы мониторинга вредных выбросов энергетической установкой грузового судна 10 Матеріали міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО, 2019, ХДМА, Херсон, с.85-88

10. Головань А.И., Гончарук И.П., Дели А.К. Использование оптического расходомера газа в задаче определения количества выбросов двуокиси углерода транспортным судном / Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT -2020) 27-29 травня 2020 року, ХДМА, Херсон, Україна с. 89-90

11. Головань А.И., Гончарук И.П., Дели А.К. Использование недиспергирующего газового анализатора в задаче определения количества выбросов двуокиси углерода транспортным судном / Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020, вересень 2020 року, ХДМА, Херсон, Україна, с. 131-134

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

12. Бугаєва С.В., Баранова Г.О., Гончарук І.П. Усиление геотубами конструкций спусковых дорожек слипа на свайном основании / III Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2016 (SLA-2016) ХДМА, с. 271-275

13. Бугаєва С.В., Гончарук І.П. Повышение безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений, путем армирования грунта основания геоматериалами / IV Міжнародна науково-практична конференція конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2017 (SLA-2017) ХДМА, с. 108-110

14. Бугаєва С.В., Головань А.І., Гончарук І.П. Підвищення безпеки

експлуатації гідротехнічних споруд / VI Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2019 (SLA-2019) ХДМА, с. 94-96

15. Бугаєва С.В., Головань А.І., Гончарук І.П. Підвищення безпеки експлуатації гідротехнічних споруд шляхом експериментальних методів визначення взаємодії паль-оболонок і ґрунту основи / VII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2020 (SLA-2020) ХДМА, с. 72-74

### ABSTRACT

*Iryna P. Honcharuk* Methods of diagnostics and increase of control efficiency of technical condition of marine railways. – Qualification scientific paper, manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering Sciences (PhD): Specialty 05.22.20 – Operation and repair of vehicles. – Odessa National Maritime University, Odesa, 2021.

The thesis focuses on the development of methods and tools for diagnosing and monitoring the technical condition of elements and units of marine railways. The drawbacks of the existing control systems are revealed, which consist in the inability to control the impacts on the slip runways that occur at the moment the vessel passes when launching. The analysis showed that the existing methods for determining the main parameters of the technical condition of units and aggregates of the slip, which are the basis for reliable diagnostics of the technical condition, need to be improved.

The solution to this relevant scientific and practical problem consists in the development of methods and diagnostic tools and improving the efficiency of monitoring the technical condition of transport equipment, in particular elements and units of marine railways, through the introduction of an automated system for diagnostics and monitoring of the technical condition of the Distributed Measurement System, which provides an increase in the reliability of diagnostics, reducing the time and cost of diagnostics.

The main objectives of the research are:

- analysis of existing methods for monitoring the technical condition of elements and units of marine railways;
- development of a method for monitoring the integrity of elements of marine railways based on their vibration parameters;
- improvement of the vibration control method of the technical condition of traction winches, as slip equipment, through the use of harmonic analysis;
- improvement of the diagnostic monitoring method of the technical condition of electrically driven pumps, as elements of mechanical slip equipment, by applying spectral analysis;
- creation of an experimental installation for the purpose of studying the vibration parameters of elements of marine railways.

The first section presents an analysis of the problem of monitoring the technical condition of marine railways at enterprises located in Ukraine and analyzes the scientific literature in the studied area. The state and prospects for the development of methods for monitoring the technical condition of marine railways are considered. The drawbacks of the existing control systems are revealed, which consist in the inability to control the impacts on the slip runways that occur at the moment the vessel passes when launching. The research direction, aims and objectives are set.

The second section of the thesis focuses on the development of models for monitoring the technical condition of units and aggregates of marine railways. Based on the calculations of the dependence of the natural vibration frequency on changes in temperature and density of elements of marine railways using software for analysis by the finite element method and multiphysics modeling, an analytical model was obtained for the dependence of the integrity factor of the main bearing elements of marine railways on two parameters such as temperature and natural vibration frequency. The integrity factor of the main bearing elements of marine railways is a quantitative characteristic of the technical condition, which characterizes the physical

deterioration of a structure and is the ratio of the actual natural vibration frequency and the expected natural vibration frequency for an integral element at a given temperature.

In the third section, the implementation of the diagnostic method based on the obtained analytical model and methods for monitoring the technical condition of elements and units of marine railways are presented. The procedure for diagnostics and processing of the results of signal measurements is submitted.

To ensure continuous monitoring of the elements and units of marine railways, a diagnostic method has been developed based on an automated diagnostic and technical condition monitoring system DMS, which is installed at the controlled object.

In the fourth section, the implementation of experimental studies of the vibration state of a pile after impact, the interaction of shell piles with an open lower end and a sandy base with an analysis of the results is given. An experimental setup is created and its description is given. A model of the shell pile and a test procedure were developed. Control and measuring equipment was selected, a methodology and plan for conducting experimental research were drawn up. The results of testing the study of the interaction of shell piles with a sand base are presented.

The scientific novelty of the results obtained is as follows:

for the first time, a method was developed for monitoring the integrity of the main elements of marine railways based on the analysis of the temperature and natural vibration frequency of the elements of marine railways, which, in contrast to the existing methods, gives a significantly smaller error in measuring the signal frequency, allows to identify defects at early stages;

the method of vibration control of the technical condition of traction winches has been improved, which, to increase the accuracy of the vibration signal harmonic analysis, uses oversampling and decimation with a fractional coefficient; in contrast to existing methods, it has a significantly lower error in determining the vibration velocity, which makes it possible to better determine the physical wear of bearings;

the method of diagnostic monitoring of the technical condition of electrically driven pumps has been improved, which, due to the interpolation of the filtered

vibration signal, increases the accuracy and reliability of monitoring the fundamental harmonics of vibration, allows for a qualitative assessment of the radial and angular displacement of the axes of pumps and power units of marine railways.

The practical implementation of the thesis research results consists in the development of new methods and tools for diagnosing and monitoring the technical condition of elements and units of marine railways. The results obtained in this work should be used in the mathematical and software DMS - an automated system for monitoring the technical condition of transport equipment.

Based on the results of theoretical studies, a control and diagnostic computer complex was created that allows solving the following tasks:

- vibration control of the integrity of the main elements of marine railways;
- diagnostic control of the technical condition of mechanical equipment elements;
- remote centralized control of the technical condition of marine railways using the Internet.

The results of research on the thesis topic were introduced: in the educational process of Odessa National Maritime University during the 2017-2020 academic year, the educational process of Odessa State Ecological University, in the production activities of PrJSC "Dunaisudnoremont" (Izmail), in the production activities of the small research production enterprise "LEPTON "(Odesa).

As a result of the thesis research carried out by the author, a new relevant scientific problem of creating methods and means of diagnostics and increasing the efficiency of monitoring the technical condition of transport equipment, in particular elements and units of marine railways, was solved by introducing an automated system for diagnosing and monitoring the technical condition of DMS improving the reliability of diagnostics, reducing costs and reducing the time required for diagnostics. The lack of similar solutions in our country and abroad makes research results a priority.

**Key words:** operational control, reliability, technical condition, marine railways, repair, shiprepair yard, ship-building yard, water transport.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРАКТИЧНИХ ТА НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД.....	26
1.1. Аналіз технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів України .....	26
1.2. Визначення напрямків підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд .....	29
1.3. Дослідження сучасних та перспективних систем контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд .....	32
Висновки по розділу 1 .....	40
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОСНОВНИХ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД.....	42
2.1. Розрахунок деформації пальової підстави спускових доріжок сліпа.....	43
2.2. Розрахунок напруження пальової підстави спускових доріжок сліпа .....	47
2.3. Моделювання стану основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд.....	51
2.4. Двопараметрична модель залежності фактору цілісності основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд .....	69
Висновки до розділу 2 .....	77
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД .....	79
3.1. Статичний розрахунок палі спускової доріжки сліпа .....	85
3.2. Динамічний розрахунок палі спускової доріжки сліпа.....	92
3.3. Метод контролю цілісності основних елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд .....	101
3.4. Удосконалення методу вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок .....	122

3.5. Удосконалення методу діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом.....	126
Висновки до розділу 3 .....	130
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ОСНОВНИХ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД З ОСНОВОЮ .....</b>	<b>132</b>
4.1. Експериментальна установка, вимірювальна апаратура і методика проведення випробувань .....	136
4.2. Модель паль-оболонки .....	138
4.3. Методика проведення дослідів .....	141
4.4. Результати випробувань дослідження взаємодії паль-оболонки з піщаною основою .....	163
Висновки по розділу 4 .....	179
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>181</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>183</b>
Додаток А. Акти впровадження.....	194
Додаток Б. Список опублікованих праць за темою дисертації .....	199



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ФОБ – формалізована оцінка безпеки
- ІМО – Міжнародна морська організація
- SWOT – аналіз аббревіатура з початкових букв англійських слів: переваги, недоліки, можливості, загрози
- DMS – Distributed Measurement System
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- ТССС – технічний стан суднопіднімальних споруд
- ДБН – державні будівельні норми
- ДСТУ – державні стандарти України
- ФАПЧ – фазове автопідстроювання частоти
- АЦП – аналого - цифровий перетворювач
- АХЧ – амплітудно – частотна характеристика
- ДФМ – дискретно-фазовий метод
- ТСО – технічний стан обладнання
- ТС – технічний стан
- CSS – chirp spread spectrum
- FEC – forward error correction
- FSK – frequency shift keying

## ВСТУП

Суднопіднімальні гідротехнічні споруди, як відомо, характеризуються великими обсягами капітальних вкладень, складністю, неоднорідністю ґрунтових умов і навантажень. Тому нові конструктивні рішення і розрахункові методи, що уточнюють особливості роботи споруди, можуть дати значний економічний ефект.

Багаторічний досвід досліджень показує, що споруди в процесі експлуатації піддаються впливу різних чинників, які впливають на величину несучої здатності. До факторів, що впливають на несучу здатність, належать наступні: технологія будівництва, режим експлуатаційних навантажень, пошкодження споруди, реологічні явища в матеріалах конструкцій і ґрунтах основи, вплив навколишнього середовища тощо.

У багатьох працях висвітлені теоретичні та практичні питання раціональної експлуатації портових гідротехнічних споруд. Викладено питання впливу на споруди статичних і динамічних навантажень. Значну увагу приділено аналізу впливу на споруди фактору часу. Наведено методи розрахунку споруд, що експлуатуються на тривалу міцність, які дозволяють оцінювати несучу здатність конструкцій в залежності від їх віку і на цій основі призначати необхідний режим експлуатації [33]. Описано технічні засоби, методика спостережень і досліджень за станом споруд.

Для забезпечення гарантованої і нормальної експлуатації портових і суднопіднімальних гідротехнічних споруд за ними необхідно вести систематичне спостереження для виявлення реального технічного стану споруд і призначити відповідний режим їх експлуатації [32].

У трудах В.Д. Костюкова наведені дані про терміни служби суден, перевантажувального обладнання та портових споруд. З них випливає, що за період експлуатації споруди в середньому двічі доводиться пристосовуватися до нових типів суден і тричі - до нових типів перевантажувального обладнання [52]. Найбільш часто моральний знос викликається недостатньою глибиною біля

причалу - 95%, рідше - недостатньою довжиною - 30% і недостатнім допустимим навантаженням - 18%.

При реконструкції споруд виникають більш складні завдання, ніж при будівництві нових. Вирішенню цих важливих завдань присвячені ґрунтовні дослідження, виконані в науково-дослідних інститутах Союзморніпроект, Ленморніпроект, ЧорноморНДІпроект, ОНМУ та ін. Найбільш інтенсивно цей напрямок розвивається в працях А.А. Долинського, Л.Ф. Златоверховнікова, С.Н. Курочкина, Ф.А. Мартиненко, В.В. Ковтуна і багатьох інших авторів. Запропоновано і реалізовано багато цікавих інженерних рішень.

Важливу роль у вирішенні проблеми забезпечення необхідних умов функціонування морського та річкового флоту відіграють судноремонтні заводи. Переважна більшість судноремонтних заводів України в своїй виробничій діяльності використовують сліпи. Сліпи, найбільш поширені в світовій суднобудівній та судноремонтній галузі, суднопіднімальні гідротехнічні споруди (СГТС) з основою у вигляді залізобетонних балок на палях або пальовій основі. Сліпи належать до транспортної техніки [49], яка виконує роль внутрішньозаводського транспорту, що використовується в технологічному процесі ремонту судна та забезпечує осушення підводної частини судна для його огляду і ремонту. Транспортна техніка – це вид транспорту, який служить для періодичного переміщення по території заводу або підприємства вантажів на виробничі майданчики або в цехи [49].

Виконання покладених на сліпи завдань має забезпечуватися ефективною експлуатацією комплексу його технічних засобів. Удосконалення процесу технічної експлуатації може бути досягнуто двома шляхами:

- перший пов'язаний з підвищенням технічного рівня експлуатації, вдосконаленням елементів цієї системи, в тому числі створення високотехнологічних і надійних елементів і агрегатів сліпа;

- другий шлях пропонує вдосконалення системи управління ефективністю процесу технічної експлуатації, в тому числі обґрунтування програм з технічного

обслуговування та поточного ремонту елементів і агрегатів сліпа, створення програм прогнозування їх залишкового ресурсу та створення сучасних засобів контролю параметрів і технічної діагностики елементів і агрегатів сліпа на базі впровадження автоматизованих систем діагностики і контролю технічного стану - Distributed Measurement System (DMS) з метою забезпечення якісного ремонту і обслуговування суден.

Періодично доводиться вирішувати завдання технічної експлуатації сліпів в умовах зниження рівня готовності технічних засобів [45], що сталося внаслідок тих чи інших пошкоджень елементів чи агрегатів [55]. Особливо складно приймати рішення в аварійних режимах, коли неправильний керуючий вплив може призвести до катастрофічних наслідків.

У зв'язку з цим, актуальним є розроблення методів і засобів діагностування та контролю технічного стану елементів і агрегатів СГТС [46]. Основними ознаками, що характеризують технічний стан СГТС являється цілісність елементів та фізичний знос агрегатів. Основними параметрами технічного стану, однозначно пов'язаними з цілісністю елементів СГТС, являються температура елемента та частота власних коливань [44].

Дана робота присвячена вирішенню наукового завдання, яке полягає в розробленні методів і засобів діагностування та підвищення ефективності контролю технічного стану транспортної техніки [43], зокрема елементів і агрегатів СГТС, за рахунок впровадження автоматизованої системи діагностики і контролю технічного стану DMS, що забезпечує підвищення достовірності діагностування, зменшення часу та зниження витрат на проведення діагностування.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до Морської доктрини України на період до 2035 року, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 р. № 13074, та її нової редакції, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 18 грудня 2018 р. [78]; спрямованість роботи обумовлена

і безпосередньо пов'язана з науково-дослідними тематиками кафедр Морські та річкові порти, водні шляхи та їх технічна експлуатація - «Розвиток методів проектування, будівництва та реконструкції гідротехнічних споруд» та Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація – «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» за 2018-2020 рр. Автор був виконавцем розділів цих тем і займався розробкою спільних пружнопластичних моделей розрахунку пальної підстави суднопіднімальних споруд та методами і заходами з підвищення ефективності функціонування інтелектуальних і телематичних систем (ІТС) управління судновими технічними засобами (СТЗ).

#### **Мета і завдання дослідження.**

Метою дослідження є розроблення та впровадження методів і засобів діагностування технічного стану елементів і агрегатів СГТС.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

- проведення аналізу існуючих методів контролю технічного стану елементів і агрегатів СГТС;
- розробка методу контролю цілісності елементів СГТС на основі параметрів їх вібрації;
- удосконалення методу вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок, як обладнання сліпа, шляхом застосування гармонійного аналізу;
- удосконалення методу діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом, як елементів механічного обладнання сліпа, шляхом застосування спектрального аналізу;
- створення експериментальної установки з метою вивчення параметрів вібрації елементів СГТС.

*Об'єкт дослідження* – є контроль та діагностика технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд.

*Предмет дослідження* – є методи контролю технічного стану елементів і агрегатів суднопіднімальних гідротехнічних споруд на основі визначення їх основних діагностичних параметрів.

*Методи досліджень.* Для досягнення поставленої в роботі мети використано методи дослідження з застосуванням математичних моделей і методів варіаційного числення, теорії ймовірностей, дискретної математики, теорії прийняття рішень.

У роботі використовувалися методи: статистичної обробки в завданнях збору й аналізу експериментальних даних, гармонійного аналізу в завданнях визначення частотних характеристик тягових лебідок і насосів з електроприводом, цифрової фільтрації дискретних сигналів на базі швидкого перетворення Фур'є.

В експериментальних дослідженнях використовувалися методи реєстрації параметрів за допомогою мікроконтролерів з вбудованим АЦП (16bit, 1MSPS), з їх подальшою програмною обробкою і візуалізацією в середовищі QT C++.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- вперше розроблено метод контролю цілісності основних елементів СГТС на основі аналізу температури та частоти власних коливань елементів СГТС, який на відміну від існуючих методів дає суттєво меншу похибку вимірювання частоти сигналів, що дозволяє визначати дефекти на ранніх стадіях;

- удосконалено метод вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок, який, для підвищення точності гармонійного аналізу вібраційного сигналу, використовує передискретизацію та децимацію з дробовим коефіцієнтом; на відміну від існуючих методів він має суттєво меншу похибку визначення віброшвидкості, що дозволяє якісніше визначати фізичний знос підшипників;

- удосконалено метод діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом, який, за рахунок інтерполяції фільтрованого

вібраційного сигналу, підвищує точність і надійність контролю основних гармонік коливань, що дозволяє проводити якіснішу оцінку радіального і кутового зміщення осей насосів та силових агрегатів СГТС.

**Достовірність отриманих в дисертації результатів** забезпечується коректною, з позиції контролю технічного стану транспортної техніки, постановкою завдання, вибором суворого математичного апарату й обґрунтованих моделей основних несучих елементів СГТС, співставленням результатів розрахунку з експериментальними даними.

**Особистий внесок автора.** Теоретичні й експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У колективній монографії [56] автором підготовлена глава 4, а також прийнято участь у написанні глави 5. У колективній монографії [52] автором прийнято участь у написанні глави 16. У колективній монографії [57] автором прийнято участь у написанні глави 6. У спільних роботах [12, 33] автору належить визначення взаємозв'язку між параметрами умов експлуатації СГТС; [5] – обґрунтування вибору математичного апарату; [29] – дослідження взаємодії елементів СГТС.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження доповідались на 10 міжнародних науково-технічних конференціях:

- III Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2016 р.;

- IV Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2017 р.;

- Міжнародна конференція «Практическое значение современных научных исследований, 2017», Одеса, 2017 р.;

- Міжнародна науково-технічна конференція ОНМУ «100 років вищої морської освіти в Україні», Одеса, 2018 р.;

- Міжнародна науково-практична конференція, присвячена пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С., Одеса – Стамбул – Одеса, 2019 р.;
- VI Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2019 р.;
- XI Міжнародна науково-практична конференція Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2019), м. Херсон, 2019 р.;
- Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (СЕУТТОО - 2019), 2019 р.;
- VII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, науки, практика», м. Херсон, 2020 р.;
- XII Міжнародна науково-практична конференція Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2020), м. Херсон, 2020 р.

**Практичне значення** одержаних результатів дисертаційного дослідження полягає в розробленні нових методів і засобів діагностування та контролю технічного стану елементів і агрегатів СГТС. Отримані в роботі результати доцільно використовувати в математичному та програмному забезпеченні DMS - автоматизованої системи контролю технічного стану транспортної техніки.

За результатами теоретичних досліджень створено контрольно-діагностичний обчислювальний комплекс який дозволяє вирішувати наступні завдання:

- вібраційний контроль цілісності основних елементів СГТС;
- діагностичний контроль технічного стану елементів механічного обладнання;



- дистанційний централізований контроль технічного стану СГТС з використанням мережі Інтернет.

Результати досліджень за темою дисертаційної роботи були впроваджені: в освітній процес Одеського національного морського університету протягом 2017 – 2020 навчальних років, освітній процес Одеського державного екологічного університету, у виробничій діяльності ПРАТ «ДУНАЙСУДНОРЕМОНТ» (м. Ізмаїл), у виробничій діяльності МНВП «ЛЕПТОН» (м. Одеса).

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРАКТИЧНИХ ТА НАУКОВО-МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД**

### **1.1. Аналіз технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів України**

Споруди для підйому і спуску суден по похилих площинам є найпоширенішими при докуванні суден. До них відносяться елінги і сліпи - суднопіднімальні засоби і споруди для будівництва, ремонту, підйому і спуску судна, плавзасобів або плавоб'єкту.

Для монтажу, огляду, інспекції, ремонту та обслуговування заглиблених, гребних, рульових і підрулюючих механізмів, дейдвудних сальників, забірної арматури, підводної частини корпусу судно необхідно підняти з води або мати сухі частини при його закладці і будівництві.

Для докування судноремонтні і суднобудівні підприємства використовують різні підйомно-спускові механізми, суднопіднімальні засоби і споруди для спуску і підйому суден і плавзасобів: елінги, сліпи, сухі, наливні і плавучі доки, вертикальні суднопідіймачі [51].

Елінг (від англ. Launch, stocks; stocks голл. Helling - спорудження для ремонту або споруди) це спеціалізоване механізоване берегове спорудження з похилим підводним і надводним фундаментом [7], бічними або тилowymi кранами, призначене для підйому по рейкових шляхах ремонтваних або споруджуваних суднів, техобслуговування і зберігання яхт, шхун, дебаркадерів; закритий цех для закладки кілей, збірки, зварювання корпусів і добудови суден в зимовий час.

Надводна похила частина елінгу одночасно виступає відкритим стапельні місцем для суден [2]. Стапельне місце - горизонтальний або похилий майданчик, розташований на березі і призначений для будівництва та ремонту судна і

подальшого його спуску на воду. Розміри стапеля завжди відповідають розмірам судна яке ремонтується або будується [1].

Залежно від положення судна відносно підйомних шляхів розрізняють елінги поперечні і поздовжні.

На поперечному елінгу діаметральна площина судна перпендикулярна рейковим судновізним підйомним шляхам. Даний тип призначений для підйому плавзасобів до 6 тис. тон.

На поздовжньому елінгу діаметральна площина судна паралельна рейковим судновізним шляхам. Їх будують для підйому плавзасобів масою до 10 тис. тон.

Сліп (slip - ковзати, насувати; building slip - суднобудівний сліп) це суднопіднімальна капітальна споруда, призначене для підйому і спуску візків одного або відразу декількох судів, які переміщуються по рейкових шляхам під похилом.

На відміну від елінгів сліпи обладнані бічними надводними стапелями з одного або з обох боків, на які відкочуються підняті на візках судна, що значно збільшує пропускну здатність споруди і покращує умови для проведення ремонтних робіт [3].

За конструктивними особливостями сліпи поділяють на два види: поздовжні і поперечні.

Поздовжній сліп обладнаний тільки похилою площиною і не має горизонтальної частини. На відкрите стапельне місце підняте з води плавзасіб пересувають в двох напрямках перпендикулярних один одному [32].



Рис. 1.1 Поздовжній елінг використовується для ремонту суден масою 10 тис. тон судно Кехуе готове до спуску на воду

Поперечний гребінчастий сліп має похилу (підйомно-спускову) і горизонтальну площадку (відкритий або критий стапель), є розширеним варіантом поперечного елінгу за рахунок горизонтального продовження берегової похилої площини.

На ньому плавзасіб піднімається на комплекті підйомних візків і передається для горизонтального пересування на комплект стапельних самохідних візків. Даний вид стапельів є найпоширенішим типом судноремонтних споруд.

В цілому елінги і сліпи є складними інженерними механізмами [13], забезпеченими рейковими шляхами і потужними візками, що переміщуються електричними лебідками. Ці засоби вимагають серйозних фінансових вкладень не тільки на етапі будівництва і обслуговування після введення в експлуатацію [28].



Рис. 1.2 Елінг на судноремонтному заводі Neptune (Голландія) призначений для підйому по рейкових шляхах відремонтованих суден

Вони зручні при ремонті і будівництві суден в хороших умовах праці на відкритому майданчику. Та є найбільш поширеним способом підйому (спуску) суден на похилій площині за допомогою косякових візків [10]. Особливості експлуатації підводної частини спускових рейкових доріжок споруд вимагають постійної підтримки їх збереження та експлуатаційної придатності виключаючи ймовірності виникнення аварійних ситуацій при виробництві суднопіднімальних або судноспускових робіт [14].

## **1.2. Визначення напрямків підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд**

Обстеження і оперативний контроль технічного стану портових гідротехнічних споруд утворюють комплексну систему технічного контролю цих об'єктів, що забезпечує ефективне використання, збереження і безпеку експлуатації споруд протягом встановленого терміну їх служби [15].

Обстеження споруд поділяють:

- на первинні комплексні обстеження - проводяться не пізніше ніж через шість місяців після введення споруд в експлуатацію;
- чергові комплексні обстеження - проводяться не рідше одного разу на п'ять років (після закінчення терміну дії свідоцтва про придатність споруди до експлуатації) [30];
- позачергові обстеження - проводяться при порушеннях нормативних умов експлуатації, коли виникають обґрунтовані сумніви в працездатності конструкцій споруди, при виникненні аварійних пошкоджень конструкцій, а також після реконструкції або капітального ремонту;
- спеціальні обстеження (спостереження за загальними та місцевими деформаціями і зсувами споруд [23], їх досвідчена огрузка, обстеження ґрунтів підстав і засипки, розтин заглиблених елементів споруд) - виконуються у випадках виявлення ознак неприпустимих деформацій і відхилень планово-висотного положення споруди від проектних значень [27].

Оперативний контроль технічного стану споруд проводять для забезпечення їх безпечної експлуатації шляхом своєчасного виявлення дефектів і порушень режиму експлуатації та вжиття заходів, щодо усунення даних дефектів і порушень [31]. Методика і обсяг технічних оглядів і спостережень для контролю, включаючи вимірювання, повинні забезпечувати достовірність і повноту одержуваної інформації для підготовки обґрунтованого висновку про поточний технічний стан споруд і розробки заходів з їх технічного обслуговування з метою забезпечення безпечної експлуатації об'єктів [53].

Розробка інтелектуальних систем оцінки технічного стану полягає в розробці спеціальних алгоритмів, які допомагають обслуговуючому персоналу прийняти правильне рішення про технічний стан в даний момент роботи.

Застосування принципу неперервного аналізу, при якому програмний комплекс за допомогою спеціальних пристроїв автоматично аналізує поточні умови експлуатації і дає спеціальні адаптовані рекомендації сервісному

персоналу і оператору, є перспективним напрямком розвитку системи технічної експлуатації.

Принцип дистанційного діагностування забезпечує безперервний оперативний контроль технічного стану систем і конструкції суднопіднімальних та судноремонтних споруд і виявлення перед відмовного стану. Дистанційне діагностування являє собою процес визначення технічного стану об'єкта діагностування на віддаленій відстані, за допомогою отримання сигналів з датчиків, встановлених на суднопіднімальних та судноремонтних спорудах.

Використання систем контролю технічного стану суднопіднімальних та судноремонтних споруд, що володіють функціями збору і передачі інформації про поточний стан, допомагають прийняти додаткові заходи для зниження ризику появи непрогнозованої відмови систем і агрегатів, дозволить не тільки неперервно виконувати задану роботу більш тривалий час, а й збільшить експлуатаційний термін загалом.

Метою контролю технічного стану є визначення дійсного технічного стану суднопіднімальних та судноремонтних споруд, забезпечення їх справності, перевірки придатності до їх безпечного використання, надійності спуску та підйому засобів водного транспорту та охорони людського життя.

Основними функціями системи технічної діагностики є:

- оцінка стану суднопіднімальних споруд;
- пошук несправностей та причин відмови;
- прогнозування технічного стану.

Загальна схема напрямків підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних споруд наведена на рисунку 1.3.

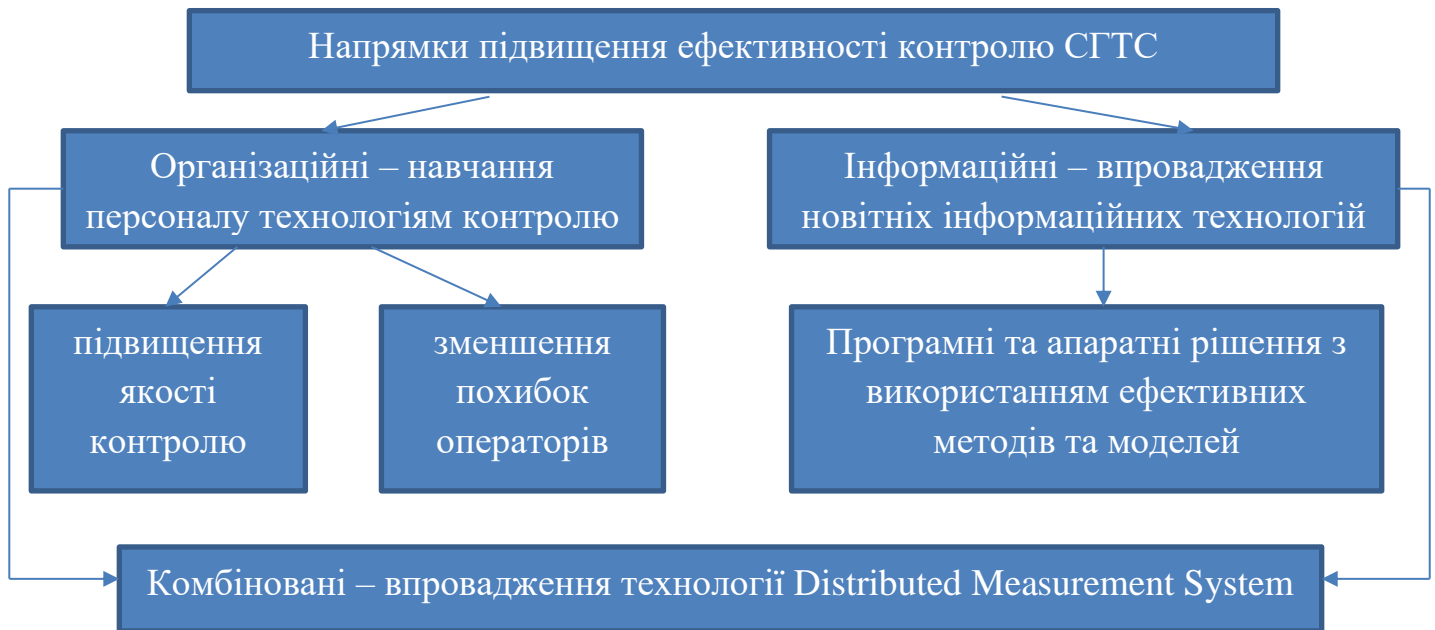


Рис. 1.3 Напрямки підвищення ефективності контролю технічного стану суднопіднімальних споруд

### 1.3. Дослідження сучасних та перспективних систем контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд

Основна роль впровадження систем контролю технічного стану - підвищення рівня ефективності, мобільності і полегшення праці [42]. Завдяки цим змінам зростає рівень конкурентоспроможності на ринку, йде потужний зріст використання ресурсної бази.

Підвищення надійності і ефективності експлуатації суднопіднімального і судноремонтного обладнання зажадало розширеного застосування компонентів технічної діагностики для оцінки і прогнозування фактичного технічного стану обладнання [36].

Поліпшення стратегії експлуатації та обслуговування суднопіднімального і судноремонтного обладнання може бути досягнуто тільки при комплексному підході до розробки та впровадження відповідного діагностичного забезпечення.

Перед системами діагностичного забезпечення стоять завдання вибору раціональної стратегії обслуговування обладнання; рівня діагностування та



структурних параметрів, що характеризують його технічний стан; методів діагностики та діагностичних параметрів; способів вимірювання діагностичних параметрів; алгоритмів виділення діагностичної інформації; апаратного забезпечення діагностування; методів прогнозування та оцінки залишкового ресурсу.

#### *Глибина діагностування*

Для вирішення цього завдання можуть застосовуватися різні методики. Перш за все, техніко-економічний аналіз, який передбачає зіставлення зниження експлуатаційних витрат, пов'язаних з відмовами, простоєм і ремонтами обладнання, і вартості розробки, поставки й експлуатації діагностичного забезпечення. Зрозуміло, що експлуатаційні втрати зі збільшенням глибини діагностування знижуються, а вартість діагностичного забезпечення при цьому збільшується. Відповідними сумарними витратами, що дозволяє зробити висновок про можливість застосування оптимізаційного підходу, якщо в якості критерію розглядається економічний показник.

Для оцінки впливу можливих відмов обладнання на рівень відповідних витрат доцільно застосування сукупності різних способів оцінки значущості обладнання. Пріоритетним слід вважати оснащення засобами діагностики обладнання, що має важливе значення для функціонування суднопіднімального і судноремонтного обладнання.

Не менш важливо і застосування статистичного аналізу досвіду експлуатації обладнання, оскільки саме практика є кінцевим критерієм істинності наукових гіпотез [37]. Ключовими моментами у відповідних методиках є способи визначення закону розподілу даних про фактичну надійності обладнання, наприклад, про напрацювання на відмову. Розробниками систем контролю технічного стану було розроблено програмне забезпечення алгоритму, основними відмінностями якого є угруповання вибірки за критерієм Стерджеса, інтерактивний режим спілкування з комп'ютером і наочне представлення результатів.

Але ніяка, навіть найдосконаліша методика не забезпечить отримання достовірних оцінок при відсутності представлених вихідних вибірок. В умовах масового виробництва виробів, що мають порівняно невеликі терміни служби, формування таких вибірок в прийнятні терміни є завданням тривіальним. Але це не відноситься до суднопіднімального і судноремонтного обладнання.

У цьому сенсі менш вразливими є методи ранжирування елементів обладнання шляхом оцінки впливу їх надійності на працездатність. Дієвим інструментом вирішення таких завдань є загальний логіко-імовірнісний метод, теоретичні основи і програмна реалізація.

Безсумнівний інтерес представляє можливість отримання результатів у вигляді діаграм вкладів елементів в надійність системи (позитивних або негативних). Такі діаграми можуть бути використані для порівняльної оцінки ефективності діагностичних завдань. Слабким місцем такого підходу є те, що малоімовірні події автоматично відносяться до малозначущих, незалежно від величини можливого збитку, який вони можуть викликати. Тим часом статистика морських аварій (і не тільки морських) показує, що малоімовірні, і, отже, неочікувані негативні події теж трапляються, причому, чим менше їх очікують, тим катастрофічнішою їх наслідки.

Ці обставини можна врахувати, якщо для оцінки значущості обладнання використовувати таку категорію, як ризик, який у відповідних стандартах визначається як «поєднання ймовірності події та її наслідків» [89]. Допускається як бальна оцінка ризику, що отримується шляхом проставлення дискретних значень індексів частоти відмов і ступеня тяжкості, так і пряма кількісна оцінка ризику у вигляді твору ймовірності небажаного події на вартість збитку. Методологія ФОб прийнята на озброєння Міжнародною морською організацією (ІМО) для формалізованої оцінки застосування і ранжирування діагностичних завдань.

### *Імітаційне моделювання*

Дієвим інструментом оцінки можливих наслідків спотворення характеристик або повних відмов елементів стохастичних систем є імітаційне моделювання режимів їх експлуатації, наприклад, математична модель автоматизованої гідравлічної системи. Стохастичними елементами системи є споживачі, які випадковим чином змінюють у часі свої запити у відповідність з рівномірним і нормальним законами розподілу [19].

Модель дозволяє налаштовувати характеристики, датчиків і дослідити поведінку системи, як при різних режимах нормальної експлуатації, так і при повному або частковому порушенні працездатності окремих елементів [35]. Підсумкова статистика дозволяє оцінити як прямі збитки, викликані відмовами, так і їх вплив на коефіцієнти використання (а, отже, і на довговічність) системи [72].

### *Експертні оцінки*

Не слід випускати з уваги і думки кваліфікованих фахівців - експертів, які мають досвід проектування, випробувань і експлуатації суднопіднімального і судноремонтного обладнання. Для оцінки окремих якостей експертами застосовується цілий ряд більш-менш формалізованих прийомів [22]. Найбільш об'єктивні оцінки виходять при індивідуальному анкетуванні, оскільки на нарадах зазвичай перемагає думка найбільш авторитетного і харизматичного експерта, а метод мозкового штурму не дуже відповідає ментальності наших фахівців [93]. Із способів заповнення анкет найбільшою популярністю користуються рангові оцінки і розстановка вагових коефіцієнтів. Для згладжування флуктуації індивідуальних думок застосовують усереднення анкетних даних і оцінюється ступінь узгодженості суджень експертів за допомогою коефіцієнта конкордації.

### *Три рівня діагностичних завдань*

Підвищення достовірності визначення раціональної глибини діагностування вимагає комплексного застосування розглянутих методик. Був

запропонований алгоритм, що включає 2 етапи: спочатку виконується перебір специфікації списку обладнання, і та діагностична задача, яка визнається значущою в результаті застосування хоча б однієї з методик, включається до попереднього списку. Потім виконується його мінімізація за таким же принципом: потрапляння завдання під дію будь-якого із зазначених обмежувальних критеріїв призводить до її виключення зі списку.

Вартість розробки, впровадження та експлуатації діагностичних систем визначається, в першу чергу, специфічними особливостями застосованих методів діагностування. Вибір їх номенклатури можна впорядкувати, якщо за допомогою методу структурної декомпозиції виділити три рівня діагностичних завдань. Верхній рівень можна назвати енергетичним, оскільки він передбачає оцінку функціональних якостей устаткування в процесі перетворення і перенесення енергії. Найбільш актуальним завданням на цьому рівні є забезпечення автоматизованого пошуку причин порушення працездатності суднопіднімального і судноремонтного обладнання з точністю до функціонально-самостійних елемент (сліп, палі).

Вирішення цього завдання може бути забезпечене двома способами. Перший передбачає створення аналогової математичної моделі, що точно описує статику і динаміку об'єкта. В процесі діагностики її можна використовувати як еталон для ідентифікації можливих несправностей устаткування. SWOT-аналіз (SWOT - аналіз аббревіатура з початкових букв англійських слів: переваги, недоліки, можливості, загрози) дозволяє поряд з незаперечними перевагами цього способу виявити і істотну проблему, а саме: велику складність і трудомісткість створення і експериментального підтвердження адекватності такої моделі. Це може привести до того, що за час створення моделі сам об'єкт втратить новизну і потребуватиме модернізації.

Альтернативою є метод, який передбачає переклад вимірних значень в дискретну форму шляхом порівняння їх із заданими уставками. Це дозволяє описати стан кожного об'єкта логічними рівняннями, і рішеннями системи цих

рівнянь отримати еталонну діагностичну матрицю, що містить комбінації дискретних значень параметрів для різних нештатних ситуацій.

Діагностичний алгоритм передбачає циклічне опитування і дискретизацію параметрів під час експлуатації об'єкта, і в разі відхилень хоча б одного з них за поле допусків, пошук аналогічної комбінації в еталонній матриці. По знайденому номеру ситуації оператору можуть бути видані в графічній і текстовій формі діагнози, рекомендації та прогнози. Досвід розробки та апробації цієї методики показав, що такі діагностичні алгоритми здатні виконувати функції електронного порадики оператора, знижуючи ризик прийняття неправильних рішень в умовах великих потоків інформації і дефіциту часу.

#### *Діагностика на механічному рівні*

Наступний рівень діагностування передбачає ідентифікацію порушення структури матеріалів конструкції [8]. Як приклад вирішення такого завдання була розроблена методика виявлення втомних тріщин в робочих елементах. Обриви в результаті неконтрольованого розвитку тріщин є однією з причин важких аварій. Аналіз функціональних можливостей методів неруйнівного контролю, що застосовуються в лабораторних умовах, показує, що вони не дозволяють виключити такі аварії, незважаючи на дуже високу чутливість. Мабуть, ефективність методу діагностики слід визначати не чутливістю, а здатністю виявити дефект до того, як він досягне критичної позначки. Розрахунки напруженого стану з макротріщини показують [90], що закладений в їх конструкцію запас міцності дозволяє їм зберігати працездатність при пошкодженні приблизно 40%. Про це ж свідчать і результати фрактографічного аналізу. Умову своєчасного виявлення дефекту можливо кількісно виразити за допомогою критерію, що враховує швидкість росту і критичний розмір тріщини, часовий інтервал між процедурами діагностування і відносну нечутливість методу діагностики. Для зручності застосування цього критерію були виконані розрахунки спеціальної номограми в табличному і графічному вигляді [67]. З неї зокрема випливає, що ефективним може виявитися

метод, який поступається лабораторним по чутливості, але забезпечує контроль безпосередньо під час експлуатації суднопіднімального і судноремонтного обладнання [4]. При виборі такого методу можна скористатися тією обставиною, що удар і вібрація не тільки є ініціатором розвитку тріщин, а й самі параметри можуть змінюватися під дією тріщини. Аналіз діагностичних можливостей цих параметрів показав, що найбільший інтерес викликає вплив тріщини на власні частоти коливань в зв'язку зі зменшенням жорсткості [58]. Дослідження цього впливу було виконано методом кінцевих елементів [11]. На першому етапі виконувалося моделювання різних форм, що дозволило встановити перспективність контролю перших двох форм згинальних коливань. На другому етапі оцінювалися розподіл напружень, викликаних спільним впливом згинальних коливань і відцентрових сил [50]. Далі в найнебезпечнішому місці виконувалося моделювання поперечної тріщини. Воно показало досить помітну зміну власних частот при докритичному діапазоні пошкодження. Експериментально перевірявся вплив на коливальні властивості і їх спрощених моделей розташування тріщини і її розміру. Отримані результати для 1-й згинальної форми свідчать про те, що вплив тріщини зростає зі збільшенням її розміру і наближенням до вузлу коливань. Для другої форми ці залежності мають 2 максимуму, розташованих у вузлах коливань. Ці результати цілком зрозумілі фізично, оскільки саме в вузлах знаходяться зони найбільших динамічних напружень, викликаних вібрацією. У той же час це створює і сприятливу перспективу використання цього явища для діагностики, оскільки саме в цих зонах і слід очікувати найбільш інтенсивного накопичення втомних пошкоджень. зрозуміло, що безпосередній контроль власних частот коливань складно реалізувати. Для безконтактного виявлення цього явища під час переміщення по спусковим доріжкам сліпа можна скористатися дискретно-фазовим методом (ДФМ), суть якого полягає в тому, що вимірюють інтервали що залежать від часу між моментами проходження і спеціальних міток повз безконтактних датчиків, встановлених на тілі палі, і по їх розмаху судять по

амплітуді коливань. Перевірка метрологічних характеристик ДФМ показала, що обраний метод дає задовільні результати в околиці резонансного піку, але не в самій його вершині. Ця обставина змушує застосовувати спеціальні прийоми для визначення частотного зсуву резонансних піків.

#### *Методики прогнозування ТСО*

Ще одним важливим компонентом діагностичного забезпечення є методики прогнозування технічного стану обладнання. Найбільш споживані екстраполяційні і причинно-наслідкові методики. Суть першої полягає в накопиченні результатів моніторингу обраного діагностичного параметра, згладжування і апроксимації отриманого часового ряду і формування прогнозу шляхом екстраполяції апроксимуючої функції [65]. Ключовим моментом тут є якісне придушення випадкових флуктуацій сигналу і оптимальний вибір виду і параметрів апроксимуючої функції. Зручним способом вирішення цього завдання є переклад часових рядів в фазові площини шляхом І або L-інтегрування та подальшого вирішення інтегральних рівнянь. Сутність причинно-наслідкової методики полягає в попередньому дослідженні впливу режимних факторів на темп деградації технічного стану об'єкта і подальше використання цих трендів для оцінки зносів обладнання на заданих режимах експлуатації. У даній роботі ефективність методики перевірялася стосовно оцінки корозійних зносів пальової підстави спускових доріжок сліпа. Експериментальним шляхом було встановлено залежність швидкості корозії від температури води і швидкості потоку. Порівняльний аналіз виявив наявність у обох методик прогнозування як сильних, так і слабких сторін. Тому була зроблена спроба отримання своєрідного симбіозу їх алгоритмів. Його реалізація вимагає деякого розширення контрольованих параметрів і ускладнення програмного забезпечення, але його застосування відкриває можливість отримання достатньо достовірних оцінок не тільки короткострокових, а й середньострокових прогнозів.

## Висновки по розділу 1

1. Дослідження дозволяють зробити висновок про пріоритетність надійного забезпечення роботи існуючих і проєктованих судноремонтних і суднобудівних споруд. Але продовжує існувати проблема безпеки, яка пов'язана як з надійністю гідротехнічних споруд, так і з помилками персоналу та іншими чинниками.

2. Аналіз вказав на роль та місце заходів по контролю технічного стану суднопіднімальних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів в умовах експлуатації та шляхи підвищення ефективності даного процесу. А також місце даного завдання при вирішенні проблеми безпечної експлуатації гідротехнічних споруд. Визначена актуальність наукових та практичних досліджень у даному напрямку.

3. Дослідження сучасних та перспективних систем контролю технічного стану суднопіднімальних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів, з урахуванням думки вчених, визначає що на теперішній час можливість інтенсивного розвитку традиційних систем вимірювання технічних параметрів практично вичерпана. Подальше підвищення надійності і ефективності експлуатації суднопіднімальних гідротехнічних споруд вимагає розширеного застосування компонентів технічної діагностики для оцінки і прогнозування фактичного технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд. Тому найбільш перспективним напрямом удосконалення названих систем є їх комбінування, інтеграція та впровадження нових відповідних моделей та методів в розподіленій системі вимірювання.

4. Доведено, що в умовах інтенсивного розвитку інформаційних технологій, які дозволяють вирішувати складні завдання за рахунок інтегрування та автоматизації завдань вимірювання, в тому числі і завдань контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд. Також в роботі доведена важливість та сучасність існуючої тенденції створення інтегрованого



обладнання оцінки технічного стану, яка полягає в розроблені розподіленої системи вимірювання (Distributed Measurement System). Аналіз наукових та інженерних підходів створення та впровадження розподілених систем вимірювання дозволив виявити ряд системних недоліків та зауважень, а саме, відсутність функцій контролю технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів.

5. Таким чином, наукове завдання розробки методів і засобів діагностування та підвищення ефективності контролю технічного стану транспортної техніки, зокрема елементів і агрегатів суднопіднімальних гідротехнічних споруд, з метою впровадження їх в програмному та апаратному забезпеченні в Distributed Measurement System є новим та актуальним. Вирішенню цього завдання і присвячена дисертаційна робота.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОСНОВНИХ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Як відомо теоретичні формули для визначення несучої здатності палі отримані з розгляду силової схеми вже зануреної палі, за ідеалізованою схемою. В цьому випадку не враховується зміни, які відбуваються в навколишньому ґрунті при її зануренні. Численні лабораторні та натурні дослідження показали, що в процесі занурення палі відбувається часткове розвантаження природної структури взаємодіє ґрунту. При цьому ґрунт знеміцнюється і несуча здатність палі відразу після її забивання буде найменшою [70]. Після закінчення деякого часу - «відпочинку» палі, спостерігається зміцнення ґрунту в слідстві консолідації тіксотробних змін і ряду інших причин [25]. У процесі занурення палі відбувається випинання і часткове ущільнення ґрунту. На певній глибині занурення палі випинання стає великим і подальші занурення палі супроводжуються в основному ущільненням і деяким зміцненням ґрунту [57].

Для виконання чисельних розрахунків автором розроблений спеціальний модуль на мові C++ (QT framework), який введений складовою частиною в програмний комплекс.

Такий підхід дозволяє розрахувати можливості програмного комплексу на розрахунки гідротехнічних споруд. Всі розрахунки виконані спираючись на розроблене програмне забезпечення.

У тривимірному евклідовому просторі  $E^3$  вводиться нерухома прямокутна декартова координатна система  $Ox_1x_2x_3$ . У цьому просторі розглядається ґрунтовий масив і палеві конструкції, що знаходяться в ньому, як єдина пов'язана система, яка складається з безперервної сукупності матеріальних частинок. Їх деформації визначаються щодо прийнятої координатної системи  $Ox_1x_2x_3$ .

Для скорочення записів використовується індексне позначення і такі записи. Повторюваний індекс в одиночному вираженні, який називається німим, означає підсумовування від 1 до 3. Наприклад,

$$a_{kk} = a_{11} + a_{22} + a_{33}$$

$$a_{ks} \cdot b_{ks} = a_{11} \cdot b_{11} + a_{12} \cdot b_{12} + a_{13} \cdot b_{13} + a_{21} \cdot b_{21} + a_{22} \cdot b_{22} + a_{23} \cdot b_{23} + a_{31} \cdot b_{31} + a_{32} \cdot b_{32} + a_{33} \cdot b_{33}$$

$a_{ks} \cdot b_{ks}$  - записується як

$$a_1 \cdot b_{11} + a_2 \cdot b_{21} + a_3 \cdot b_{31}$$

$$a_1 \cdot b_{12} + a_2 \cdot b_{22} + a_3 \cdot b_{32}$$

$$a_1 \cdot b_{13} + a_2 \cdot b_{23} + a_3 \cdot b_{33}$$

де індекс, що не повторюється  $s$  називається вільним.

При диференціюванні функцій вводяться позначення:

$$(\ )_{,k} = \frac{\partial (\ )}{\partial x_k}, (\ )_{ks} = \frac{\partial^2 (\ )}{\partial x_k \cdot \partial x_s}$$

Скалярний добуток векторів  $\underline{a}$  і  $\underline{b}$  записується у вигляді:

$$\underline{a} \cdot \underline{b} = a_k \cdot a_k = a_{11} + a_{22} + a_{33}.$$

## 2.1. Розрахунок деформації пальової підстави спускових доріжок сліпа

Деформації можна записати в тензорною або векторній формі. У розрахунках вони зазвичай використовуються в компонентному вигляді.

Так, деформація в околиці частки визначається тензором деформації  $T_\varepsilon$ , який можна уявити в системі координат  $OX_1X_2X_3$  як

$$T_\varepsilon = \varepsilon_{ks} \cdot \underline{i}_k \cdot \underline{i}_s \quad (2.1)$$

Тут  $\varepsilon_{ks}$  - наступна сукупність компонентів тензора  $T_\varepsilon$ , записаних у вигляді симетричній матриці

$$[\varepsilon_{ks}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$\underline{i}_k \cdot \underline{i}_s$  - одиничні вектори координатних осей.

У зв'язку з рівністю  $\varepsilon_{ks} = \varepsilon_{sk}$ , кожне значення тензора  $T_\varepsilon$  відповідає в шестивимірному просторі деформацій вектору  $\underline{\varepsilon}$ , компоненти якого утворюють матрицю – стовпець

$$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{bmatrix} = [\varepsilon_{11} \varepsilon_{22} \varepsilon_{33} \varepsilon_{12} \varepsilon_{23} \varepsilon_{13}]^T \quad (2.3)$$

Вважається, що деформації системи відбуваються при малих подовженнях, зрушення і кутах повороту. Компоненти  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$  позитивні, якщо спостерігається подовження волокон системи уздовж відповідних осей координат, і негативні, якщо волокна коротшають. Компоненти  $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{23}, \varepsilon_{13}$  позитивні, якщо вони відповідають зменшенню кута між позитивними напрямками відповідних осей координат, і негативні при його збільшенні.

Тензор деформації можна представити у вигляді суми девіатора деформації  $T_{\varepsilon'}$  та шарового тензора  $T_{\varepsilon_0}$ . Ці нові тензори в компонентній формі записуються як

$$\varepsilon'_{ks} = \varepsilon_{ks} - \varepsilon_0 \cdot \delta_{ks}, \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{kk}, \quad (2.4)$$

Компоненти тензора деформації залежать від прийнятої системи координат. Але його інваріанти зберігають одні і ті ж значення в будь-якій системі координат. Базисні інваріанти мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} I_1(T_\varepsilon) &= \varepsilon_{kk}, \\ I_2(T_\varepsilon) &= \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{ks} \cdot \varepsilon_{sk}, \\ I_{23}(T_\varepsilon) &= \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{ks} \cdot \varepsilon_{sm} \cdot \varepsilon_{mk}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

У наступному викладі буде використовуватися наступна система інваріантів:

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \frac{1}{3} \cdot I_1(T_\varepsilon), \\ \varepsilon_i &= \sqrt{I_2(T_\varepsilon)}, \\ \varphi &= \frac{1}{3} \cdot \arcsin \left( -\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{I_3(T_\varepsilon)}{(I_2(T_\varepsilon))^{\frac{3}{2}}} \right), \quad -\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{\pi}{6}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

Де  $T_{\varepsilon'}$ ,  $(I_2(T_{\varepsilon'}))$ ,  $I_3(T_{\varepsilon'})$ , визначається по формулі (2.5) при заміні  $\varepsilon_{ks}$  на  $\varepsilon'_{ks}$ .

Величина  $3 \cdot \varepsilon_0 = I_1(T_\varepsilon)$  визначається відносно об'ємне розширення елементарного об'єму системи. Інтенсивність девіатора деформації  $\varepsilon_i$  характеризується середнє значення кута зрушення в частці системи.  $\varphi$  використовується для визначення подібності девіатором в сенсі пропорційності їх компонентів. Він пов'язаний з параметром Лоде  $\mu_\varepsilon$  в вигляді:

$$\mu_\varepsilon = \sqrt{3} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.7)$$

Головні деформації, які є також інваріантами, за умови  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$  знаходяться через інваріанти (2.6) як

$$\begin{aligned}
\varepsilon_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varepsilon_i \cdot \sin\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right) + \varepsilon_0, \\
\varepsilon_2 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varepsilon_i \sin \varphi + \varepsilon_0, \\
\varepsilon_3 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varepsilon_i \cdot \sin\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right) + \varepsilon_0,
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Компоненти вектору деформації  $\underline{\varepsilon}$  і компоненти вектора переміщень  $\underline{u}$  пов'язані між собою вирівняні Коші в векторній і компонентній формі:

$$\begin{aligned}
\underline{\varepsilon} &= L \cdot \underline{u} \\
\varepsilon_{ks} &= \frac{1}{2} \cdot (u_{k,s} + u_{s,k})
\end{aligned} \tag{2.9}$$

де оператор  $L$  дорівнює

$$[\varepsilon_{ks}] = \begin{bmatrix} (\quad)_{,1} & 0 & 0 \\ 0 & (\quad)_{,2} & 0 \\ 0 & 0 & (\quad)_{,3} \\ \frac{1}{2}(\quad)_{,2} & \frac{1}{2}(\quad)_{,1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}(\quad)_{,3} & \frac{1}{2}(\quad)_{,2} \\ \frac{1}{2}(\quad)_{,3} & 0 & \frac{1}{2}(\quad)_{,1} \end{bmatrix}.$$

У формулах (2.9) шість компонентів тензора деформації  $\varepsilon_{ks}$  визначають чисту (без обертань) деформацію системи і виражаються через дев'ять приватних похідних від компонент вектора переміщень  $u_{k,s}$ , які представляють тензор відносних деформацій  $T_{\partial u}$  який дорівнює:

$$T_{\partial u} = T_\varepsilon + T_\omega, \tag{2.10}$$

Де

$$[T_\omega] = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & 0 & \omega_{23} \\ \omega_{31} & \omega_{32} & 0 \end{bmatrix}, \omega_{ks} = -\omega_{sk}, \omega_{kk} = 0, \tag{2.11}$$

$$\omega_{ks} = \frac{1}{2} \cdot (u_{k,s} - u_{s,k}), k \neq s, \quad (2.12)$$

Тензор  $T_\omega$  визначає три відсутні компоненти деформації і представляє жорсткий поворот системи, а його компоненти  $\omega_{ks}$  називаються компонентами обертання.

Зміни деформованого стану в околиці матеріальної частки визначає траєкторія деформування, яку можна задати в шестивимірному просторі деформацій  $\varepsilon_{ks}$  або трьох інваріантів (2.6) за умови  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ .

## 2.2. Розрахунок напруження пальової підстави спускових доріжок сліпа

Через вектор напружень  $\underline{t}_n$ , діючий на майданчику з нормаллю  $\underline{n}$ , можна визначити симетричний тензор напружень, який характеризує напружений стан в точці і знаходиться за допомогою формули Коші

$$\underline{t}_n = \underline{n} \cdot T_\sigma \quad (2.13)$$

Його компоненти визначають, як

$$T_\sigma = \sigma_{ks} \cdot \underline{i}_k \cdot \underline{i}_s, [\sigma_{ks}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Напруги в точці системи можна також представити у вигляді вектору  $\underline{\sigma}$

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{bmatrix} = [\sigma_{11} \ \sigma_{22} \ \sigma_{33} \ \sigma_{12} \ \sigma_{23} \ \sigma_{13}]^T \quad (2.15)$$

За аналогією з тензором деформації можна визначити

$$\sigma'_{ks} = \sigma_{ks} - \sigma_0 \cdot \delta_{ks}, \sigma_0 = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{kk}, \quad (2.16)$$

Де  $\sigma'_{ks}$  - компоненти девіатора напруження;

$\sigma_0$  - середнє нормальне напруження.

Базові інваріанти тензора  $T_\sigma$  дорівнюють:

$$\begin{aligned} J_1(T_\sigma) &= \sigma_{kk}, \\ J_2(T_\sigma) &= \frac{1}{2} \cdot \sigma_{ks} \cdot \sigma_{sk}, \\ J_3(T_\sigma) &= \frac{1}{3} \cdot \sigma_{ks} \cdot \sigma_{sm} \cdot \sigma_{mk}, \end{aligned} \quad (2.17)$$

Нова система інваріантів, що має ясний фізичний зміст, визначається як

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \frac{1}{3} \cdot J_1(T_\sigma) \\ \sigma_i &= \sqrt{J_2(T_{\sigma'})} \\ \psi &= \frac{1}{3} \cdot \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3(T_{\sigma'})}{(J_2(T_{\sigma'}))^{3/2}}\right), -\frac{\pi}{6} < \psi < \frac{\pi}{6} \end{aligned} \quad (2.18)$$

де  $T_{\sigma'}$ ,  $J_2(T_{\sigma'})$ ,  $J_3(T_{\sigma'})$  знаходяться, по формулі (2.17) при заміні  $\sigma_{sk}$  на  $\sigma'_{ks}$ .

Перший варіант  $\sigma_0$  характеризує середнє нормальне напруження. Другий інваріант  $\sigma_i$  представляє інтенсивність дотичних напружень. Третій інваріант  $\psi$  визначає вид напруженого стану і пов'язаний з параметром Лоде  $\mu_\sigma$ , який характеризує орієнтацію головних осей тензора напружень і змінюється в межах, співвідношенням

$$\mu_\sigma = \sqrt{3} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.19)$$



Головні напруги за умови визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_i \cdot \sin\left(\psi + \frac{2}{3}\pi\right) + \sigma_0, \\ \sigma_2 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_i \cdot \sin\psi + \sigma_0, \\ \sigma_3 &= \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_i \cdot \sin\left(\psi + \frac{4}{3}\pi\right) + \sigma_0,\end{aligned}\tag{2.20}$$

За аналогією з траєкторією деформування можна задати траєкторію навантаження в шестивимірному просторі або в підпросторі трьох інваріантів (2.18) за умови  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ .

### 2.2.1. Принципи віртуальної роботи при розрахунку гідротехнічних споруд

Незалежно від механічних властивостей системи має місце статико-геометричний принцип, який виконується безвідносно до конкретного виду співвідношень напруги-деформації, тобто незалежно від того, чи є тіло твердим, пружним або пластичним [63], і називається принципом віртуальної роботи. Вважаємо, що матеріальні частинки системи що деформується знаходяться в рівновазі. Повідомляємо їй додаткове можливе нескінченно мале переміщення  $d\underline{u}$ , яке задовольняє геометричним граничним умовам. Додаткові напруги, що виникають в системі при таких переміщеннях, будуть нескінченно малі, і їх робота на них є величиною другого порядку малості, і нею нехтуємо. В цьому випадку отримуємо наступне співвідношення, яке представляє принцип віртуальної роботи

$$\int_V [\partial \underline{\varepsilon}]^T \cdot \underline{\sigma} \cdot dV = \int_V [\partial \underline{u}]^T \cdot \underline{Q} \cdot dV + \int_{S_q} [\partial \underline{u}]^T \cdot \underline{q} \cdot dS\tag{2.21}$$

де  $\underline{\partial \varepsilon}$  - вектор віртуальної деформації;

$\underline{\partial u}$  - вектор віртуальних переміщень;

$\underline{Q}$  - вектор масових сил;

$\underline{q}$  - вектор поверхневих сил, діючих на поверхню;

$S_q, V$  - об'єм системи.

Інтегруючи ліву частину співвідношень (2.21), отримуємо рівняння рівноваги і статичні граничні умови в векторній і компонентній формі

$$L^T \cdot \underline{\sigma} + \underline{Q} = 0, \quad (2.22)$$

$$\sigma_{ks,s} + Q_k = 0,$$

$$\underline{\sigma} \cdot \underline{n} = \underline{q},$$

$$\sigma_{ks} \cdot \frac{n_s}{S_q} = q_k, \quad (2.23)$$

де оператор  $L^T$  визначається з (2.9).

Крайові задачі теорії пластичності вирішуються зазвичай в збільшеннях напружень і деформацій. В цьому випадку позначимо через  $\underline{\sigma}^{i-1}$  напруження, отримані на  $i-1$  збільшенні поверхневого та об'ємного навантаження  $\underline{q}^{i-1}, \underline{Q}^{i-1}$ . Тоді на  $i$ -том збільшенні навантажень знаходимо повне напруження рівним

$$\underline{\sigma}^i = \underline{\sigma}^{i-1} + \Delta \sigma \quad (2.24)$$

а рівняння віртуальної роботи приймає наступний вигляд

$$\int_V [\underline{\partial \varepsilon}]^T \cdot \Delta \underline{\sigma} \cdot dV = \int_V [\underline{\partial u}]^T \cdot \underline{Q}^i \cdot dV + \int_{S_q} [\underline{\partial u}]^T \cdot \underline{q}^i \cdot dS - \int_V [\underline{\partial \varepsilon}]^T \cdot \underline{\sigma}^{i-1} \cdot dV, \quad (2.25)$$

### 2.3. Моделювання стану основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд

Рівняння стану або, як їх ще називають, визначальні рівняння дозволяють встановити зв'язок між напруженнями і деформаціями. Ці співвідношення замикають систему рівнянь, необхідну для вирішення як пружних, так і пружнопластичних завдань.

#### 2.3.1. Пружні моделі основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд

У загальному випадку для нелінійно-пружних ізотропних середовищ існує тензорна залежність між співвісними симетричними сполученими тензорами напружень  $T_{\sigma'}$  і деформації  $T_{\varepsilon}$ , яка в компонентній формі записується в наступному вигляді

$$\varepsilon_{ks} = \frac{\sigma_0}{3 \cdot K} \cdot \delta_{ks} + \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \left\{ \frac{\cos(3 \cdot \psi - \omega)}{\cos^3 \psi} \cdot \sigma'_{ks} + \frac{\sqrt{3} \cdot \sin \omega}{\sigma_i \cdot \cos(3 \cdot \psi)} \cdot \left[ \sigma'_{km} \cdot \sigma'_{ms} - \frac{2}{3} \cdot \sigma_i^2 \cdot \delta_{ks} \right] \right\}, \quad (2.26)$$

де  $K$  - модуль об'ємного розширення матеріалу;

$G$  - модуль зсуву;

$\omega = \psi - \varphi$  - фаза подібності девіаторов навантажень  $T_{\sigma}$  і деформацій  $T_{\varepsilon}$ .

Інваріанти  $\sigma_0, \sigma_i, \psi$  визначаються за формулами (2.18).

Якщо тензори  $T_{\sigma'}$  і  $T_{\varepsilon}$  не тільки соосни, але і подібні, тобто коли  $\varpi = 0$ , то формула перетворюється до виду

$$\varepsilon_{ks} = \frac{\sigma_0}{3 \cdot K} \cdot \delta_{ks} + \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \sigma'_{ks} \quad (2.27)$$

Дана формула може бути застосована тільки при простому навантаженні. Незалежність роботи напружень на деформаціях від шляху навантаження має місце при наявності потенціалу деформації, необхідні і достатні умови існування якого накладають певні умови на варіанти  $K$ ,  $G$ ,  $\omega$ . Ці питання детально досліджені в роботі. Наявність потенціалу деформації допускає існування деякої функції  $W(\varepsilon_{ks})$ , що диференціюється, яка називається пружним потенціалом, і має місце наступна рівність

$$\sigma_{ks} = \frac{\partial W(\varepsilon_{ks})}{\partial \varepsilon_{ks}} \quad (2.28)$$

Якщо функція  $W(\varepsilon_{ks})$  аналітична щодо своїх аргументів, то має місце рівняння [2]

$$\sigma_{ks} = D_{ksmn} \cdot \varepsilon_{mn} + D_{ksmnlr} \cdot \varepsilon_{lr} + \dots \quad (2.29)$$

Утримуючи в (2.29) кінцеве число членів ряду, можна отримати різні типи теорії пружності. Так, для лінійної теорії пружності з (2.28) і (2.29) слід

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \cdot D_{ksmn} \cdot \varepsilon_{ks} \cdot \varepsilon_{mn}, \\ \sigma_{ks} &= D_{ksmn} \cdot \varepsilon_{mn}, \end{aligned} \quad (2.30)$$

З симетрії тензорів  $T_\sigma$  і  $T_\varepsilon$  слід симетрія коефіцієнтів пружності  $D_{ksmn}$  за індексами з кожними двома послідовними їх парами. Звертаючи другу формулу з (2.30) і записуючи аналогічну формулу для збільшень, отримуємо

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ks} &= C_{ksmn}^e \cdot \sigma_{mn}, \\ d\varepsilon_{ks}^e &= C_{ksmn}^e \cdot d\sigma_{mn}, \end{aligned} \quad (2.30a)$$

Для ізотропного матеріалу

$$D_{ksmn} = \lambda \cdot \delta_{ks} \cdot \delta_{mn} + \mu \cdot (\delta_{km} \cdot \delta_{sn} + \delta_{kn} \cdot \delta_{sm}), \quad (2.31)$$

де  $\lambda, \mu$  - параметри Ламе.

### 2.3.2. Пружнопластичні моделі основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд

Рівняння стану деформаційних теорій пластичності встановлюють зв'язок між тензорами повних напружень і деформацій. Така постановка пружнопластичних задач призводить до спрощення їх рішень, але в свою чергу, породжує цілий ряд серйозних обмежень, дотримання яких істотно звужує клас допустимо розв'язуваних таким чином задач. Так, найбільш розроблена А.А. Ільюшиним деформаційна теорія малих пружних деформацій може бути застосовна тільки при простому навантаженні, яке в реальних умовах майже не зустрічається [61]. Найбільш повно питання застосовності деформаційних теорій пластичності розглянуті в роботах. Внаслідок істотної обмеженості цієї теорії для вирішення прикладних завдань, вона тут не застосовується.

Теорія пружнопластичних процесів А.А. Ільюшина застосовна до конструкційних матеріалів, але не до ґрунтів, тому тут буде використовуватися теорія пластичної течії зі зміцненням.

Відповідно до цієї теорії, при малих деформаціях повні деформації і їх збільшення можна представити у вигляді суми

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ks} &= \varepsilon_{ks}^e + \varepsilon_{ks}^p \\ d\varepsilon_{ks} &= d\varepsilon_{ks}^e + d\varepsilon_{ks}^p \end{aligned} \quad (2.32)$$

де  $\varepsilon_{ks}^e, d\varepsilon_{ks}^e$  - повні деформації та збільшення пружних деформацій, які можна визначати за формулою (2.30),  $\varepsilon_{ks}^p, d\varepsilon_{ks}^p$  - повні деформації та збільшення пластичної деформації, які необхідно визначити.

Опис пластичного деформування системи буде повністю визначено, якщо встановлені:

- 1) початок прояви пластичної течії;
- 2) закон течії, тобто співвідношення, що зв'язують деформації з напругою при навантаженні і розвантаженні;
- 3) закон зміцнення, що встановлює зміни течії, починаючи з появи пластичних деформацій.

Всі ці три умови пов'язані з припущеннями про існування в просторі напружень кусочно-гладкої поверхні, яка описується рівнянням

$$\int (\sigma_{ks}, \varepsilon_{ks}^p, \chi_m, d_m) = 0 \quad (2.33)$$

розділяє області пружного  $f < 0$  і пластичного  $f = 0$  деформування і називається поверхнею навантаження, а  $\int (\sigma_{ks}, \varepsilon_{ks}^p, \chi_m, d_m)$  - функцією навантаження.

Якщо параметри зміцнення і пластичні деформації дорівнюють нулю, то функція  $f_0(\sigma_{ks}, d_m)$  залежить від напруг і механічних параметрів і називається функцією плинності, тоді

$$f_0(\sigma_{ks}, d_m) = 0 \quad (2.34)$$

називається поверхнею плинності і визначає початок пластичної течії.

Модель ґрунту і матеріалу конструкцій системи, для якої має місце співвідношення (2.34), деформується без зміцнення і фіксує тільки два її стана:

- 1) дограничний, коли система деформується тільки пружно;
- 2) граничний, коли деформування системи супроводжується безмежним накопиченням пластичних деформацій.

Надалі будемо використовувати в основному поверхню навантаження (2.33). Якщо в кожній точці цієї поверхні функцію навантаження диференціюємо по  $\sigma_{ks}$ , то вона має в кожній з них єдину нормаль і називається регулярною.

Нехай напружений стан матеріальної частинки належить точці регулярної поверхні навантаження, яка називається точкою можливого навантаження. Потім відбувається зміна напруженого стану, що може привести до одного з трьох можливих станів.

Перше, приріст вектору навантажень  $d\underline{\sigma}$  (вектора довантаження) направлено всередину області, обмеженою поверхнею  $f = 0$ . У цьому випадку збільшення пластичної деформації і параметрів зміцнення дорівнюють нулю, а збільшення напруги пов'язані з приростом деформації законом Гука. Такий процес деформування називається розвантаженням. Він не змінює і не переміщує поверхню навантаження (а нормаль  $\underline{n}$  утворює з вектором  $d\underline{\sigma}$  тупий кут) і показаний на рис. 2.1.

При розвантаженні виконуються наступні нерівності

$$f_{,\sigma_{ks}} d\sigma_{ks} < 0, df < 0 \quad (2.35)$$

де

$$df = f_{,\sigma_{ks}} d\sigma_{ks} + f_{,\varepsilon_{ks}^p} d\varepsilon_{ks}^p + f_{,\chi_m} d\chi_m = 0 \quad (2.36)$$

є умови безперервної зміни поверхні навантаження.

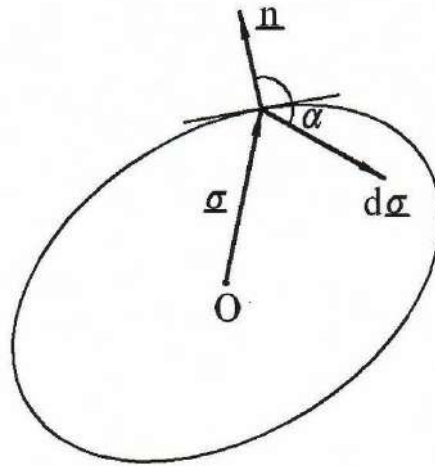


Рис. 2.1 Процес розвантаження

Друге, кінець вектору  $d\underline{\sigma}$  знаходиться на фіксованій поверхні навантаження. В цьому випадку приріст пластичної деформації і параметри зміцнення також дорівнюють нулю, а кут між векторами  $\underline{n}$  і  $d\underline{\sigma}$  дорівнює  $90^\circ$ . Такий процес деформування називається нейтральним навантаженням і зображений на рис. 2.2. При нейтральному навантаженні мають місце рівності

$$f_{,\sigma_{ks}}d\sigma_{ks} = 0, df = 0, \quad (2.37)$$

Третє, вектор  $d\underline{\sigma}$  направлений поза області, обмеженою поверхнею навантаження, викликаючи її переміщення таким чином, щоб кінець цього вектора перебував на цій поверхні, як показано на рис.2.3. Такий процес деформування називається активним навантаженням.

В цьому випадку поверхню навантаження може змінювати свою форму, повертатися і переміщатися. Збільшення пластичної деформації і параметри зміцнення будуть відмінні від нуля, а кут  $\alpha$  на підставі принципу максимуму Мізеса буде гострим.

Мають місце наступні співвідношення:

$$f_{,\sigma_{ks}}d\sigma_{ks} > 0, df = 0 \quad (2.38)$$



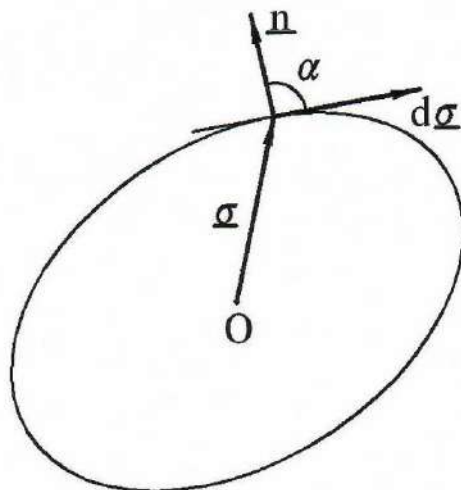


Рис. 2.2 Нейтральне навантаження

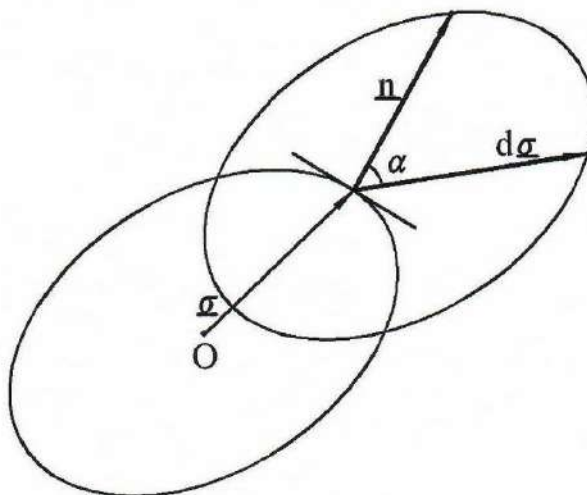


Рис. 2.3 Активне навантаження

Допускається, що поверхня навантаження може мати сингулярні точки. Цей випадок детально досліджений в роботах.

Закон течії заснований на принципі максимуму Мізеса або на постулаті Друкера [81]. Він для гладкої поверхні навантаження в компонентній формі записується як

$$(\sigma_{ks} - \sigma_{ks}^*) \cdot d\varepsilon_{ks}^p \geq 0, \quad (2.39)$$

де  $\sigma_{ks}$  - дійсні напруги, відповідні приросту деформації  $\sigma_{ks}^*$ ,  $d\varepsilon_{ks}^p$  - можливі напруги, що допускаються функцією навантаження за умови  $f(\sigma_{ks}^*, \varepsilon_{ks}^p, \chi_m, d_m) \leq 0$ . Якщо  $\sigma_{ks}^*$  збігається з точкою навантаження, то, тому з (2.39) слід додаткове нерівність

$$d\sigma_{ks} \cdot d\varepsilon_{ks}^p \geq 0 \quad (2.40)$$

Отримані нерівності називаються основними нерівностями теорії пластичності.

Ґрунти або матеріал пальових конструкцій, для яких виконуються нерівності, називаються стійкими.

З наведених вище нерівностей випливає, що поверхня навантаження для будь-якого напруженого стану  $\underline{\sigma}$  не може бути увігнутою і що вектор збільшення пластичної деформації  $d\underline{\varepsilon}^p$  в регулярній точці поверхні навантаження повинен бути спрямований по її зовнішньої нормалі  $\underline{n}$ .

Спираючись на отримані властивості функції навантаження і основні нерівності теорії пластичності, в регулярній її точці отримуємо закон течії в наступному вигляді

$$d\varepsilon_{ks}^p = d\lambda \cdot f_{,\sigma_{ks}} \quad (2.41)$$

або у вигляді

$$d\varepsilon_{ks}^p = C_{ksmn}^p \cdot d\sigma_{mn} \quad (2.41a)$$

де  $d\lambda$  - позитивна скалярна величина.

Співвідношення (2.41) називається асоційованим законом течії або деформування.

Підставляючи (2.41) у (2.36), після перетворень знаходимо

$$d\lambda = -\frac{f_{,\sigma_{ks}} \cdot d\sigma_{ks} + f_{,\chi_n}}{f_{,\varepsilon_{nm}^p} \cdot f_{,\sigma_{nm}}}, \quad (2.42)$$

У сингулярної точки поверхні навантаження, ґрунтуючись на підході, запропонованому В. Койтером, у вигляді принципу суперпозиції, закон течії можна представити у вигляді

$$d\varepsilon_{ks}^p = \sum_{n=1}^N c_n \cdot d\lambda \cdot f_{,\sigma_{ks}}^{(n)} \quad (2.43)$$

де  $c_n = 1$ , коли  $f^{(n)} = 0, d'f^{(n)} > 0$ ;  $c_n = 0$ , коли  $f^{(n)} < 0$  або  $f^{(n)} = 0, d'f^{(n)} \leq 0$ ;  $N$  - кількість гладких поверхонь, що проходять через сингулярну точку.

Під знаком суми будуть відмінними від нуля тільки ті складові вектору збільшення пластичних деформацій, для яких відповідні поверхні навантаження знаходяться в процесі активного навантаження. Нульовій складовій відповідають такі поверхні, щодо яких має місце розвантаження або нейтральне навантаження.

Закон зміцнення повинен враховувати різні властивості ґрунтів і матеріалу пальових конструкцій, які проявляються при пластичній деформації, і є спільним з законом течії. Можна виділити два основних типи зміцнення: ізотропне і анізотропне. Спочатку розглянемо ізотропне зміцнення. У цьому випадку функція навантаження залежить від шести інваріантів тензора напружень і пластичних деформацій і в загальному вигляді записується як

$$f(J_1(\underline{\sigma}), J_2(\underline{\sigma}), J_3(\underline{\sigma}), I_1(\underline{\varepsilon}^p), I_2(\underline{\varepsilon}^p), I_3(\underline{\varepsilon}^p), d_m) = 0 \quad (2.44)$$

Протягом всього процесу пластичного деформування система зберігає властивості ізотропії, а функція навантаження залишається інваріантною щодо

перетворення системи координат. При активному процесі навантаження поверхню навантаження розширюється, як показано на рис. 2.4.

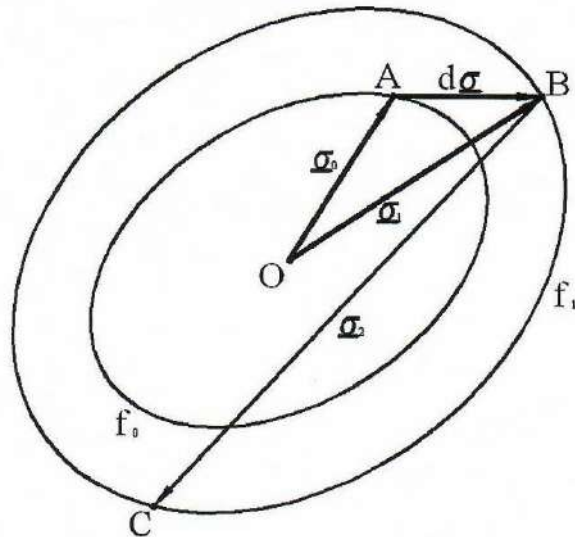


Рис.2.4 Зміни функції навантаження при ізотропному зміцненні і активному навантаженні

Як показано на рис. 2.4, навантаження до точки А є пружним. Потім відбувається процес активного навантаження і кінець вектору довантаження  $d\sigma$  переміщається в точку В. При цьому поверхня навантаження  $f_0$  розширюється до положення  $f_1$ , а початкова точка О залишається на місці. Далі відбулося розвантаження, і кінець вектору  $\underline{\sigma}_1$  перемістився в точку С. Модель ізотропного зміцнення відноситься до нестійких процесів пластичного деформування і призводить до задовільних результатів лише при шляхах навантаження, близьких до простих.

При анізотропном зміцненні функція навантаження в загальному випадку залежить вже від дев'яти інваріантів і має такий вигляд

$$f \left( J_1(\underline{\sigma}), J_2(\underline{\sigma}), J_3(\underline{\sigma}), I_1(\underline{\varepsilon}^p), I_2(\underline{\varepsilon}^p), I_3(\underline{\varepsilon}^p), I_{11}(\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}^p), I_{12}(\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}^p), I_{21}(\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}^p), d_m \right) = 0, \quad (2.45)$$

де спільні інваріанти визначаються в компонентній формі як

$$\begin{aligned} I_{11}(\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}^p) &= \sigma_{ks} \cdot \varepsilon_{ks}^p, \\ I_{12}(\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}^p) &= \frac{1}{3} \cdot \sigma_{ks} \cdot \varepsilon_{sm}^p \cdot \varepsilon_{mk}^p, \\ I_{21}(\underline{\sigma}, \underline{\varepsilon}^p), d_m &= \frac{1}{3} \cdot \sigma_{ks} \cdot \sigma_{sm} \cdot \varepsilon_{mk}^p, \end{aligned} \quad (2.46)$$

Розглянемо найпростіший варіант цієї теорії - кінематичне зміцнення. Відповідно до даного закону зміцнення при пластичній деформації поверхня навантаження переміщується в просторі напружень, як абсолютно тверде тіло, зберігаючи розміри, форму і орієнтацію початкової поверхні плинності, як показано на рис.2.5.

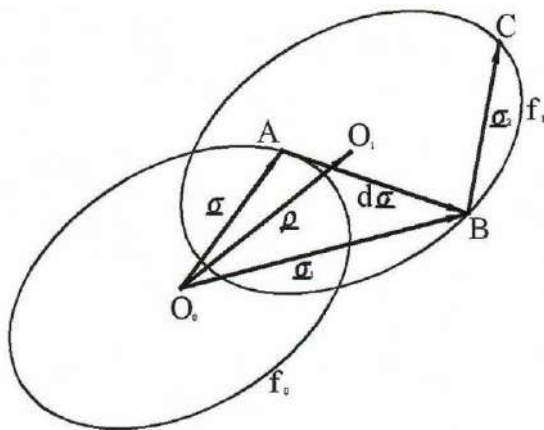


Рис.2.5 Зміна функції навантаження при кінематичному зміцненні і активному навантаженні

Початкова точка  $O$  перемістилася в процесі деформування в точку  $O_1$  на величину вектору  $\underline{\rho}$ . На цьому рисунку показаний такий же процес деформування, що і на рис.2.4. При кінематичному зміцненні функцію навантаження можна записати в наступному вигляді

$$f(\sigma_{ks} - \rho_{ks}) = 0 \quad (2.47)$$

де  $\rho_{ks}$  є компоненти тензора залишкових мікронапружень, а

$$\sigma_{ks}^0 = \sigma_{ks} - \rho_{ks}, \quad (2.48)$$

компоненти тензора активних напружень.

Компоненти дорівнюють нулю до появи в системі перших пластичних деформацій, залишаються постійними при нейтральному навантаженні і змінюються при активному навантаженні. Його в найбільш простому вигляді можна представити як

$$\rho_{ks} = a \cdot \varepsilon_{ks}^p, \quad (2.49)$$

де  $a$  - постійна, що визначається з експерименту.

Закон кінематичного зміцнення задовольняє процесам стійке деформування ґрунтів і матеріалів пальових конструкцій.

Підставляючи (2.30а) і (2.41а) в (2.32), отримуємо при активному навантаженні

$$d\varepsilon_{ks} = C_{ksmn}^{ep} \cdot d\sigma_{mn}, \quad (2.50)$$

де  $C_{ksmn}^{ep} = C_{ksmn}^e + C_{ksmn}^p$ .

При нейтральному навантаженні і розвантаженні  $C_{ksmn}^{ep} = C_{ksmn}^e$ .

При ізотропному зміцненні, слідуючи Куїні і Шмідту, можна прийняти

$$d\chi = \sigma_{ks} \cdot \varepsilon_{ks}^p, \quad (2.51)$$

Цей параметр зміцнення визначає роботу пластичної деформації. Можливо також записати

$$d\chi = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot d\varepsilon_{ks}^p \cdot d\varepsilon_{ks}^p, \quad (2.52)$$

Тут враховується довжина траєкторії деформування (параметри Одквіста).  
З формули (2.36), (2.41) і (2.52) отримуємо

$$d\lambda = -\frac{D_{ksmn}^e \cdot f_{,\sigma mn} \cdot d\varepsilon_{ks}}{f_{,\sigma ks} \cdot D_{ksmn}^e \cdot f_{,\sigma nm} - f_{,\chi} \cdot \sigma_{ij} \cdot f_{,\sigma ij}}, \quad (2.53)$$

Остаточно рівняння стану для пружно-пластичного деформування системи можна записувати в наступному вигляді

$$\begin{aligned} d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{ep} \cdot d\varepsilon_{nm}, \text{ коли } f = 0, d'f > 0; \\ d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^e \cdot d\varepsilon_{nm}, \text{ коли } f < 0 \text{ або } f = 0, d'f \leq 0, \end{aligned} \quad (2.54)$$

Якщо в якості зміцнення прийняти модуль пластичного зміцнення при розтягуванні стержня, який дорівнює

$$H' = \frac{d\sigma}{d\varepsilon^p} = \frac{E_m}{1 - E_m/E}, \quad (2.56)$$

то підкреслене в (2.55) вираз і дорівнюватиме  $H'$ .

При кінематичному зміцненні умова безперервності функції навантаження (2.36) перетвориться до виду

$$df = f_{,\sigma ks} d\sigma_{ks} + f_{,\rho nm} \rho_{nm, \varepsilon_{ks}^p} d\varepsilon_{ks}^p = 0, \quad (2.57)$$

В цьому випадку

$$d\lambda = -\frac{f_{,\sigma ks} d\sigma_{ks}}{f_{,\rho nm} \rho_{nm, \varepsilon_{ks}^p} f_{,\sigma ks}}, \quad (2.58)$$

Формули (2.54) зберігають свій вигляд, а в (2.55) необхідно підкреслений вираз змінити на  $f_{\rho_{nm}} \rho_{nm, \varepsilon_{ks}^p} f_{\sigma_{ks}}$ .

### 2.3.3 Функції навантаження основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд

У рівняння стану (2.54), (2.55) входять похідні від функції навантаження. Для всього різноманіття ґрунтів і будівельних матеріалів не існує єдиної функції навантаження. Як показали експериментальні дані, різні середовища, що деформуються описуються різними її представниками. Кожна функція навантаження представляє деяку модель ґрунтів що деформуються або матеріалів палювих конструкцій, наділену певними властивостями [62].

Тут наведені лише ті їх представники, які найбільш вірогідно підтвержені досвідченими даними для розглянутих матеріалів і базуються на суворих передумови механіки деформованих середовищ. Інші функції навантаження розглядалися в роботах [8,9].

Умова Кулона-Мора, як функція навантаження широко застосовується для ґрунтів і в деяких випадках для бетонів і має такий вигляд

$$\sigma_1 - \chi \cdot \sigma_2 - \sigma_p = 0, \quad (2.59)$$

де  $\chi = \sigma_p / \sigma_c$ ;

$\sigma_p, \sigma_c$  - граничний стан матеріалу при розтягуванні і стисненні;

$\sigma_1, \sigma_2$  - головні напруження.

Ця умова може бути записано через кут внутрішнього тертя  $\varphi$  і зчеплення  $c$ , використовуючи інваріанти  $\sigma_0, \sigma_1, \psi$  як



$$\left(\sigma_0 - \frac{\sigma_i \cdot \sin \psi}{\sqrt{3}}\right) \cdot \sin \varphi + \sigma_i \cdot \cos \psi - c \cdot \cos \varphi = 0, \quad (2.60)$$

Між  $\sigma_p$ ,  $\sigma_c$ ,  $\chi$  та  $\varphi$  існує наступний зв'язок

$$\begin{aligned} \sigma_p &= \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 + \sin \varphi}, \\ \sigma_c &= \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}, \\ \chi &= \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \end{aligned} \quad (2.61)$$

Якщо матеріал однаково працює на розтягування і стиснення, тобто  $\sigma_T = \sigma_p = \sigma_c$ , то з (2.59) і (2.60) відповідно отримуємо:

$$\begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_T &= 0, \\ 2\sigma_i \cdot \cos \psi - \sigma_T &= 0 \end{aligned} \quad (2.62)$$

Ці співвідношення визначають умови Тріска-Сен-Венана, яке широко застосовується для металів і сплавів.

Якщо в цих умовах величини  $\sigma_p$ ,  $\sigma_c$  або  $\varphi$ ,  $c$  постійні, то вони представляють функцію плинності. При змінних значеннях цих величин або вважаючи їх постійними, але додаючи в ці рівняння функцію, що враховує зміцнення матеріалу в процесі пружного деформування, то в цьому випадку наведені умови будуть представляти функцію навантаження. В якості такої функції, наприклад можна взяти:

$$h(\chi_i) = H' \cdot d\varepsilon_{ks}^p, \quad (2.63)$$

Де

$$d\varepsilon_3^p = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \varepsilon_{ks}^p \cdot \varepsilon_{ks}^p}, \quad (2.64)$$

$H'$  - визначається по формулі (2.56)

При кінематичному зміцненні необхідно в (2.60) замість  $\sigma_0, \sigma_i$  та  $\psi$  підставити  $\sigma_0^0, \sigma_i^0, \psi^0$ , які визначаються за формулами виду (2.18), в яких необхідно врахувати (2.48) при визначенні інваріантів  $J_k(T_{\sigma^0})$  по (2.17).

Визначимо похідні від функції навантаження (2.60), які входять в рівняння стану. Буде широко використовуватися формула диференціювання складної ситуації

$$f_{,\sigma_{ks}} = f_{,\sigma_0} \sigma_{0,\sigma_{ks}} + f_{,\bar{\sigma}} \bar{\sigma}_{,\sigma_{ks}} + f_{,\psi} \psi_{,\sigma_{ks}}, \quad (2.65)$$

Остаточно отримуємо такі формули

$$\sigma_{0,\sigma_{ks}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \sigma_{i,\sigma_{ks}} = \frac{1}{2\sigma_i} \begin{bmatrix} \sigma_{11} - \sigma_0 \\ \sigma_{22} - \sigma_0 \\ \sigma_{33} - \sigma_0 \\ 2\sigma_{12} \\ 2\sigma_{23} \\ 2\sigma_{13} \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

$$\psi_{,\sigma_{ks}} = -3 \begin{bmatrix} (\sigma_{22} - \sigma_0)(\sigma_{33} - \sigma_0) - \sigma_{23}^2 \\ (\sigma_{11} - \sigma_0)(\sigma_{33} - \sigma_0) - \sigma_{13}^2 \\ (\sigma_{11} - \sigma_0)(\sigma_{22} - \sigma_0) - \sigma_{12}^2 \\ 2[\sigma_{13} \cdot \sigma_{23} - (\sigma_{33} - \sigma_0) \cdot \sigma_{12}] \\ 2[\sigma_{12} \cdot \sigma_{13} - (\sigma_{11} - \sigma_0) \cdot \sigma_{23}] \\ 2[\sigma_{12} \cdot \sigma_{23} - (\sigma_{22} - \sigma_0) \cdot \sigma_{13}] \end{bmatrix} - \sigma_i^2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\psi_{,\sigma_{ks}} = \psi_{,\sigma_i} \sigma_{i,\sigma_{ks}} + \psi_{,J_3(\sigma')} J_3(\sigma')_{,\sigma_{ks}}$$

$$\psi_{,\sigma_i} = -\frac{tg3\psi}{\sigma_i}, \psi_{,J_3(\sigma')} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cos \psi_i^3} \quad (2.67)$$

$$J_3(\sigma')_{,\sigma_{ks}} = \begin{bmatrix} \left( \sigma'_{22} \sigma'_{33} - \sigma_{23}^2 + \frac{1}{3} \sigma_i \right) \left( \sigma'_{22} \sigma'_{33} - \sigma_{11}^2 + \frac{1}{3} \sigma_i \right) \\ \left( \sigma'_{11} \sigma'_{22} - \sigma_{12}^2 + \frac{1}{3} \sigma_i \right) 2(\sigma_{13} \sigma_{12} - \sigma'_{11} \sigma_{23}) \\ 2(\sigma_{11} \sigma_{23} - \sigma'_{22} \sigma_{13}) 2(\sigma_{23} \sigma_{13} - \sigma'_{33} \sigma_{12}) \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$$\begin{aligned}
 f_{,\sigma_0} &= \sin \varphi, \\
 f_{,\sigma_i} &= \left[ (1 + \operatorname{tg} \psi \cdot \operatorname{tg} 3\psi) - \frac{\sin \psi}{\sqrt{3}} (\operatorname{tg} \psi - \operatorname{tg} 3\psi) \right] \cos \psi, \\
 f_{,\psi} &= \frac{\sqrt{3} \sin \psi - \sin \varphi \cos \psi}{2\sigma_i^2 \cos \psi},
 \end{aligned} \tag{2.69}$$

Друга похідна  $f_{,\sigma_{ks}\sigma_{mn}}$  має громіздкий вигляд та тут не наводиться.

Похідні від функції плинності Тріска-Сен-Венана (2.62) мають такий вигляд

$$\begin{aligned}
 f_{,\sigma_i} &= 2(1 + \operatorname{tg} \psi \cdot \operatorname{tg} 3\psi) \cos \psi, \\
 f_{,\psi} &= -2\sigma_i \sin \psi,
 \end{aligned} \tag{2.70}$$

При кінематичному уточненні необхідно використовувати формулу диференціювання  $f_{,\sigma_{ks}}$  в наступному вигляді

$$f_{,\sigma_{ks}} = f_{,\sigma_{ks}^0} \sigma_{ks}^0 = f_{,\sigma_{ks}^0} \tag{2.71}$$

Друга рівність засноване на (2.48) і (2.49). Отже, в наведених вище формулах необхідно замінити  $\sigma_{ks}$  на  $\sigma_{ks}^0$ .

Ґрунти при пластичній деформації мають значну стисливість не тільки від формозміни, але і від всебічного стиснення. Отже, необхідний додатковий зв'язок між першими інваріантами  $\sigma_0$  і  $\varepsilon_0^p$  у вигляді

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_0^p &= f_0(\sigma_0), \\
 d\varepsilon_0^p &= f_{0,\sigma_0} d\sigma_0,
 \end{aligned} \tag{2.72}$$

Таким чином, визначено новий закон пластичної течії від всебічного стиснення. Він асоційований з наступною функцією навантаження

$$f, = f_0 - \varepsilon_0^p = 0, \tag{2.73}$$

Та має місце наступне співвідношення

$$d\varepsilon_0^p = f_{,\sigma_0} \sigma_{0,\sigma_{ks}} + f_{0,\sigma_0} d\sigma_0 \quad (2.74)$$

Поверхні  $f = 0$  і  $f_1 = 0$  обмежують область пружного стану системи. Для сингулярних точок залишається в силі принцип суперпозиції В.Койтера.

Деякі значення функції  $f_0$  наведені.

Так, як рівнянь (2.72) можна використовувати співвідношення, запропоновані С.С. Григоряном

$$\begin{aligned} \varepsilon_0^p &= \varepsilon_s [1 - \exp(-b \cdot \sigma_0)], \\ d\varepsilon_0^p &= b \cdot \varepsilon_s \cdot \exp(-b \cdot \sigma_0) d\sigma_0 \end{aligned} \quad (2.75)$$

або дрібно-лінійну залежність

$$\begin{aligned} \varepsilon_0^p &= \frac{\sigma_0 \cdot \varepsilon_s}{\sigma_0 - K_0 \cdot \varepsilon_s}, \\ d\varepsilon_0^p &= \frac{K_0 \cdot \varepsilon_s^2}{(\sigma_0 + K_0 \cdot \varepsilon_s)^2} d\sigma_0 \end{aligned} \quad (2.76)$$

де  $\varepsilon_s$  - граничне значення об'ємної деформації при  $\sigma_0 \rightarrow \infty$ , тобто при граничній пластичності матеріалу;

$K_0$  - модуль об'ємного деформування.

Умови Боткіна часто застосовуються до ґрунтів і встановлюють, що в граничному стані октаедричні дотичне напруження є функцією октаедричної нормальної напруги. У інваріантній формі воно записується в наступному вигляді

$$(\sigma_c - \sigma_p)\sigma_0 + \sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_p)\sigma_i - 2\sigma_p\sigma_c = 0, \quad (2.77)$$

за однакової кількості  $\sigma_T = \sigma_p = \sigma_c$  з (2.77) впливає умова Мізеса

$$\sqrt{3} \cdot \sigma_i = \sigma_T \quad (2.78)$$

яке широко використовується для металів і сплавів.

При ізотропному і кінематичному зміцненні необхідно виконати такі ж перетворення, як і для умови Кулона-Мора.

Похідні від функції (2.77) визначаються як

$$\begin{aligned} f_{,\sigma_0} &= \sigma_c - \sigma_p, \\ f_{,\sigma_i} &= \sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_p), \\ f_{,\sigma_{ks}\sigma_{nm}} &= \frac{\sqrt{3}}{2} [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2], \end{aligned} \quad (2.79)$$

інші похідні наведені в (2.66).

Розроблено модифікацію моделі Боткіна для пружно-пластичного ділантіруючого середовища, до якого відносяться ґрунти.

#### **2.4. Двопараметрична модель залежності фактору цілісності основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд**

Оптимальне рішення задач визначення технічного стану складних об'єктів може бути отримано тільки в результаті аналізу множини технічних станів  $W$ , в яких ці об'єкти можуть перебувати в період експлуатації. Цей аналіз може бути виконаний як теоретично, так і експериментально.

Побудова алгоритмів розпізнавання в діагностиці істотно полегшується в тому випадку, коли вдається побудувати діагностичну модель, що встановлює зв'язок між простором станів і простором діагностичних ознак. При цьому не має значення, в якій формі представлено цей зв'язок.

Діагностична модель відповідає призначенню в тому випадку, коли вона дозволяє:

- 1) сформулювати умови розбиття множини  $W$  на дві підмножини справних  $W'$  і несправних  $W''$  станів;
- 2) отримати критерії для оцінки працездатності об'єкта діагностики (розрізнення станів у підмножині  $W'$ )
- 3) встановити ознаки несправностей що виникли (розрізнення станів в підмножині  $W''$ )
- 4) встановити відповідність між простором станів  $W$  і простором діагностичних ознак  $D$ .

Вибір типу моделі залежить від таких факторів, як умови експлуатації, конструктивне виконання, тип комплектуючих елементів, характер взаємодії деталей, умови збудження коливань, характер цільової функції та інше.

В якості діагностичних моделей можна розглядати диференціальні і алгебраїчні рівняння, логічні співвідношення, матриці вузлових провідностей, функціональні, структурні, регресійні і інші моделі, що дозволяють зв'язати параметри технічного стану з характеристиками об'єкта [40].

Представлення реального об'єкта діагностичною моделлю дозволяє відволіктися від його фізичної природи і формалізувати рішення діагностичних завдань.

Для того щоб розробити будь який метод і технологію діагностування складного агрегату, недостатньо знати закономірності зміни параметрів його окремих вузлів. Необхідно мати узагальнений логічний або аналітичний опис найбільш важливих властивостей всього об'єкта в цілому, яке повинно включати перелік елементів що відмовляють найбільш часто, які структурні і діагностичні параметри і зв'язки між ними відповідають цим елементам.

Найбільш простий логічний опис об'єкту контролю виражається структурно-наслідковою схемою, зображеною на рис. 2.6.

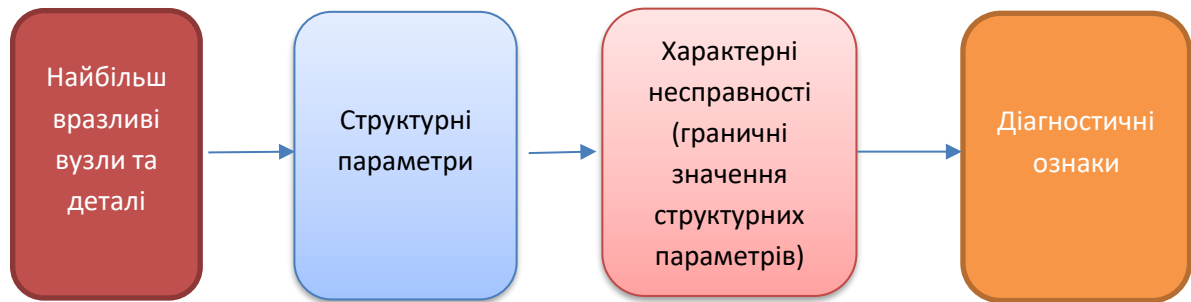


Рис. 2.6 Структурно-наслідкова схема об'єкту діагностування

Структурно-наслідкова схема створюється на основі інженерного вивчення устрою об'єкта і його функціонування, статистичного аналізу показників надійності і діагностичних параметрів. Вона дає наочне уявлення про найбільш уразливі та найбільш відповідальні елементи та зв'язки структурних і діагностичних параметрів. Користуючись цією схемою, можна вибрати найбільш важливі діагностичні ознаки, отже, методи та засоби діагностування [40].

Грунтуючись на здоровому глузді і конструктивному виконанні суднопіднімальної гідротехнічної споруди, в якості моделі застосовної для пошуку найбільш вагомих діагностичних ознак технічного стану, вибираємо регресійну модель.

#### 2.4.1. Регресійна модель контролю технічного стану

Процес змін параметрів технічного стану механізму при його експлуатації – багатофакторний. Тому при побудові системи діагностичних ознак доцільний підхід, що передбачає побудову багатофакторної моделі залежності функцій відгуку системи (характеристики вібраційного сигналу палі) від параметрів технічного стану.

В умовах обмежених можливостей набору статистичних даних внаслідок високої вартості діагностичних випробувань найбільш ефективним є метод побудови регресійної моделі, що базується на використанні математичного

апарату планування експерименту [40]. Цей метод дозволяє відшукати «характерну» діагностичну ознаку, однозначно пов'язану з будь-яким одним параметром технічного стану.

Планування експерименту – це процедура вибору числа та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю.

При розгляді функції відгуку, що залежить від багатьох факторів, результати спостережень представляють поліноміальну модель [60]. Отримане при цьому наближене рівняння зв'язку параметрів технічного стану  $m_i$  (факторів) та діагностичної ознаки  $q$  (функція відгуку) називають рівнянням регресії. У досліджуваному випадку, для створення моделі контролю технічного стану суднопіднімальних споруд, добре наближення дала лінійна регресійна модель виду:

$$q = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i m_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ l \neq 1}}^k a_{ij} m_l m_j, \quad (2.80)$$

де друга сума характеризує ефекти взаємодії  $k$  нормованих факторів.

Задача моделювання зводиться до знаходження коефіцієнтів регресії  $a_i$  та оцінки адекватності моделі відповідно до визначених правил [40]. Число рівнянь у системі (2.80) дорівнює числу  $p^k$  де  $p$  число дискретних рівнів варійованих параметрів технічного стану, які повинні задовольняти вимогам незалежності, сумісності та керованості;  $k$  — число факторів.

Наприклад, для суднопіднімальної споруди, приймаємо число дискретних рівнів  $p = 3$ , а число факторів  $k = 2$ . Обчислимо число рівнянь системи  $p^k = 3^2 = 9$ .

У процесі обробки результатів експерименту оцінюють такі величини:

1) Дисперсію функції відгуку за результатами  $n$  паралельних дослідів



$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n - 1} \quad (2.81)$$

де  $\bar{q} = \sum_{i=1}^n y_i/n$  - математичне очікування;  $n - 1$  - число ступенів свободи;

2) Дисперсію відтворюваності функції відгуку за результатами всіх дослідів

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_{q=1}^N \sum_{i=1}^n (q_{ri} - \bar{q}_r)^2}{N(n - 1)}, \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n; \\ r = 1, 2, \dots, N; \end{matrix} \quad (2.82)$$

3) Оцінку однорідності дисперсії по - критерію Фішера

$$\frac{S_{max}^2}{S_{min}^2} < F_T, \quad (2.83)$$

де  $F_T$  табличне значення  $F$ -критерія при обраному рівні значущості;

4) Коефіцієнти регресії

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^N q_i m_{ji}}{N}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, k; \quad (2.84)$$

5) довірчий інтервал коефіцієнту регресії

$$\Delta a_j = \pm t \frac{S_{\{y\}}}{N}, \quad (2.85)$$

де  $t$  - табличне значення критерію Стьюдента при числі ступенів свободи, з яким визначалось  $S_{\{y\}}^2$  і обраному рівні значущості [40];

б) адекватність моделі

$$\frac{S_{ad}^2}{S_{\{y\}}^2} < F_T, \quad (2.86)$$

де  $S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (q_i - \hat{q}_i)^2}{N - (k+1)}$  - дисперсія адекватності;  $\hat{q}$  - розрахункове значення функції відгуку.

У граничному випадку, коли діагностична ознака є функцією одного аргументу  $\hat{q} = a_0 + a_i m_i$  його називають характерним. В результаті проведених розрахунків в рівнянні моделі залишаються тільки значущі члени, які суттєво впливають на формування даної діагностичної ознаки.

#### **2.4.2. Модель залежності кількісної характеристики технічного стану від двох параметрів**

На підставі проведених розрахунків (Таблиця 2.1.) залежності частоти власних коливань від зміни температури і щільності елементів СГТС з використанням програмного забезпечення для аналізу методом кінцевих елементів і мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics, була отримана аналітична модель (1) залежності фактору цілісності основних несучих елементів СГТС  $q_{ц}$  від двох параметрів - температури та частоти власних коливань, наступного виду:

$$q_{ц} = a_0 + a_T T + a_F F \quad (2.87)$$

де  $T$  – температура основних несучих елементів СГТС, °С;  
 $F$  – частота власних коливань основних несучих елементів СГТС, Гц;  
 $a_0, a_T, a_F$  – коефіцієнти двопараметричної моделі, які визначаються за допомогою методу оптимізації Левенберга –Марквардта.

Графік залежності фактору цілісності основних несучих елементів СГТС представлено на рис. 2.7, де зелений колір на площині відображає справний технічний стан елемента, червоний колір відображає несправний технічний стан. Жовтий та помаранчевий колір характеризують перехід між технічними станами.

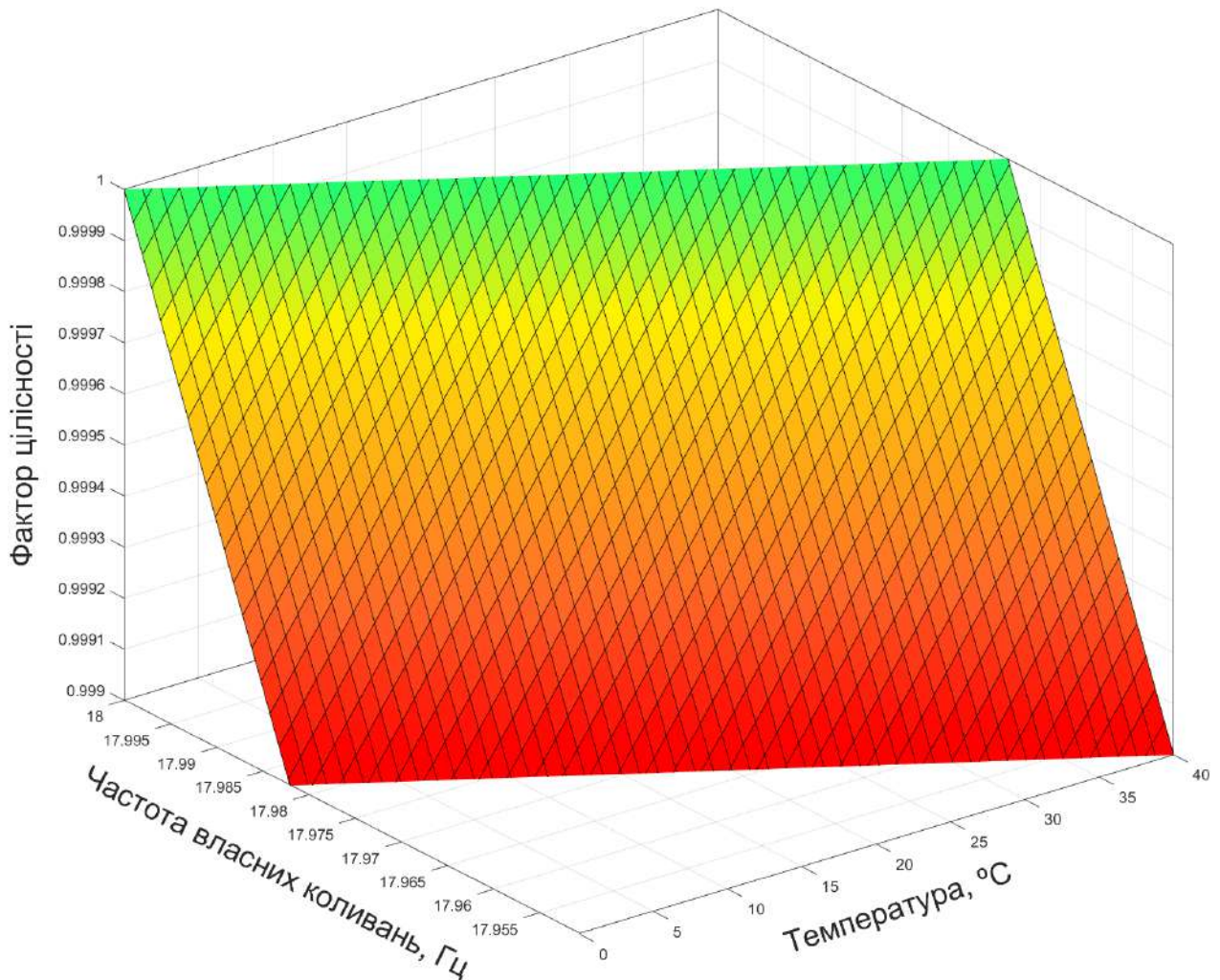


Рис. 2.7 Графік залежності цілісності основних несучих елементів СГТС від температури елемента та частоти власних коливань

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків залежності частоти власних коливань елементів СГТС виконаних в COMSOL Multiphysics

40,0	36,0	32,0	28,0	24,0	20,0	16,0	12,0	8,0	4,0	0,0	T, °C/q <sub>п</sub>
17,9685	17,9717	17,9748	17,9780	17,9811	17,9843	17,9874	17,9906	17,9937	17,9969	18,0000	1,0000
17,9667	17,9699	17,9730	17,9762	17,9793	17,9825	17,9856	17,9888	17,9919	17,9951	17,9982	0,9999
17,9649	17,9681	17,9712	17,9744	17,9775	17,9807	17,9838	17,9870	17,9901	17,9933	17,9964	0,9998
17,9631	17,9663	17,9694	17,9726	17,9757	17,9789	17,9820	17,9852	17,9883	17,9915	17,9946	0,9997
17,9613	17,9645	17,9676	17,9708	17,9739	17,9771	17,9802	17,9834	17,9865	17,9897	17,9928	0,9996
17,9595	17,9627	17,9658	17,9690	17,9721	17,9753	17,9784	17,9816	17,9847	17,9879	17,9910	0,9995
17,9577	17,9609	17,9640	17,9672	17,9703	17,9735	17,9766	17,9798	17,9829	17,9861	17,9892	0,9994
17,9559	17,9591	17,9622	17,9654	17,9685	17,9717	17,9748	17,9780	17,9811	17,9843	17,9874	0,9993
17,9541	17,9573	17,9604	17,9636	17,9667	17,9699	17,9730	17,9762	17,9793	17,9825	17,9856	0,9992
17,9523	17,9555	17,9586	17,9618	17,9649	17,9681	17,9712	17,9744	17,9775	17,9807	17,9838	0,9991
17,9505	17,9537	17,9568	17,9600	17,9631	17,9663	17,9694	17,9726	17,9757	17,9789	17,9820	0,9990

Фактор цілісності основних несучих елементів СГТС  $q_{ц}$  – це кількісна характеристика технічного стану, яка характеризує фізичне зношення споруди та є співвідношенням фактичної частоти власних коливань  $F$  та очікуваної частоти власних коливань  $F_1$  для цілісного елемента ( $q_{ц} = 1$ ) при температурі  $T$ .

Для моделі, що зображена на рис. 2.7, за допомогою методу оптимізації Левенберга –Марквардта з використанням пакета прикладних програм Matlab, були отримані наступні коефіцієнти:

$$a_0 = -0,000875;$$

$$a_T = 4,377e^{-5};$$

$$a_F = 0,0556.$$

## Висновки до розділу 2

1. Дослідження принципів автоматизації контролю технічного стану суднопіднімальних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів визначило такі основні принципи: принцип узгодженості, суть якого в тому, що всі дії в процесі, що автоматизується повинні бути узгоджені між собою та з входами і виходами процесу. У разі прояву неузгодженості дій може статися порушення виконання процесу; принцип інтеграції – процес, що автоматизується повинен мати можливість інтегруватися в загальне середовище; принцип незалежності виконання – процес, що автоматизується повинен виконуватися самостійно, без участі оператора, або з мінімальним контролем з боку оператора. Оператор не повинен втручатися в процес, якщо процес виконується відповідно з встановленими вимогами.

2. Найбільш ефективною є стратегія удосконалення моделі контролю параметрів технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд, яка на відміну від існуючих базується на теорії пластичної течії з зміцненням, на принципі максимуму Мізеса і розробленої модифікації програми чисельного

розрахунку паль спускових доріжок сліпа спільно з ґрунтом основи, яка може бути використана при проектуванні та реконструкції гідротехнічних споруд. Це дозволяє оцінити напружено-деформований стан споруд в реальних умовах їх експлуатації, а не виконувати тільки перевірочні розрахунки по їх несучій здатності, як це робиться з теорії граничного стану;

3. Моделювання залежності фактору цілісності елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд за допомогою пружних та пружнопластичних моделей, виконаних в COMSOL Multiphysics, свідчить про те, що розробка є функціональною, тому що встановлює зв'язок між напруженнями і деформаціями. Модель є адекватною, а використане програмне забезпечення є досить надійним. Завдяки використанню швидких математичних апаратів модель є досить ефективна.

### РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Узагальненим рішенням розглянутих задач, що вирішуються в збільшеннях переміщень, називається вектор-функція  $d\bar{u}$  задовольняє співвідношенню

$$\int_V [d\sigma_{ks} \cdot d\varepsilon_{ks} + \sigma_{ks} \cdot (du_{n,k} \delta u_{n,s} + du_{n,s} \delta u_{n,k}) - dQ_k \delta u_k + (\sigma_{ks} \delta \varepsilon_{ks} - dQ_k \delta u_k)] dV - \int_{S_q} (dq_k + q_k) \cdot du_s dS = 0, \quad (3.1)$$

Де  $\delta u$ ,  $\delta \varepsilon$  - допускаються переміщення і деформації.

Деформації і їх похідні визначаються через переміщення і їх похідні за формулами (2.9). Аналогічно знаходяться збільшення напружень через збільшення деформацій по (2.54), а потім по (2.9) через збільшення переміщень.

Одним з основних переваг узагальненим рішенням є зниження порядку похідних вектор-функції  $\bar{u}$ , що входять в рівняння рівноваги.

Можна довести, що класичне рішення розглянутих задач є узагальненим і навпаки узагальнення рішення при підвищеній гладкості є класичним.

Отримані в розділі 2 рівняння є нелінійними і можуть бути вирішені тільки наближеними методами. При їх чисельній реалізації необхідно розглянути дві проблеми:

- 1) дискретизацію області, займаної системою, і вихідних рівнянь;
- 2) побудова ітераційного процесу для визначення функцій які вишуковуються, що характеризують напружено-деформаційний стан в точках системи з наперед заданою точністю.

Для дискретизації рівнянь і області системи буде використовуватися метод кінцевих елементів. Його достоїнства і недоліки викладені в численних роботах.

Область системи в тривимірному просторі апроксимувати тетраедрами з 10 вузлами.

У локальній системі координат  $\eta_i, i = 1,2,3$  функції форми записуються як

$$\begin{aligned}
 N_1 &= (2\eta_1 - 1)\eta_1, \\
 N_2 &= 4\eta_1 \cdot \eta_2, \\
 N_3 &= (2\eta_2 - 1)\eta_2, \\
 N_4 &= 4\eta_2 \cdot \eta_3, \\
 N_5 &= (2\eta_3 - 1)\eta_3, \\
 N_6 &= 4\eta_1 \cdot \eta_3, \\
 N_7 &= 4\eta_1(1 - \eta_1 - \eta_2 - \eta_3), \\
 N_8 &= 4\eta_2(1 - \eta_1 - \eta_2 - \eta_3), \\
 N_9 &= 4\eta_3(1 - \eta_1 - \eta_2 - \eta_3), \\
 N_{10} &= (2(1 - \eta_1 - \eta_2 - \eta_3) - 1)(1 - \eta_1 - \eta_2 - \eta_3),
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Схема тетраедра з нумерацією вузлів (•) показана на рис. 3.1.

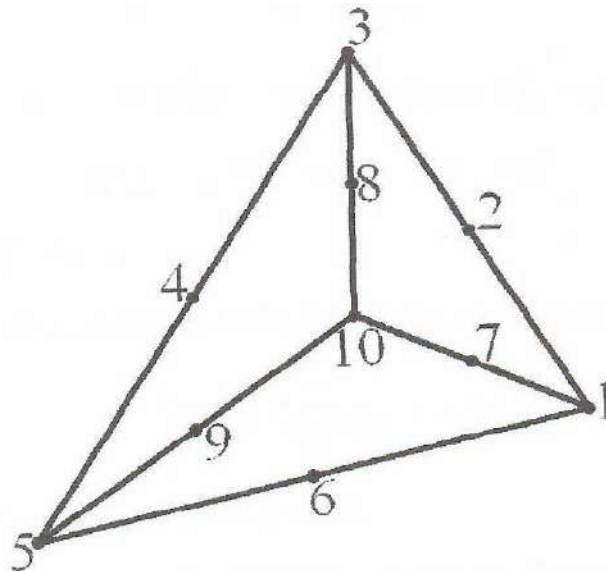


Рис. 3.1 Схема вузлів тетраедра

Чисельне інтегрування по кінцевих елементів проводилося із застосуванням формули Гауса по 4 точкам при  $\eta_i = 0,13819966, i = 1,2,3$ .



Кожній сукупності локальних координат  $\eta_i, i = 1, 2, 3$  в (3.2) елемента порівнюється одна і тільки одна сукупність його глобальних координат  $x_{k(e)}, k = 1, 2, 3$  по формулі

$$x_{k(e)} = x_{k(e)}^m N_{(e)}^m(\eta), k = 1, 2, 3, m = 1, 2, \dots, 10, \quad (3.3)$$

Використовуючи правило диференціювання складних функцій, можна отримати

$$N_{(e), \eta_k}^m = N_{(e), x_s}^m x_{s, \eta_k}, \quad (3.4)$$

Матриця Якобі і її зворотна визначаються за формулами

$$J_{(e)} = [x_{s, \eta_k}] = [N_{(e), \eta_k}^m \cdot x_3^m], \quad (3.5)$$

$$[J_{(e)}]^{-1} = [\eta_{s, x_k}], \quad (3.6)$$

де  $s, k = 1, 2, 3, m$  - номер вузла у елементі.

Має місце формула

$$N_{(e), x_k}^m = N_{(e), \eta_s}^m \eta_{s, x_k} = N_{(e), \eta_s}^m [J_{(e)}]^{-1}, \quad (3.7)$$

Визначає через,  $d\underline{\delta}_{(e)}^k, k = 1, 2, \dots, 10$  локальне значення функції  $d\underline{u}_{(e)}$  у вузлі елемента  $e$

$$d\underline{u}_{(e)} = N_{(e)}^k \cdot d\underline{\delta}_{(e)}^k, \quad (3.8)$$

Коли функція форми  $N_{(e)}^k$  відповідає у вузлах  $x_{(e)}^n$  елемента  $e$  умовам

$$N_{(e)}^k(x_{(e)}^n) = \delta_{kn}, n, k = 1, 2, 3, \dots, 10, \quad (3.9)$$

де  $\delta_{kn}$  - символ Кронекера.

Дискретна модель вектор-функції  $d\underline{u}(x)$  визначається як

$$d\underline{u}(x) = \sum_{e=1}^{M_e} d\underline{u}_{(e)} = \underline{N}^\Delta d\underline{\delta}^\Delta, \quad (3.10)$$

де  $M_e$  – кількість елементів у системі;

$\Delta$  - номер глобальних вузлів в системі, у (3.10) здійснюється підсумовування по  $\Delta$  від 1 до  $M$ ;

$M$  – кількість глобальних вузлів у системі.

Позначимо через  $\underline{\delta}^\Delta, \Delta = 1, 2, 3, \dots, M$  глобальне значення  $\underline{u}$  у вузлі  $\Delta$ .

Тоді

$$\underline{u} = \underline{N}^\Delta \underline{\delta}^\Delta, \quad (3.11)$$

В матричній формі визначаємо

$$\underline{\varepsilon} = \underline{B}^\Delta \underline{\delta}^\Delta, d\underline{\varepsilon} = \underline{B}^\Delta d\underline{\delta}^\Delta, \quad (3.12)$$

Де

$$\underline{B}^\Delta = \begin{bmatrix} \underline{N}_1^\Delta & 0 & 0 \\ 0 & \underline{N}_2^\Delta & 0 \\ 0 & 0 & \underline{N}_3^\Delta \\ \underline{N}_2^\Delta & \underline{N}_1^\Delta & 0 \\ 0 & \underline{N}_3^\Delta & \underline{N}_2^\Delta \\ \underline{N}_3^\Delta & 0 & \underline{N}_1^\Delta \end{bmatrix}, \quad (3.13)$$

$$\underline{N}_i^\Delta = \frac{\partial \underline{N}^\Delta}{\partial x_i},$$

Рівняння віртуальної роботи (3.11) в матричній формі запишеться як

$$[d\underline{\delta}^\Delta]^T \left\{ \int_V [\underline{B}^\Delta]^T \underline{\sigma} dV - \int_V [\underline{N}^\Delta]^T \underline{Q} dV - \int_{S_q} [\underline{N}^\Delta]^T \underline{q} ds \right\} = 0, \quad (3.14)$$

У формулі (3.14) вираз, що стоїть у фігурних дужках, має дорівнювати нулю, так як  $d\underline{\delta}^\Delta$  відмінно від нуля. При наближеному вирішенні на ЕОМ з певною точністю воно виходить відмінним від нуля, тобто

$$\underline{\omega} = \int_V [\underline{B}^\Delta]^T \underline{\sigma} dV - \int_V [\underline{N}^\Delta]^T \underline{Q} dV - \int_{S_q} [\underline{N}^\Delta]^T \underline{q} ds \neq 0, \quad (3.15)$$

де  $\underline{\omega}$  - вектор остаточної сили.

Тому в процесі чисельного рішення розглянутих завдань передбачається процедура зменшення  $\underline{\omega}$  до наперед заданої малої величини.

При наближеному методі рішення задачі внаслідок накопичення різних помилок можливий вихід вектору напружень  $\underline{\sigma}$  за межі поверхні навантаження, тобто  $f > 0$ , що в теорії пластичної течії неприпустимо.

Тому будується процедура повернення вектору  $\underline{\sigma}$  на поверхню навантаження або всередину її. Це питання детально досліджений.

Позначаючи перший доданок в правій частині співвідношення (3.15) через  $\underline{K}$  і об'єднуючи матриці об'ємних і поверхневих сил в глобальну матрицю вузлових навантажень, отримуємо

$$\underline{\omega} = \underline{K}(\underline{\delta})\underline{\delta} - \underline{Q} = 0, \quad (3.16)$$

Рішення пружнопластичних задач виконується в збільшеннях. Для цього розбиваємо навантаження  $\underline{Q}$  на  $N$  малих інтервалів  $\Delta\underline{Q}_i, i = 1, 2, \dots, N$  і вирішуючи рівняння на  $\Delta\underline{Q}_j$  збільшенні навантаження

$$\underline{K}(\underline{\delta}_j)\Delta\underline{\delta}_j - \Delta\underline{Q}_j = 0, \quad (3.17)$$

визначаємо  $\Delta\underline{\delta}_j$ . Потім за наведеними вище формулами визначаємо  $\Delta\underline{\varepsilon}$  і  $\Delta\underline{\sigma}$ .

Після цього рішення знаходимо

$$\underline{Q}_{i+1} = \underline{Q}_i + \Delta\underline{Q}_i,$$

$$\underline{\delta}_{i+1} = \underline{\delta}_i + \Delta\underline{\delta}_i,$$

$$\underline{\varepsilon}_{i+1} = \underline{\varepsilon}_i + \delta\underline{\varepsilon}_i,$$

$$\underline{\sigma}_{i+1} = \underline{\sigma}_i + \delta\underline{\sigma}_i.$$

Підставляючи ці значення в (3.16), визначаємо похибку  $\underline{\omega}_{i+1}$ .

Для визначення нев'язки  $\underline{\omega}_{i+1}$  необхідно знайти рішення рівняння (3.17).

Різні однокрокові і багатокрокові методи вирішення таких рівнянь викладені в [83]. Якщо рівняння (3.18) записати у вигляді

$$\underline{K}(\underline{\delta})\Delta\underline{\delta} = 0, \quad (3.18)$$

то його рішення по методу Ньютона-Канторовича можна уявити як

$$\Delta\underline{\delta}_j = \Delta\underline{\delta}_{j-1} - [\underline{K}'(\underline{\delta}_{j-1})]^{-1}\underline{K}(\underline{\delta}_{j-1}), \quad (3.19)$$

Складність рішення рівняння у вигляді (3.19) полягає в тому, що необхідно визначити матрицю  $[\underline{K}'(\underline{\delta}_{j-1})]^{-1}$ , яка залежить від вибору вдалого початкового наближення. Для спрощення рішення використовують його різні модифікації. Тут в програмі закладено метод дотичних жорсткостей і його модифікації, коли матриця жорсткості  $\underline{K}$  оновлюється через задану кількість ітерацій. При цьому ітераційний процес закінчується при виконанні нерівності

$$\frac{\|\Delta\underline{\delta}^i - \Delta\underline{\delta}^{i-1}\|}{\|\Delta\underline{\delta}^i\|} \leq \varepsilon_0, \quad (3.20)$$

де  $\varepsilon_0$  - наперед задана мала величина.

Для вирішення пружнопластичних задач на ЕОМ розроблений наступний алгоритм вирішення, який був реалізований в системі C++ (QT framework), який введений складовою частиною в програмний комплекс.

1. З'являються глобальні динамічні масиви, необхідні для вирішення завдань.
2. Проводиться автоматизоване розбиття області системи на скінчені елементи.
3. Визначаються межі динамічних масивів і оголошуються необхідні для вирішення файли.

4. Проводиться розбивка діючого навантаження на збільшення. На дисплей виводиться схема розбиття системи на кінцеві елементи з нумерацією вузлів і елементів.

5. Будується ітераційний процес, на кожній ітерації якого виконуються наступні операції.

5a. Залежно від умови (2.54) обчислюється матриця  $D_e$  або  $D_{ep}$ . Потім визначається матриця  $K$ .

5b. Проводиться рішення системи рівнянь (3.17) і визначаються вузлові переміщення  $\Delta\delta$  і  $\delta$ .

5c. Обчислюється нев'язка  $\omega$ , будується ітераційний процес для її зменшення. Коригується вектор  $\underline{\sigma}$  з урахуванням перерозподілу пластичних зон в системі.

5d. Проводиться перевірка нерівності (3.11). Якщо воно не виконується, то процес рішення повертається на пункт 5a. В іншому випадку задається нове збільшення навантаження, і процес вирішення триває.

6. Закінчується цикл по приросту навантаження.

7. Проводиться вивід на дисплей і в файл виведення загальної схеми переміщень системи, схеми створення в ній пластичних зон і епюр переміщень і напружень по перетинах, що цікавлять користувача програми.

### 3.1. Статичний розрахунок палі спускової доріжки сліпа

На рис. 3.2. показана розрахункова паля спускової доріжки сліпа в поперечному розрізі. Приймалася навантаження на косяковий візок 10400 кН. При перерахунку навантаження на одну палю вона склала 813 кН. Використовувалися призьменні елементи. Область масиву ґрунту і конструкції розбита на 644 елемента з 5923 вузлами.

Від ваги палі прогини поверхні ґрунту склала 0,65 см. Схема розбивки системи паля - ґрунт після розбивки палі приведена на рис. 3.3.

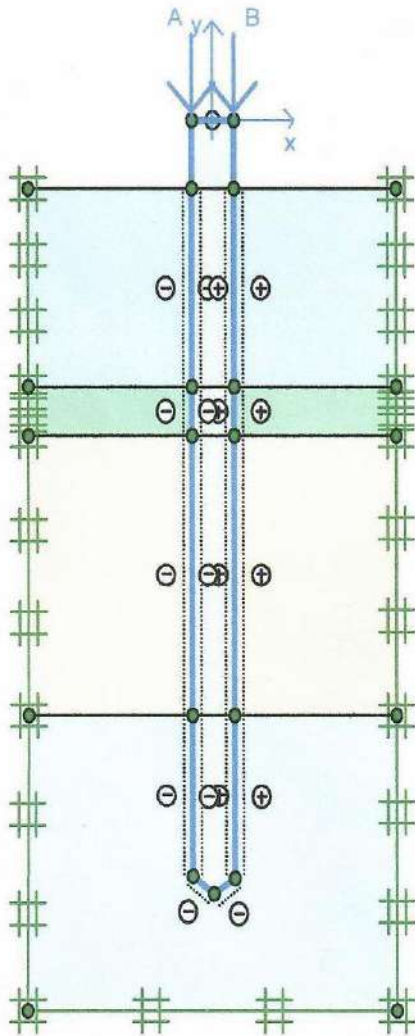


Рис. 3.2 Розрахункова схема

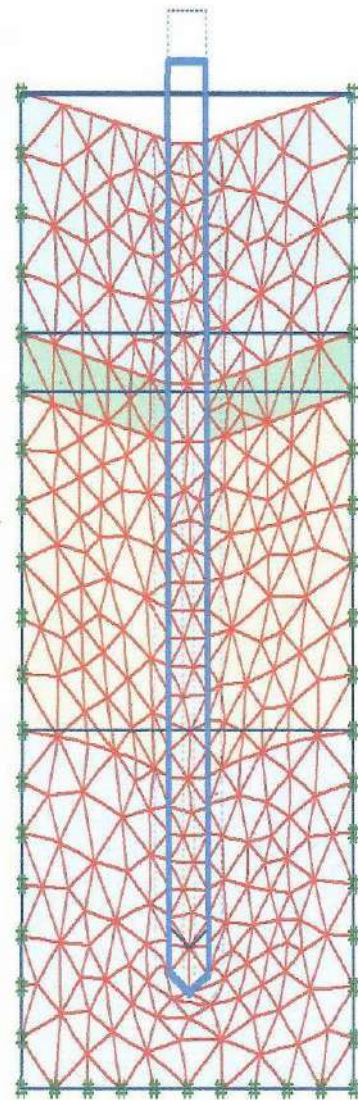


Рис. 3.3 Схема розбиття системи на кінцеві елементи

Епюри переміщень від ваги палі показані на рис. 3.4. Найбільше переміщення склало 0,65 см. Справо на малюнку показана масштабна лінійка переміщень. Значення по лінійці необхідно помножити на  $10^{-3}$ м. Епюра повних напружень системи приведена на рис. 3.5. Найбільша напруга рівна  $242,6 \text{ кН/м}^2$ . На лінійці розмірність напружень в  $\text{кН/м}^2$ .

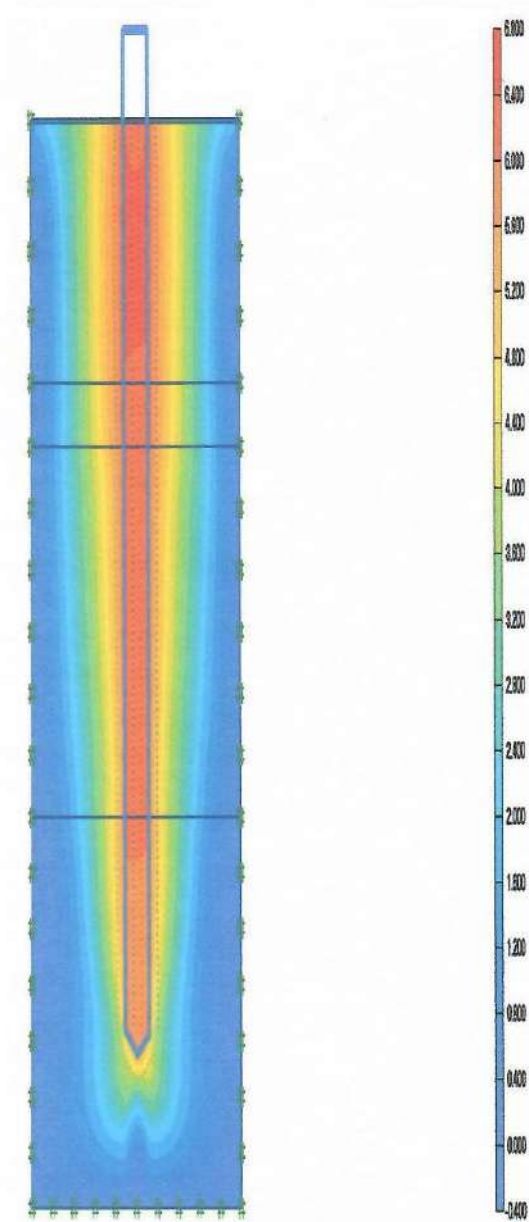


Рис. 3.4 Епюра переміщень

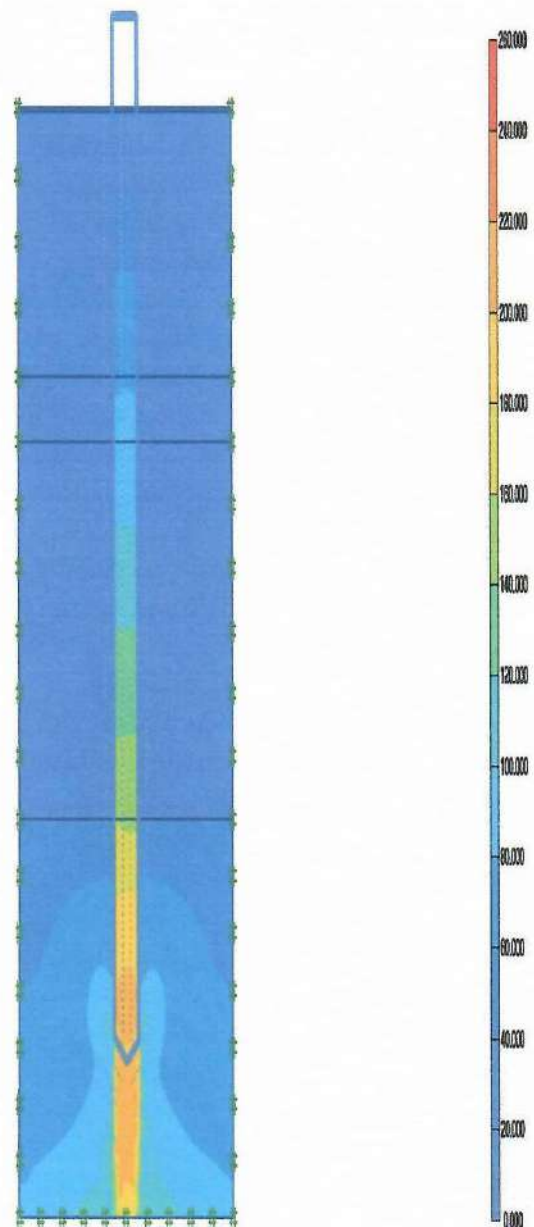


Рис. 3.5 Епюра напружень

Далі йдуть епюри і схеми отримані з розрахунку після прикладання навантаження на палю 813 кН.

На рис. 3.6. зображена епюра переміщень системи. Найбільше переміщення верху палі склало 3,05 см. На рис. 3.7. показана епюра деформацій. Найбільші деформації під палею склали 5,71%.

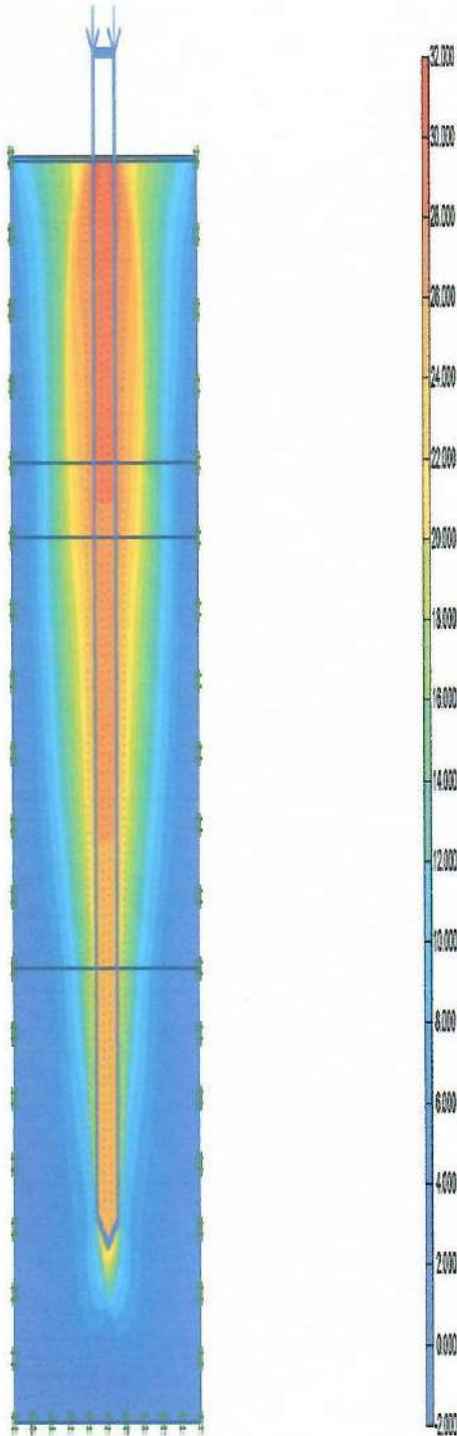


Рис. 3.6 Епюра переміщень

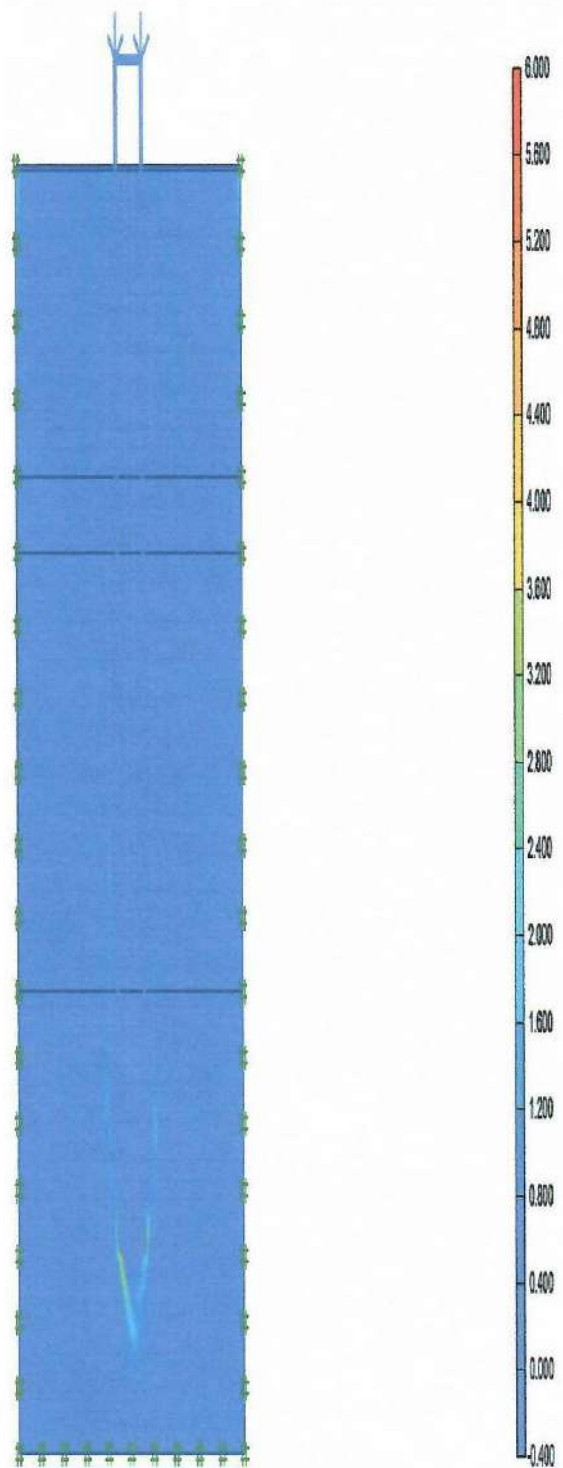


Рис. 3.7 Епюра деформацій

Епюра повних напружень показана на рис. 3.8. Найбільша напруга в ґрунті під палею одно  $472,1 \text{ кН/м}^2$ .

Схема виникнення пластичних зон в системі приведена на рис. 3.9. Чорним кольором показані зони отримані в результаті розтягування ґрунту і бетону.



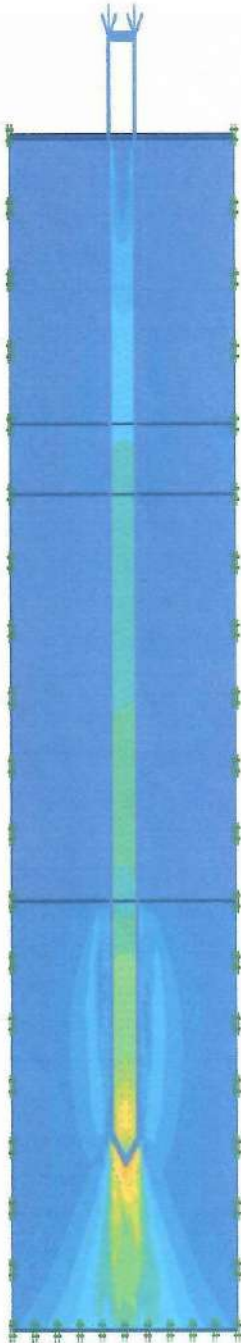
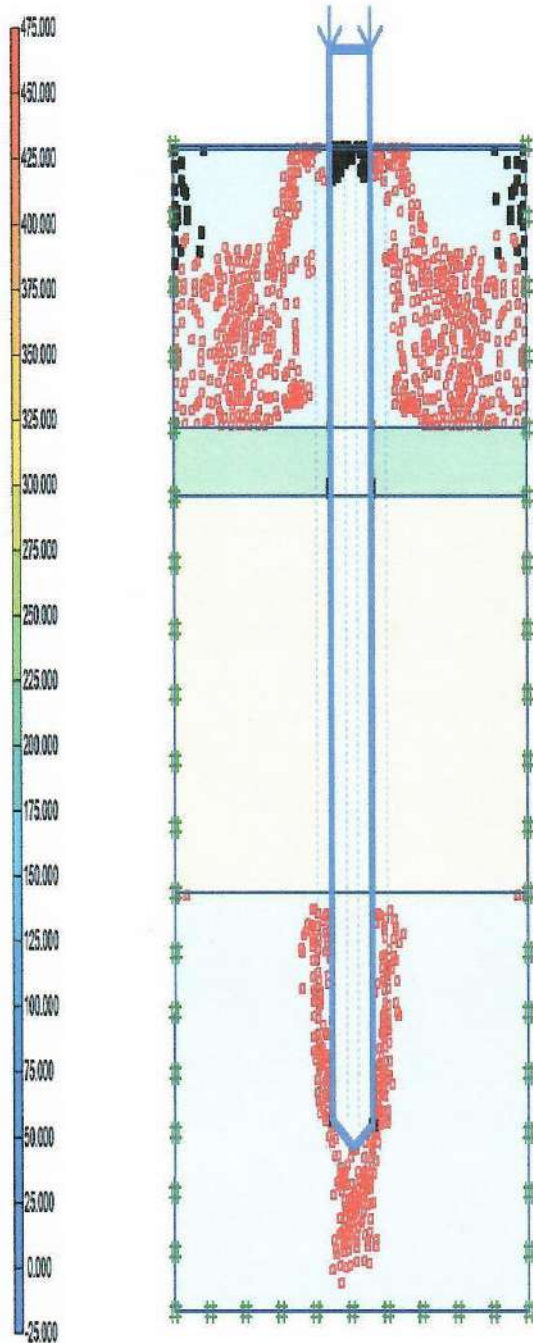


Рис. 3.8 Епюра напружень

Рис. 3.9 Схема виникнення  
пластичних зон

На рис. 3.10. показана епюра переміщень нижньої точки палі в залежності від кроку переміщень навантаження. На рис. 3.11. приведена епюра напружень.

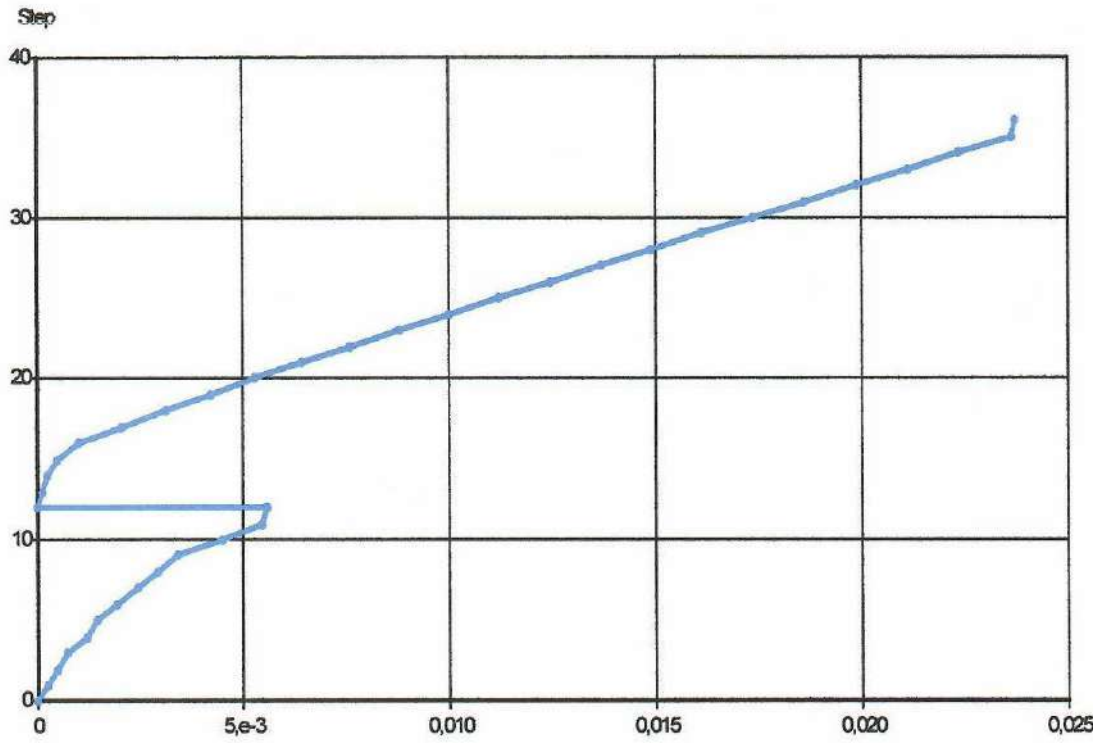


Рис. 3.10 Епюра переміщень нижньої кінцевої точки палі

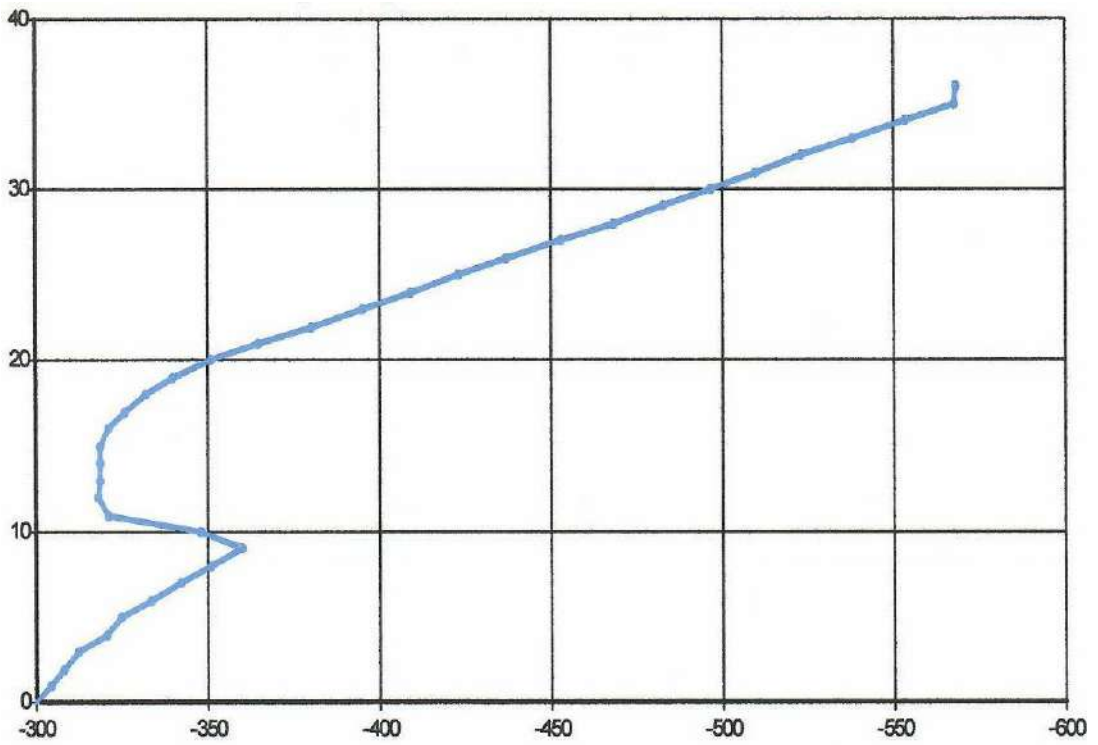


Рис.3.11 Епюра нормальних напружень  $\sigma_{yy}$

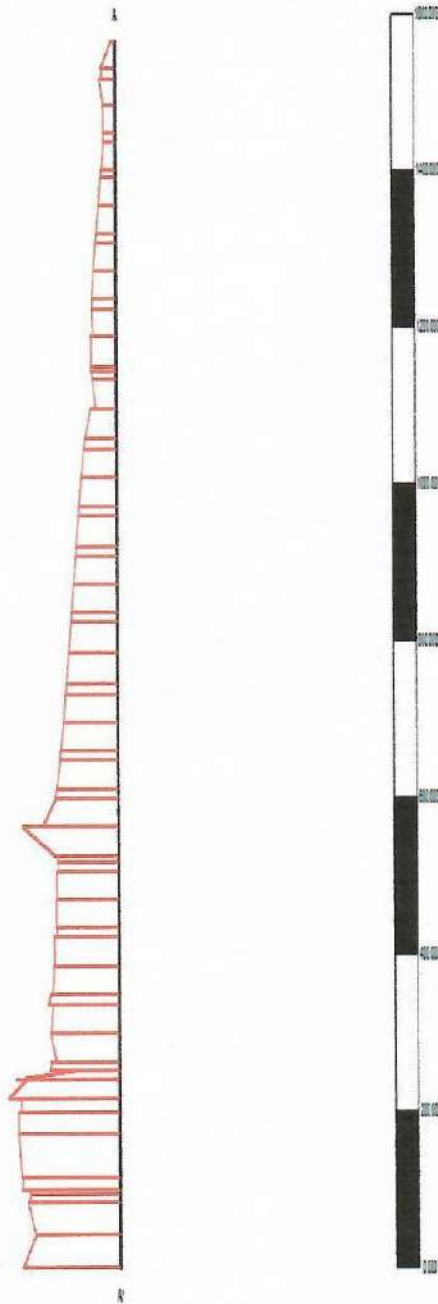


Рис. 3.12 Епюра активного тиску ґрунту на палю

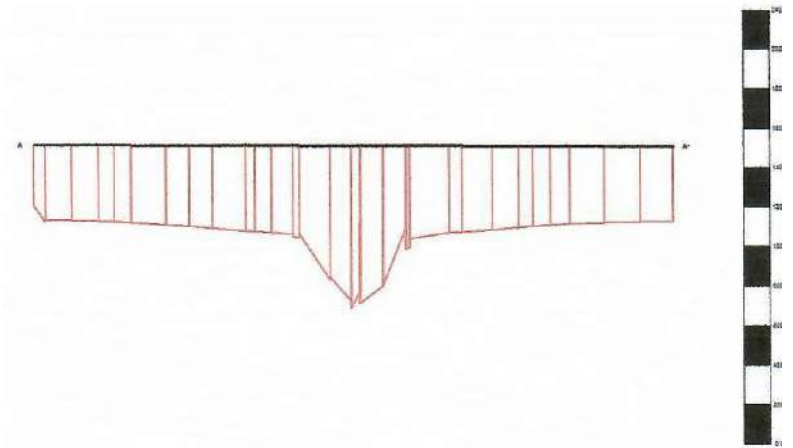


Рис. 3.13 Епюра напружень  $\sigma_{yy}$  кН/м<sup>2</sup>

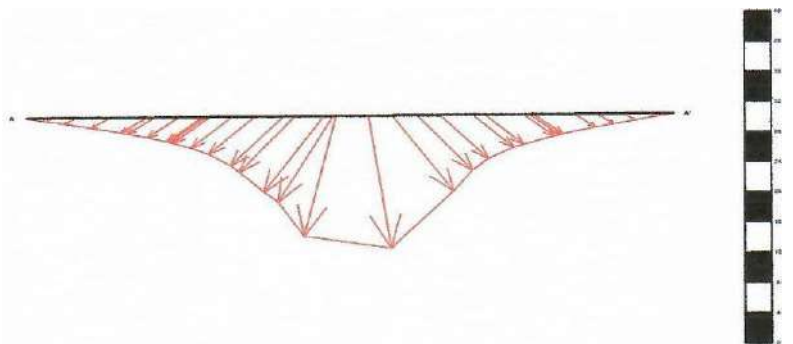


Рис. 3.14 Епюра переміщень по горизонтальному перерізі

На рис. 3.12. відображена епюра активного тиску ґрунту на палю кН/м<sup>2</sup>.

На рис. 3.13. доведена епюра напружень  $\sigma_{yy}$  кН/м<sup>2</sup> по горизонтальному перерізі проведеному через кінець палі.

На рис. 3.14. відображена епюра вертикальних переміщень по горизонтальному перерізі, проведеному через нижній кінець палі. Значення на масштабній лінійці необхідно помножити на  $10^{-3}$ м.

### 3.2. Динамічний розрахунок палі спускової доріжки сліпа

Будемо вважати, що удар по рамі стався силами, прикладеними як в статичних задачах, над палями.

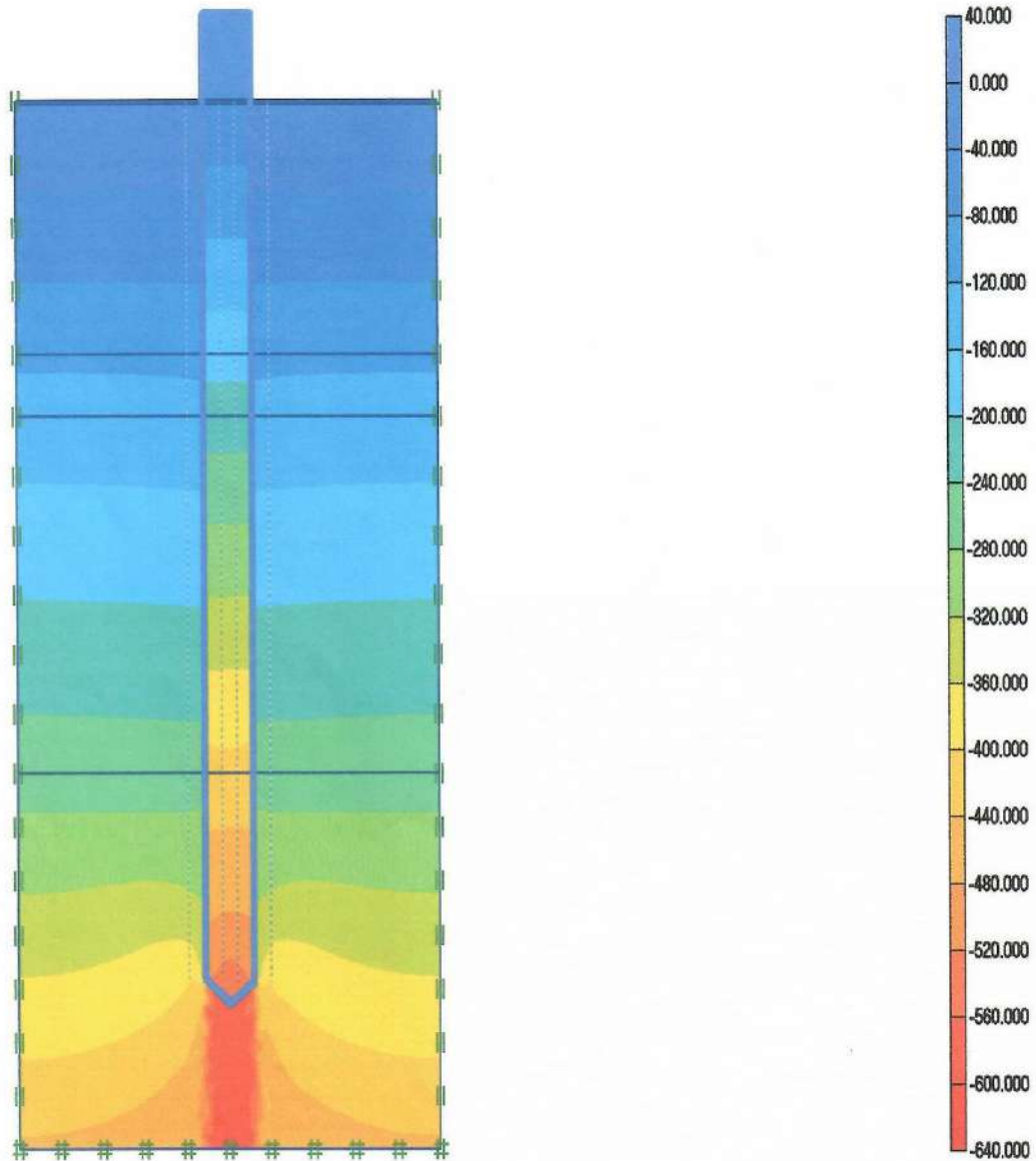


Рис. 3.15 Епюра загальних навантажень

Епюра ефективних напружень  $\sigma_{yy}$ , яка наведена на рис. 3.2.2 вона значно менше загальних та дорівнює  $397,29 \text{ кН/м}^2$ .

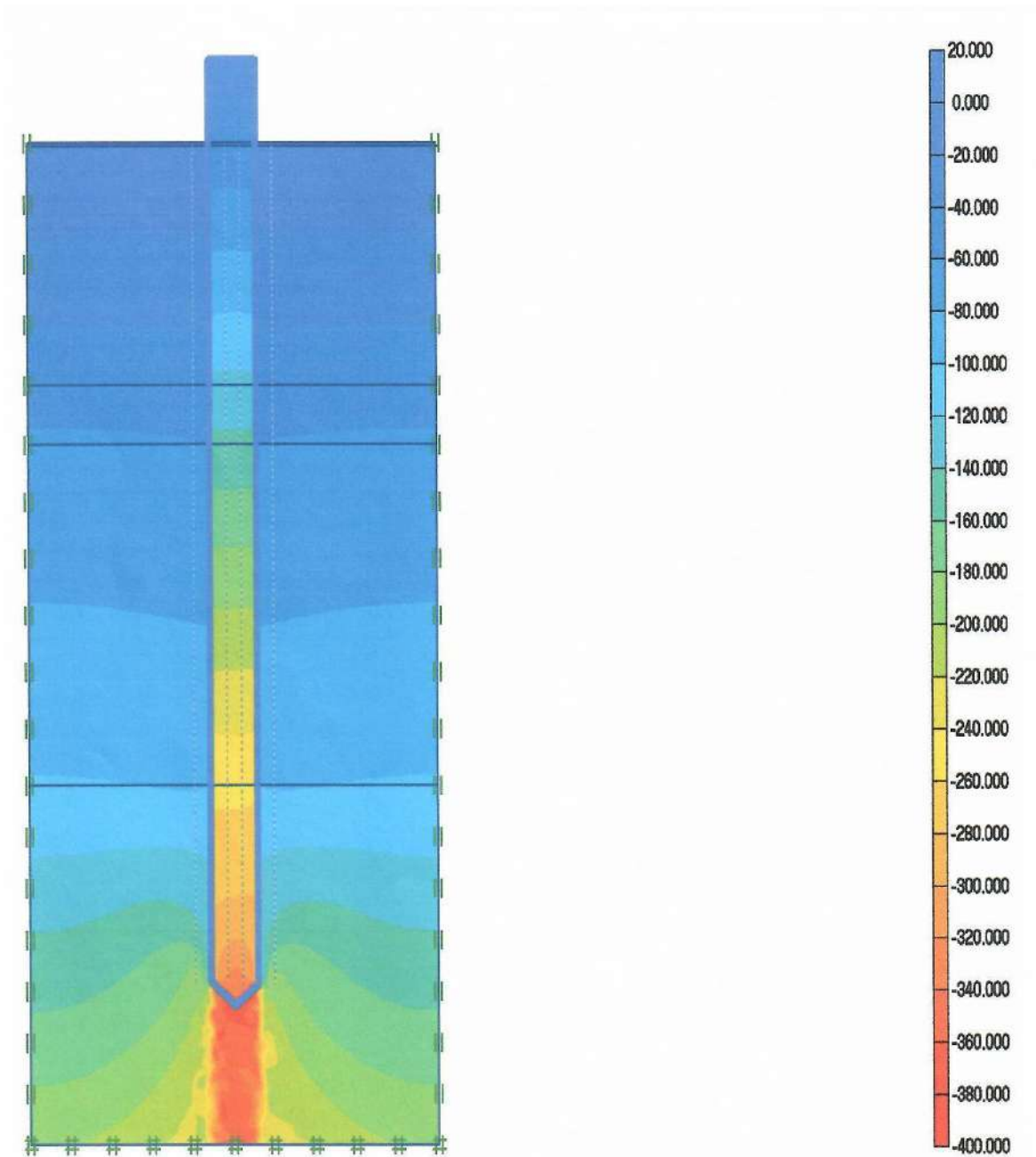


Рис. 3.16 Епюра ефективних напружень  $\sigma_{yy}$

Вважаємо, що аварійний удар по рамі стався силами, прикладеними, як і в статичних задачах [92], над палями. Величина сил дорівнює по  $600 \text{ кН/м}^2$ , час дії  $0,01 \text{ с}$ . На епюрі рисунка 3.15. показані загальні напруги в системі після удару. Найбільші напруги виникають в ґрунті під палею і рівні  $607,75 \text{ кН/м}^2$ .

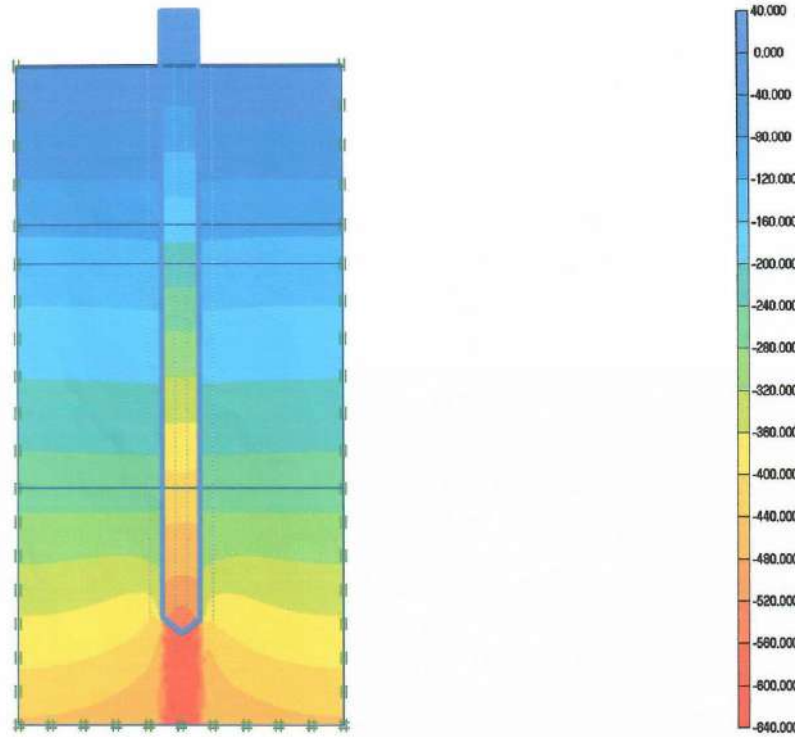


Рис. 3.17 Епюра загальних напружень

Епюра ефективних напружень  $\sigma_{yy}$  приведена на рис. 3.18. Вони значно менше загальних та є рівними  $397,29 \text{ кН/м}^2$ . Така різниця викликана впливом води.

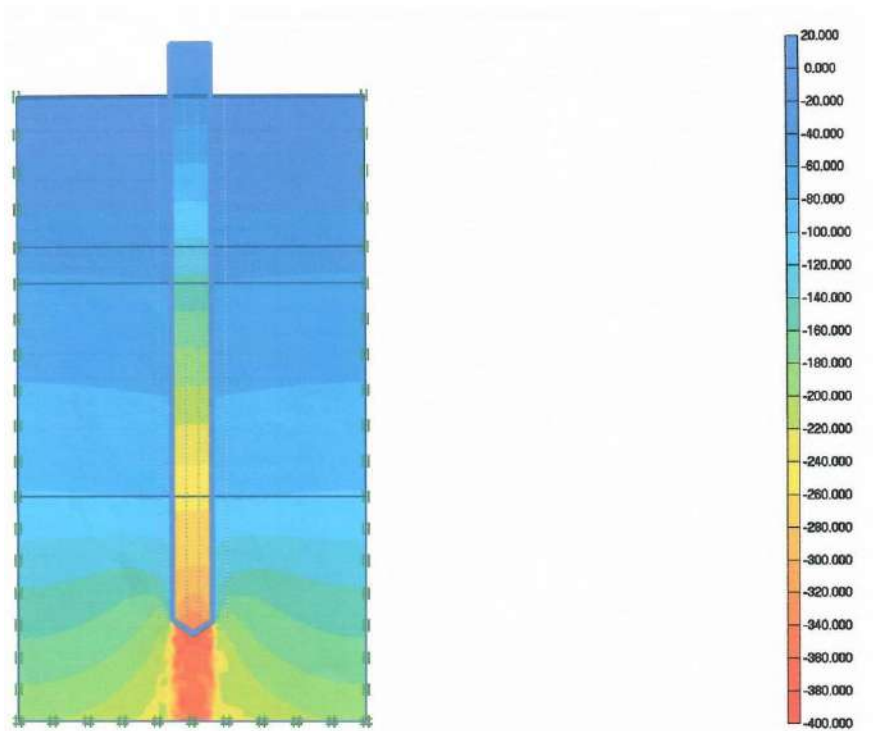


Рис. 3.18 Епюра ефективних напружень  $\sigma_{yy}$

Епюра вертикальних деформацій  $\varepsilon_{yy}$  показана у відсотках на малюнку 3.19. Значення на масштабній лінійці необхідно помножити на  $10^{-3}\%$ . Найбільші деформації рівні 0,0044%.

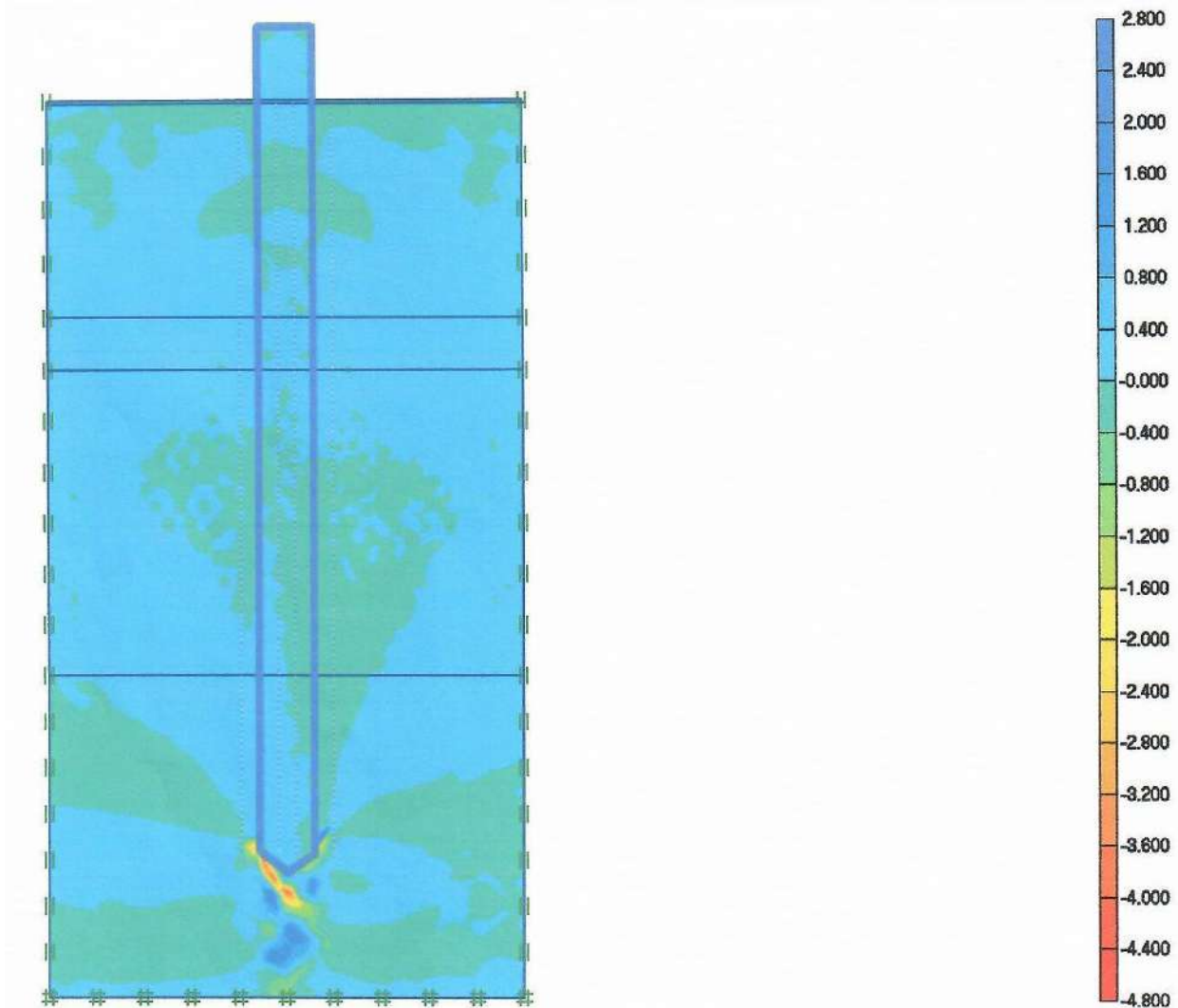


Рис. 3.19 Епюра деформацій  $\varepsilon_{yy}$ .

На рис. 3.20 показана епюра швидкостей після удару.

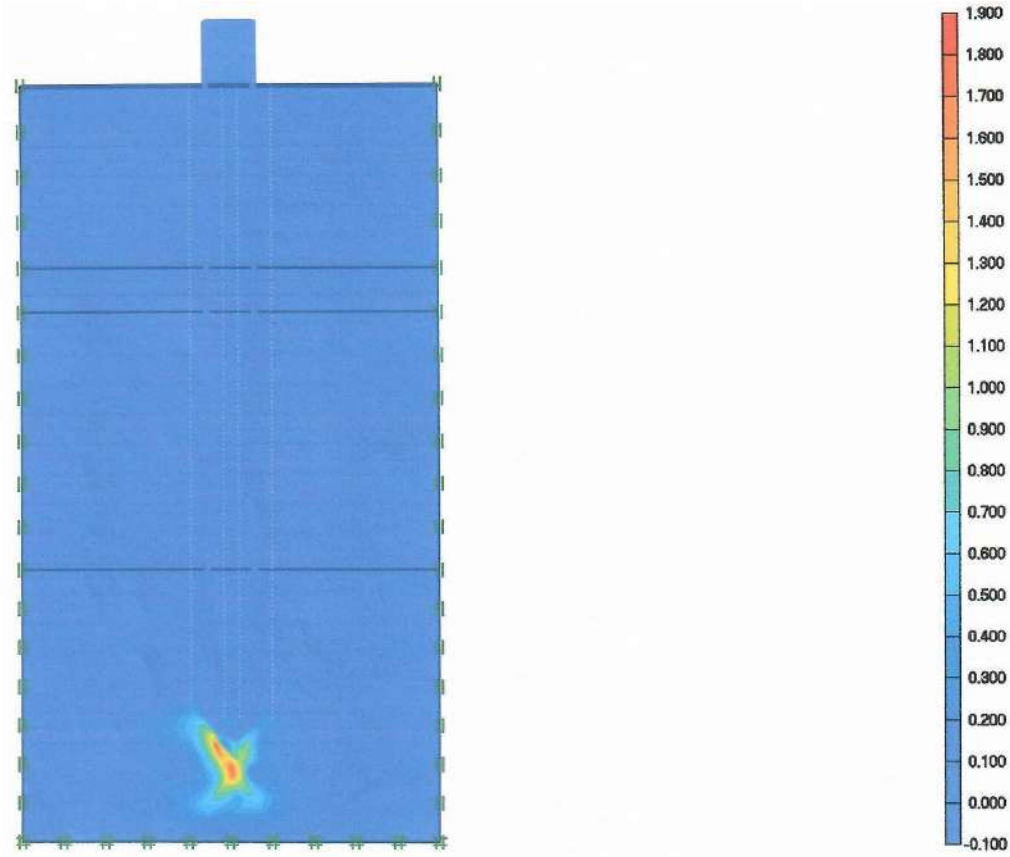


Рис. 3.20 Епюра швидкостей.

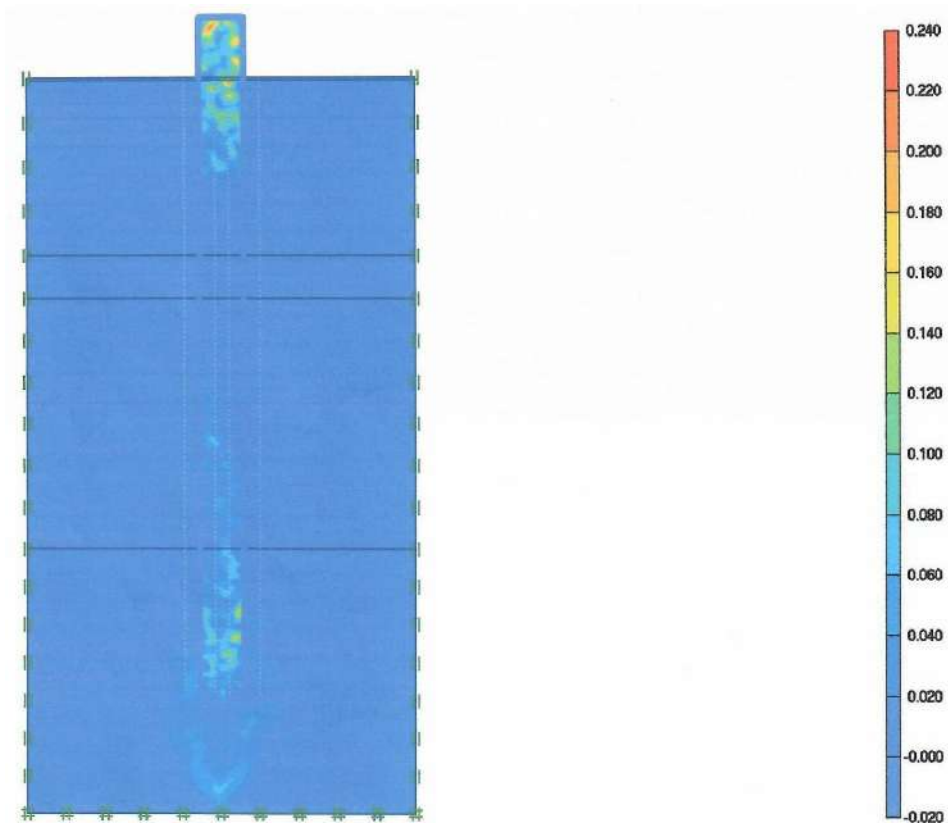


Рис. 3.21 Епюра прискорень після удару.



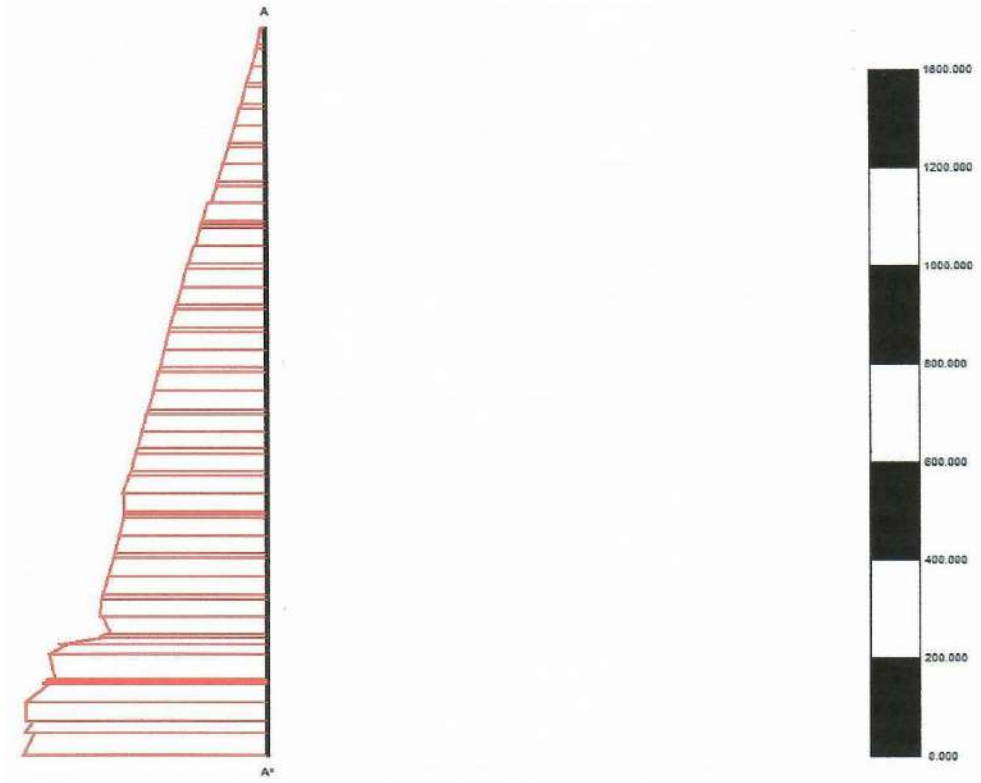


Рис. 3.22 Епюра тиску ґрунту на палю після удару в  $\text{кН/м}^2$ .

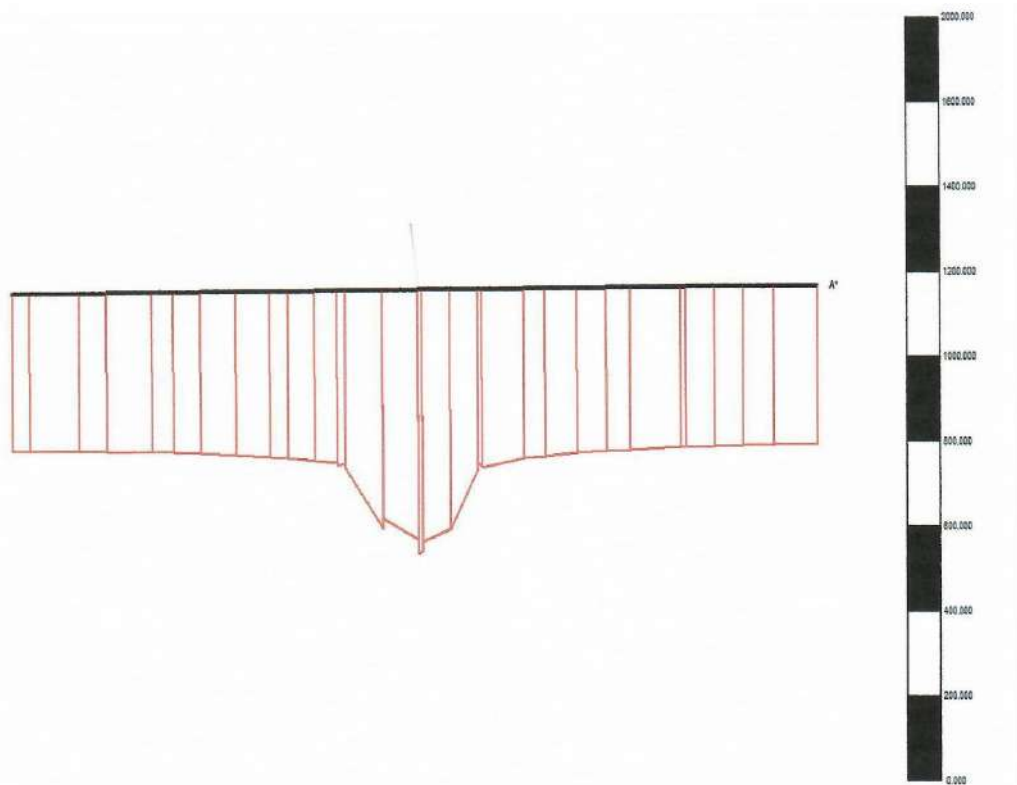


Рис. 3.23 Епюра напружень  $\sigma_{yy}$  по горизонтальному перерізу після удару в  $\text{кН/м}^2$ , проведеному через кінець палі після удару.

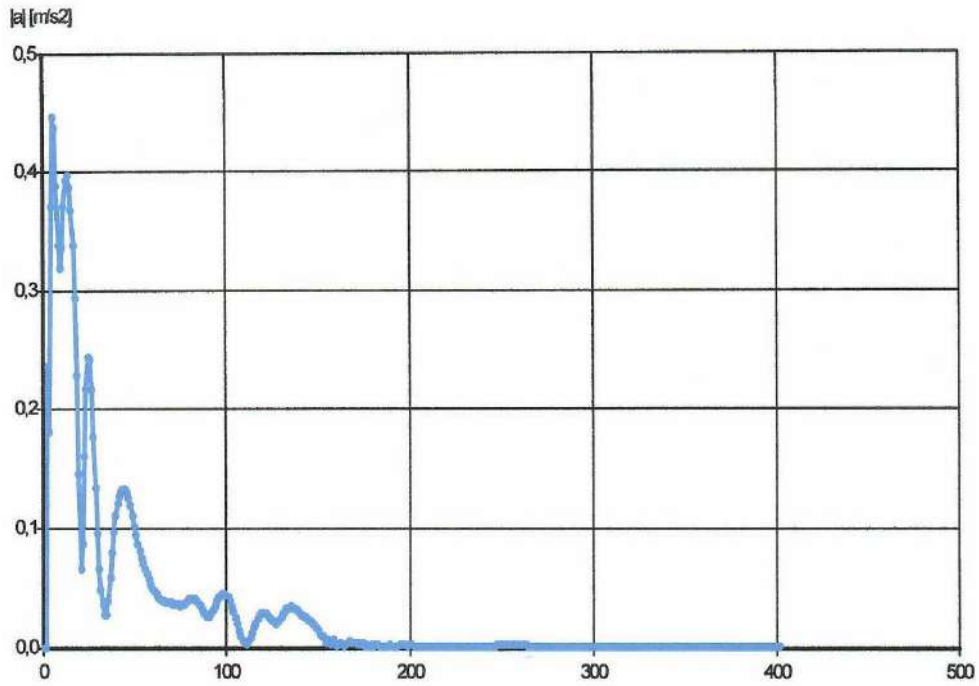


Рис. 3.24 Епюра прискорення в залежності від кроку збільшення після удару.

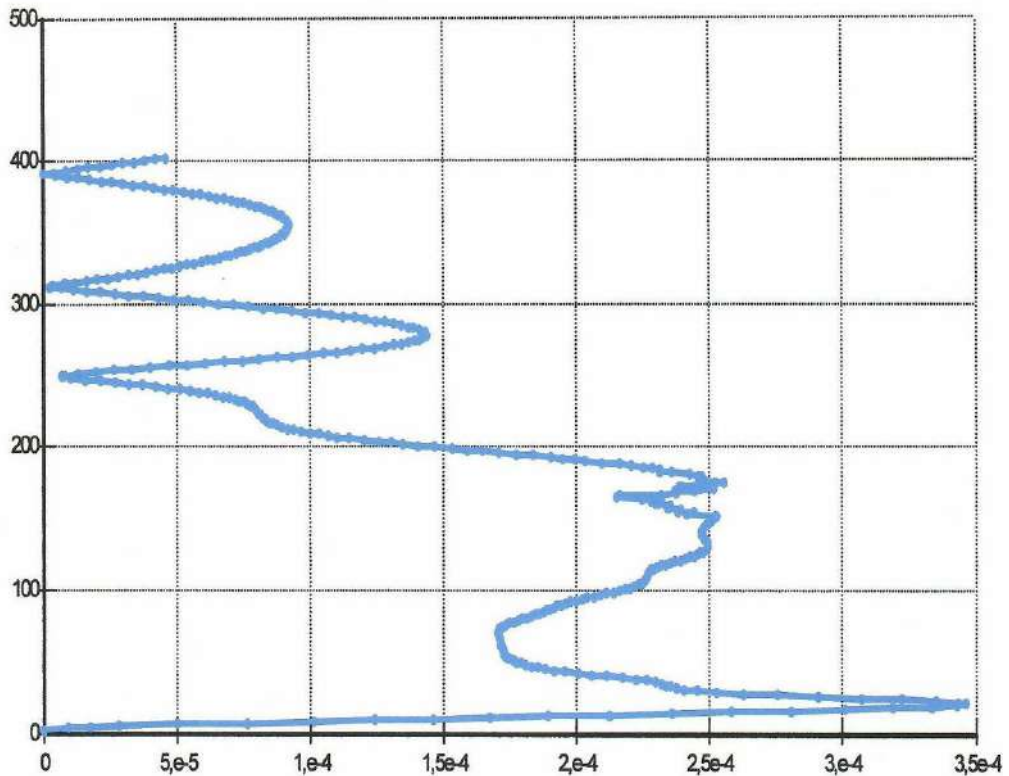


Рис. 3.25 Епюра швидкостей в залежності від кроку збільшення після удару.

Були виконані розрахунки в нашому випадку натуральних випробувань. Представлені експериментальні дані показали, що тиск на один каток косякового

візка дорівнював в середньому 100 кН, а це склало тиск на одну палю 400 кН. Були виконані розрахунки розглянутої вище конструкції на таке навантаження. Вони показали, що вертикальне переміщення верху конструкції склало 1,713 см, тобто зменшення в порівнянні з навантаженням 813 кН відбулося в 1,78 рази. За досвідченими даними переміщення дорівнювало 1,6 см. Таке непропорційне зменшення переміщень, пов'язане зі зменшенням діючої навантаження, викликане скороченням пластичних зон і відповідно збільшення пружних. Якщо врахувати, що в розрахунку не була врахована розподільна здатність поздовжньої балки, що має поперечний переріз 60 x 40 см, то отримані розрахункові результати близькі до натурних. Максимальні напруги в ґрунті під палями склали 308,56 кН/м<sup>2</sup>, тобто вона зменшилася лише в 1,53 рази. Концентрація навантажень змінюється пропорційно зміні навантаження.

Отримані результати моделювання є багатоекстремальними залежностями з явними зламами і розривами за похідною. Для апроксимації таких результатів не можливо застосувати навіть класичний регресійний аналіз, у зв'язку з тим, що при малому порядку апроксимуючого полінома проявляється дуже грубе наближення по експериментально знятим точкам, а при високому порядку проявляється досить близьке відтворення залежності в околиці цих точок, але при цьому не забезпечується гладкість опису межточечних інтервалів.

Для подібних залежностей більш продуктивний інший підхід, заснований на отриманні локальних наближень фрагментів даних залежностей і аддитивном зведенні їх в єдиний аналітичний вираз - метод «розділити-об'єднати» [55, 65]. Порядок апроксимуючого полінома або іншої апроксимуючої функції, а також її структура для кожної ділянки можуть бути довільними. Ще одна вигідна відмінність апроксимації за методом «розділити-об'єднати» полягає в єдиному аналітичному записі всієї кускової функції замість завдання векторної сплайн-функції громіздкою системою рівнянь.

Для отримання єдиного аналітичного вираження функції  $F(y, x)$ , заданого безліччю точок  $N$ , розіб'ємо цю безліч на  $n$  непересічних підмножин  $F_i(y, x)$ .

При цьому повинна виконуватися умова  $\cup_{i=1}^n F_i(y, x) = F(y, x)$ . Далі проводимо аналітичний опис із заданою точністю  $\delta_i^{app}$  будь-якої виділеної  $i$ -ї ділянки апроксимуючої точкової залежності в обраній локальній області визначення  $x \in [x_{i-1}, x_i]$  деякою функцією  $\varphi_i(x)$ . В загальному випадку ця задача вирішується для кожної ділянки мінімізацією деякого функціоналу  $Q_i[F_i(y, x), \varphi_i(x)]$ , формалізуючого оцінку точності апроксимації кожної ділянки [65]. Подібний підхід значно підвищує точність апроксимації кожної ділянки  $i$ , як наслідок, загальну точність апроксимації всієї залежності що моделюється. Далі для кожного відокремленого по конфігурації інтервалу апроксимуючої точкової залежності, можна побудувати узагальнену апроксимуючу функцію  $f(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x)$ , яка буде описувати кусочну залежність, що моделюється. В результаті  $f(x)$  буде єдина аналітична функція залежності від кількості окремо апроксимуючих інтервалів та їх розмірів. Ця функція апроксимує цілком описаний точковою (в тому числі кускову) залежністю діапазон та реалізує таким чином метод «розділити-об'єднати».

Як впливає з наведених вище положень, апроксимація за методом «розділити-об'єднати» реалізується в три етапи. На першому етапі результати моделювання або експериментально отримана точкова залежність розбивається на відокремлені інтервали і здійснюється математичний опис кожної ділянки будь-якими аналітичними функціями  $\varphi_i(x)$ , які гарно їх апроксимують. На другому етапі для кожної ділянки формується інтервально виділена функція  $f_i(x)$ . На третьому етапі отримуємо результуючу узагальнену апроксимуючу функцію  $f(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x)$ , в адитивній формі.

Описаний метод апроксимації дозволяє використовувати отримані відносно нескладні аналітичні вирази, що описують результати моделювання, в програмному забезпеченні Distributed Measurement System.

### 3.3. Метод контролю цілісності основних елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд

Відомі методи технічного обстеження суднопіднімальних споруд судноремонтних і суднобудівних заводів не забезпечують безперервний контроль за системою ґрунт-спорудження, тому існує загроза пропуску початку можливих аварійних процесів, які можуть відбуватися в таких системах [79]. Для забезпечення безперервного контролю за системою ґрунт-спорудження пропонується автоматизована система моніторингу, яка встановлюється на контрольованому об'єкті. У пропонованому проекті методики викладені основні принципи по облаштуванню, роботі та регламенту системи моніторингу споруд.

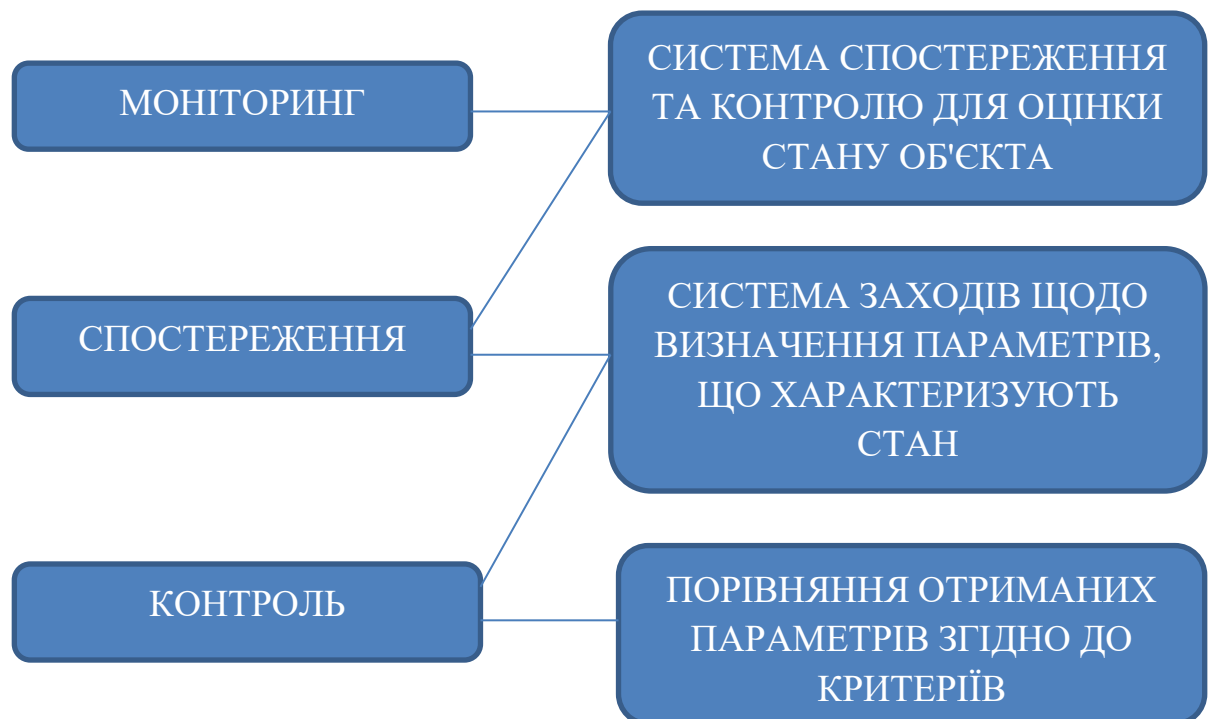


Рис. 3.26 Структура системи контролю параметрів технічного стану

Структура і обладнання розподіленої системи вимірювання (Distributed Measurement System)

Інженерами МНВП «ЛЕПТОН» (м. Одеса), під керівництвом автора роботи, розроблена розподілена система вимірювання (Distributed Measurement System). В апаратному та програмному забезпеченні системи Distributed Measurement System, що здійснює контроль технічного стану (ТС) суднопіднімальних споруд суднобудівних і судноремонтних заводів (ССССЗ) реалізовані такі методи контролю і діагностики ТС [45]:

- метод електричних вимірювань механічних величин: температури, сил, тисків і перевантажень, що діють на палю в осьовому напрямку (Рис. 3.27., Рис. 3.28, Рис. 3.29); [69]
- метод мікроелектромеханічного вимірювання лінійного прискорення діючих на палю в осьовому, поздовжньому і поперечному напрямках (Рис. 3.30, Рис. 3.31); [80]
- метод циклічного декодування вимірюваних величин; [64]
- вдосконалений метод вібраційної діагностики палі в момент удару [5];
- метод інтерполяційної децимації передискретизації сигналу [5];



Рис. 3.27 Термометр опору Pt1000

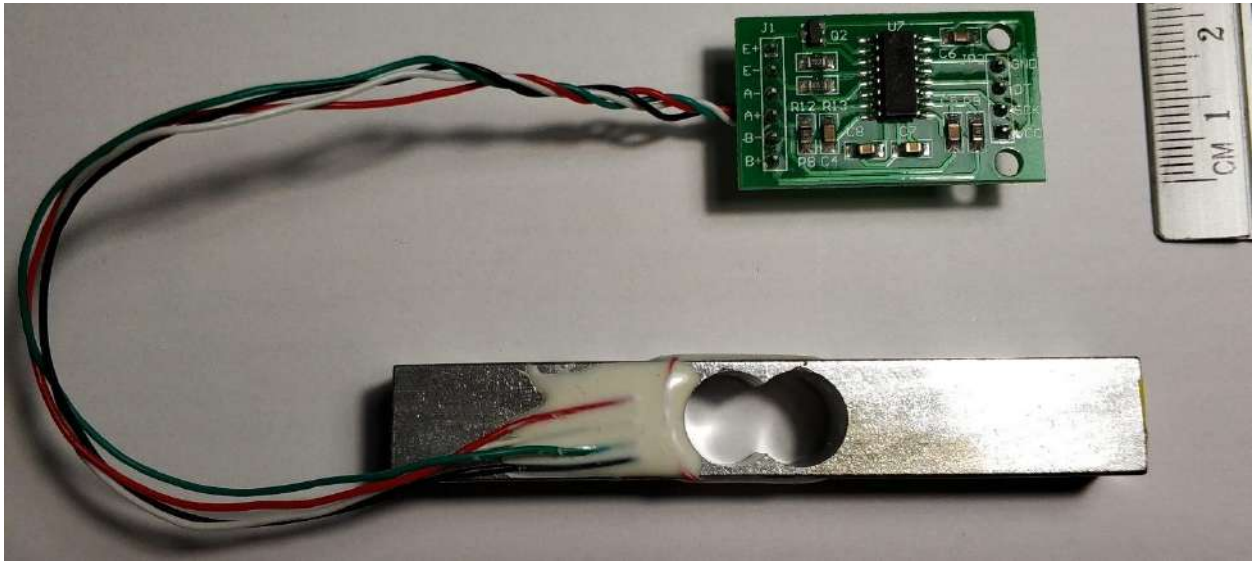


Рис. 3.28 Тензодатчик та 24-bit АЦП



Рис. 3.29 Тензодатчик KYOWA LCTS-B з нержавіючої сталі

В якості вимірювача сили був обраний тензодатчик KYOWA LCTS-B.  
Переваги тензодатчиків KYOWA LCTS-B:

- Конструкція з нержавіючої сталі дозволяє використовувати в умовах вологості або наявності корозійних газів;
- Тонкий датчик, оснащений пластинами знизу і зверху, просто встановлювати на палях;
- Вбудований механізм забезпечення стійкості дозволяє зважувати встановлюються на опорах палі;
- Запобігання зміщення датчика за рахунок кріплення болтами.



Рис. 3.30 Акселерометр ADIS16210 в герметичному корпусі (Analog Devices)



Рис. 3.31 Трьох осьовий акселерометр з індикатором

ADIS16210 і Sensor® (Рис. 3.30, 3.31) - це цифрова підсистема вимірювання відхилення (інклінометр), яка забезпечує точні вимірювання по кутах крену і тангажу в повному діапазоні  $\pm 180^\circ$ . Вона поєднує в собі трьохосевий датчик прискорення, виконаний за технологією MEMS, схеми обробки сигналу, набір адресованих користувачем регістрів для програмування/збору даних і сумісний з SPI послідовний інтерфейс [43]. В процесі виробництва кожен модуль піддається калібруванню для забезпечення оптимальної точності вимірювань. Компонент додатково видає свідчення цифрового датчика температури і вимірювання напруги живлення, а також має можливості управління внутрісистемного калібрування, частотою дискретизації,



настройками фільтрації, сигналами тривоги, конфігурацією введення/виведення і енергоспоживанням.

Для забезпечення жорсткого механічного зв'язку з платформою і якісної механічної стабільності вимірювальні елементи, виконані за технологією MEMS, прикріплені до алюмінієвого сердечника. Підсистема вибірки даних працює від внутрішнього тактового сигналу, що позбавляє від необхідності в зовнішньому джерелі синхронізації. Порт SPI і буфер даних забезпечують зручний доступ до точних результатів вимірювань датчиків і налаштувань конфігурації.

ADIS16210 випускається у вигляді модуля, що має габарити 35 мм × 55 мм × 25 мм, з монтажними отворами під кріпильні гвинти M5 і герметичним торцевим з'єднувальним інтерфейсом. Він працює в розширеному температурному діапазоні від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ .

Області застосування ADIS16210:

- Управління, стабілізація і вирівнювання платформ
- Вимірювання відхилення, інклінометри, нівелювання
- Вимірювання положення/параметрів руху
- Пристрої контролю і сигналізації
- Навігація

Як мікроконтролер вибираємо представника сімейства контролерів STM32L4 на ядрі Cortex-M4 - STM32L471RE.

Нове сімейство мікроконтролерів STM32L4 являє собою комбінацію високої продуктивності і малого споживання. Нові контролери отримали понад високопродуктивне ядро ARM Cortex-M4, багату периферію, і, разом з тим, зберегли гнучкість при оптимізації споживання, яка була характерна для більш ранніх сімейств STM32L.

STM32L4 поєднує в собі переваги STM32L і STM32F4. Серед ключових особливостей нового сімейства варто відзначити:

- високо продуктивність ядра ARM Cortex-M4 з робочою частотою до 80 МГц і піковою продуктивністю 100 DMIPS при роботі з вбудованим прискорювачом пам'яті (ART accelerator);
- широкий набір інструментів оптимізації споживання: гнучка система тактирування, динамічне управління живленням, безліч режимів зниженого споживання, набір спеціалізованої периферії для роботи в сплячих режимах;
- розширення функціоналу за рахунок нових периферійних блоків, таких як CAN, паралельний інтерфейс DFSDM, контролер зовнішньої пам'яті Quad-SPI, блок захисту пам'яті Firewall, аудіоінтерфейс SAI, інтерфейс SWP, контролер сенсорних додатків TSC.

Останній пункт дуже важливий, так як новий функціонал значно розширює сфери застосування STM32L (рис. 3.32). Поява CAN уможлиблює використання в промисловій електроніці.



Рис. 3.32 Области застосування мікроконтролерів STM32L [URL: [www.st.com](http://www.st.com)]

Мікроконтролери STM32L4 відрізняються значними обсягами пам'яті і широким вибором периферії:

- Flash: до 1 Мбайт;
- ОЗУ: до 128 кбайт;

- інтерфейси підключення зовнішньої пам'яті FSMC (не для всіх лінійок) і QuadSPI, а також - SDIO;

- багата системна периферія: 14 каналів прямого доступу до пам'яті DMA, розвинена система тактирування, вбудовані генератори, ФАПЧ, годинник реального часу, системний таймер, блок підрахунку контрольної суми, генератор випадкових чисел, блок захисту пам'яті Firewall, схема автопробудження, порти вводу-виводу і так далі;

- широкий вибір таймерів: до одинадцяти 16-бітних таймерів загального призначення, до двох 32-бітних таймерів загального призначення, віконний і незалежний сторожові таймери, до двох 16-бітних таймерів, призначених для роботи в режимах зниженого споживання;

- стандартні комунікаційні інтерфейси: SPI, I2C, USART;

- додаткові комунікаційні інтерфейси: CAN, SAI, SDIO, SWP. Для більшості лінійок також доступні USB і DFSDM;

- багата аналогова периферія: до двох 12-бітних ЦАП, до трьох 12-бітних АЦП (5 MSPS), аналогові компаратори, операційні підсилювачі, джерело опорного напруги, датчик температури, контролер сенсорних додатків;

- контролер РК-дисплеїв (не для всіх лінійок);

- блоки шифрування та криптографії.

Для передачі даних в системі Distributed Measurement System була обрана Технологія LoRa.

Технологія LoRa - об'єднує в собі метод модуляції LoRa в бездротових мережах LPWAN і відкритий протокол LoRaWAN.

Технологія LoRa забезпечує між машинної взаємодії (M2M) на відстані до 15 км при мінімальному споживанні електроенергії, що забезпечує кілька років автономної роботи на одному акумуляторі AA.

Діапазон застосувань даної технології величезний: від домашньої автоматизації та інтернету речей (Internet of Things, IoT) до промисловості та Розумних Міст.

Найбільш підходящі модулі приймачів LoRa представлені на Рис. 3.33, 3.34.

LoRa™ (від англ. Long Range) - це технологія і однойменний метод модуляції. Метод модуляції LoRa запатентований компанією Semtech, заснований на техніці розширення спектра (spread spectrum modulation) і варіацію лінійної частотної модуляції (chirp spread spectrum, CSS), при якій дані кодуються широкосмуговими імпульсами з частотою, що збільшується або зменшується на деякому часовому інтервалі.

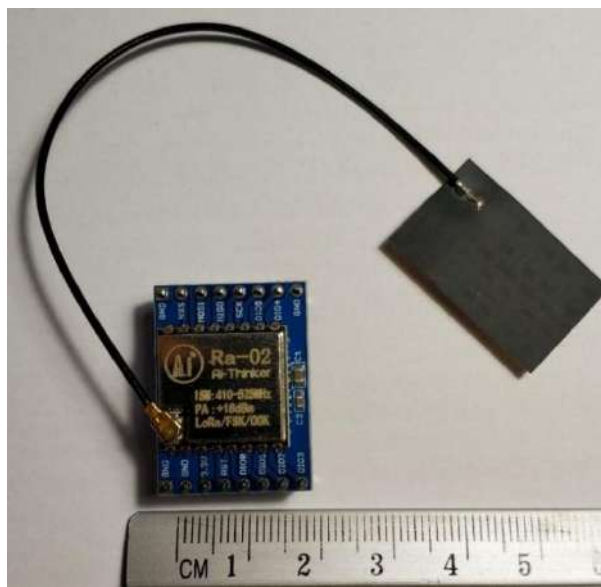


Рис. 3.33 Приймач LoRa 433МГц на платі з антеною

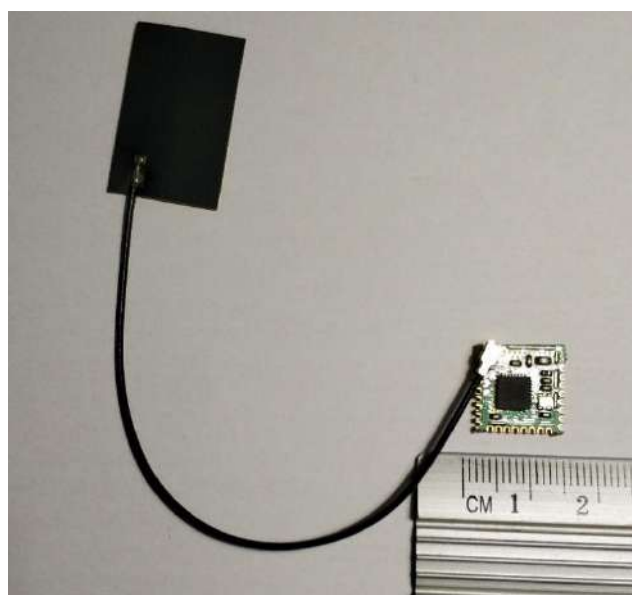


Рис. 3.34 Приймач LoRa 433МГц вбудовується в вимірювач

Таке рішення, на відміну від технології прямого розширення спектра, робить приймач стійким до відхилень частоти від номінального значення і спрощує вимоги до тактового генератора, що дозволяє використовувати недорогі кварцові резонатори. LoRa використовує пряму корекцію помилок (forward error correction, FEC), працює в субгігагерцовом діапазоні частот.

LoRa дозволяє демодулювати сигнали на рівні 20dB нижче рівня шумів, тоді як більшість систем з частотної маніпуляцією (frequency shift keying, FSK) можуть коректно працювати з сигналами на рівні не нижче 8-10dB над рівнем шумів. Модуляція LoRa визначає фізичний рівень (physical layer, PHY, OSI level 1), який може використовуватися в мережах з різною архітектурою - mesh-мережі, зірка, точка-точка і інші.

Завдяки своїй високій чутливості (-148dbm) LoRa ідеально підходить до пристроїв з вимогами низького споживання електроенергії і високої стійкості зв'язку на великих відстанях [44].

Коли говорять про технології LoRa, то найчастіше мають на увазі і метод модуляції LoRa, що належить Semtech, і відкритий протокол LoRaWAN, розвитком якого займається некомерційна організація LoRa Alliance, в яку входять різні компанії: як виробники устаткування і програмного забезпечення, так і оператори зв'язку. У числі членів LoRa Alliance IBM, Semtech і інші.

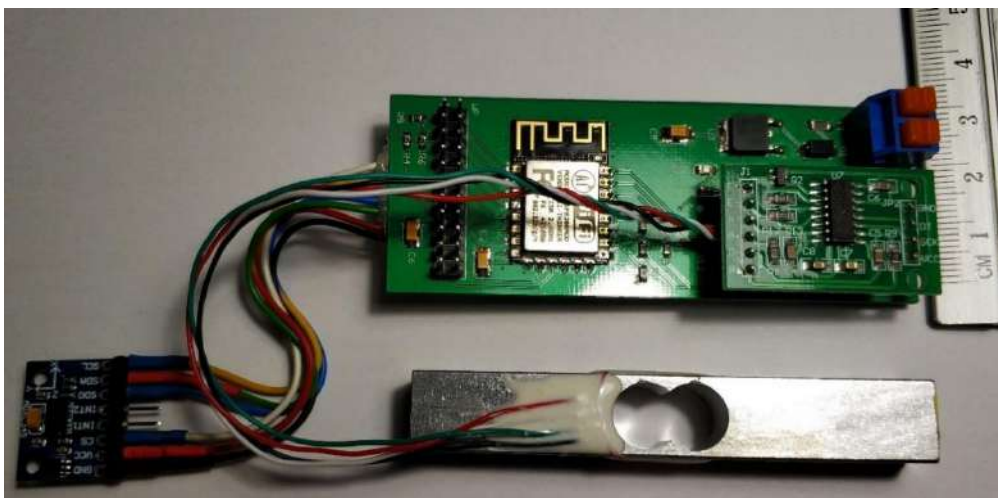


Рис. 3.35 Прототип вимірювального пристрою системи Distributed Measurement System з тензодатчиком і трьохосевим акселерометром

На Рис. 3.35. представлена плата вимірювача системи Distributed Measurement System з тензодатчиком і трьохосевим акселерометр. Моделі друкованих плат системи DMS розроблені в середовищі Altium Designer 19 і вироблені промисловим способом за технологією без вмісту свинцю. Устаткування системи DMS [46] задовольняє директиви 2002/95/ЄС Євросоюзу.



Рис. 3.36 Промисловий комп'ютер VPi-M1 +, призначений для збору даних переданих від вимірників



Рис 3.37 Промисловий комп'ютер VPi-M1 +, вид з боку приймача LoRa

Обраний промисловий комп'ютер VPi-M1+ - це одноплатний двоядерний міні комп'ютер, побудований на базі Allwinner A20. На даній платі збільшилася

кількість GPIO контактів до 40 і з'явився Wi-Fi/LoRa модуль. Процесор має тактову частоту 1.0 ГГц, графічний процесор GPU ARM Mali-400 MP2. Плата несе на борту 1 Гбайт DDR3 SDRAM ОЗУ, Gigabit Ethernet, SATA, USB, HDMI, microUSB OTG, Camera Interface, microSD, а також є 40 висновків GPIO, сумісних з Raspberry Pi. Є кнопки живлення, перезавантаження і U-boot. Можна підключити пристрої і датчики через I2C, SPI, UART і ін. Блок живлення повинен бути на 5 В і мінімум 2 А. Дана плата сумісна з багатьма операційними системами Linux-подібними. І має багато дистрибутивів спеціально розроблених для BPI-M1+: Android, Raspbian, Debian, Lubuntu, Ubuntu, Ezgo, OpenWrt, і ін.

### 3.3.1. Некогерентні частоти в вимірювальній системі DMS

У фізиці когерентністю називається узгодженість декількох коливальних або хвильових процесів в часі, що виявляється при їх складанні. Під узгодженістю мається на увазі сталість різниці фаз і частот цих процесів, що дає при додаванні стаціонарну (незмінну) інтерференційну картину [73].

Когерентними можуть бути не тільки рівні частоти, але і частоти  $F_1$  і  $F_2$ , ставляться один до одного як відношення натуральних чисел  $M$  і  $N$ :

$$F_1 / F_2 = M / N, \text{ где } N \neq 0,$$

оскільки такі частоти при взаємодії також дають стаціонарну інтерференційну картину.

У технічній системі когерентна частота сигналу по відношенню до частоти сигналу опорного генератора може бути отримана [43]:

- постійної затримкою сигналу опорної частоти;
- розподілом частоти опорного генератора за допомогою лічильної схеми розподілу частоти;
- синтезом частоти системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) або інших методів синтезу, заснованому на вихідних когерентних частотах.

Будь-яка реальна вимірювальна система знаходиться в зоні впливу різних частот, присутніх у вихідному сигналі, і частот які впливають на фізичні процеси в самій вимірювальній системі (частота мережі живлення, частота перетворення імпульсного джерела живлення, частота перетворення АЦП і інші фактори). При цьому частоти від незалежних джерел некогерентні.

У статті [73] описані застосовувані методи обробки сигналів у вимірювальних системах. Ці методи складно реалізувати на апаратному рівні і вимагають точного налаштування обладнання та неспроможні при проведенні діагностики палі.

Для вирішення завдання діагностики палі, авторами був удосконалений метод ударних імпульсів [68] шляхом комбінації зазначеного методу з методами передискретизації і децимації сигналу [5].

Отриманий метод обробки і підвищення точності діагностичної інформації отримав назву «Метод інтерполяційної децимації передискретизації сигналу».

Підвищення точності отриманої діагностичної інформації проводиться за рахунок наступних прийомів:

1. Застосовується метод передискретизації - це процес вибірки сигналу з частотою дискретизації, що значно перевищує частоту Найквіста.

2. Наступним кроком є застосування до отриманих даних децимації з дробовим коефіцієнтом проріджування відліків. Даний вид децимації необхідний, коли частота дискретизації сигналів некогерентна з частотою оброблюваного сигналу.

В цьому випадку для децимації з коефіцієнтом  $M / L$ , де  $M, L \in \mathbb{Z}$ ;  $M > L$ , спочатку необхідно провести інтерполяцію відліків з допомогою інтерполюючого полінома порядку  $L$ , а потім виконати їх проріджування з коефіцієнтом  $M$ , наприклад, за допомогою описаної процедури додаткового стробування відліків АЦП [87]. Можлива також децимація з ірраціональними коефіцієнтами перерахунку.



### 3.3.2. Метод діагностування основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд

Перше, що слід визначити - це фізичний зміст ударних імпульсів. Коливання тіла, що зазнає зовнішній механічний вплив, умовно можна розкласти на три складові:

- Поперечні коливання;
- Поздовжні коливання;
- Крутильні коливання;

Слід відразу обмовитися, що крутильні коливання випадають з області представленої роботи. Поперечні коливання - це не що інше, як вібрація пружною деформації або коливання тіла щодо стану спокою [68].

Залежність від часу являє собою в найпростішому випадку затухаючу синусоїду.

Поздовжні коливання - це коливання геометричних розмірів тіла (розтягування-стиснення) при поперечній деформації під впливом зовнішнього механічного впливу.

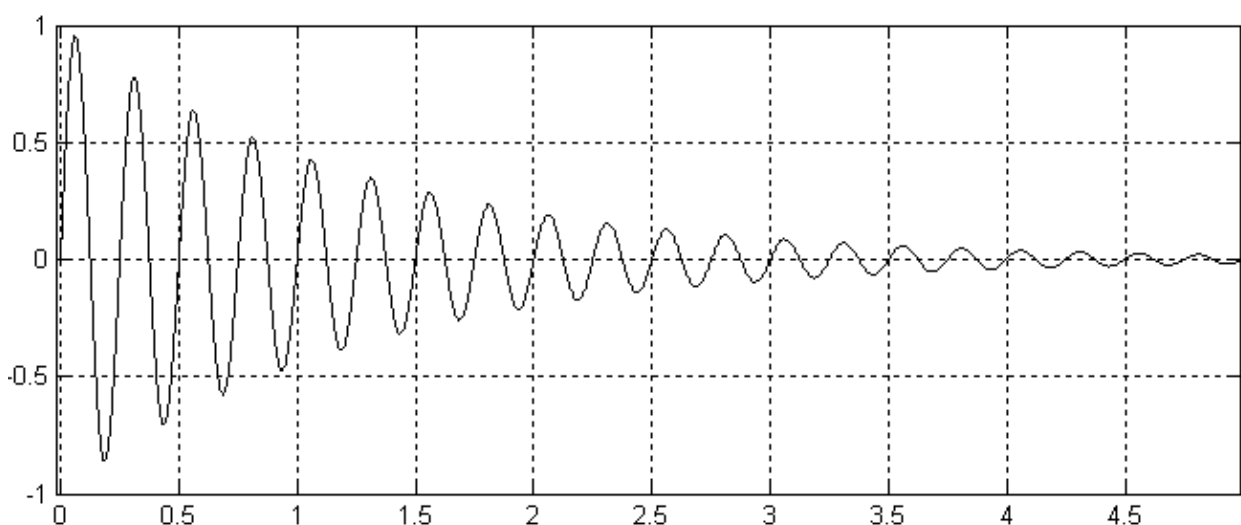


Рис. 3.38 Швидко затухаючі коливання палі після удару

При реєстрації залежності сигналу від часу вона являє собою швидко затухаючі перехідні процеси (Рис. 3.38). Їх амплітуда залежить від геометричних розмірів і матеріалу тіла, що деформується, а також від сили зовнішнього впливу, частота - від геометричних розмірів, матеріалу та температури тіла. Саме ці сигнали є інформативним при використанні удосконаленого методу ударних імпульсів.

Практично, такий сигнал не можна реєструвати за допомогою звичайного п'єзоакселерометра, це пов'язане з рядом труднощів, пов'язаних з фільтрацією сигналу і залежністю АЧХ акселерометра від способу установки.

Для впевненої реєстрації хвиль розтягування-стиснення фірмою SPM був розроблений спеціальний датчик, що складається з механічного резонатора, індуктивності і диференціального підсилювача. Така конструкція дозволяє відійти від низькочастотної вібрації і мінімізувати вплив способу установки датчика (за винятком кріплення на магніті). Механічний резонатор є свого роду камертоном, що сприймає хвилі розтягу-стиску і перетворює їх в пульсації на своїй резонансній частоті. Індуктивність перетворює механічні коливання в електричні, диференційний підсилювач є вхідним каскадом вимірювального каналу.

У розробленій авторами системі Distributed Measurement System застосовуються наступні типи датчиків, які реєструють коливання, що виникають при ударах: тензорезистивний датчик і мікроелектромеханічний трьохосьовий акселерометр.

Критерієм відсутності несправностей палі і її задовільного стану приймаємо співвідношення частот АЦП і власних коливань палі після удару. Частота власних коливань палі залежить від форми і матеріалу, з якого виготовлена палля, ця частота залишається незмінною, до тих пір, поки її технічний стан задовільний. Удари виникають в момент проходження судна при спуску на воду по спусковим доріжкам сліпа. При обробці сигналу що залежить від часу та містить інформацію про частоту власних коливань, з метою усунення

некогерентності сигналів, була застосована передискретизація і децимація з дробовим коефіцієнтом.

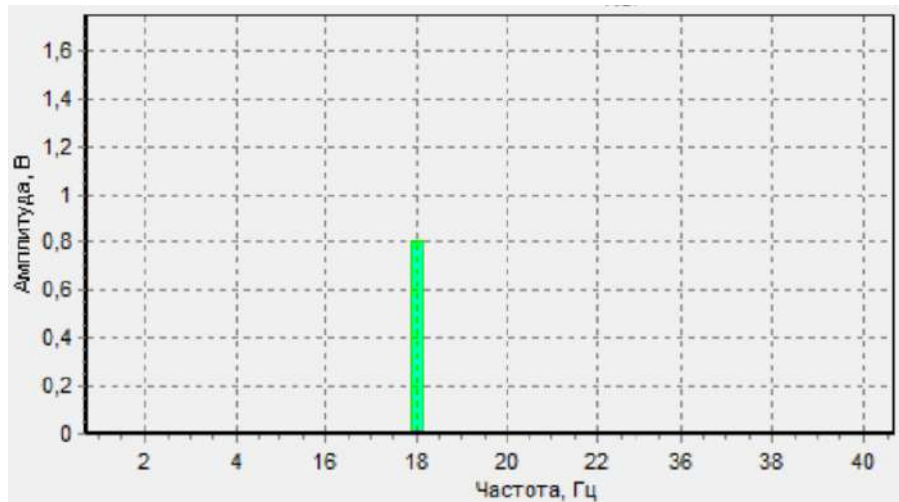


Рис. 3.39 Задовільний технічний стан

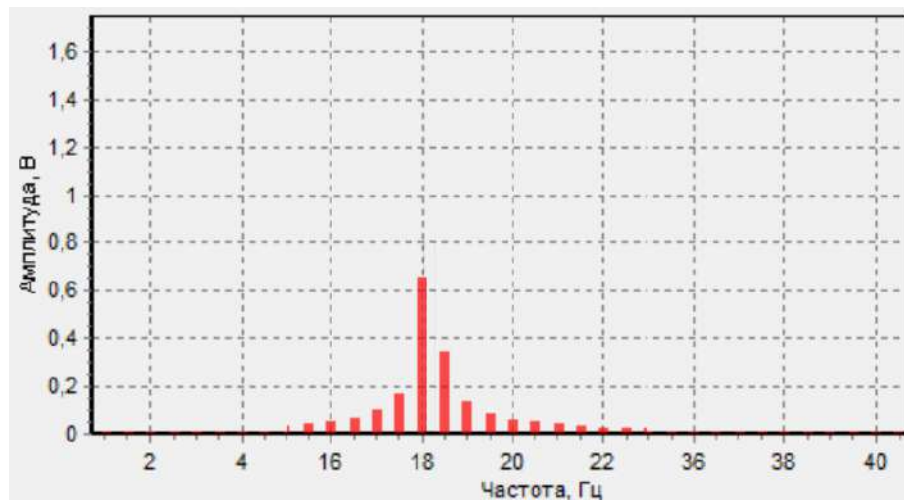


Рис. 3.40 Незадовільний технічний стан

В результаті цього, співвідношення частоти сигналу АЦП і частоти власних коливань є натуральним числом. Частота, яка домінує, представлена в спектрі сигналів єдиною гармонікою при задовільному технічному стані палі (Рис. 3.39). У разі переходу технічного стану палі в незадовільний в спектрі сигналу виникають додаткові гармоніки (Рис. 3.40), навколо частоти власних коливань, через зміну домінуючої частоти. Кількість цих додаткових гармонік та

відстань їх від уставки домінуючої частоти і буде свідчити про ступінь руйнування палі.

Для забезпечення безперервного контролю за елементами і агрегатами СГТС розроблено метод діагностики на основі автоматизованої системи діагностики і контролю технічного стану DMS, яка встановлюється на контрольованому об'єкті.

В апаратному та програмному забезпеченні системи DMS, що здійснює контроль технічного стану елементів і агрегатів СГТС реалізовані методи:

- електричних вимірювань механічних величин: температури, сил, тисків і перевантажень, що діють на елементи в осьовому напрямку;
- мікроелектромеханічного вимірювання лінійного прискорення діючих на елементи в осьовому, поздовжньому і поперечному напрямках;
- циклічного декодування вимірюваних величин;
- вібраційної діагностики елементів СГТС;
- інтерполяційної децимації передискретизації сигналу.

При реєстрації залежності сигналу від часу, ця залежність являє собою швидко затухаючі перехідні процеси, амплітуда яких залежить від геометричних розмірів і матеріалу тіла, що деформується, а також від сили зовнішнього впливу, частота - від геометричних розмірів, матеріалу та температури тіла. Саме частота власних коливань є інформативною при використанні методу контролю технічного стану елементів СГТС, тому що характеризує зміну геометричних розмірів цих елементів при незмінній температурі та матеріалі елементів.

На практиці, такий затухаючий сигнал практично неможливо реєструвати за допомогою звичайного п'єзоакселерометра, це викликано рядом труднощів, пов'язаних з фільтрацією сигналу і залежністю АЧХ п'єзоакселерометра від способу установки.

У розробленій автором системі DMS застосовуються наступні типи датчиків: тензорезистивний датчик і мікроелектромеханічний трьохосьовий

акселерометр для реєстрації коливань та термометри опору Pt1000 для вимірювання температури.

Для визначення технічного стану елемента СГТС в першу чергу припустимо що цей елемент цілісний ( $q_{ц} = 1$ ), виміряємо температуру елемента  $T$  та обчислимо, за формулою (1), очікувану частоту власних коливань  $F_1$  при температурі  $T$ . По-друге налаштувати АЦП таким чином, щоб співвідношення частоти дискретизації АЦП і очікуваної частоти власних коливань було натуральним числом. По-третє, провести запис вібросигналу з тензорезистивного датчика і акселерометра.

На рис. 3.41, у якості прикладу, наведено вібросигнал отриманий з палі (як одного з основних елементів СГТС). По цьому сигналу можливо охарактеризувати технічний стан палі. Крім корисної складової, він має в своєму спектрі багато «шумів», котрі необхідно відфільтрувати.

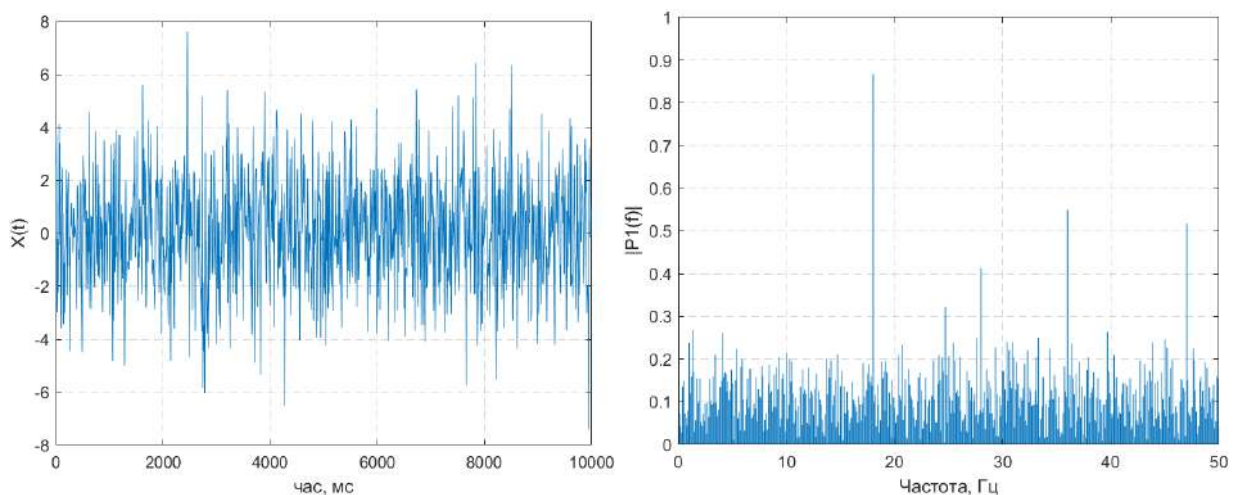


Рис. 3.41 Вібросигнал у часі і спектрограма вібросигналу з палі

Для оцінки величини «шумів» використовуємо співвідношення Хинчина:

$$U_{ш}^2 = \frac{1}{T^2} \int_0^T \int_0^T R(t_2 - t_1) x(t_1) x(t_2) dt_1 dt_2 \quad (3.21)$$

де,  $R(t_2 - t_1)$  - кореляційна функція випадкового процесу,  $x(t_x)$  – детерміновані функції,  $T$  - період інтегрування.

Співвідношення сигнал-шум визначається за формулою:

$$\gamma \approx \frac{U_c \sqrt{T}}{2\sqrt{S_o}} = \frac{U_{\text{вих}}}{\sqrt{U_{\text{ш}}^2}} \quad (3.22)$$

де,  $U_c$  – корисний сигнал,  $T$  - період інтегрування,  $S_o$  - спектральна щільність потужності шумів,  $U_{\text{вих}}$  – вихідний сигнал.

Попередня фільтрація сигналу проводиться в частотній області за допомогою цифрового гребінчастого фільтра, коефіцієнти якого розраховуються для кожного окремого вимірювання на основі оцінки величини шумів (3.21) та співвідношення сигнал-шум (3.22). Результат попередньої фільтрації вібросигналу зображено на рис. 3.42.

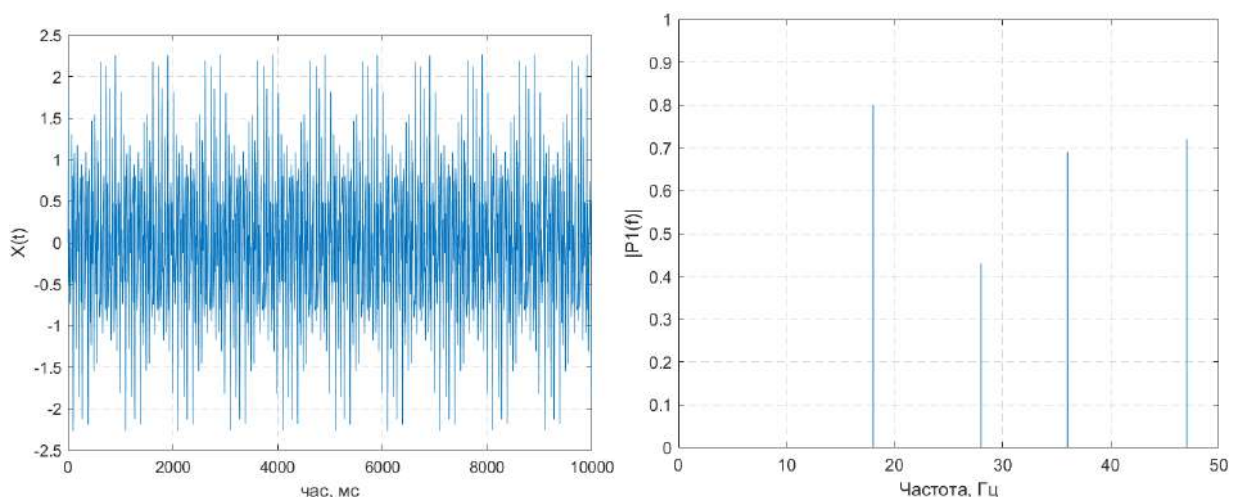


Рис. 3.42 Вібросигнал у часі і спектрограма вібросигналу після попередньої фільтрації

На наступному кроці, з корисного сигналу виділяється домінуюча частота, сигнал якої додатково фільтрується, та отримується синусоїдальна модель домінуючої частоти власних коливань палі після удару (рис. 3.43).

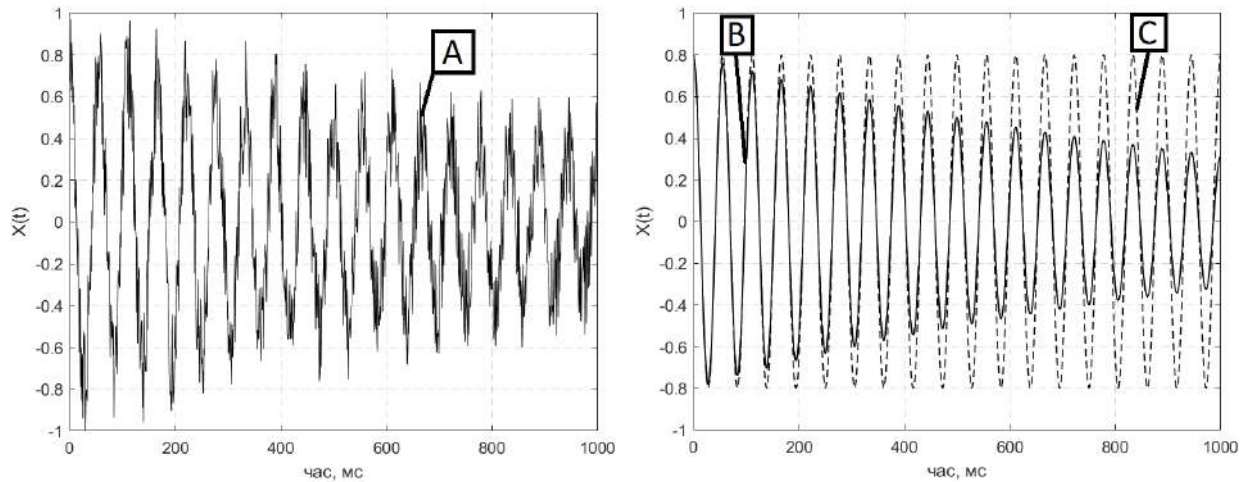


Рис. 3.43 Виділена домінуюча частота вібросигнала (А), відфільтрований сигнал (В) та синусоїдальна модель домінуючої частоти власних коливань палі (С)

$$r_{\text{ч}} = \frac{f_{\text{ацп}}}{f_{\text{скп}}} \quad (3.23)$$

Критерієм (3.23) цілісності основних несучих елементів СГТС і їх справного технічного стану  $r_{\text{ч}}$  приймаємо співвідношення  $f_{\text{ацп}}$  - частоти дискретизації АЦП і  $f_{\text{скп}}$  - частоти власних коливань основних несучих елементів СГТС після удару. При справному технічному стані частота власних коливань основних несучих елементів СГТС залежить від температури, форми і матеріалу, з якого виготовлено елемент. Удари виникають в момент проходження судна при спуску на воду по спусковим доріжкам сліпа. При обробці сигналу що залежить від часу та містить інформацію про частоту власних коливань, з метою усунення некогерентності сигналів, була застосована передискретизація і децимація з дробовим коефіцієнтом.

В результаті цього, співвідношення частоти дискретизації АЦП і частоти власних коливань є натуральним числом. Частота, яка домінує, представлена в спектрі сигналів єдиною гармонікою при справному технічному стані палі (рис. 3.44). У разі переходу технічного стану палі в несправний в спектрі сигналу виникають додаткові гармоніки, через зменшення домінуючої частоти (рис. 3.45). Величина на яку зменшується критерій цілісності палі  $r_q$  залежить від характеру руйнування палі.

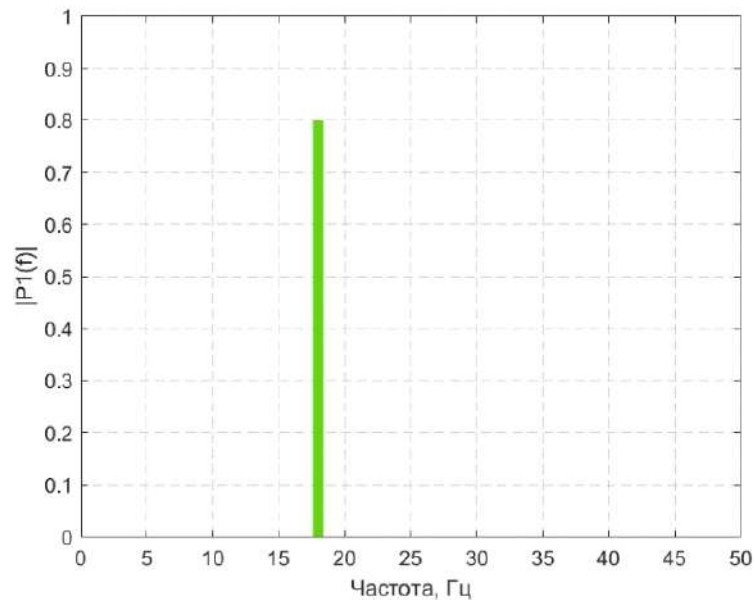


Рис. 3.44 Справний технічний стан палі при 24 °С - частота власних коливань  $f_{скп} = 17,9811$  Гц, критерій цілісності  $r_q = 1$



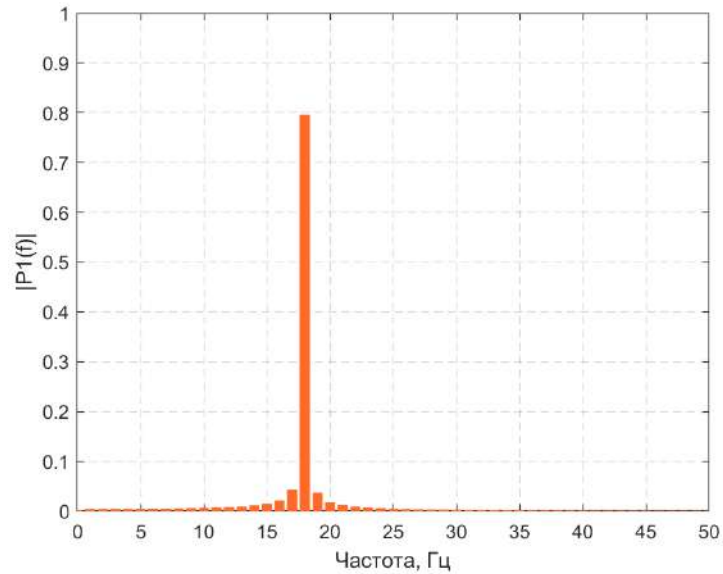


Рис. 3.45 Задовільний технічний стан палі при 24 °С -  
частота власних коливань  $f_{\text{СКП}} = 17,9721$  Гц, критерій  
цілісності  $r_{\text{ч}} = 0,9995$

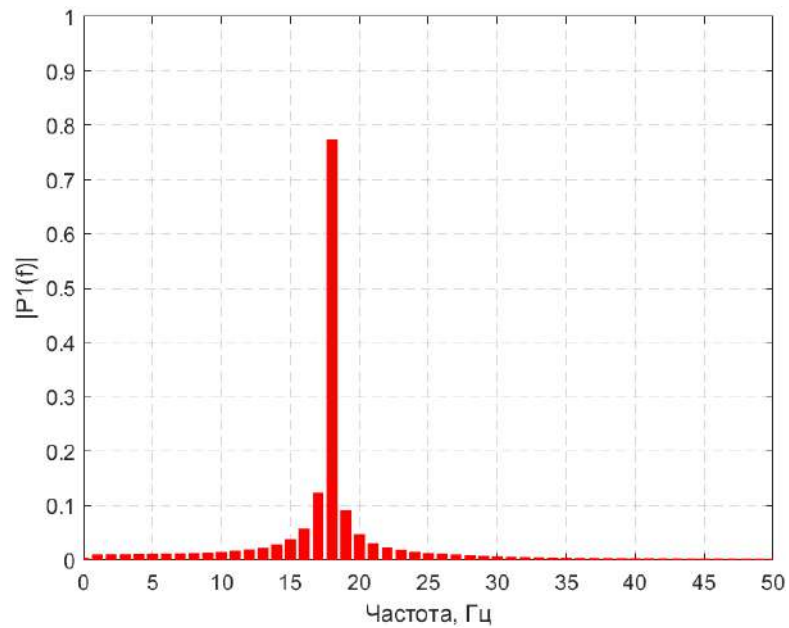


Рис. 3.46 Несправний технічний стан палі при 24 °С -  
частота власних коливань  $f_{\text{СКП}} = 17,9631$  Гц, критерій  
цілісності  $r_{\text{ч}} = 0,9991$

### **3.4. Удосконалення методу вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок**

Незмінність елементів тягових лебідок показує, що в цілому використовувана конструкція задовольняє вимогам довговічності і ремонтпридатності. Безвідмовність даного механізму забезпечується своєчасним технічним обслуговуванням і ремонтом. Різниця в числі двигунів і редукторів, потужності і габаритів, основних та аварійного гальма проявляється при порівнянні однієї з перших і однією з останніх лебідок фірми «Отіс». Це дозволяє використовувати при діагностуванні даних механізмів однотипний підхід, враховуючи періодичність роботи і різні маси вантажу, що піднімається.

Тривалі терміни експлуатації призводять до появи і розвитку несправностей, усунення яких вимагає тривалої зупинки СГТС. Це пошкодження підшипників, руйнування яких призводить до зносу і поломок зубчастих передач, і пошкодження зубчастих передач через розбіжності кутів нахилу зубів шевронною передачею при заміні шестерні. Найбільша тривалість ремонту пов'язана з заміною барабана, що часто є наслідком ослаблення різьбових з'єднань. Порушення режиму змашування, заміна і регулювання гальм доповнюють цей перелік несправностей. Деякі пошкодження виявляються при візуальному огляді, інші залишаються прихованими до етапу критичного руйнування, що передує відмови, і призводять до необхідності виконання додаткових робіт при ремонті.

Контроль технічного стану з використанням методів технічного діагностування дозволяє визначити характер пошкодження і скоротити час ремонту за рахунок більш раннього проведення підготовчих робіт. Найбільш інформативні вимірювання параметрів вібрації [24, 41, 47, 48, 77], які використовуються при оцінці технічного стану механізмів роторного типу енергетичного обладнання, що працює в тривалому режимі. Відомі спроби

використовувати даний підхід для побудови стаціонарної системи вібраційного моніторингу тягової лебідки [76].

В роботі [26] для ідентифікації причин вібрації і підвищення точності діагностування роторних машин, що працюють із змінною швидкістю обертання, запропонований метод багаторазового дискретного виміру вібраційних параметрів. Діагностування механізмів, що працюють в повторно-короткочасному режимі при зміні напрямку обертання і різному навантаженні, має відмінні риси, які слід враховувати при побудові алгоритму діагностування і правил розпізнавання дефектів, що і становить основну мету даної глави.

Тягові лебідки в основному представлені двома конструкціями - з одним і двома проміжними валами. Наявність виносних опор і три напрямки виміру параметрів вібрації (вертикальний, горизонтальний, осьовий) визначають розташування точок контролю (рис. 3.47) і позначення, що відповідає прийнятим заводським правилам. В цілому розташування контрольних точок відповідає рекомендаціям стандарту ISO 10816-1-97 [88].

Особливістю роботи тягової лебідки є реверсування приводних двигунів, при якому змінюються напрямки діючих сил в зубчастих передачах. Це призводить до зміни загального рівня вібрації у вертикальному і горизонтальному напрямках і вимагає проведення двох послідовних циклів вимірювання параметрів загального рівня вібрації. Одночасно з'являється можливість використання горизонтального напрямку при спектральному аналізі. Додатково можуть використовуватися контурні діаграми вібрації, що дозволяють оцінити якість затягування різьбових з'єднань і стан фундаменту. Оцінка одночасності спрацьовування гальм і їх стану реалізується при розташуванні датчиків на важелях або гальмівних колодках.

Вибір режимів вимірювання вібрації проводиться з урахуванням кінематичних характеристик елементів і обмеженого циклом роботи (близько 30 с) часу проведення вимірювань. Частотні діапазони для діагностування тягової лебідки включають частоти:

обертання проміжних валів і вала барабана (0,5 - 3,0 Гц);  
обертання швидкохідного вала і зубчастих передач (10,0 - 350 Гц);  
підшипників кочення (10 - 5000 Гц).

Рекомендовані параметри вимірювань загального рівня вібрацій:

віброшвидкість - середньоквадратичне значення в частотному діапазоні 10 - 1000 Гц, додатково може бути використаний діапазон 2 - 200 Гц;  
віброприскорення - середньоквадратичне і пікове значення в частотному діапазоні 10 - 5000 Гц.

Загальний рівень вібрації вимірюють віброметрами з безперервним інтегруванням при підйомі правого і лівого скіпів.

Встановлено, що оцінка технічного стану тягових лебідок проводиться щодо наступних значень: до 4,0 мм / с - функціонування без обмеження строків; 4,0 - 7,0 мм / с - функціонування в обмеженому періоді; понад 7,0 мм / с - можливі пошкодження машини.

Різниця в значеннях віброшвидкості по контрольним точкам при роботі правого і лівого скіпів в даному випадку - результат ослаблення затягування різьбових з'єднань, зносу посадочних місць підшипників.

Значення віброприскорення в частотному діапазоні 10 - 5000 Гц дозволяють локалізувати несправні підшипники і оцінити якість проведеного ремонту. При цьому необхідно враховувати, що почався процес приробітки, похибки монтажу і неусунуті пошкодження.

З метою удосконалення методу вібраційного контролю технічного стану тягових лебідок (рис. 3.47), при обробці сигналу віброшвидкості та аналізі вібродіаграм (рис. 3.48) було використано передискретизацію та децимацію з дробовим коефіцієнтом, що дозволило підвищити точність гармонійного аналізу вібраційного сигналу. Удосконалений метод на відміну від існуючих методів має похибку визначення віброшвидкості менше 0,5%, що дозволяє якісніше визначати фізичний знос підшипників.

Коефіцієнт передискретизації  $n_{\text{пд}}$  має задовольняти умові  $n_{\text{пд}} = 256$ , та визначатися за наступним співвідношенням:

$$n_{\text{пд}} = \frac{f_{\text{ацп}}}{f_{\text{мч}}} \quad (3.24)$$

де  $f_{\text{ацп}}$  – частота дискретизації АЦП,  $f_{\text{мч}}$  – максимальна частота в спектрограмі віброшвидкості.

Дробовий коефіцієнт децимації визначається співвідношенням:

$$n_{\text{дц}} = \frac{f_{\text{дч}}}{f_{\text{мч}}} \quad (3.25)$$

де  $f_{\text{дч}}$  – домінуюча частота в спектрограмі віброшвидкості,  $f_{\text{мч}}$  – максимальна частота в спектрограмі віброшвидкості.

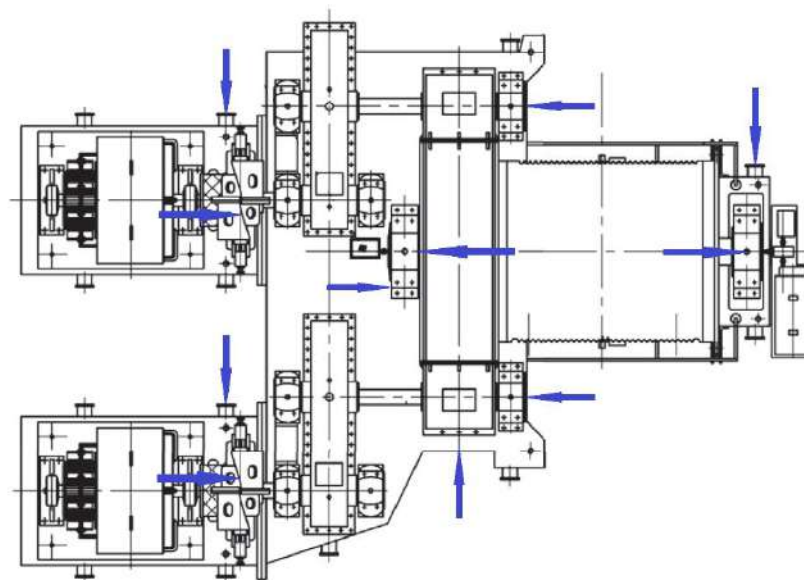


Рис. 3.47 Тягова лебідка СГТС (стрілки вказують на місця установки вібродатчиків)

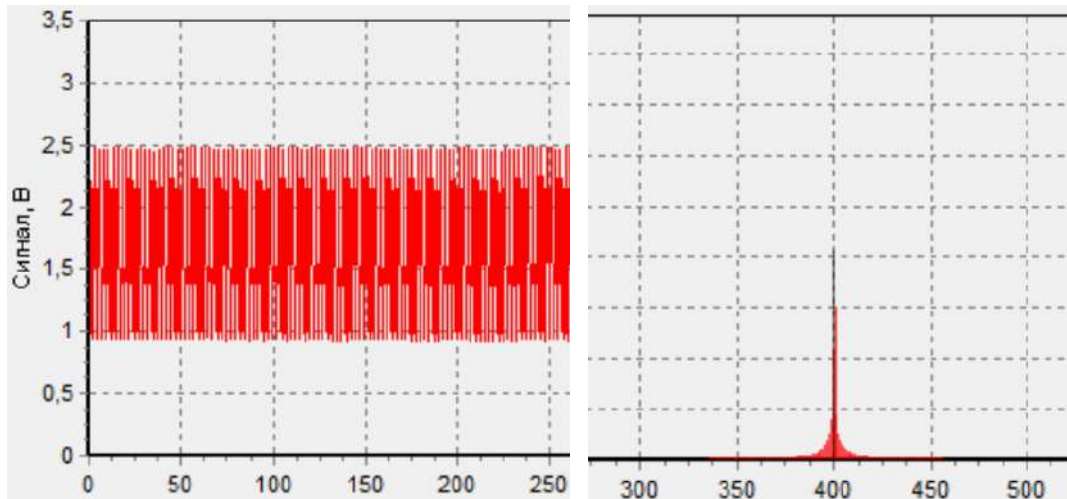


Рис. 3.48 Сигнал у часі віброшвидкості і спектрограма віброшвидкості лебідки

### 3.5. Удосконалення методу діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом

У суднопіднімальних гідротехнічних спорудах як і в судових енергетичних установках отримали велике поширення роторні насоси, що забезпечують перекачку різних в'язких середовищ: палива, мастил та інше. Як і всі судові механізми, насоси потребують відповідного обслуговуванні і контролю технічного стану. Доцільним є обслуговування та ремонт, що проводиться "за станом" по результатам проведеної безрозбірної діагностики. Найбільшого поширення для діагностики насосів отримали методи вібродіагностики. Вібродіагностика роторних насосів має ряд особливостей, обумовлених характером і станом середовищ, що перекачуються. Для нормування вібрації і діагностики технічного стану роторних насосів використовуються норми Українського морського реєстра судноплавства (УМРС). Для з'ясування особливостей вібродіагностики роторних насосів були проведені вимірювання на спеціальному стенді, що дозволяє імітувати різні режими роботи судових насосів: різний тиск в системі і температуру середовища, що перекачується. В результаті вимірювань отримані третьоктавні і

вузькосмугові спектри вібрації насосів які розвиваються при різних тисках і температурах середовища, що перекачується. Проведений аналіз результатів показав, що норми УМРС для діагностики суднових роторних насосів мають недостатню інформативність з огляду на те, що не враховують залежність спектра вібрації від тиску, що розвивається і температури перекачування. Характер отриманих сигналів показує, що рівні третьоктавного спектра віброшвидкості істотно залежать від температури середовища, що перекачується, це необхідно враховувати при застосуванні норм УМРС. Великий вплив температура середовища надає на характер вузькосмугового спектру віброприскорення в області середніх частот, менше - на характер спектру віброшвидкості. В результаті можна зробити висновки про доцільність використання для діагностики технічного стану роторних насосів вузькосмугових спектрів віброшвидкості і спектрів огинаючої високочастотного компоненти вібрації, при цьому слід спиратися не на абсолютні значення рівня вібрації, а на наявність характерних частот і присутність їх модуляцій, породжуваних різними дефектами [85].

Роторні насоси набули широкого поширення в суднових енергетичних установках та суднопіднімальних гідротехнічних спорудах. Як правило, вони використовуються для перекачування в'язких рідин - палива, масел, рідин для гідросистем. Насоси застосовуються в системах змащення суднових дизелів як транспортні насоси в системах перекачування палива і масел і як насоси гідравлічних приводів. Роторні насоси застосовуються в відповідальних суднових системах і потребують своєчасного ремонту і обслуговуванні. Найбільш раціональним методом експлуатації роторних насосів є обслуговування та ремонт " по стану", коли технічне обслуговування і ремонт проводяться за результатами визначення технічного стану методами безрозбірної діагностики. При проведенні безрозбірної діагностики часто використовуються і методи прогнозування залишкового ресурсу агрегату [59, 82]. Тому велике значення має методика проведення діагностики, а також

достовірність і точність отриманих результатів. Найбільш поширеним методом діагностики роторних насосів є вібродіагностика [6, 24]. Стосовно до роторних насосів в суднових умовах вона має ряд особливостей, які необхідно враховувати при визначенні їх технічного стану [85].

Основні вимоги до вимірювання вібрації насосів, відповідності нормі і, отже, визначення технічного стану насосів наведені в правилах УМРС 1 "Частина VII. Механічні установки".

Інші суттєві вимоги до проведення діагностики викладені в "Інструкції з використання достовірних свідчень вбудованих і переносних засобів діагностування та неруйнівного контролю при огляді об'єктів на судах".

Зазначена норма поширюється на всі типи насосів, незалежно від їх конструктивних особливостей, коригується тільки по потужності (дві градації) і способу монтажу насоса (горизонтальне розташування або вертикальне). Це є недоліком зазначеного нормування. У роторних насосів (шестеренних і гвинтових) рівень вібрації значно залежить від в'язкості масла і тиску, що розвивається насосом. Тиск насоса в кінцевому підсумку залежить від опору системи і в'язкості. В'язкість в умовах експлуатації визначається температурою перекачування. Метою проведення діагностики роторних насосів є визначення несправностей підшипників насоса, стану центрування з приводним двигуном, дефектів зачеплення в шестернях і гвинтових парах. Всі зазначені дефекти виявляються на характерних частотах, які порушуються силами, що діють при роботі насоса. Як правило, контролюються частоти рівні і кратні частоті обертання (стан центрування), зубцеві частоти (модуляція зубцової частоти може виникати як наслідок дефектів зубів) і їх вищі гармоніки, частоти обертання гвинтів. Діагностика підшипників насоса або його електроприводу може проводитися з аналізу обвідної вібрації. Для виявлення впливу тиску що розвивається насосом на діагностичні параметри шестеренного і гвинтового насосів необхідно проводити вимірювання на лабораторному стенді, що



дозволяє імітувати різні умови роботи насосів шляхом регулювання тиску в системі і зміни температури середовища, що перекачується [85].

Вимірювання вібрації необхідно проводити на підшипникових щитах насосів в трьох напрямках (вертикальному, горизонтальному і поздовжньому).

При діагностиці технічного стану насоса може використовуватися вузькосмуговий спектр віброшвидкості, так як на частотний склад вібрації тиск і температура середовища, що перекачується, не роблять істотного впливу. При цьому за діагностичні параметри приймаються характерні частоти (роторні, зубцеві), їх модуляція, вищі і субгармоніки. Більше значення для визначення дефекту має присутність вищих гармонік, наявність і вид модуляції, ніж амплітуда окремих дискретних складових, яка залежить від температури середовища, що перекачується. При діагностиці технічного стану насоса може використовуватися сигнал віброприскорення в діапазоні частот до 10 кГц. Віброприскорення в зазначеному діапазоні дозволяє використовувати для діагностики огинаючу високочастотної компоненти сигналу, крім того, по сигналу віброприскорення можливо визначити наявність кавітації в насосі. На первинному етапі діагностики можливе використання третьоктавного спектра віброприскорення в діапазоні до 5 кГц з наступним уточненням по спектру огонаючої або вузькосмугового спектру віброшвидкості. Огинаюча також застосовується і для діагностики підшипників кочення насоса і електродвигуна [16, 47, 85].

З метою удосконалення методу діагностичного контролю технічного стану насосів з електроприводом, застосовується апроксимація функції, а саме метод інтерполяції фільтрованого вібраційного сигналу (рис. 3.49) кусочно-кубічними функціями. Це підвищує точність і надійність контролю основної гармоніки коливань, що дозволяє проводити якіснішу оцінку радіального і кутового зміщення осей насосів та силових агрегатів СГТС.

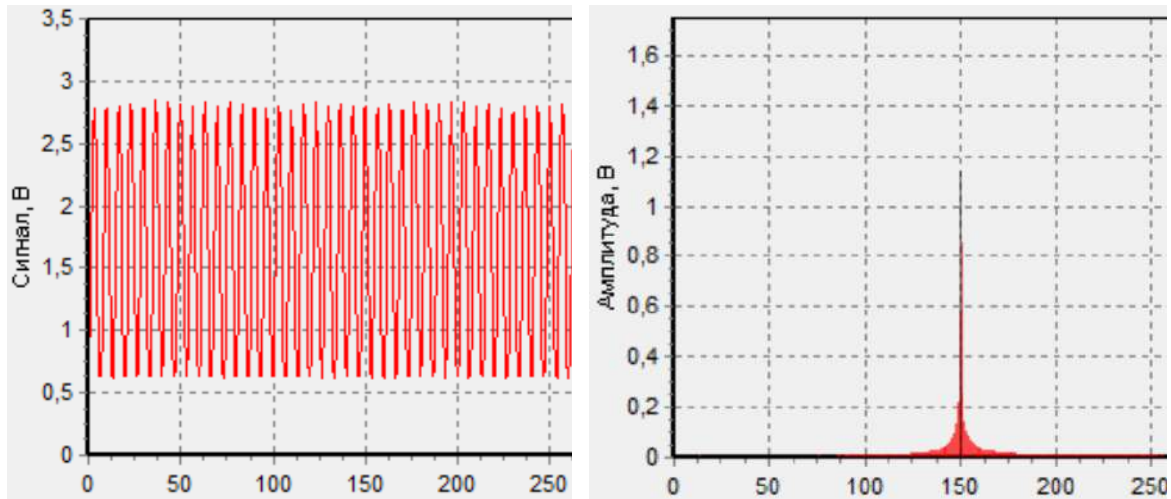


Рис. 3.49 Сигнал у часі віброшвидкості і спектрограма віброшвидкості насосу

Ідея удосконалення методу полягає в наступному. Вібраційний сигнал на кожному відрізку  $[X_i, X_{i+1}]$  апроксимується поліномом третього ступеню, тобто функцією виду

$$f_i(x) = a + b(x - X_i) + c(x - X_i)^2 + d(x - X_i)^3 \quad (3.26)$$

При цьому, у вузлах співпадають не тільки значення сусідніх поліномів, а і їх перші похідні, тобто -  $f_i(X_{i+1}) = f_{i+1}(X_{i+1})$  та  $f'_i(X_{i+1}) = f'_{i+1}(X_{i+1})$ . Значення похідних інтерполюючих поліномів вибираються довільно, виходячи з попереднього аналізу спектру сигналу.

### Висновки до розділу 3

1. Метод контролю цілісності основних елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів в умовах відсутності достовірної статистичної інформації, який вперше розроблено, має відмінну особливість, суть якої у врахуванні в опису процесу зміни стану реальних властивостей матеріалів конструкцій і взаємодію їх з ґрунтом; це дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати та час на визначення стану основних несучих елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд.

2. Однією з відомих проблем автоматизації процесу контролю технічного стану суднопіднімальних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів є проблема достовірності статистичних даних які потрібні для формування моделі прогнозу технічного стану. Доведено, що достовірність знижують ряд факторів які пов'язані як з похибками вимірювань, так і з недостатньою кількістю вимірювань. Виходячи з цього, класична задача вибору типу моделі є актуальною. Аналіз показав, що в умовах недостатньої кількості вимірів та неточності вимірювань, недостатньо ефективно використовувати традиційні методи при вирішенні поставленого завдання. Тому в дисертаційній роботі пропонується новий підхід, а саме, модель залежності кількісної характеристики технічного стану від двох параметрів.

3. Актуальним є завдання розробки методу визначення технічного стану суднопіднімальних гідротехнічних споруд судноремонтних та суднобудівних заводів на основі двопараметричної моделі контролю технічного стану суднопіднімальних споруд, яка на відміну від існуючих використовує апроксимуючу функцію з метою пошуку моделі зміни технічного стану суднопіднімальних споруд в часі. Запропонована в дисертації математична модель, яка в свою чергу визначає науковий результат – метод контролю цілісності основних елементів суднопіднімальних гідротехнічних споруд.

4. Удосконалення методів вібраційного та діагностичного контролю технічного стану агрегатів та механізмів суднопіднімальних гідротехнічних споруд, є актуальним.

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ОСНОВНИХ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СУДНОПІДНІМАЛЬНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД З ОСНОВОЮ

Експериментальні дослідження передбачали вивчення вібраційного стану палі-оболонки з відкритим нижнім кінцем та її взаємодії з ґрунтовою основою при зануренні осьовим вертикальним навантаженням на висмикування з ґрунту, встановлення впливу різних форм нижнього кінця палі на напружено-деформований стан ґрунтової основи [56].

Результатами цих робіт:

1. підтверджено припущення, що:

- критерієм цілісності палі і її справного технічного стану прийнято співвідношення частот дискретизації АЦП і власних коливань палі після удару;
- частота власних коливань палі залежить лише від температури, до тих пір, поки її технічний стан справний.

2. отримано залежності опору ґрунту зануренню і висмикування палі-оболонки від величини осьового навантаження, визначення закономірностей розподілу бокового тиску ґрунту по зовнішній і внутрішній поверхнях палі-оболонки і опору ґрунту по її підшві, а також встановлення висоти підйому ґрунту в порожнині оболонки при зануренні [56].

Через відсутність загальнодержавних та відомчих нормативних документів з розрахунку трубчастих паль з відкритим нижнім кінцем, єдиною можливістю встановлення несучої здатності є спосіб статичних випробувань в польових умовах, що вимагають дорогого технологічного обладнання, обладнання і тривалого часу їх проведення. Основні вимоги до проведення статичних і динамічних випробувань викладені в ДБН В. 2.1-10-2009 [75] і ДСТУ Б В.2.1-1-95 [74]. З урахуванням вимог цих документів можуть бути палі певного опору, за якими проводиться статична оцінка їх несучої здатності по ґрунту.

Використання розрахункових моделей гідротехнічних споруд [54], розроблених в середині минулого століття не відображають їх специфічну

роботу в період будівництва та експлуатації, вони не враховують спільну роботу конструкції, ґрунтової основи і водного середовища, які працюють в умовах складного навантаження. Ці методи розрахунків не дозволяють з єдиних позицій реалізувати закладені в нормативних документах дві групи граничних станів за несучою здатністю і деформацій, з урахуванням пружних і пластичних властивостей матеріалів конструкції і ґрунтової основи.

Багаторічний досвід досліджень показує, що споруди в процесі експлуатації піддаються впливу різних чинників, що впливають на величину несучої здатності [95]. До факторів, що впливає на несучу здатність, відносяться наступні: технологія будівництва, режим експлуатаційних навантажень, пошкодження споруди, реологічні явища в матеріалах конструкцій і ґрунтах підстави, вплив навколишнього середовища та інші [96].

У багатьох працях висвітлені теоретичні і практичні питання раціональної експлуатації гідротехнічних споруд [38, 39, 97]. Викладено питання впливу на споруди статичних і динамічних навантажень [94]. Значну увагу приділено аналізу впливу на спорудження факторів часу. Наведено методи розрахунку споруд що експлуатуються на тривалу міцність, які дозволяють оцінювати несучу здатність конструкцій в залежності від їх віку і на цій основі призначати необхідний режим експлуатації [66]. Описано технічні засоби, методика спостережень і досліджень за станом споруд [17, 18, 34].

Обстеження та експериментальні випробування споруд для підйому і спуску суден по похилих площинах, спрямовані на виявлення фактичного стану новозбудованих і експлуатованих об'єктів, визначення дійсної роботи гідротехнічних споруд і їх підстав для коригування та розробки обґрунтованих методів розрахунку [29].

З огляду на актуальність завдання, розроблена, виготовлена і випробувана установка для дослідження взаємодії палі-оболонки з ґрунтом.

В основу установки поставлена задача створення пристрою для вивчення взаємодії палі-оболонки з ґрунтом, що забезпечує можливість поділу сил опору

грунту, що діють на палю при її зануренні або витягу з ґрунту осьовими навантаженнями, на складові по внутрішньої і зовнішньої бокової поверхні палі-оболонки.

Результати експериментів використані для розробки програми розрахунку конструкцій на палях-оболонках з відкритим нижнім кінцем.

Вони передбачали вивчення взаємодії палі-оболонки з відкритим нижнім кінцем і ґрунтової основи при зануренні осьовим вертикальним навантаженням і висмикуванню з ґрунту, встановлення впливу різних форм нижнього кінця палі на напружено-деформований стан ґрунтової основи.

З метою впровадження в практику розроблених методів, в системі автоматизованого проектування (САПР) Altium Designer 19 був змодельований, та виготовлений промисловим способом вимірювальний пристрій (рис. 4.1) системи DMS з тензодатчиком і трьохосьовим акселерометром. На рис. 4.2 представлено моделі друкованих плат системи DMS. Моделі розроблені автором в САПР Altium Designer 19 і вироблені промисловим способом за технологією без вмісту свинцю. Устаткування системи DMS задовольняє вимогам директиви 2002/95/ЄС Євросоюзу.

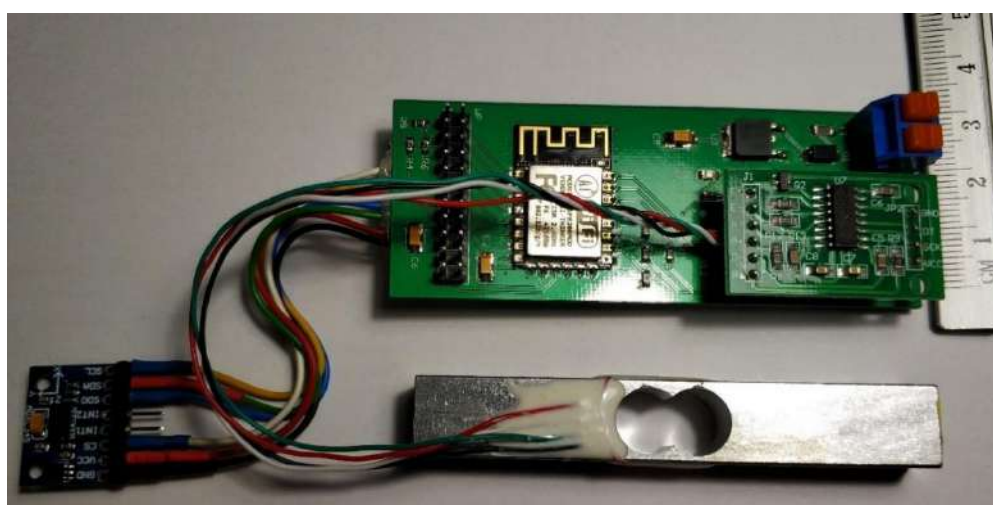


Рис. 4.1 Вимірювальний пристрій системи DMS з тензодатчиком і трьохосьовим акселерометром

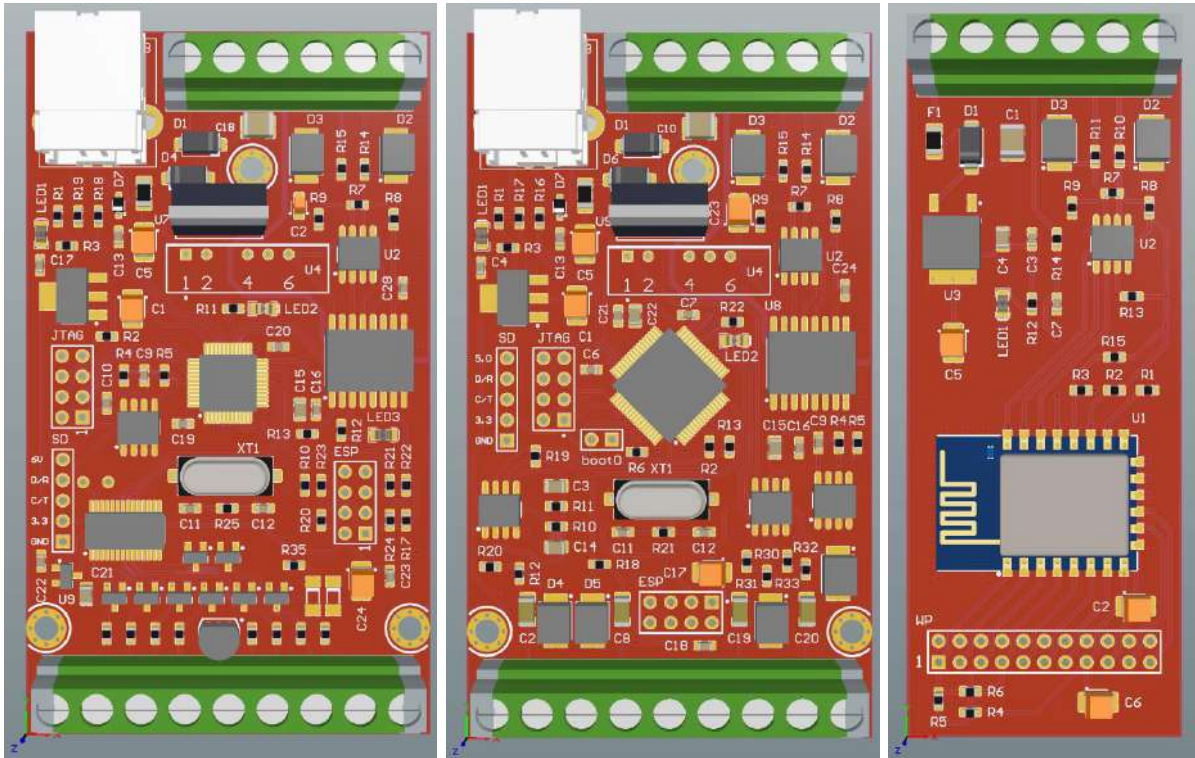


Рис. 4.2 Моделі друкованих плат системи DMS розроблені в САПР Altium Designer 19

Результатами цих робіт є: отримання залежностей опору ґрунту зануренню і висмикуванню палі-оболонки від величини осьового навантаження, визначення закономірностей розподілу бокового тиску ґрунту по зовнішній і внутрішній поверхнях палі-оболонки і опору ґрунту по її підшві, а так само встановлення висоти підйому ґрунту в порожнині оболонки при зануренні.

З огляду на актуальність завдання, випробувана установка для дослідження взаємодії палі-оболонки з ґрунтом. В основу установки - поставлено створення пристрою для вивчення взаємодії палі - оболонки з ґрунтом, що забезпечує можливість поділу сил опору ґрунту, що діють на палю при її зануренні або витяганні з ґрунту осьовими навантаженнями, на складові по внутрішньої і зовнішньої бічних поверхонь і по кільцевому торцю низу палі, а також встановлення по глибині розподілу нормального тиску і сил тертя по зовнішній боковій поверхні палі - оболонки.

#### 4.1. Експериментальна установка, вимірювальна апаратура і методика проведення випробувань

Експериментальна установка (рис. 4.3) включає:

- 1 - ґрунтовий лоток;
- 2 - модель палі - оболонки спеціальної конструкції;
- 3 - модель трубчастої палі для вивчення кінематики піщаної основи;
- 4 - пристрій для створення осьового навантаження при зануренні моделі в ґрунт і її висмикування;
- 5 - вимірювальна і реєструюча апаратура;
- 6 - методика проведення випробувань.



Рис. 4.3 Загальний вигляд експериментальної установки для випробування паль-оболонки і жорстких штампів



Ґрунтовий лоток має розміри: висота - 115 см, ширина - 75 см, довжина - 80 см. Бічні стінки лотка виконані з листів полірованого скла товщиною 15 мм, що спираються на його металевий каркас. Задня стінка розбірна і складається з окремих досок товщиною 40 мм, які встановлюються по кінцях в передбачені напрямні. Така конструкція дозволяє легко спорожнити лоток від піску і визначати кут природного укосу, який, як відомо, для сухого піску дорівнює куту внутрішнього тертя.

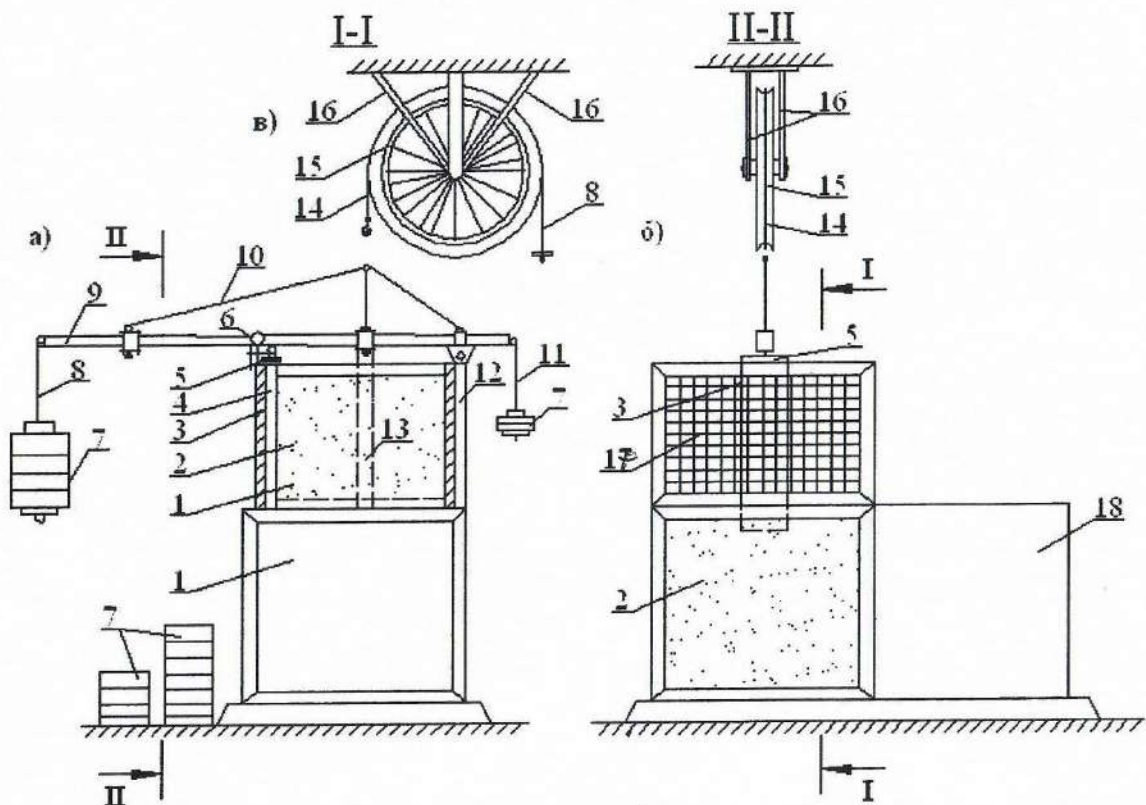


Рис. 4.4 - Схема експериментальної установки:

а - вид по I-I, б - вид по II-II, в - висмикуючий пристрій. Умовні позначення: 1 - верхня і нижня частина лотка; 2 - пісок; 3 - скляні бічна стінка лотка; 4 - модель напівоболонки; 5 - завантажувальний полуштамп; 6 - індикатор переміщень; 7 - гирі; 8 - вантажна підвіска; 9 - навантажувальний важіль; 10 - розтяжки; 11 - підвіска на консолі; 12 - шарнірна опора важеля; 13 - місце для вдавнення пальця; 14 - вантажний трос; 15 - колесо; 17 - сітка на склі лотка; 18 - лоток для запасу піску.

Передня стінка лотка виконана у вигляді жорсткої металевої плити, яка закріплена зверху з двох сторін нерухожими шарнірними опорами. По осі плити на відстані 12 см від дна лотка встановлена третя рухома шарнірна опора, закріплена жорстко другим кінцем до каркасу лотка. Плита виконує, крім того, роль жорсткої підпірної стінки для отримання епюри тиску ґрунту на стінку. За її осі в передбачені гнізда вмонтовані датчики тиску з кроком 15 см по висоті. Конструкція датчиків розроблена на кафедрі МРПВШіТЕ ОНМУ.

Для вивчення кінематики переміщення частинок піску при зануренні або витягу з ґрунту моделі на боковій стінці лотка нанесена фарбою тонкими лініями сітка з осередками 5x5 см.

На рисунках 4.3, 4.4 наведено загальний вигляд і схема експериментальної установки відповідно.

## 4.2. Модель палі-оболонки

Одним з основних елементів установки є модель палі - оболонки спеціальної конструкції (рис. 4.2), яка включає корпус 1, що складається з набору циліндричних ланок висотою 15 см з протоками по торцях розмірами 4x4 см, з'єднаних між собою з внутрішньої сторони плоскими скобами з одним подовженим і іншим круглим отворами по кінцях 2. Скоби закріплюються за допомогою болтів 3 одним кінцем шарнірно нерухомо до верхньої циліндричної ланці, а іншим - до нижньої з можливістю поздовжнього зсуву. На зовнішній поверхні кожної скоби наклеєні тензорезистори для вимірювання розтягуючих зусиль, що характеризують сили тертя ґрунту по зовнішній бічній поверхні кожної ланки. У кожній циліндричній ланці палі-оболонки по середині по висоті передбачено гніздо для установки датчиків тиску ґрунту на бічну поверхню оболонки. У середині корпусу оболонки 1 співвісно поміщений порожнистий циліндричний сердечник 4, на зовнішній поверхні якого наклеєні тензорезистори 5 для вимірювання тиску ґрунту на внутрішню поверхню циліндричного

сердечника. Знизу моделі палі-оболонки передбачені знімні наконечники кільцевого перерізу 6 і ґрунтозахисний кожух у формі склянки 7, жорстко з'єднаний болтами зі штампом оболонки і вільно переміщається вертикально по корпусу палі. По верху моделі передбачено навантажувальний жорсткий диск 9, з'єднаний з корпусом болтами 11 і сердечником сполученим болтом 10.

Співвісність корпусу 1 і сердечника 4 забезпечується передбаченими проточками на штампі 6 і навантажувальному диску 9, діаметри яких дорівнюють внутрішніх діаметрів корпусу і сердечника.

Експериментальна модель палі-оболонки має різні замінні конструктивні форми наконечників вістря, що дозволяють вивчати їх взаємодію з ґрунтовою основою. Основні конструктивні форми знімних наконечників вістря моделі палі-оболонки наведені на рис. 4.5



Рис. 4.5 - Конструктивні форми знімних наконечників вістря моделі палі-оболонки.

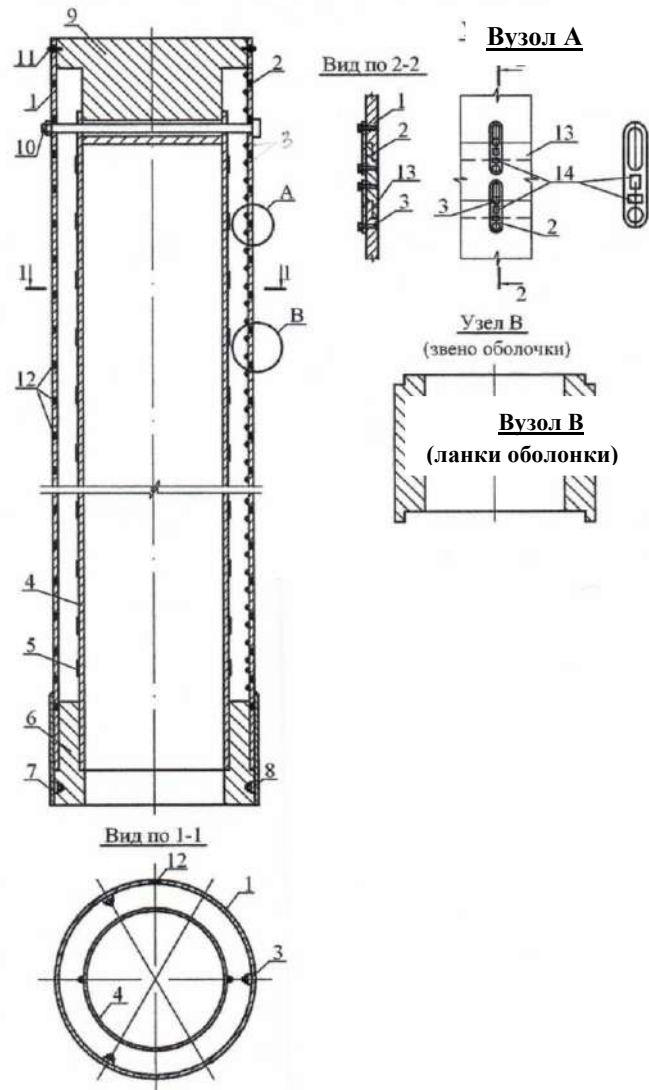


Рис. 4.6 - Поздовжній розріз і план моделі палі-оболонки.

Умовні позначки: 1 - корпус; 2 - плоскі скоби; 3 - кріпильні болти; 4 - циліндричний сердечник; 5 - тензорезистори; 6 - штамп; 7 - ґрунтозахисних кожух; 8 - кріпильні болти; 9 - навантажувальний диск; 10 - з'єднувальний болт; 11 - болти кріплення корпусу до навантажувальних диску; 12 - датчик тиску ґрунту; 13 - проточки-шліци; 14 - робочі та компенсаційні резистори.

Основні параметри моделі палі-оболонки:

- модель виготовлена з нержавіючої труби;
- корпус довжиною  $L = 105$  см, зовнішній діаметр  $D_H = 108$  мм, товщина стінки  $\delta_{ст} = 5$  мм, складається з 7 ланок висотою по 15 см з проточками по торцях

для забезпечення співвісності і поздовжнього переміщення на 4 мм, вага кожної ланки 1,9 кг. Загальна вага корпусу - 13,7 кг;

- сердечник з нержавіючої труби  $L = 102$  см, зовнішній діаметр  $D_H = 75$  мм, товщина стінки  $\delta_{ст} = 5$  мм, вага - 6,9 кг;

- знімні наконечники з нержавіючої сталі висотою 70 мм з проточками зверху висотою по 5 мм для співвісного з'єднання корпусу і сердечника (рис. 4.5);

- здатність навантаження плити з нержавіючої сталі зовнішнім діаметром  $D_H = 98$  мм, висотою  $H = 40$  мм, з проточками висотою 25 мм для забезпечення співвісності корпусу і сердечника і можливості поздовжнього переміщення. Вага навантаження плити - 1,8 кг.

### 4.3. Методика проведення дослідів

#### 4.3.1. Методика занурення моделі палі-оболонки

В експериментальних дослідженнях в якості ґрунтової основи використовувався дрібнозернистий кварцовий пісок з кутом внутрішнього тертя  $\varphi = 33^\circ$ , питомою масою  $\gamma = 26,5$  кН/м<sup>3</sup>, об'ємною масою  $\gamma_{об} = 15,5$  кН/м<sup>3</sup>.

Методичні досліді з вивчення впливу тертя бокових стінок лотка, проведені П.І. Яковлєвим, М.М. Варгіним, А.І. Пасічником та ін. Показали, що гальмуюча дія стінок позначається тільки в безпосередній їх близькості [21, 84]. Це дає підстави стверджувати, що в середній частині лотка вплив бічних стінок на модель не буде позначатися.

Випробування моделі палі-оболонки проводилися в такій послідовності.

Лоток заповнювався піском до рівня підшви моделі. Модель палі-оболонки в зібраному вигляді встановлюється на піщану подушку вертикально, строго під завантажувальним пристроєм (рис. 4.7). Тимчасово закріплюється її положення. Відсипається пісок в лоток до рівня на 5 см нижче верхнього торця моделі, до цього рівня заповнюється піском порожнина осердя моделі.

Тимчасове закріплення забирається, встановлюється завантажувальний пристрій, вимірювальна і реєструюча апаратура. Підключаються датчики до реєструючої апаратури, проводиться їх перевірка та балансування.



Рис. 4.7 - Модель пали-оболонки під завантажувальним пристроєм

Перед початком дослідів з'єднувальний болт 10 видаляється, сердечник відділений від корпусу, навантажувальний диск з'єднаний болтами 11 з корпусом і може спільно з ним переміщатися вертикально під дією осьового навантаження. Після перевірки працездатності пристроїв та апаратури приступають до виконання випробувань моделі.

Випробування моделі осьовим навантаженням проводилися в чотири етапи.

Перший етап: проводиться навантаження диска 9 вдавлюють їх зростаючими ступенями силою за допомогою пристрою. При цьому відбувається занурення в ґрунт тільки корпусу, нижній кінець якого вільно входить в середину кожуха 7, сердечник і штамп залишаються нерухомими. Після кожного ступеня завантаження навантажувальним диском і стабілізації переміщень корпусу,

фіксується нормальний тиск на бічну поверхню оболонки за допомогою датчиків 12 і сумарна сила тертя по зовнішній поверхні корпусу 1. Цей процес проводиться до торкання кільцевого виступу навантажувального диска 9 з верхнім торцем циліндричного сердечника 4, момент торкання фіксується включенням індикаторної лампочки.

Таким чином, на першому етапі ґрунт взаємодіє тільки з зовнішньою поверхнею корпусу моделі паль-оболонки.

Потім видаляються болти 11, від'єднується корпус від навантажувального диску 9, вступає спільна взаємодія навантажувального диску 9, циліндричного сердечника 4 і штампа 6, корпус моделі залишається нерухомим. Приступають до виконання випробувань моделі на другому етапі.

Другий етап: вивчається взаємодія ґрунту з внутрішньою поверхнею циліндричного сердечника 4 і подошвою штампа 6 при послідовному навантаженні диску 9. Навантаження доводиться до розрахункової граничної несучої здатності основи. В ході проведення цього етапу випробувань визначаються сили тертя по внутрішній поверхні циліндричного сердечнику 4 і тиск ґрунту [71] по подошві штампа кільцевого типу 6.

Для поділу на складові опору ґрунту, що діє по внутрішній поверхні циліндричного сердечника і подошві штампа, проводять третій етап випробувань моделі.

Третій етап: навантажувальний диск знімається. У передбачені отвори у верхній частині циліндричного сердечника для з'єднувального болта 10 закріплюється підйомна скоба з дроту діаметром 4 мм, яка з'єднується з тросом висмикуваючого механізму. У цих випробуваннях корпус моделі і штампа залишаються нерухомими.

Після підготовки моделі та оснащення, проводиться додатковим ступінчастим осьовим висмикувачим навантаженням. В ході випробувань вимірюється сумарна сила тертя по внутрішній поверхні циліндричного

сердечника і його вертикальні переміщення, після кожної ступені завантаження. Вертикальні переміщення сердечника доводилися до 5 см.

Четвертий етап: визначаються величини розподілу нормального тиску ґрунту і сил його тертя по висоті зовнішньої поверхні корпусу моделі при її вилученні з ґрунту осьовим ступінчастим навантаженням. Підготовка моделі до випробування цього етапу полягає у від'єднанні корпусу від сердечника. Під час експерименту тільки корпус взаємодіє з контактуючим піском. Сердечник і штамп нерухомі. Спочатку вступає у взаємодію з піском тільки перша ланка корпусу 1, яка переміщається вгору під дією зростаючої висмикуючої сили. У момент досягнення граничного опору піску по боковій поверхні ланки відбувається його зрушення на величину подовженого отвору в плоских скобах першої ланки (близько 4 мм). Фіксується нормальний тиск ґрунту за допомогою датчика 5 і сила тертя по зовнішній поверхні першої ланки датчиками 12 і 14. При подальшому збільшенні висмикуючого навантаження в роботу вступає друга ланка і переміщається разом з першою вгору до настання граничного опору піску по поверхні другої ланки і зсуву на величину подовжених отворів в плоских скобах другої ланки. Вимірюються нормальний тиск ґрунту і сили тертя по зовнішніх поверхнях першої і другої ланок. Потім при збільшенні висмикуючого навантаження у взаємодію з піском вступає третя ланка і переміщається разом з першою і другою ланками вгору до настання граничного опору піску по боковій поверхні і зсуву на величину подовжених отворів в плоских скобах третьої ланки і т.д. до повного переміщення корпусу моделі з ґрунту.

В експериментальних дослідженнях використовувалася наступна апаратура:

- індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм для вимірювання переміщень вузлів моделі;

- контактні датчики тиску ґрунту на бічну поверхню корпусу моделі паль-оболонки;



- тензорезисторні датчики для вимірювання прогину стінки сердечника моделі при визначенні нормального тиску ґрунту і розтягуючих зусиль в плоских сергах для оцінки тертя ґрунту об бічну поверхню ланок корпусу моделі.

Електрична тензорезисторна схема включалася в напівміст з автоматичною компенсацією температурних деформацій.

Показання датчиків тиску ґрунту, розтягуючих зусиль в плоских сергах і приладів стінки конструкції фіксувалися за допомогою вимірювальної системи СПТ - 3.

У дослідах для створення вдавлюючого осьового навантаження на модель палі застосовувався важільний пристрій, спеціально виготовлене з профільюючої сталі квадратного перетину 40x40 мм, товщиною стінки 3 мм і загальною довжиною 1625 мм. Для створення необхідної жорсткості до важеля приварюються ферма з пруткової сталі. На кінцях важеля шарнірно закріплювалися підвіски для гир навантаження. Підвіска на консолі служила для врівноваження важеля. На відстані 325 мм від консольного кінця до важеля приварюють шарнір, до якого кріпилася опора, приварена до корпусу лотка. Плечі важеля пристрою становили: відстань від шарніра до центру палі 355 мм, а від шарніра до вантажної підвіски - 1410 мм. Таким чином, ставлення плечей склало - 4.

Висмикувачий механізм являв собою нерухоме колесо, яке шарнірно за допомогою кронштейнів в певному місці прикріплений до стелі лабораторії. Для цього використовувалося велосипедне колесо діаметром 60 см без шини. Вантажний сталевий трос діаметром 3 мм заводився через колесо по жолобу обода, одним кінцем кріпився до голови моделі висмикування палі, а другим до вантажної підвіски. Таким чином, вантаж що прикладається на підвіску, відповідає висмикувачому навантаженню. Це спрощувало контроль висмикувачих сил.

Проведені попередні методологічні випробування запропонованої моделі палі-оболонки показали її високу точність, багатофункціональність і

продуктивність. Запропонована модель палі-оболонки дозволяє досліджувати взаємодію ґрунту та зовнішній поверхні палі-оболонки, опір ґрунту з оболонкою окремо: визначати нормальний тиск ґрунту на зовнішню поверхню палі-оболонки, опір ґрунту по зовнішній і внутрішній бічних поверхнях оболонки і нижньому її торцю, а також встановлювати розподіл по висоті оболонки і нижньому її торцю, а також встановлювати розподіл по висоті оболонки нормального тиску ґрунту і його опір по зовнішній поверхні палі-оболонки. Результати випробувань на такій моделі дозволяють більш повно оцінити спільну роботу палі-оболонки і контактуючого з нею ґрунту, і ефективно використовувати сучасні методи розрахунку споруд.

Таким чином, створена експериментальна установка, спеціальна модель трубчастої палі, застосовувана вимірювальна апаратура і розроблена методика випробувань дозволяють отримувати необхідну інформацію про несучу здатність палі-оболонки з відкритим нижнім кінцем. В цьому і полягає відмінність розробленої експериментальної моделі палі-оболонки від існуючих, які дозволяють вимірювати сумарну силу опору ґрунтової основи.

Описана установка показала себе працездатною.

#### **4.3.2. Методика вивчення переміщень середовища в зоні контакту основи при зануренні і висмикування палі-оболонки**

При розробці розрахункових моделей несучої здатності трубчастих паль з відкритим нижнім кінцем важливим є знання деформації контактує ґрунту підстави. У цьому напрямку відомі роботи Яковлева П.І., Тугаєнко Ю.Ф., Готман А.Л., Зіязова Я.Ш., Єгорова К.Є., Дьяконова Н.П. та ін., які присвячені дослідженням деформації ґрунту за підпірними стінками при їх переміщенні, оцінці деформацій ґрунту в котлованах або навколо суцільних паль. Переміщення ґрунту зовні і всередині палі-оболонки з відкритим нижнім кінцем на всіх етапах занурення і висмикування не вивчалась.



Рис. 4.8 Модель напівоболонки

В роботі проведені спеціальні експериментальні дослідження взаємодії палі-оболонки з відкритим нижнім кінцем і піщаної основи з метою встановлення картини деформації піщаної основи в усіх зонах усередині і зовні оболонки на різних етапах занурення і висмикування палі, що дозволяють отримати для кожного рівня і вертикального перетину залежності "осаду - навантаження". В роботі проведені спеціальні експериментальні дослідження взаємодії палі-оболонки з відкритим нижнім кінцем і піщаної основи з метою встановлення картини деформації піщаної основи в усіх зонах усередині і зовні оболонки на різних етапах занурення і висмикування палі, що дозволяють отримати для кожного рівня і вертикального перетину залежності "осаду - навантаження".

Досліди проводити в лабораторії на спеціальній установці, що включає ґрунтовий лоток (висотою 115 см, довжиною 80 см, шириною 75 см), завантажувальний пристрій, вимірювальну та апаратуру що реєструє. Підставою служив дрібнозернистий кварцовий пісок об'ємною вагою  $\gamma = 15,5 \text{ кН/м}^3$  кутом внутрішнього тертя  $\varphi = 33^\circ$ , природної вологості.

Випробувана модель являє собою напівоболонку (рис. 4.8), спеціально виготовлену з нержавіючої труби з зовнішнім діаметром 155 мм (товщина стінки 4 мм) і довжиною 400 мм. При виготовленні моделі труба довжиною 400 мм розрізалася тонкої фрезою по утворюючим на дві рівні половини. Зрізані торці моделі прошліфовані з тим, щоб щільно прилягали до поверхні стекла бічної стінки лотка.

Основні параметри моделі напівоболонки склали: площі зовнішньої і внутрішньої бічних поверхонь рівні відповідно  $973,3 \text{ см}^2$  та  $910,6 \text{ см}^2$ , власна вага -  $42,0 \text{ кг}$ , площа нижнього торця -  $11,8 \text{ см}^2$ , кут тертя піску по боковій поверхні моделі –  $\delta=21^\circ 30'$ ,  $\text{tg}\delta=0,394$  – коефіцієнт тертя.

Для вивчення переміщень частинок піску підстави при зануренні або висмикуванні моделі палі з ґрунту на бічному склі лотка нанесена сітка з осередками  $5 \times 5 \text{ см}$  фарбою тонкими лініями.

Проведено чотири серії дослідів взаємодії напівоболонки і піщаної підстави в пухкому і ущільненому стані.

Методика випробувань передбачала отримання залежностей осаду моделі від вдавлюють осьового навантаження і вимір на кожному етапі дослідів переміщень фіксованих точок піску.

Випробування проводилися в такій послідовності. Пісок віддалявся з лотка на глибину рівну висоті випробуваної моделі. На вирівняну поверхню підстави встановлювалася вертикально модель палі, строго по осі важеля завантажувального пристрою розрізаними торцями напівоболонки впритул до скляної стінки лотка. Пісок відсипався зовні і всередині моделі горизонтальними шарами товщиною  $5 \text{ см}$ , рівними висоті осередки сітки на склі бічної стінки лотка. Після відсипання і вирівнювання кожного шару, відсипалися спеціальним пристроєм смуги піску, пофарбованого чорною тушшю, горизонтальними лініями строго по сітки, нанесеної на склі лотка. Засипка піском лотка доводилася до рівня верху моделі напівоболонки.

На голову моделі встановлювалася навантажуюча напівшайба діаметром  $160 \text{ мм}$ ; товщиною  $15 \text{ мм}$ , з проточкою по внутрішньому діаметру напівоболонки і фіксованим центром прикладання навантаження. Монтувалися завантажувальний важільний пристрій і вимірювальна апаратура. Після перевірки правильності монтажу пристрою і приладів, проводилося занурення моделі ступінчастою навантаженням, шляхом застосування гир заданої ваги на вантажну підвіску.

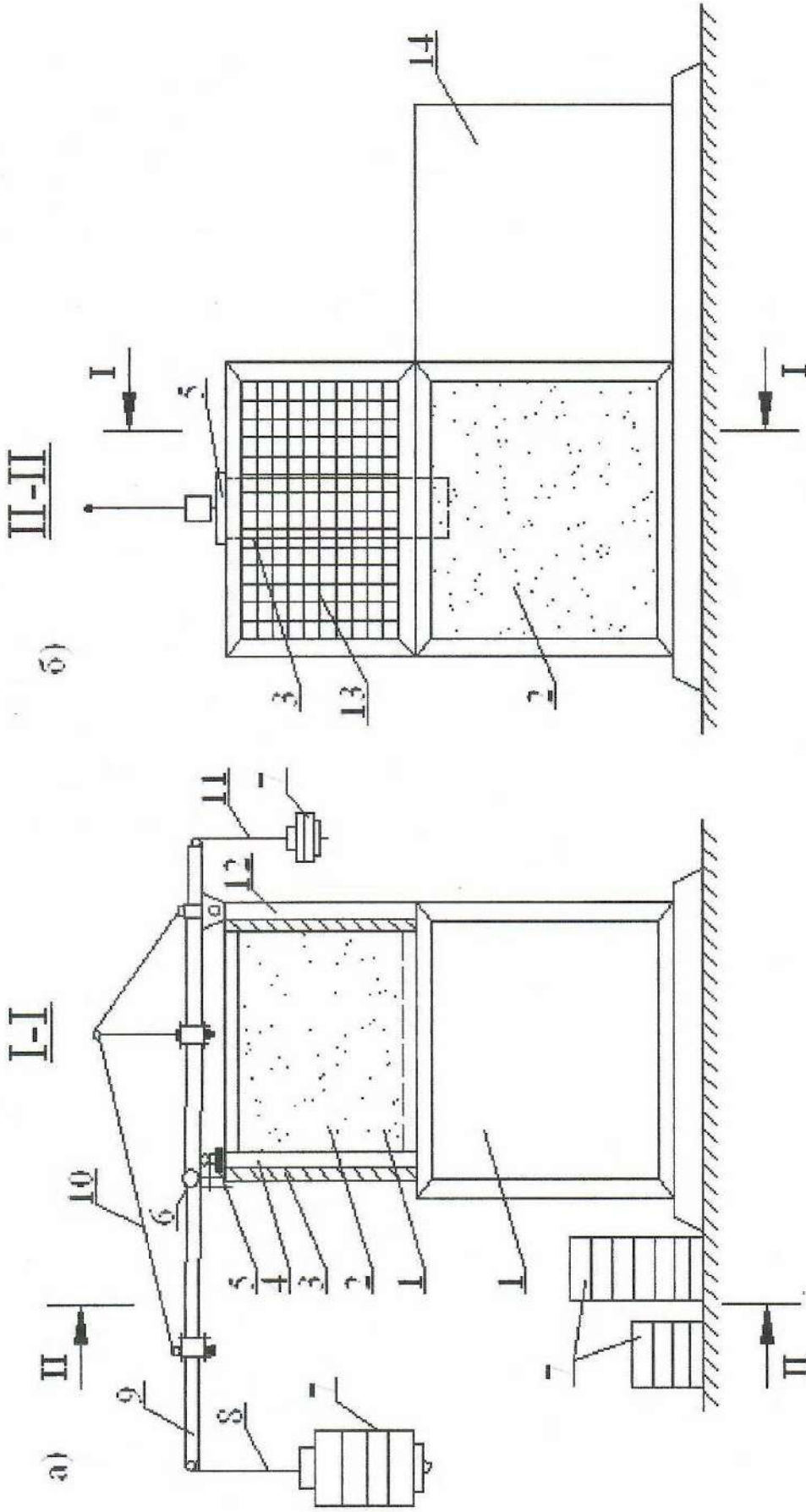


Рис. 4.9 Схема экспериментальной установки: а – разрез I-I, б – разрез II-II.

Після кожного ступеня навантаження і стабілізації переміщень моделі палі-оболонки, знімалися показання всіх приладів і фіксувалася деформація забарвлених ліній піску. Загальний осад моделі доводилася до 5 см. На рис. 4.9 показана схема експериментальної установки.

Висмикування моделі оболонки проводилося в такій послідовності: вантажна підвіска віддалялася, її роль виконувала підвіска на кінці консолі. Випробувана модель палі (полуоболонками) закріплювалася до важеля системі за допомогою дротяного (товщиною 4 мм) пристосування, вільні кінці якого вставляли в передбачені отвори в голові напівоболонки. Висмиктує навантаження у вигляді гир певної величини прикладалися ступенями на консольну підвіску і передавалася на модель при співвідношенні плечей, рівному 0,46. Переміщення моделі напівоболонки при вилученні з ґрунту вимірювалося за допомогою металевої лінійки, закріпленої до корпусу лотка.

На рис. 4.9 показаний фрагмент деформації фіксованих горизонтальних піщаних ліній, забарвлених чорною тушшю, для випадку вдавнення моделі (напівоболонки) палі-оболонки на глибину 5 см. Подібні характерні картини переміщень піску підстави спостерігаються практично у всіх видах занурення моделі. При висмикуванні моделі палі деформації фіксованих горизонтальних ліній мають ту ж картину, але розгорнуту на 180°.

Умовні позначки до рис. 4.9.: 1 – верхня та нижня частина лотка; 2 – песок; 3 - скляні бічні стінки лотка; 4 - модель напівоболонки; 5 - завантажувальний полуштамп; 6 - індикатор переміщень; 7 - гирі; 8 - вантажна підвіска; 9 - важіль; 10 - розтяжки; 11 - підвіска консолі; 12 - шарнірна опора важеля; 13 - сітка на склі; 14 - лоток для піску.

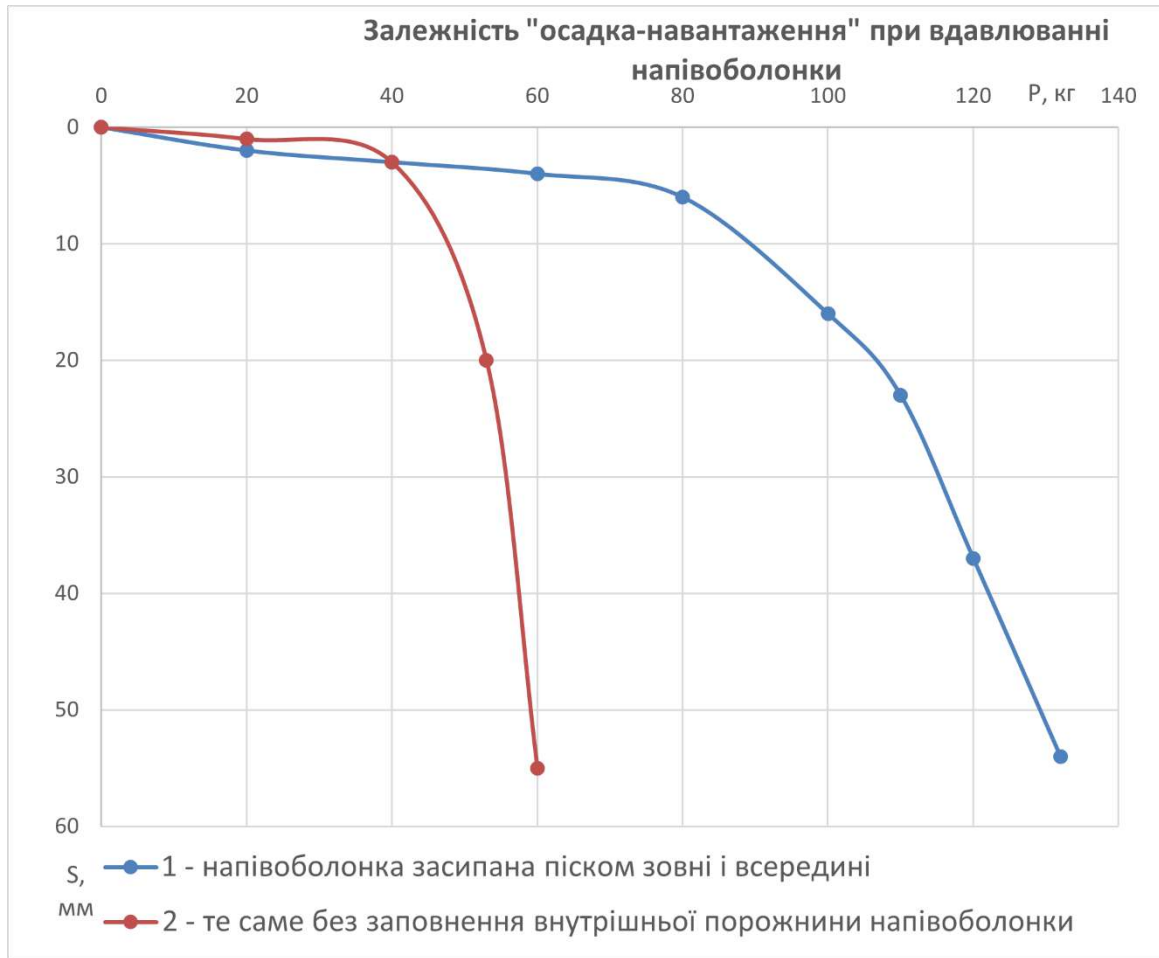


Рис. 4.10 Графік залежності осадка-навантаження при вдавлюванні

При цьому вертикальні переміщення піску, як видно з рис. 4.9а, відбуваються нелінійно по довжині. У зоні контакту на рівні поверхні засипки переміщення, як зовні, так і всередині, складають не менше 5 см. У міру віддалення від моделі палі переміщення піску збільшуються майже лінійно під кутом  $25^\circ$ . Потім приблизно на відстані більше 2,5 см від палі зміщення нелінійно зменшуються. На цьому ж малюнку суцільною лінією "К" показаний характер вертикального переміщення поверхні основи піску, отриманого по передбачуваному методу розрахунку як видно з малюнка. Теоретичні та експериментальні результати добре узгоджуються між собою.

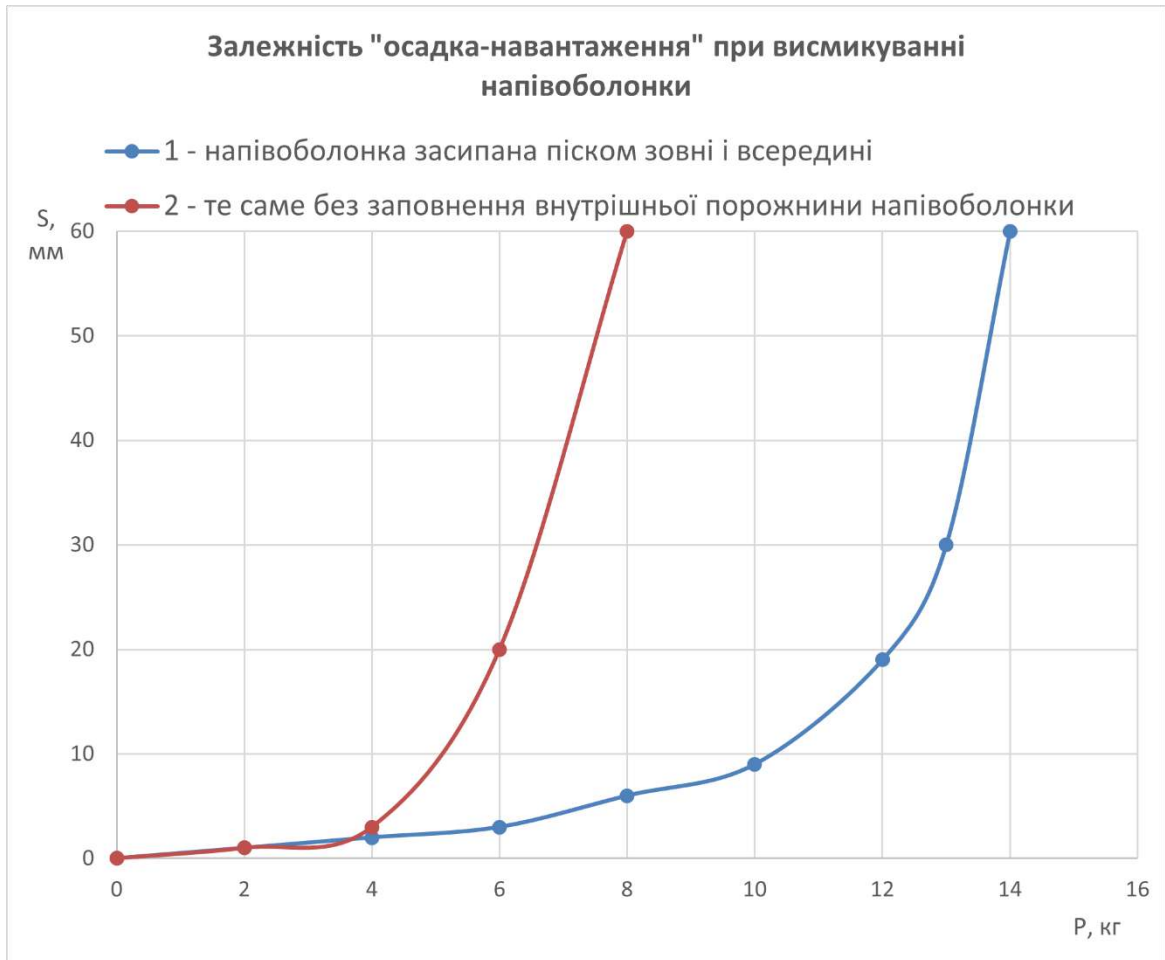


Рис. 4.11 Графік залежності осадка-навантаження при висмикуванні

На графіках показані залежності "осаду-навантаження", побудовані за результатами лабораторних випробувань моделі палі-оболонки при вдавлюванні в піщану основу і висмикування осьової ступінчастою навантаженням із заповненням порожнини оболонки (1) і без заповнення (2).

Аналіз результатів проведених експериментів показав:

1. У початковий період випробувань внутрішнє заповнення ґрунтом порожнини трубчастих паль істотно впливає на її несучу здатність.

2. Вертикальні проекції переміщень частинок піску в контактній зоні приблизно пропорційні переміщенням палі-оболонки при зануренні. Однак, ці переміщення неоднакові по глибині, зі збільшенням глибини вони зменшуються. Можна припускати, що в натурних умовах ця нерівномірність буде ще більш істотною.



3. При розробці методів розрахунку трубчастих паль, взаємодіючих з ґрунтом, необхідно враховувати його деформації, що виникають при зануренні паль.

#### **4.3.3 Методика оцінки впливу форми вістря палі-оболонки на процес занурення в піщану основу**

Нижній торець палі-оболонки являє собою жорсткий кільцевої штамп і взаємодіє з ґрунтом основи подібно фундаменту кільцевої в плані форми. Такі фундаменти широко використовуються при будівництві висотних і глибоководних окремо розташованих споруд. Однак робота фундаментів кільцевого типу в експериментальному плані вивчена недостатньо. Найбільш відомі теоретичні дослідження проблеми К.Є. Єгорова, основні результати яких наведені в збірнику його статей "До розрахунку деформації підстав", випущеної в 2002 році окремим виданням. Вирішенню цього завдання присвячено дослідження Бородіна М.А., Шаповала В.Г., Швеця В.Б. (ПДАБА, а також Тугаєнко Ю.Ф., Гришина В.А. (ОДАБА, ОНМУ) та ін [20].

Відомо, що форма нижнього кінця суцільних і трубчастих паль істотно впливає на напружено-деформований стан ґрунтової основи. Для вивчення цього важливого питання були проведені експериментальні дослідження, основною метою яких було вирішення двох завдань:

1) встановлення закономірностей деформації пісочної підстави під жорстким круглим і кільцевим штампами в процесі навантаження від вельми малих і до граничних по міцності підстав навантаженнями в умовах просторового осесіметричного завдання;

2) дати оцінку впливу форми вістря палі-оболонки на процес занурення моделі палі в піщану основу.

Експериментальні дослідження першого завдання проводилися в лабораторії портових гідротехнічних споруд ОНМУ на спеціальній установці,

що включає ґрунтовий лоток, моделі жорстких круглих і кільцевих штампів, пристрій для створення навантаження, вимірювальну та апаратуру що реєструє. Опис експериментальної установки наведено в підрозділі 4.1. У дослідженнях передбачалося встановлення залежності середньої опади круглого і кільцевих штампів від середнього тиску.

Моделлю підстави в дослідях обраний піщаний ґрунт, який є одним з типових ґрунтів природних підстав. Піщаний ґрунт можна від досвіду до досвіду доводити до однакового початкового стану і виконати приладів з мінімальними порушеннями однорідності масиву.

Випробування проводилися в такій послідовності. Лоток заповнюється на всю висоту дрібнозернистим піском з об'ємною вагою  $\gamma=15,5$  кН/м<sup>3</sup>, щільністю  $\rho=26,5$  кН/м<sup>3</sup>, кутом внутрішнього тертя  $\phi=33^\circ$ , коефіцієнтом пористості  $\varepsilon=0,5$ , природною вологістю. Досліди проводилися на ущільненому і пухкому (без ущільнення) піску. Щільність піску при пошаровому укладанні перед досвідом контролювали голкою-густиномірами. Після досвіду щільність вимірювалась безпосередньо під штампом. На вирівняну поверхню піску встановлювався жорсткій круглий або кільцевої штамп. Осьова навантаження на штамп прикладалася за допомогою завантажувального пристрою важільного типу ступенями, величина яких задавалася для кожної серії дослідів. Опади штампів вимірювалися в трьох точках по його периметру за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм.

Результати дослідів по цьому завданню представлені в табл. 4.1, 4.2 і на рис. 4.12., 4.13.

Таблиця 4.1 - Залежність відносного осідання кільцевого штампа від співвідношення його внутрішнього і зовнішнього діаметрів

$\frac{d}{D}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\bar{S} = \frac{S_{\text{кільць}}}{S_{\text{круг}}}$	1,0	1,06	1,13	1,20	1,24	1,30	1,36	1,41	1,52	1,68

Отримані результати досить добре описав з даними експериментальних досліджень Бородіна М.А.

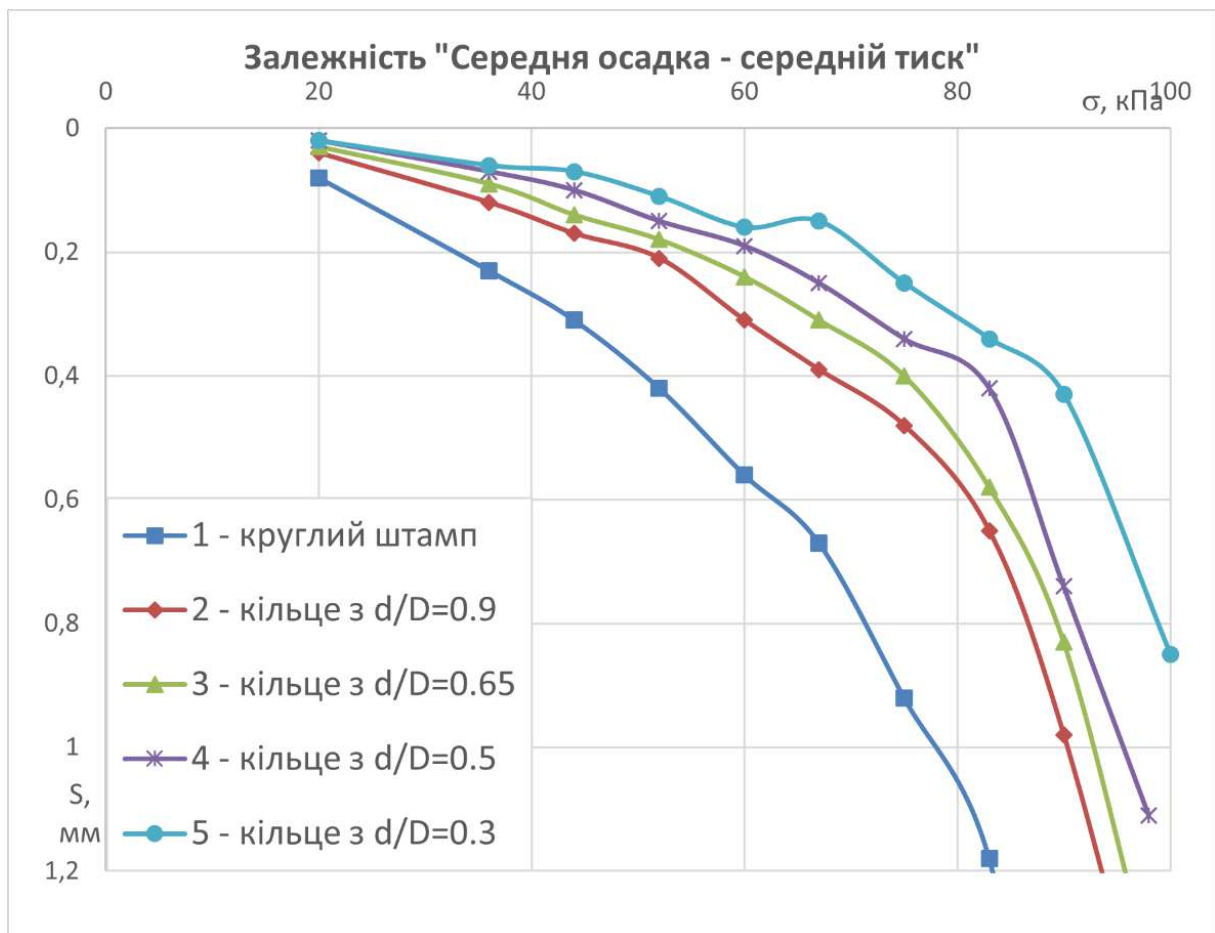


Рис. 4.12 Залежності "Середня осадка - середній тиск "

Випробування по вивченню переміщень частинок піщаної основи під жорстким круглим і кільцевим штампами при їх осьовому навантаженні проводилися за такою методикою. Попередньо його площині по діаметру на дві

рівні частини. Торці поперечного перерізу розрізаних частин шліфувалися. Напівштамп відшліфованим торцем укладався впритул до скляної стінки лотка на підготовлену поверхню піщаної основи.

Спочатку в дослідах при засипці лотка піском влаштовувалися горизонтальні лінії з пофарбованого піску. Ці лінії збігалися з горизонтальними лініями сітки, нанесеної на склі бічної стінки лотка. Однак цей метод не дозволяє в повній мірі зафіксувати траєкторію переміщень частинок піску в процесі випробувань штампів.

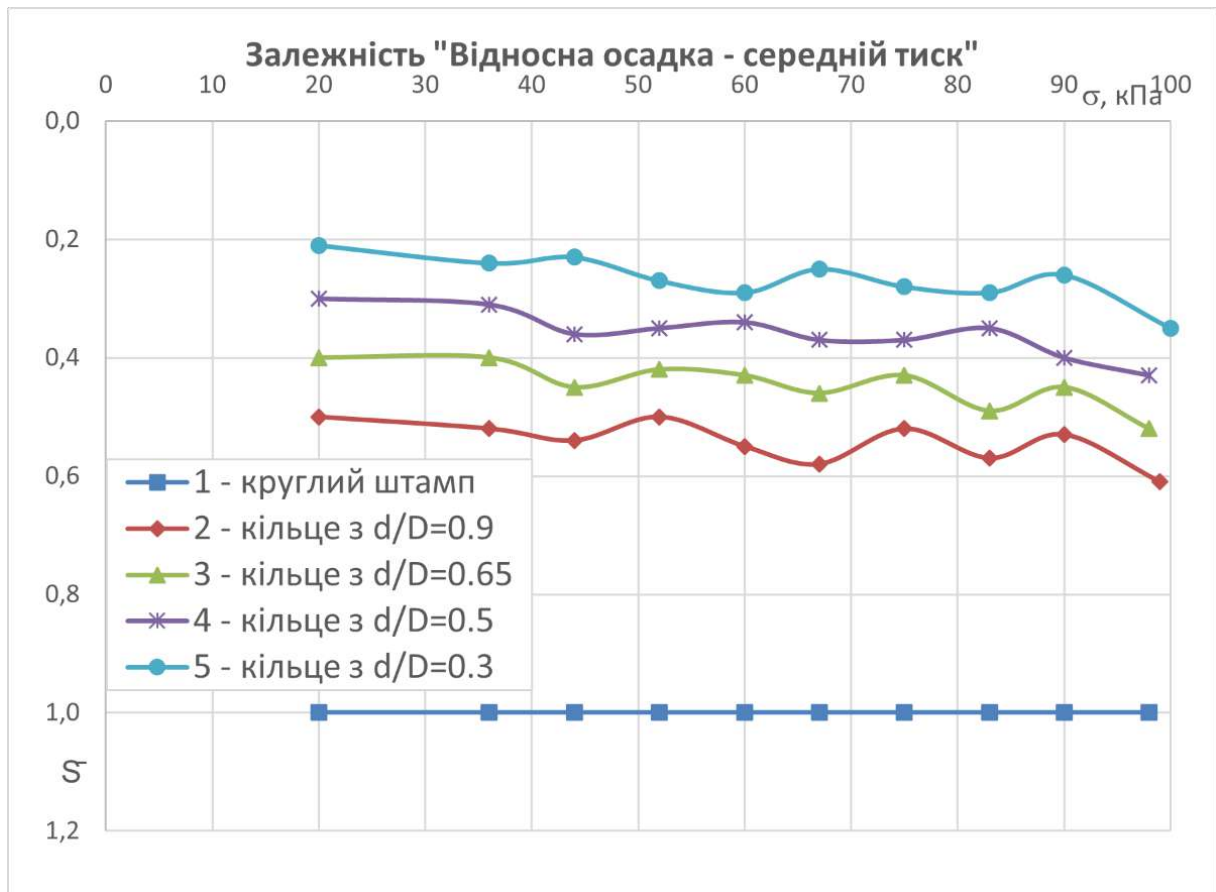


Рис. 4.13 Залежності "Відносна осадка - середній тиск"

Таблиця 4.2

Результати випробувань на осьову навантаження жорстких круглих і кільцевих штампів на піщаному підставі

№ п/п	Серія №1				Серія №2				Серія №3				Серія №4				Серія №5			
	Круглий штамп $D=115\text{мм}, d=0,$ $F=104\text{ см}^2$				Кільцевий штамп $D=115\text{мм}, d=105,$ $d/D=0,9, F=16\text{ см}^2$				Кільцевий штамп $D=115\text{мм}, d=55,$ $d/D=0,65, F=79\text{ см}^2$				Кільцевий штамп $D=115\text{мм}, d=75,$ $d/D=0,5, F=59\text{ см}^2$				Кільцевий штамп $D=115\text{мм}, d=35,$ $d/D=0,3, F=94\text{ см}^2$			
	$P,$ кг	$\sigma,$ кПа	$S,$ мм	$\bar{S}$	$P,$ кг	$\sigma,$ кПа	$S,$ мм	$\bar{S}$	$P,$ кг	$\sigma,$ кПа	$S,$ мм	$\bar{S}$	$P,$ кг	$\sigma,$ кПа	$S,$ мм	$\bar{S}$	$P,$ кг	$\sigma,$ кПа	$S,$ мм	$\bar{S}$
1	21	20	0,08	1,0	3,2	20	0,04	0,50	15,8	20	0,03	0,4	11,8	20	0,02	0,30	28,2	20	0,02	0,21
2	38	36	0,23	1,0	5,8	36	0,12	0,52	28,4	36	0,09	0,4	21,2	36	0,07	0,31	33,8	36	0,06	0,24
3	46	44	0,31	1,0	7,0	44	0,17	0,54	34,8	44	0,14	0,45	26,0	44	0,1	0,36	41,4	44	0,07	0,23
4	54	52	0,42	1,0	8,3	52	0,21	0,50	41,1	52	0,18	0,42	30,7	52	0,15	0,35	48,9	52	0,11	0,27
5	62	60	0,56	1,0	9,6	60	0,31	0,55	47,4	60	0,24	0,43	35,4	60	0,19	0,34	56,4	60	0,16	0,29
6	70	67	0,67	1,0	10,7	67	0,39	0,58	53,0	67	0,31	0,46	39,5	67	0,25	0,37	63,0	67	0,15	0,25
7	78	75	0,92	1,0	12,0	75	0,48	0,52	59,0	75	0,40	0,43	44,2	75	0,34	0,37	70,5	75	0,25	0,28
8	86	83	1,18	1,0	13,3	83	0,65	0,57	65,6	83	0,58	0,49	49,0	83	0,42	0,35	78,0	83	0,34	0,29
9	94	90	1,84	1,0	14,4	90	0,98	0,53	71,0	90	0,83	0,45	53,1	90	0,74	0,40	84,6	90	0,43	0,26
10	102	98	2,59	1,0	15,7	99	1,56	0,61	77,4	98	1,35	0,52	57,8	98	1,11	0,43	94	100	0,85	0,35
11	107	103	втрага стійкості	втрага стійкості	16,8	105	втрага стійкості	втрага стійкості	86,9	110	втрага стійкості	втрага стійкості	63,0	107	втрага стійкості	втрага стійкості	63,0	107	втрага стійкості	втрага стійкості

Примітка:  $\bar{S}$ - відносна осадка – осадка штампа кільцеві форми, віднесені до осаді суціль суці штампа.

У даних експериментах був використаний точковий метод визначення деформації сипучого середовища, який полягає в наступному. Під час засипання лотка наносяться точки з пофарбованого піску в місцях перетину ліній сітки, нанесеної на склі бічної стінки лотка. Метод не вимагає складних пристосувань і навичок. Точки укладаються дуже швидко. Їх можна розташовувати як завгодно часто. Кожна пофарбована точка, що знаходиться в масиві основи під підошвою моделі штамп, при зміщенні штамп переміщається, фіксуючи положення якої відносно нерухомої сітки, можна отримати траєкторію переміщень точок.

Аналізуючи дані таблиць 4.1 і 4.2, а також графіки на рис. 4.12 і 4.13, можна зробити наступні висновки:

1. Прийнята методика лабораторних випробувань кільцевих штампів дозволяє отримати дані для аналізу взаємодії фундаментів кільцевої форми підошви з ґрунтовою основою.
2. Чи підтверджується висновок, що при однакових умовах випробувань і однакових площах підошви опади круглого штамп більше ніж у кільцевого.
3. Осадка суцільного круглого штамп більше опади будь-якого кільцевого штамп однакової площі підстави (крива 1 на рис. 4.11).
4. Залежності відносного осідання і середнього тиску носять лінійний характер. При цьому їх рівень залежить від співвідношення внутрішнього і зовнішнього діаметрів кільця  $\left(\frac{d}{D}\right)$ . Крім того, прями  $\bar{S} = f(G)$  нахилені до горизонтальної осі під певним кутом, величина якого залежить також від співвідношення  $\frac{d}{D}$ : чим воно більше, тим менше кут нахилу  $\bar{S} = f(G)$  до осі абсцис.
5. Іспользований при проведенні даних дослідів точковий метод визначення деформацій сипучого середовища є дуже простим і наочним, дозволяє вести спостереження за переміщеннями точок в ході експерименту і побудувати їх траєкторію на кожному етапі лабораторне.

У другій задачі вивчалася взаємодія наконечника вістря палі-оболонки різної форми з піщаним підставою.

Для вивчення цього питання в ОНМУ розроблена, виготовлена і випробувана експериментальна модель палі-оболонки з набором замінних наконечників її вістря різної конструктивної форми [12]. Основні з них показані на рис. 4.14.

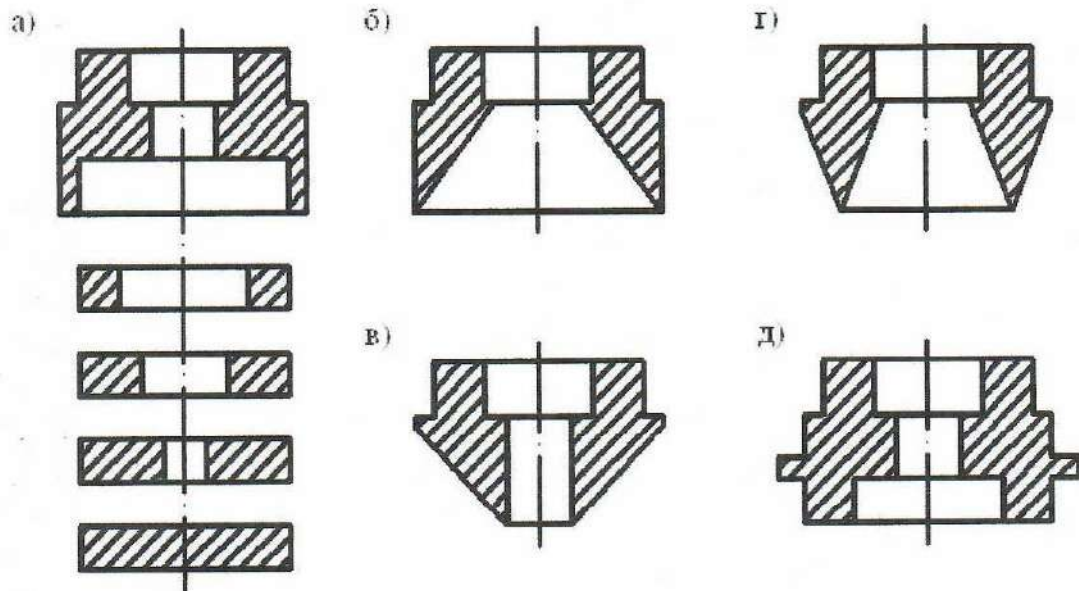


Рис. 4.14 Конструктивні форми знімних наконечників вістря моделі палі-оболонки

Пристрій наконечника вістря оболонки (рис. 4.14а) дозволяє досліджувати взаємодію жорсткого суцільного круглого і кільцевого штампів різного внутрішнього діаметра кільця з піщаним підставою. За допомогою наконечників, показаних на (рис. 4.14б, в, г) є можливість вивчати вплив різних конічних форм вістря палі-оболонки на процес занурення моделі трубчастої палі у фундамент. Наконечник вістря палі-оболонки (рис. 4.14д) дозволяє вивчати вплив зовнішніх і внутрішніх кільцевих виступів на моделі трубчастої палі на зниження тертя ґрунту по її бічних поверхнях.

Наведені на рис. 4.14 форми наконечників вістря палі-оболонки дозволяють досліджувати їх взаємодія з ґрунтом основи на осьову вдавлюють навантаження, встановлювати залежності осідання моделі палі-оболонки від

середнього навантаження, виявляти найбільш раціональну конструкцію наконечника на зниження тертя ґрунту по боковій поверхні оболонки і лобового опору підстави, а також вирішувати багато інших завдань.

Випробування проводити на тій же експериментальній установці і за тією ж методикою послідовності, що і в попередніх дослідах в лабораторії гідротехнічних споруд ОНМУ. Лоток заповнюється на всю висоту дрібнозернистим піском з об'ємною вагою  $\gamma=15,5$  кН/м<sup>3</sup>, щільністю  $\rho=26,5$  кН/м<sup>3</sup>, кутом внутрішнього тертя  $\varphi=33^\circ$ , коефіцієнтом пористості  $e=0,5$ , природної вологості. Досліди проводилися на ущільненому і пухкому (без ущільнення) піску. Щільність піску при пошаровому укладанні перед досвідом контролювалася голкою-густиномірами. Після досвіду щільність вимірювалася безпосередньо під штампом. На вирівняну поверхню піску укладався наконечник-штамп певної форми, на якому монтувався нагрузочний майданчик з фіксованим центром. Осьова навантаження на штамп прикладалася за допомогою важеля пристрої (рис.4.1) ступенями, величина яких задавалася для кожної серії дослідів. Оподи штампів-наконечників вимірювалися в трьох точках по периметру штампа за допомогою індикаторів годинникового типу.

Використовуючи теорію планування експериментів, була обрана трьохфакторна трирівнева модель.

Як фактори впливу були прийняті:

1. Форма наконечника вістря палі-оболонки (кут загострення нижнього кінця оболонки).
2. Товщина шару, що несе піщаної основи.
3. Величина статичного навантаження, прикладеної до моделі штампа-наконечника.

В експериментах використовувалися три види наконечників вістря оболонки (перший фактор):

- перший зразок мав плоску кільцеву підшву (рис. 4.14 а);



- другий мав загострення внутрішньої нижньої кромки оболонки під кутом  $30^\circ$  (рис. 4.14 в).

Зразки наконечників мали рівні ваги і обсяги.

Товщина шару, що несе піску (другий фактор) приймалася трьох рівнів: 25 см, 50 см і 75 см.

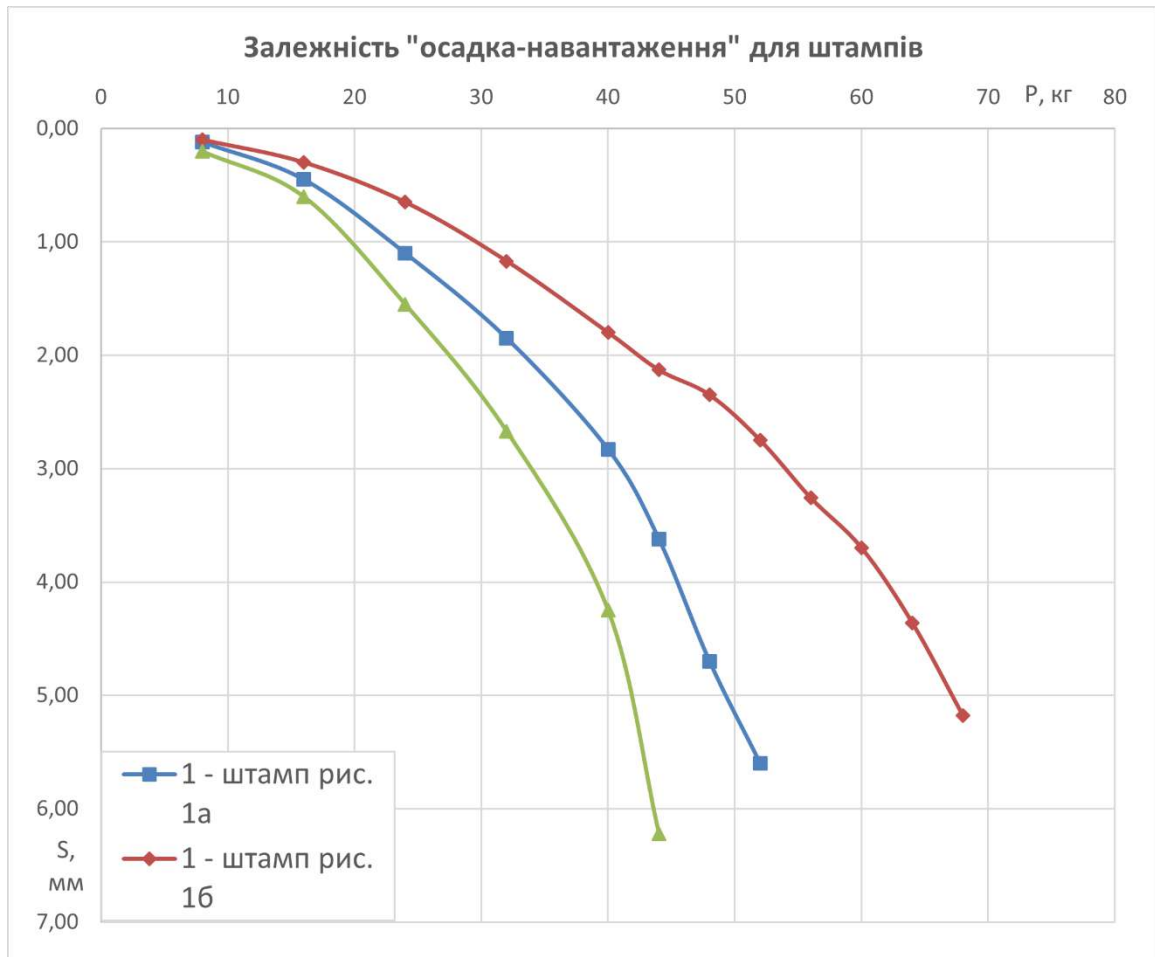


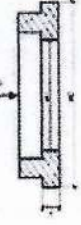


Рис. 4.15 Графіки залежностей осадки штампів від навантаження

На всі зразки наконечників прикладалися статичні навантаження (третій фактор) трьох рівнів: 200 Н, 400 Н і 600 Н.

В ході експерименту вимірювалися осадку штампа-наконечника, несуча здатність штампа-насадки при заданому навантаженні і щільність піщаної основи після проведення випробувань.

Навантаження штампів-насадок доводилося до величини, яка викликала осадку 10 мм.

Таблиця 4.3 - Залежності відносного осідання від осьового навантаження

№ п/п	Серія №1						Серія №2						Серія №3					
	 $D=110\text{мм}, d=66\text{мм},$ $h=15\text{мм}, F=104\text{ см}^2$						 $D=110\text{мм}, d=66\text{мм},$ $h=15\text{мм}$						 $D=110\text{мм}, d=66\text{мм},$ $h=15\text{мм}$					
	$P, \text{ кг}$	$\sigma, \text{ кПа}$	$S, \text{ мм}$	$\bar{S}$	$P, \text{ кг}$	$\sigma, \text{ кПа}$	$S, \text{ мм}$	$\bar{S}$	$P, \text{ кг}$	$\sigma, \text{ кПа}$	$S, \text{ мм}$	$\bar{S}$	$P, \text{ кг}$	$\sigma, \text{ кПа}$	$S, \text{ мм}$	$\bar{S}$		
1	8	0,13	0,12	0,75	8	0,09	0,10	0,62	8	0,09	0,20	1,25	8	0,09	0,20	1,25		
2	16	0,26	0,45	0,90	16	0,18	0,30	0,60	16	0,18	0,60	1,20	16	0,18	0,60	1,20		
3	24	0,39	1,10	0,88	24	0,28	0,65	0,52	24	0,28	1,55	1,25	24	0,28	1,55	1,25		
4	32	0,52	1,85	0,88	32	0,37	1,17	0,56	32	0,37	2,67	1,27	32	0,37	2,67	1,27		
5	40	0,63	2,83	0,88	40	0,46	1,80	0,56	40	0,46	4,25	1,32	40	0,46	4,25	1,32		
6	44	0,72	3,62	0,83	44	0,51	2,13	0,49	44	0,51	6,22	1,43	44	0,51	6,22	1,43		
7	48	0,79	4,70	0,82	48	0,56	2,35	0,41	48	0,56	втрага н/с		48	0,56	втрага н/с			
8	52	0,85	5,60	0,75	52	0,60	2,75	0,37										
9	56	0,92	втрага н/с		56	0,65	3,26											
10					60	0,70	3,70											
11					64	0,74	4,36											
12					68	0,79	5,18											
13					72	0,84	втрага н/с											

Примітка:  $\bar{S}$  - відносна осадка - осадка штампа кільцевої форми, віднесена до осаді суцільного штампа того ж діаметру.

Результати випробувань наведені в таблиці 4.3 і на графіку залежності "осаду-навантаження" на рис. 4.15.

Аналізуючи дані таблиці 4.3 і графік на рис. 4.15, були зроблені наступні висновки.

1. При однакових ступенях завантаження, опади кільцевого штампа-насадки менше, ніж у насадки із загостреною зовнішньої кромкою, але більше, ніж у насадки із загостреною внутрішньою кромкою. Очевидно, це пояснюється розподілом тиску від прикладеного навантаження по підшві штампів на різну площу.
2. Втрата несучої здатності найбільш швидко відбувається при використанні насадки із загостреною внутрішньою кромкою.
3. Найбільш раціональною конструкцією наконечника на зниження тертя ґрунту по боковій поверхні оболонки і лобового опору підстави є штамп-насадка, показаний в табл. 4.3 (серія 2), оскільки для втрати стійкості палі необхідно прикласти до неї найбільшу осьову навантаження в порівнянні з іншими штампами.

#### **4.4. Результати випробувань дослідження взаємодії паль-оболонки з піщаною основою**

##### **4.4.1 Результати випробувань трубчатої палі.**

Досліди проводилися в ґрунтовому лотку експериментальної установки за розробленою методикою в чотири етапи.

У підготовчий період модель палі-оболонки збиралася, перевірялася її працездатність, встановлювалася на підготовлене піщану основу товщиною 30 см в дослідному лотку строго під завантажувальним пристроєм. Відсипався пісок зовні оболонки і в порожнині осердя моделі. Монтувалось завантажувальний

пристрій, вимірювальна і реєструюча апаратура. Проводилась необхідна перевірка і налаштування всіх механізмів і апаратури.

На першому етапі випробувань вивчалася взаємодія контактуючого піску тільки з зовнішньої бічної поверхнею корпусу моделі оболонки. Для цього з'єднувальний болт 10 віддалявся, навантажувальна плита закріплювалася болтами 11 до корпусу.

Осьова навантаження на завантажувальний диск 9 прикладалася за допомогою важеля пристрої ступенями по 20 кг. Після кожного ступеня навантаження і стабілізації переміщень корпусу вимірювалася осаду моделі індикатором годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. У цій серії дослідів переміщався тільки корпус моделі, сердечник і штамп були нерухомими.

Таблиця 4.4 - Залежність осадки корпусу оболонки від навантаження

<b>№ ступені</b>	<b>Навантаження P, кг</b>	<b>Осадка, мм</b>	<b>Примітка</b>
1	20	0,02	
2	40	0,06	
3	60	0,21	
4	80	0,27	
5	100	0,50	
6	120	0,74	
7	140	1,51	
8	160	2,62	
9	180	4,02	
10	190	5,03	дотик сердечника навантажувальної площинки

Занурення корпусу проводилося до торкання верхнього торця сердечника навантажувального диск, яке фіксувалося індикаторної лампочкою. Результати вимірювань представлялися в таблиці 4.4 і на графіку на рис. 4.16.

З графіка видно, що спочатку навантаження від 0 до 80 кг опади зростає пропорційно, підстава знаходиться в пружною стадії. При осьовому навантаженні в межах 80-120 кг ця пропорційність порушується, осадку збільшується швидше, і при навантаженні 120 кг вона склала 0,62 мм. При подальшому збільшенні навантаження, підстава втрачає несучу здатність, осадку зростає дуже швидко.

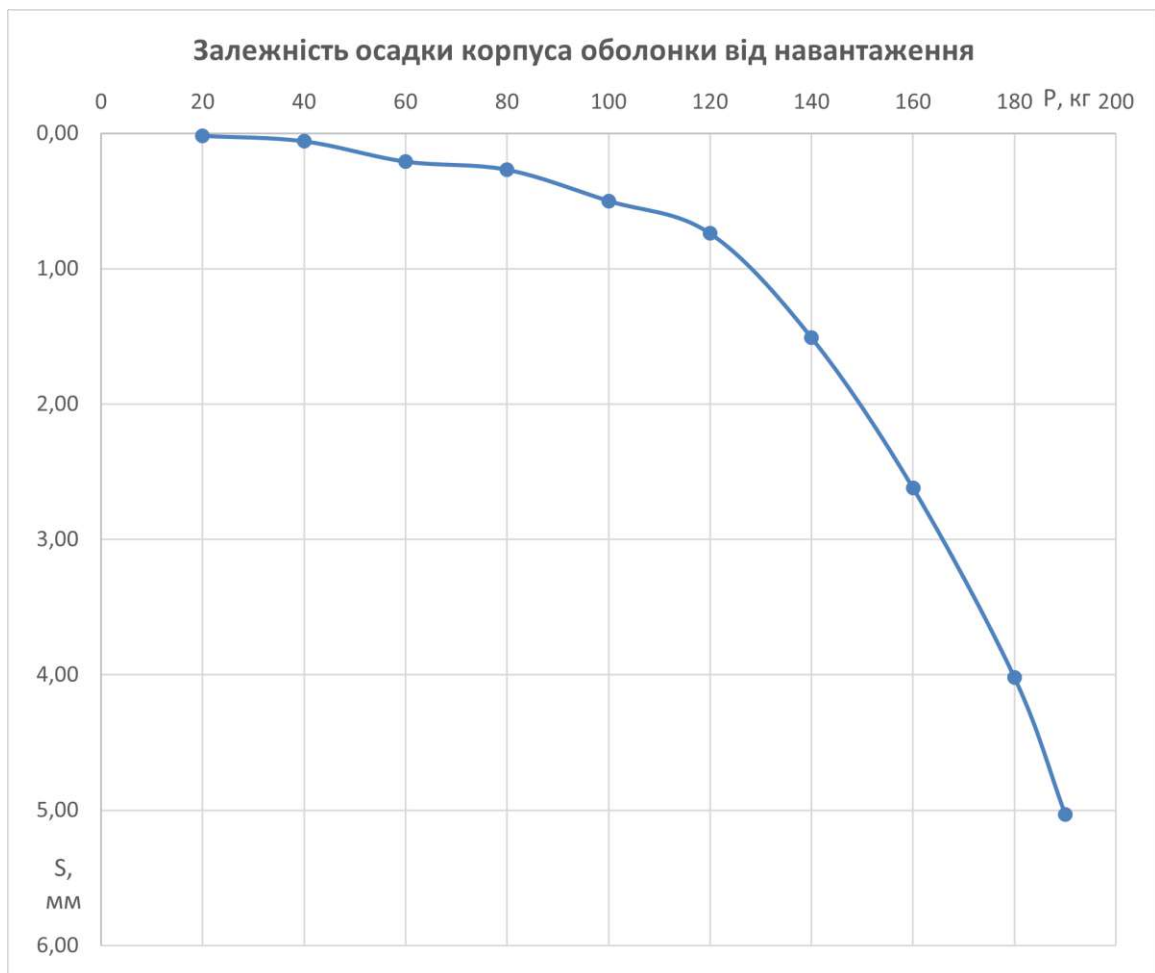


Рис. 4.16 Графік залежності «осадка – навантаження»

Ця серія дослідів дозволяє визначати сили тертя по боковій поверхні корпусу. Дотичні напруження по зовнішній поверхні склали  $\tau=0,015$  кг/см<sup>2</sup>.

Основні параметри корпусу моделі: висота корпусу - 105 см; зовнішній діаметр - 108 мм; товщина стінки - 5 мм; вага - 13,3 кг; площа зовнішньої бічної поверхні дорівнює 3560 см<sup>2</sup>.

Корпус моделі складається з 7 циліндричних ланок висотою 15 см і вагою 1,9 кг. Для забезпечення співвісності ланок і можливості поздовжнього переміщення, по торцях ланок передбачені проточки висотою 5 мм і глибиною 2,5 мм. Верхні проточки в ланках робилися зовнішніми, нижні - внутрішніми.

Між собою ланки з'єднувалися з внутрішньої сторони за допомогою трьох плоских серг, на які наклеювалися тензорезистори для вимірювання поздовжнього зусилля.

Другий етап випробувань. У дослідах навантажувальний майданчик від'єднувалася від корпусу моделі (болти 11 віддалялися). Взаємодіють з піском сердечник і штамп моделі при їх переміщенні під дією вдавлюють осьового навантаження, яка створювалася за допомогою важеля пристрої ступенями по 40,0 кг. Визначалися сили тертя піску по внутрішній боковій поверхні сердечника і лобове опір підставу штампу.

Після кожного ступеня навантажування і стабілізації переміщень вимірювалися вертикальні переміщення голови сердечника за допомогою індикатора годинникового типу.

Навантаження доводилося до втрати несучої здатності основи.

Результати випробувань наведені в таблиці 4.5 і на графіку рис. 4.17.

Таблиця 4.5 - Залежність осадки сердечника та штампу від навантаження

№ ступені	Навантаження Р, кг	Осадка Мм	Примітка
1	40	0,20	
2	80	0,36	
3	120	0,48	
4	160	0,68	
5	200	1,26	
6	240	2,31	
7	280	3,42	
8	320	Зрив	втрата несучої здатності основи

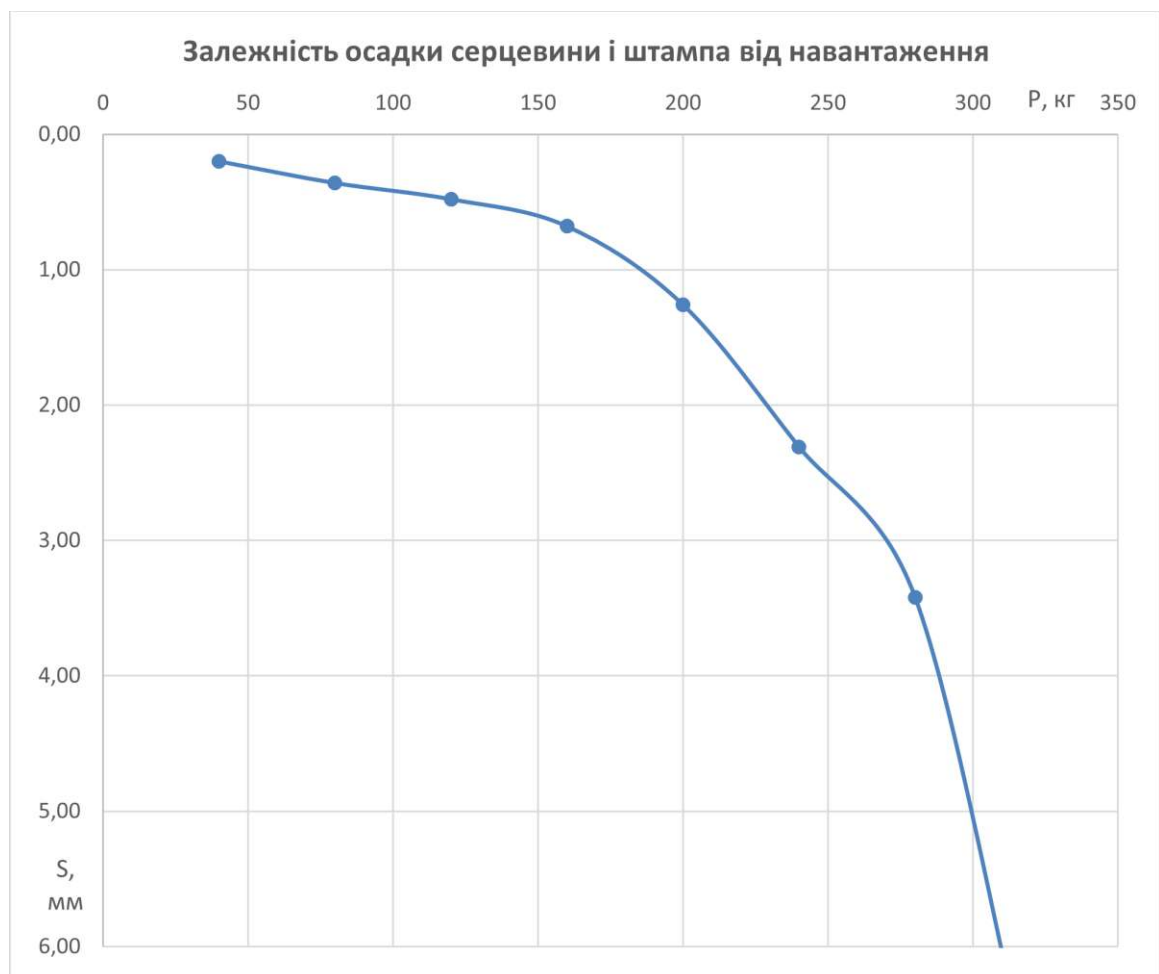


Рис. 4.17 Графік залежності «осадка-навантаження»

З графіка випливає, що спочатку навантаження від 0 до 120 кг осаду зростає за лінійним законом. Потім при збільшенні навантаження пропорційність опади порушується, і при навантаженні понад 280 кг підставу втрачає несучу здатність. Для цього навантаження сили тертя піску по внутрішній боковій поверхні сердечника склали 32 кг (11,4% від загального навантаження), а лобовий опір підстави - 248 кг.

Нормальна напруга по підшві кільцевого штампа дорівнює  $\sigma_{\text{очн}}=4,24$  кг/см<sup>2</sup>. Дотичні напруження по внутрішній боковій поверхні сердечника склали  $\tau=0,018$  кг/см<sup>2</sup>.

Основні параметри сердечника і штампа: довжина труби-сердечника - 102 см; зовнішній і внутрішній діаметри - 9,8 см і 9,5 см; товщина стінки - 4,5 мм; вага сердечника - 6,9 кг. Площі бічних поверхонь: зовнішньої – 3140 см<sup>2</sup>, внутрішньої - 2082 см<sup>2</sup>. Розміри знімного штампа показані на рис. 4.18, його вага - 1,5 кг.

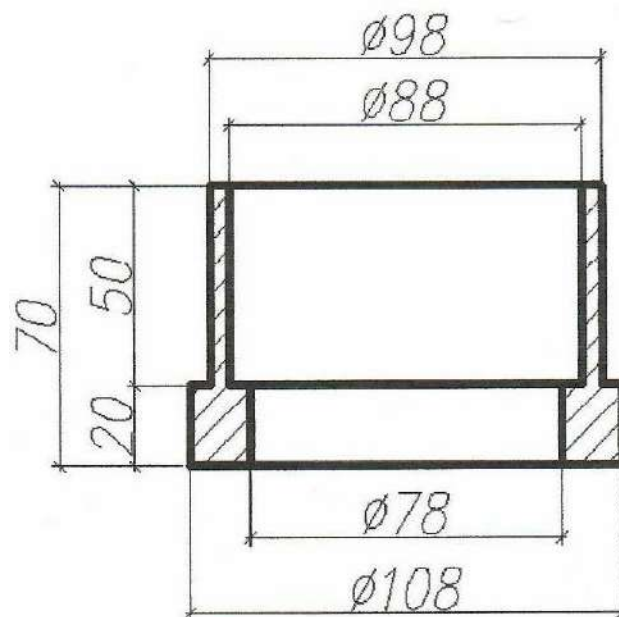


Рис. 4.18 Розміри знімного штампа

Третій етап випробувань проведено з метою поділу сприймають сил сердечником і штампом щодо другого етапу дослідів. У цій серії визначаються



сили тертя піску по внутрішній боковій поверхні сердечника. Переміщається тільки сердечник, корпус моделі і штамп нерухомості. Навантажувальний диск снить. У передбачені у верхній частині сердечника отвори закріплюється дротова скоби діаметром 4 мм, до середини якої кріпиться трос висмикувати механізму.

Таблиця 4.6 - Залежність величини переміщення сердечника від навантаження висмикування

№ ступені	Навантаження Р, кг	Осадка мм	Примітка
1	5	0,20	
2	10	0,25	
3	15	0,31	
4	20	0,46	
5	25	0,76	
6	30	1,38	
7	35	2,49	
8	40	зрив	втрата несучої здатності основи

Трос пропускається по жолобку колеса і вільного кінця кріпиться підвіска для вантажу. Прикладається на підвіску навантаження відповідає висмикує сили. Навантаження на підвіску прикладається ступенями по 5 кг. Вертикальне переміщення вимірювалося за допомогою металевої лінійки, одним кінцем закріпленої до каркасу лотка. Власна вага сердечника 6,9 кг враховувався при визначенні висмикує сили.

Результати випробувань приведені в таблиці 4.6 та на графіку рис. 4.19.

Четвертий етап випробувань присвячений визначенню тиску піску на зовнішню бічну поверхню корпусу оболонки і його розподілу по висоті, а так же оцінці величини і розподілу сил тертя по зовнішній контактної поверхні палі-оболонки при висмикуванні. У опеньках важільне пристрій і навантажувальний

диск прибиралися, до голови моделі кріпилися в передбачені отвори скоби з дроту діаметром 4 мм, посередині якої закріплювався кінець висмикувати троса, а інший кінець його опускався по жолобку колеса, до вільного кінця якого кріпилася навантажувальна підвіска. Навантаження на підвіску прикладалася ступенями визначеної величини. Це навантаження відповідала висмикує сили. На початку досвіду у взаємодію вступає тільки перше (верхнє) ланка, в міру зростання висмикує сили збільшуються вертикальні переміщення ланки.

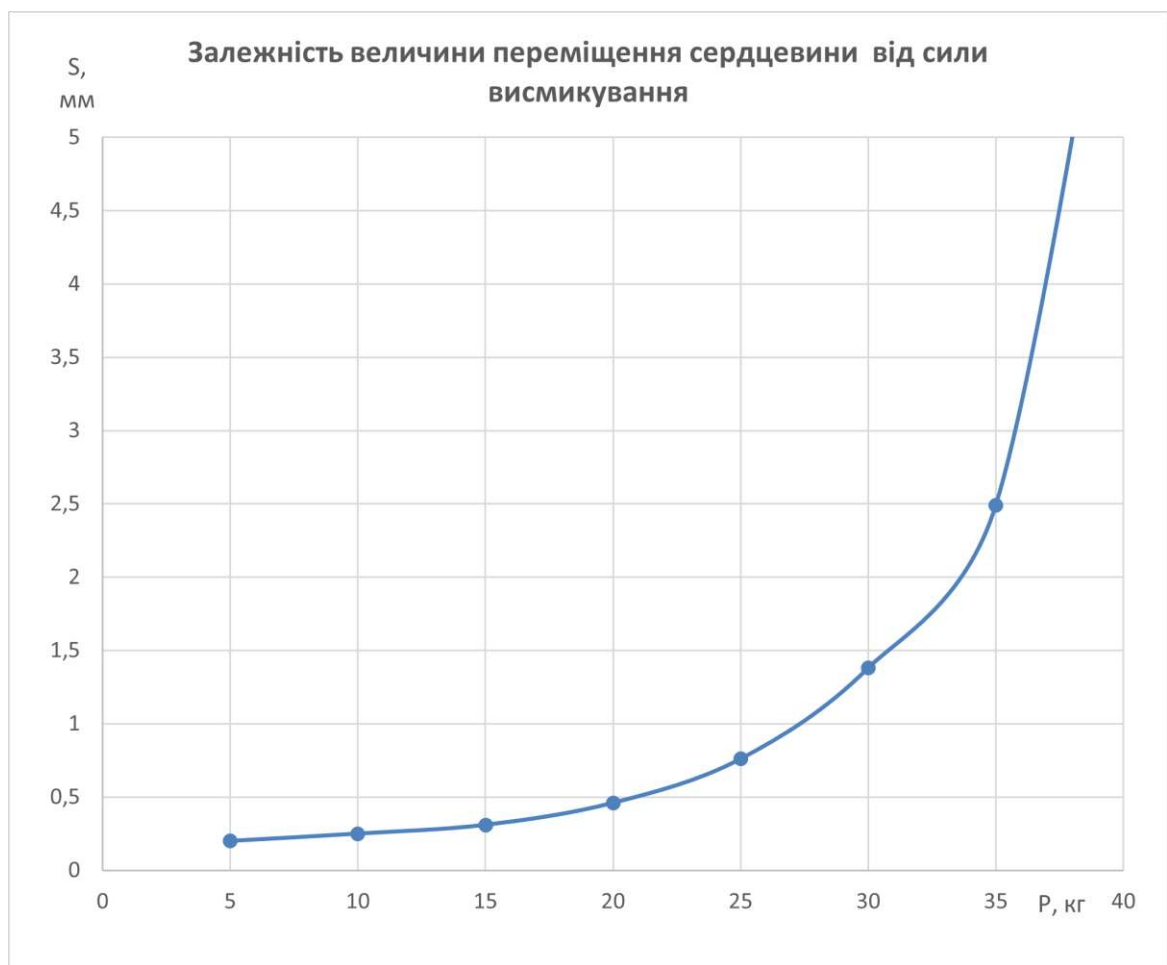


Рис. 4.19 Графік залежності «осадка – навантаження»

При досягненні граничного опору піску відбувається зсув верхньої ланки на 4 мм - величину подовжених отворів в трьох плоских, що з'єднують його з нижньою ланкою. Потім у взаємодії з піском вступає друга ланка і спільно з першим переміщається вгору в міру збільшення висмикує сили. У момент

настання граничного опору контактує піску з бічними поверхнями першого і другого ланок, відбувається їх зсув на 4 мм подовжених отворів в сполучних сережках другої і третьої ланок.

Таблиця 4.7 - Залежність вертикального переміщення моделі палі при висмикуванні

№ ланки корпусу моделі	Вага ланки, кг	навантаження з урахуванням ваги ланки, кг	Вертикальне переміщення моделі		нормальні напруги на бічну поверхню оболонки, кг/см <sup>2</sup>	дотичні напруження, кг/см <sup>2</sup>	Примітка
			Переміщення ланки, мм	зсув ланки, мм			
1	G <sub>1</sub> =1,9	2,4	0,1				
		2,9	0,3				
		3,4	0,7	4,0	0,006	0,007	Зсув ланки 1
2	G <sub>1-2</sub> =3,8	3,4	4,7				
		6,5	4,8				
		7,3	4,9				
		7,8	5,0	4,0	0,010	0,0077	Зсув ланки 1-2
3	G <sub>1-3</sub> =5,7	7,8	9,0				
		11,7	9,3				
		13,7	9,7				
		15,2	10,2	4,0	0,015	0,0099	Зсув ланки 1-3
4	G <sub>1-4</sub> =7,6	15,2	14,0				
		19,1	14,6				
		20,6	15,8				
		21,3	16,5	4,0	0,020	0,010	Зсув ланки 1-4
5	G <sub>1-5</sub> =9,5	21,3	19,2				
		26,2	21,1				
		28,2	22,4				
		29,2	23,5				
		31,0	24,3	4,0	0,026	0,012	Зсув ланки 1-5
6	G <sub>1-6</sub> =11,4	31,0	29,0				
		35,9	31,7				
		37,4	34,2				
		38,9	37,8				
		39,5	39,4	4,0	0,031	0,013	Зсув ланки 1-6
7	G <sub>1-7</sub> =13,3	39,5	43,5				
		44,4	46,4				
		46,4	49,6				
		47,8	57,2				
		48,8	65,8	4,0	0,036	0,0136	Зсув ланки 1-7

Далі при збільшенні висмикує сили вступає у взаємодію з контактують піском третю ланку і спільно з першими двома переміщається вгору. При

досягненні граничного опору піску по контактних поверхнях трьох взаємодіючих ланок відбувається зрушення цих ланок на величину подовжених отворів 4 мм в плоских скобах, що з'єднують третє і нижня ланки. У такій послідовності вступають у взаємодію інші ланки корпусу моделі до повного вилучення з піщаної основи.

Таким чином, за допомогою дослідів четвертого етапу можна визначити всі параметри взаємодії контактує піску з зовнішньої бічною поверхнею корпусу-моделі.

Основні результати цього етапу випробувань наведені в таблиці 4.7 і графіку на рис. 4.20.

З графіка випливає, що спочатку досвіду переміщення зростає за лінійним законом. Потім при збільшенні навантаження пропорційність збільшення переміщення порушується, при залученні в роботу кожного наступного ланки воно збільшується і при навантаженні понад 48 кг відбувається повне висмикування палі-оболонки з ґрунту.

Таким чином, запропонована модель палі-оболонки дозволяє досліджувати взаємодію ґрунту з оболонкою окремо: визначати нормальний тиск ґрунту на зовнішню поверхню палі-оболонки, опір ґрунту по зовнішній і внутрішній бічній поверхні і нижнього торця, а також встановлювати розподіл по глибині занурення моделі нормальний тиск ґрунту і його опору по зовнішній поверхні палі-оболонки.

Результати випробувань на такій моделі дозволяють більш повно оцінити спільну роботу палі-оболонки і взаємодіє з нею ґрунту, і ефективно використовувати сучасні методи розрахунку споруд, що призведе до оптимального рішення і зниження матеріаломісткості пальових фундаментів.

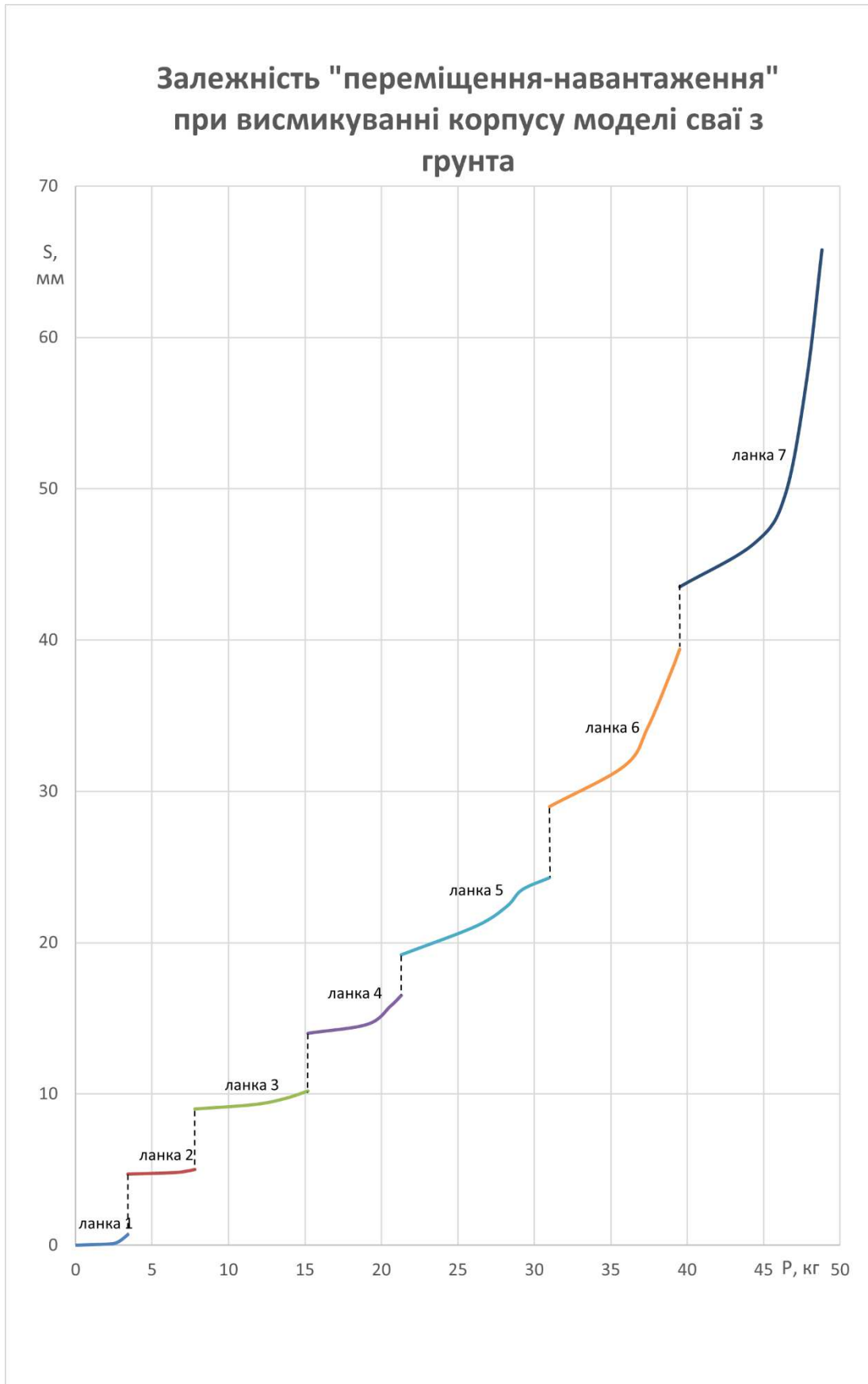


Рис. 4.20 Залежність «переміщення – навантаження» при висмикуванні корпусу моделі палі з ґрунту

#### 4.4.2 Результати випробувань трубчастої палі при вдавненні в піщану підставу і висмикування.

З метою уточнення отриманих в попередніх іспитах результатів взаємодії палі-оболонки з піщаною підставою додатково були проведені випробування моделі трубчастої палі при вдавненні і висмикування збільшуючої ступінчастою осьовим навантаженням. Для цього використовувався сердечник експериментальної установки (див. п.4.1), що представляє суцільну трубу з нержавіючої сталі вагою 6,9 кг, довжиною 102 см, зовнішнім і внутрішнім діаметрами - 75 мм і 65 мм.

Проведено чотири серії дослідів на експериментальній установці. Кожна серія повторювалася не менше трьох разів за методикою, описаною в п. 4.3.1.

У першій серії дослідів вивчалася опір піщаної основи вдавненню кільцевого торця оболонки осьовим навантаженням. Підстава контактувати тільки нижнім кінцем. Досліди проводилися в лотку (див. п.4.1). На модель трубчастої палі, встановлену на відсипатися і підготовлену піщану подушку товщиною 30 см, прикладалася за допомогою важеля пристрої ступенями навантаження. Після стабілізації переміщень моделі, фіксувалася її осаду датчиком переміщень годинного типу [9].

Результати випробувань оформлялися у вигляді таблиць і графіків. На рис. 4.20, показана залежність "осадка - навантаження". З графіка випливає, що спочатку при навантаженні до 10 кг осаду зростає лінійно. Потім її зростання йде швидше і при навантаженні понад 15 кг становить 6,5 мм. Контактна напруга по підшві кільцевого торця палі дорівнювало  $1,4 \text{ кг/см}^2$ . Пунктирною лінією показана розрахункова залежність  $S=f(S)$  за пропонованим методом.

У другій серії дослідів досліджувався взаємодія внутрішньої бокової поверхні оболонки і торця палі кільцевої форми з піщаним підставою. У цій серії дослідів трубчаста паля встановлювалася на підготовлену піщану подушку товщиною 30 см в ґрунтовому лотку експериментальної установки. Порожнина

труби заповнювалася піском на всю висоту. Монтувалось завантажувальний важільне пристрій і необхідна вимірювальна і реєструюча апаратура. Випробування проводилися за методикою 4.3.1. Результати дослідів оброблялися і представлялися у вигляді таблиць і графіків. На рис. 4.21б, показана залежність "осаду-навантаження". Висмикувати сила склала 12,1 кг, сила тертя по внутрішній поверхні дорівнювала 5,2 кг.

Третя серія дослідів була присвячена вивченню взаємодії піску із зовнішньою поверхнею оболонки і опору підстави торця моделі. На підготовлену піщану подушку в лотку встановлювалася модель палі - оболонки під завантажувальним пристроєм. Зовні модуль засипали піском на всю висоту. Внутрішня порожнина оболонки була порожньою.

За допомогою важеля пристрої прикладалася осьова навантаження ступенями. Після кожного навантаження і стабілізації переміщень вимірювалася осаду моделі.

Результати вимірювань заносилися в таблицю 4.8 і будувалися графіки "осадка - навантаження". На рис. 4.21в, наведена ця залежність.

Після стабілізації переміщень вироблялося висмикування моделі за методикою п.4.3.1. При цьому висмикувати сила склала 25,8 кг, а сила тертя - 17,9 кг.

У четвертій серії дослідів модель палі - оболонки, встановленої на піщану подушку товщиною 30 см, засипали піском зовні і всередині на всю висоту, досліджувався взаємодія зовнішньої і внутрішньої поверхонь оболонки з піском, а також його лобове опір торця трубчастої палі. Досліди проводилися на експериментальній установці за методикою, описаною в п.4.3.1. Після кожного ступеня навантаження і стабілізації переміщень палі вимірювалася її осаду. Результати вимірювань заносилися в таблицю і оформлялися графіком "осадка - навантаження". На графіку (рис. 4.21г) показана ця залежність для пухкого і ущільненого підстави.

Таблиця 4.8 - Залежність осадки сердечника від навантаження

№ серія досліджень	№ ступені	Навантаження Р, кг	Осадка, мм	Примітки
1 серія	1	5	0,8	
	2	10	1,6	
	3	15	6,5	
	4	20	зрив	втрата несучої здатності основи
2 серія	1	10	0,5	
	2	20	1,0	
	3	30	4,0	
	4	40	зрив	втрата несучої здатності основи
3 серія	1	10	0,4	
	2	20	0,8	
	3	30	1,2	
	4	40	2,0	
	5	50	6,5	
	6	60	зрив	втрата несучої здатності основи
4 серія	1	40	0,5/0,2	
	2	80	1,0/0,4	
	3	120	2,0/0,8	
	4	160	3,2/1,2	
	5	200	6,0/1,5	
	6	240	зрив/3,0	втрата несучої здатності основи
	7	280	-/зрив	втрата несучої здатності основи

При цьому для пухкого стану підстави ця залежність має більш плавний характер: осадку палі в пухкому підставі зростає при однаковій навантаженні



значно швидше. Так, осаду 2 мм створюється для пухкого підстави навантаженням, що дорівнює 120 кг, для ущільненого - 220 кг, тобто на 45% більше; осаду 4 мм створюється навантаженням в пухкому підставі 175 кг, в ущільненому - 260 кг, що на 29% вище; осаду палі 6 мм відбувається при навантаженні в пухкому піску 200 кг, в ущільненні - 228 кг, що на 27% більше. Спостерігається помітне зниження різниці навантажень для створення однієї і тієї ж опади палі при зануренні в ущільнене і пухкий стан.

Результати цих випробувань трубчастої моделі палі при вдавненні в піщану основу наведені в таблиці 4.8 і на графіках рис. 4.21.

Примітка: для четвертої серії дослідів в чисельнику дані значення для пухкого піску, в знаменнику - для ущільненого.

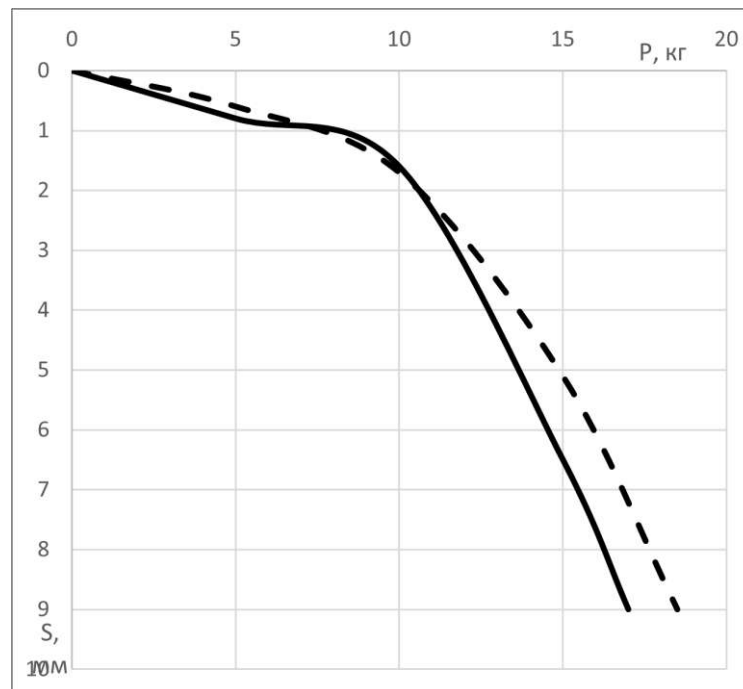


Рис. 4.21а Залежність «осадка – грунт», трубчата паля  $D_H = 75$  см,  $\delta_{ст} = 5$  мм,  $L=102$  см,  $G=6,9$  кг, встановлена на піщану подушку  $h=30$  см.

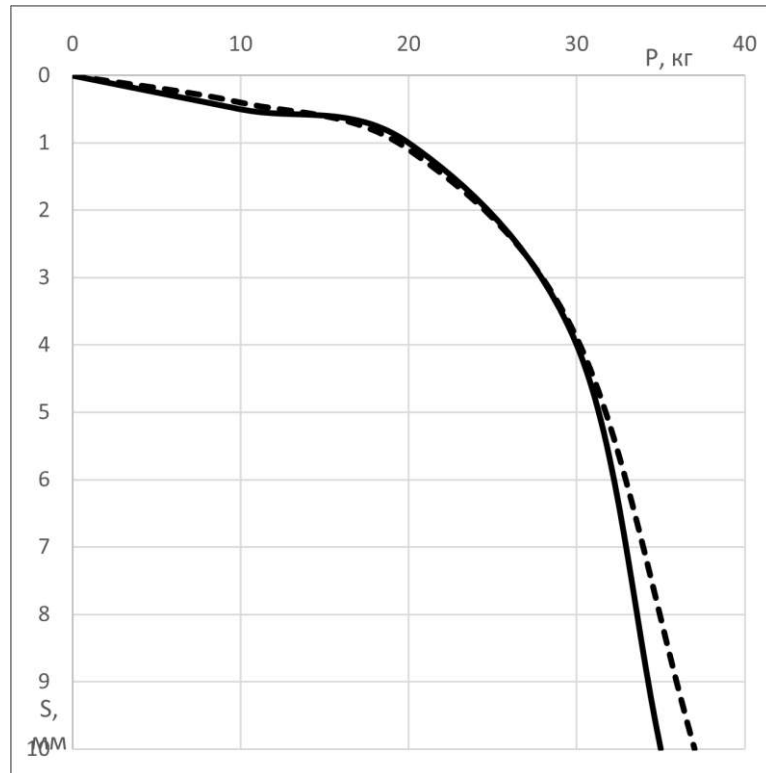


Рис. 4.21б. Залежність «осадка – ґрунт», трубчатого паля  $D_H = 75$  см,  $\delta_{ст} = 5$  мм,  $L=102$  см,  $G=6,9$  кг, засипана тільки порожнина труби.

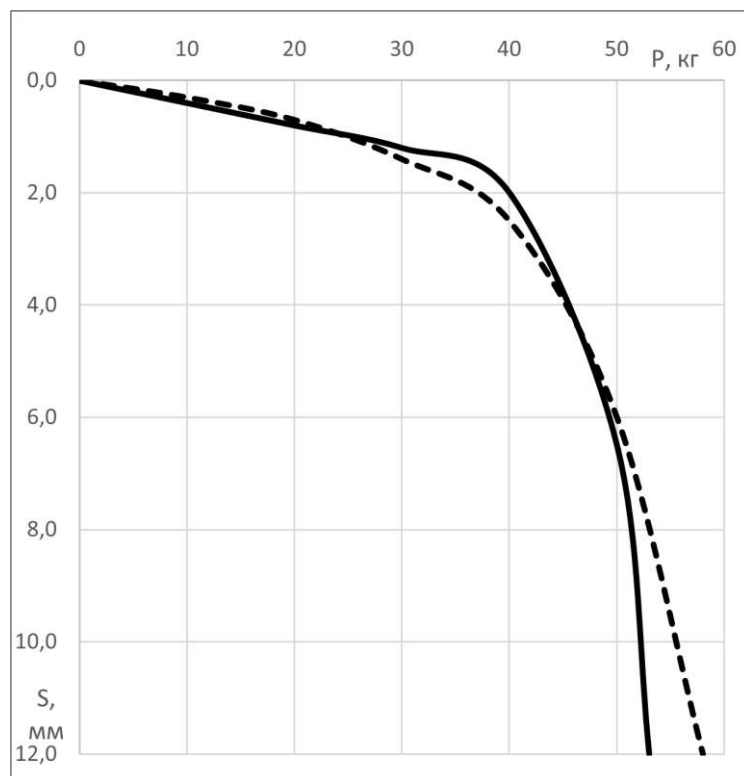


Рис. 4.21в. Залежність «осадка – ґрунт», трубчатого паля  $D_H = 75$  см,  $\delta_{ст} = 5$  мм,  $L=102$  см,  $G=6,9$  кг, засипана тільки труба зовні.