

Міністерство освіти та науки України  
Державний університет інфраструктури та технологій  
Міністерство освіти та науки України  
Державний університет інфраструктури та технологій

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ЧЕРЕДНИК ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 624.132.345

ДИСЕРТАЦІЯ  
**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНОГО ФЛОТУ В ОСОБЛИВИХ УМОВАХ  
ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ЕРЛІФТНОЇ УСТАНОВКИ  
З ШНЕКОВИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ**

05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту»  
«05 – технічні науки»

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  
В.М. Чередник

Науковий керівник: Сьомін Олексій Анатолійович, кандидат технічних  
наук

Київ – 2019

## АНОТАЦІЯ

Чередник В.М. Підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту в особливих умовах шляхом використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» («05 – технічні науки»). – Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, 2019.

У дисертаційній роботі вирішується актуальне наукове завдання, спрямоване на підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту шляхом використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором у водоймищах глибиною до 20 метрів.

Особливістю прибережних вод і акваторій річкових та морських портів України є невеликі глибини та постійне замулення великими річковими магістралями (Дніпром, Дунаєм, Дністром, Південним Бугом). Це ускладнює забезпечення повноцінного судноплавства. Комплекс заходів з підтримки глибин, необхідних для безпечного мореплавання, включає в себе видобуток, підйом і транспортування ґрунту до місця звалища та здійснюється суднами днопоглиблювального флоту. Актуальним напрямком при цьому є використання ерліфтних комплексів.

Використання ерліфту для днопоглиблення на малих глибинах натомість звичайних земснарядів обумовлено низькою металоємністю та високою надійністю, за рахунок відсутності складних частин в конструкції. Між економічними показниками та кількістю транспортованого ґрунту існує пряма залежність, яка і визначає переважаючу ефективність роботи ерліфта.

Одним із основних напрямів розвитку ерліфтних установок є створення нових конструкцій машин, вибору раціональних схемних рішень та

компонувань із застосуванням енергозберігаючих технологій. Використання шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту дозволяє збільшити повноту передачі енергії від повітря до твердого матеріалу, а це в свою чергу підвищує продуктивність та збільшує коефіцієнт корисної дії машини, саме ті параметри, які були низькі у звичайних ерліфтах.

У ході дисертаційних досліджень отримано нові наукові результати, які полягають у тому, що: вперше запропоновано метод підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту, який відрізняється від відомих, застосуванням шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту, що дозволяє більш ефективно виконувати днопоглиблювальні роботи на глибинах до 20 метрів; отримала подальший розвиток математична модель робочого процесу ерліфтної установки, яка відрізняється від відомих врахуванням впливу шнекового інтенсифікатора на підйом гідросуміші в підйомній трубі, що дозволяє спрогнозувати продуктивність та коефіцієнт корисної дії установки; удосконалено метод знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки, який відрізняється від відомих врахуванням значень експлуатаційних параметрів шнекового інтенсифікатора, що дозволяє більш ефективно використовувати днопоглиблювальний флот.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та основні задачі дослідження, показано наукову новизну і практичну значущість роботи.

У першому розділі роботи виконано аналіз ефективності використання флоту, розглянуті особливості використання та шляхів підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту, виконано постановку загального завдання дослідження.

У другому розділі розглянуто конструкційні особливості та класифікація існуючих ерліфтів; наведено відомі аналітичні підходи до визначення основних параметрів ерліфтної установки та основні шляхи покращення продуктивності ерліфтної установки для днопоглиблення.

У третьому розділі представлено метод підвищення ефективності днопоглиблювального флоту, шляхом застосуванням шнекового інтенсифікатора

в підйомній трубі ерліфту та удосконалено математичну модель робочого процесу ерліфтної установки врахуванням впливу шнекового інтенсифікатора на потік гетерогенної суміші, що дозволяє спрогнозувати продуктивність самої установки; виведено аналітичні залежності для визначення коефіцієнту корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором, що дають змогу визначити енергетичну ефективність використання ерліфту з шнековим інтенсифікатором.

У четвертому розділі виконано експериментальну перевірку, яка підтвердила ефективність запропонованих науково-технічних рішень: наведено результати проведених експериментальних досліджень робочих процесів традиційно працюючого ерліфта та ерліфта з шнековим інтенсифікатором; представлена методика проектування ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором; представлено метод знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки; розроблено заходи щодо автоматичного регулювання подачі стисненого повітря компресором ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором та представлено модель системи автоматичного регулювання витрати повітря компресора; виконано розрахунок економічної ефективності застосування ерліфту з шнековим інтенсифікатором.

Використання результатів дисертаційного дослідження дозволяє підвищити ефективність експлуатації днопоглиблювального флоту, за рахунок використання шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту при роботі у водоймищах глибиною до 20 метрів.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи забезпечується: коректним використанням математичного апарату теорії газо-гідродинамічних процесів; врахуванням чинників, що впливають на розв'язання наукового завдання; обґрунтованим вибором допущень і обмежень, прийнятих як вихідні дані при формулюванні наукових завдань; використанням апробованих результатів, коректним вибором показників і критеріїв, а також відповідністю теоретичних даних результатам проведених експериментів. Основні наукові та практичні результати, що отримані в дисертаційній роботі впроваджені.

Результати дисертаційних досліджень можуть бути використані для покращення конструкції при проектуванні сучасного ерліфтного комплексу для днопоглиблювальних робіт, а також в навчальному процесі при викладенні навчальної дисципліни «Суднові допоміжні установки, системи та технологічне обладнання» у розділі «Днопоглиблювальна техніка».

Ключові слова: ерліфтна установка, підйомна труба, шнек, трикомпонентна суміш, річковий та морський флот, днопоглиблення, днопоглиблювальний флот.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Основні наукові результати.

1.1 Сукач М.К., Чередник В.М. Основні шляхи удосконалення ерліфтної установки для розробки підводних ґрунтів. *Гірн., буд., дор. і меліорат. машини*. 2007. №69. С. 26-33.

1.2 Сукач М.К., Чередник В.М. Аналітичні підходи до визначення основних параметрів ерліфтної установки. *Гірн., буд., дор. і меліорат. машини*. 2008. №72. С.8-11.

1.3 Сукач М.К., Чередник В.М. Установка для транспортування ґрунту в акваторіях. *Гірн., буд., дор. і меліорат. машини*. 2010. №75. С.57-61.

1.4 Сукач М., Чередник В. Гидравлический расчет эрлифтной установки. *Motrol*. 2010. 12D. С. 117-122.

1.5 Чередник В.М. Планування експерименту щодо дослідження продуктивності ерліфтної установки зі шнековим інтенсифікатором. *Новітні технології* : зб. наук. пр. приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». Київ, 2019. Випуск 1(8). С. 163-168.

1.6 Чередник В.М. Експериментальний аналіз продуктивності ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором для днопоглиблювальних робіт. *Вісник ОНМУ* : зб. наук. пр. Одеського національного морського університету. Одеса, 2019. Випуск 1(58). С. 110-118.

### 2. Апробація наукових результатів.

2.1 Сукач М.К., Чередник В.М. Ерліфтний комплекс для розробки підводного мулистого ґрунту. *Молодь: освіта, наука, духовність* : тези доп. IV всеукр. студ. наук. конф. Частина II. Київ: Університет «Україна», 2007. С. 245-246.

2.2 Чередник В.М. Ерліфтний комплекс для розробки підводного мулистого ґрунту. Тези доп. наук. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА. Київ. 6-9 лист. 2007 р. Київ : КНУБА, 2007. С. 77-78.

2.3 Сукач М.К., Чередник В.М. Застосування ерліфтного комплексу для розробки підводного мулистого ґрунту. *Молодь: освіта, наука, духовність* : тези доп. V всеукр. наук. конф. студентів і молодих вчених. Частина II. Київ : Університет «Україна», 2008. С. 456.

2.4 Чередник В.М. Ерліфтний комплекс для розробки підводного мулистого ґрунту. Тези доп. наук. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА. Київ. 4-6 лист. 2008 р. Київ : КНУБА, 2008. С. 94.

2.5 Сукач М.К., Чередник В.М., Марчук О.П. Розрахунок ерліфту для транспортування підводного мулистого ґрунту. *Молодь: освіта, наука, духовність* : тези доп. VI всеукр. наук. конф. студентів і молодих вчених. Частина II. Київ: Університет «Україна», 2009. С. 419-420.

2.6 Чередник В.М. Структура двофазного потоку у вертикальній трубі ерліфта. Тези доп. наук. конф. молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА. Київ. 3-5 лист. 2009 р. Частина I. Київ : КНУБА, 2009. С. 98-99.

2.7 Сукач М.К., Чередник В.М. Аналітичний підхід до визначення основних параметрів ерліфтної установки. *Динамика, надійність і довговечність механічних і біомеханічних систем і елементів їх конструкцій* : матеріали конф. МНТК. Севастополь. 6-10 вер. 2010 р. Севастополь, 2010. С. 14.

2.8 Сукач М.К., Чередник В.М. Напрями розвитку ерліфтної техніки для розробки ґрунтів під водою. *Енергія 2010* : матеріали конф. IV МНТК. Сімферополь. 13-18 вер. 2010 р. Сімферополь, 2010. С. 8.

2.9 Чередник В.М. Ерліфтна установка для видобутку піску з дна водоймищ. *Гідромеханіка в інженерній практиці* : матеріали конф. XVIII міжнародн. наук.-техн. конф. Київ. 21-24 трав. 2013 р. Київ. 2013, С. 125-126.

2.10 Чередник В.М. Аналіз робочого процесу ерліфту зі шнеком з підйому трьохфазної суміші. *Гідромеханіка в інженерній практиці* : матеріали міжнародн. наук.-техн. конф. Кіровоград. 21-24 трав. 2014 р. Кіровоград, 2013. С. 125-126.

2.11 Чередник В.М. Ерліфтний комплекс для розробки будівельного матеріалу з дна водоймища. *Гідромеханіка в інженерній практиці* : матеріали ХХ міжнародн. наук.-техн. конф. Київ. 26-29 трав. 2015 р. Київ, 2015. С. 140.

2.12 Чередник В.М. Ерліфтний комплекс для розробки підводних мулистих ґрунтів. Збірник тез ХХІ наук.-метод. конф. викладачів, аспірантів та студентів. Київ. 27-29 бер. 2017 р. Частина II. Київ : КДАВТ, 2017. С. 145-146.

2.13 Чередник В.М. Ерліфтний комплекс для видобутку будівельного матеріалу з дна водоймища. Збірник тез ХХІІ наук.-метод. конф. викладачів, аспірантів та студентів. Київ. 26-29 бер. 2018 р. Частина II. Київ : ДУІТ, 2018. С. 90-91.

2.14 Чередник В.М. Експериментальний аналіз продуктивності ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором для днопоглиблювальних робіт. Зб. тез ХХІІІ наук.-метод. конф. викладачів, аспірантів та студентів. Київ. 27-29 бер. 2019 р. Київ : ДУІТ, 2019. С. 71-73.

2.15 Чередник В.М. Продуктивність ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором для днопоглиблювальних робіт. *Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку* : зб. матеріалів міжнародн. наук.-практ. конф. Київ. 16-17 трав. 2019 р. Київ, 2019. С. 102-104.

### 3. Праці, які додатково відображають наукові результати.

3.1 Ерліфт: пат. 130913 Україна : МПК F04F 1/18 (2006.01). № u201808054 ; заявл. 20.07.2018 ; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24. 4 с.

## ANNOTATION

Cherednyk V.M. Improving the efficiency of the dredging fleet in special conditions by using an airlift plant with a screw intensifier. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.22.20 Operation and repair of means of transport. – State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, 2019.

In the dissertation the topical scientific problem is solved, aimed at increasing the efficiency of operation of the dredging fleet by using the method of auger intensification of the air lift plant when working in reservoirs with a depth to 20 m.

The peculiarity of coastal waters and water areas of the river and sea ports of Ukraine is the shallow depths and the permanent siltation of large river highways (Dnieper, Danube, Dniester, Southern Bug). This makes it difficult to ensure full navigation. The set of depth support measures required for safe navigation includes the extraction, lifting and transportation of soil to the landfill site and is carried out by dredging vessels. The current trend is the use of airlift complexes.

The use of dredging for shallow dredging at shallow depths instead of conventional dredges is due to low metal intensity and high reliability due to the absence of complex parts in the structure. There is a direct relationship between economic indicators and the amount of soil transported, which determines the prevailing efficiency of airlift operation.

One of the main directions of development of airlift plants is the creation of new machine designs, the choice of rational circuit solutions and arrangements using energy-saving technologies. The use of a screw intensifier in an airlift lift pipe increases the completeness of the energy transfer from air to solid material, which in turn increases productivity and increases the machine's efficiency, exactly the parameters that were low in conventional airlifts.

In the course of the dissertation, new scientific results were obtained, which are: for the first time, a method of increasing the efficiency of operation of the

dredging fleet, which differs from the known ones, is proposed by the use of a screw intensifier in the lift pipe, which allows more efficient performance of dredging operations at depths up to 20 meters; further developed a mathematical model of the workflow of an airlift plant, which differs from the known effects of the auger intensifier on the lifting of the hydraulic mix in the lifting pipe, which allows to predict the performance and the efficiency of the installation; the method of finding the optimum operating parameters of an air lift plant has been improved, which differs from the known values of the operational parameters of the screw intensifier, which makes it possible to use the dredging fleet more effectively.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and main tasks of the research, shows the scientific novelty and practical significance of the work.

The first section of the paper analyzes the efficiency of fleet use, examines the features of use and ways to improve the efficiency of the dredging fleet, the formulation of the overall task of the study.

The second section discusses the design features and classification of existing airlifts; known analytical approaches to determining the basic parameters of an airlift plant and the main ways to improve the performance of an air lift installation for dredging.

The third section presents the method of increasing the efficiency of the dredging fleet by using a screw intensifier in the lift tube and improved the mathematical model of the workflow of the lift taking into account the impact of the screw intensifier on the flow of heterogeneous mixture, allowing to predict the products; analytical dependences are derived to determine the efficiency of the airlift with a screw intensifier, which allow to determine the energy efficiency of the use of the airlift with a screw intensifier.

In the fourth section, an experimental test was carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed scientific and technical solutions: the results of the experimental studies of the working processes of traditionally working airlift and airlift with a screw intensifier are presented; the technique of designing an airlift

plant with a screw intensifier is presented; the method of finding the optimum operating parameters of an airlift plant is presented; measures for automatic control of compressed air supply by an airlift compressor with a screw intensifier were developed and a model of a system for automatic control of compressor air flow was presented; the cost effectiveness of the use of the airlift with a screw intensifier was calculated.

The use of the results of the dissertation research allows to increase the efficiency of operation of the dredging fleet, due to the use of a screw intensifier in the lifting pipe of the airlift when working in reservoirs with a depth to 20 m.

The validity and reliability of the results of the dissertation is provided by: correct use of mathematical apparatus of the theory of gas-hydrodynamic processes; taking into account the factors that influence the solution of the scientific task; reasonable choice of assumptions and limitations taken as input when formulating scientific objectives; using the tested results, the correct choice of indicators and criteria, as well as the relevance of theoretical data to the results of the experiments. The main scientific and practical results obtained in the dissertation are implemented.

The results of the dissertation research can be used to improve the design when designing a modern air lift complex for dredging works, as well as in the educational process in the teaching of the disciplines "Ship auxiliaries, systems and technological equipment" in the section "Dredging equipment".

Keywords: airlift plant, lifting pipe, auger, three-component mixture, river and navy, dredging, dredging fleet.

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....   | 15 |
| ВСТУП .....   | 16 |
| РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНОГО ФЛОТУ .....               | 23 |
| 1.1 Аналіз ефективності використання флоту .....  | 23 |
| 1.2 Особливості використання днопоглиблювального флоту .....  | 31 |
| 1.3 Шляхи підвищення ефективності ерліфтної установки .....   | 35 |
| 1.3.1 Критерії ефективності роботи ерліфтної установки .....  | 35 |
| 1.3.2 Способи збільшення ефективності роботи ерліфтної установки .....  | 40 |
| 1.3.3 Фактори, що обмежують ефективність роботи ерліфтної установки .....                                       | 41 |
| 1.4 Постановка загального завдання дослідження .....  | 46 |
| Висновки до розділу 1 .....   | 47 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕРЛІФТНОЇ УСТАНОВКИ .....      | 49 |
| 2.1 Загальна методика дослідження .....   | 49 |
| 2.2 Конструкційні особливості та класифікація існуючих ерліфтів ...   | 51 |
| 2.3 Аналітичні підходи до визначення основних параметрів ерліфтної установки .....                              | 57 |
| 2.4 Основні шляхи покращення продуктивності ерліфтної установки для розробки підводних ґрунтів .....            | 72 |
| Висновки до розділу 2 .....   | 84 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕРЛІФТНОЇ УСТАНОВКИ З ШНЕКОВИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ .....              | 86 |
| 3.1 Метод шнекової інтенсифікації ерліфтної установки. Фізична модель ерліфта з шнековим інтенсифікатором ..... | 86 |

|  |            |
|--|------------|
|  | 13         |
| 3.2 Постановка задачі про рух гідросуміші в ерліфті з гвинтовим шнеком. Основні співвідношення .....                         | 87         |
| 3.3 Визначення продуктивності роботи ерліфта з шнековим інтенсифікатором .....   | 105        |
| 3.4 Визначення коефіцієнту корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором .....  | 107        |
| 3.5 Аналіз гідродинамічних параметрів робочого процесу ерліфта з шнековим інтенсифікатором .....                             | 108        |
| Висновки до розділу 3 .....  | 111        |
| <b>РОЗДІЛ 4. ПІДТВЕРДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ .....</b>                                    | <b>113</b> |
| 4.1 Експериментальні дослідження робочих процесів традиційно працюючого ерліфта та ерліфта з шнековим інтенсифікатором ..... | 113        |
| 4.1.1 Завдання та обґрунтування вибору об'єкта експериментальних досліджень .....  | 113        |
| 4.1.2 Експериментальна установка та вимірювальний комплекс .....   | 114        |
| 4.1.3 Методика та результати експериментальних досліджень..  | 125        |
| 4.2 Методика знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором .....                | 138        |
| 4.2.1 Знаходження геометричних параметрів підйомної труби .  | 138        |
| 4.2.2 Знаходження швидкості аерогідросуміші .....  | 139        |
| 4.2.3 Знаходження геометричних параметрів підвідної труби ...  | 141        |
| 4.2.4 Знаходження геометричних параметрів трубопроводу, що подає повітря .....   | 141        |
| 4.2.5 Знаходження геометричних параметрів шнекового інтенсифікатора .....  | 142        |
| 4.3 Автоматичне регулювання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором .....  | 144        |
| 4.3.1 Автоматичне регулювання подачі стисненого повітря компресором ерліфтної установки .....                                | 144        |

|  |     |
|--|-----|
|  | 14  |
| 4.3.2 Модель системи автоматичного регулювання витрати повітря компресора .....                | 149 |
| 4.4 Розрахунок економічної ефективності застосування ерліфту з шнековим інтенсифікатором ..... | 152 |
| Висновки до розділу 4 .....  | 160 |
| ВИСНОВКИ .....   | 161 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....   | 163 |
| ДОДАТКИ .....  | 180 |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

|        |   |
|--------|---|
| АЦП –  | аналогоцифровий перетворювач;                       |
| БК –   | блок керування;                                     |
| ДР –   | датчик рівня;                                       |
| ДУІТ – | Державний університет інфраструктури та технологій; |
| ЕУШ –  | ерліфтна установка з шнековим інтенсифікатором;     |
| ККД –  | коефіцієнт корисної дії;                            |
| ТКК –  | тверді корисні копалини;                            |
| ТПЧ –  | тиристорний перетворювач частоти;                   |
| САР –  | система автоматичного регулювання;                  |
| САК –  | система автоматичного керування;                    |
| УЗВ –  | ультразвуковий витратомір.                          |

## ВСТУП

Особливістю прибережних вод і акваторій річкових та морських портів України є невеликі глибини, а також наявність мулистого та піщаного ґрунту, що наноситься великими річковими магістралями (Дністром, Дніпром, Дунаєм, Південним Бугом). Це ускладнює забезпечення повноцінного судноплавства. Комплекс заходів з підтримки глибин, необхідних для безпечного мореплавства, включає в себе видобуток, підйом і транспортування ґрунту до місця звалища та здійснюється суднами днопоглиблювального флоту. Перспективним напрямком при цьому є використання ерліфтних комплексів.

Використання ерліфту для днопоглиблення на малих глибинах замість звичайних земснарядів обумовлено низькою металоємністю та високою надійністю, за рахунок відсутності складних частин в конструкції. Між економічними показниками та кількістю транспортованого ґрунту існує пряма залежність, яка і визначає переважаючу ефективність роботи ерліфта.

Одним із основних напрямів розвитку ерліфтних установок є створення нових конструкцій машин, вибору раціональних схемних рішень та компонувань із застосуванням енергозберігаючих технологій. Використання шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту дозволяє збільшити повноту передачі енергії від повітря до твердого матеріалу, а це в свою чергу підвищує продуктивність та збільшує коефіцієнт корисної дії машини, саме ті параметри, які були низькі у звичайних ерліфтах.

### **Обґрунтування вибору теми дослідження.**

На сьогоднішній день існує протиріччя щодо необхідності підтримки паспортних глибин у невеликих акваторіях, де застосовувати традиційні днопоглиблювальні спеціалізовані судна, призначені для морських та океанських шляхів, економічно або технічно недоцільно, та можливістю використання для цього ерліфтних установок, але традиційні ерліфти мають низьку продуктивність та коефіцієнта корисної дії.

Підйом твердих матеріалів з дна водоймищ на 20% ефективніше ерліфтними установками, ніж використання традиційних землерийних машин, це обумовлено низькою енергоємністю та простотою конструкції їх. Але при використанні ерліфту на глибинах до 20 метрів він має невисокий коефіцієнт корисної дії. Використання шнекового інтенсифікатора в конструкції ерліфту дозволяє збільшити коефіцієнта корисної дії установки.

Немає наукового обґрунтування методу підвищення ефективності процесу використання ерліфтних установок на глибинах до 20 метрів під час проведення днопоглиблювальних робіт. Це призводить до додаткових витрат ресурсів під час проведення днопоглиблювальних робіт і в цілому зменшує ефективність експлуатації засобів водного транспорту в акваторіях де глибина від 20 метрів і менше. Тому дисертаційної роботи на тему «Підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту в особливих умовах шляхом використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором» є актуальною.

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

Тема дисертаційної роботи тісно пов'язана з положеннями «Морської доктрини України на період до 2035 року» (Постанова КМ України від 7 жовтня 2009 року, № 13074) та здійснюється відповідно до Галузевого забезпечення безпеки судноплавства на 2014-2019 роки, відповідно до Програми економічних реформ у Транспортній стратегії України на період до 2030 р. (розпорядження КМУ від 30 травня 2018 року № 430-р.).

Дисертаційна робота виконана в інтересах науково-дослідної роботи «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю» (номер держреєстрації 0116U03946), (розділ щодо покращення днопоглиблювальних робіт в акваторіях), яка виконувалась у Київському інституті водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій.

**Мета та завдання дослідження.**

*Мета дослідження* – розроблення методу підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту за рахунок використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором для виконання днопоглиблювальних робіт в акваторіях на глибинах до 20 метрів.

Для досягнення визначеної мети в роботі необхідно розв’язати наступні завдання:

- провести дослідження шляхів підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту;
- проаналізувати основні способи підвищення ефективності експлуатації ерліфтної установки для виконання днопоглиблення в акваторіях на глибинах до 20 метрів;
- розробити новий метод підвищення ефективності днопоглиблювального флоту на основі використання шнекової інтенсифікації в підйомній трубі ерліфтної установки при роботах в акваторіях на глибинах до 20 метрів;
- удосконалити математичну модель робочого процесу ерліфтної установки шляхом врахування впливу шнекового інтенсифікатора на потік гетерогенної суміші в підйомній трубі ерліфтної установки, що дозволяє спрогнозувати продуктивність й коефіцієнт корисної дії установки та виявити область доцільного використання ерліфта з шнековим інтенсифікатором;
- удосконалити метод знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки врахуванням впливу від шнекового інтенсифікатора;
- розробити аналітичні залежності та алгоритм знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором;
- розробити систему автоматичного регулювання продуктивності компресора ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором;
- підтвердити ефективність запропонованих науково-технічних рішень, шляхом проведення експериментальних досліджень та виконання економічних розрахунків.

*Об'єкт дослідження* – процес проведення днопоглиблювальних робіт для підвищення ефективності експлуатації засобів водного транспорту.

*Предмет дослідження* – технічні робочі параметри шнекового інтенсифікатора ерліфтної установки.

**Методи дослідження.** Аналіз наукових джерел дозволив обґрунтувати актуальність наукової проблеми та сформулювати завдання досліджень. Методи аналізу та синтезу гідродинамічних явищ дозволили обґрунтувати фізичні моделі роботи ерліфта з шнековим інтенсифікатором. Методи і закони механіки рідини та газу, закономірності теорії двофазного потоку і гідравліки покладені в основу математичної моделі режиму роботи та робочих процесів газорідинного підйомника з шнековим інтенсифікатором. Методи математичного моделювання дозволили встановити енергетично доцільні області експлуатації та оптимальні режими роботи ерліфту з шнековим інтенсифікатором. Експериментальний метод досліджень роботи ерліфту з шнековим інтенсифікатором дозволив підтвердити адекватність математичних залежностей робочих процесів газорідинного підйомника.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше розроблено метод підвищення ефективності днопоглиблювального флоту, який відрізняється від відомих, застосуванням шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту, що дозволяє більш ефективно виконувати днопоглиблювальні роботи на глибинах до 20 метрів.

2. Отримала подальший розвиток математична модель робочого процесу ерліфтної установки, яка відрізняється від відомих врахуванням впливу шнекового інтенсифікатора на підйом гідросуміші в підйомній трубі, що дозволяє спрогнозувати продуктивність та коефіцієнт корисної дії установки.

3. Удосконалено метод знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки, який відрізняється від відомих врахуванням значень експлуатаційних параметрів шнекового інтенсифікатора, що дозволяє більш ефективно використовувати днопоглиблювальний флот.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у: розробленні аналітичних залежностей та алгоритму знаходження оптимальних робочих

параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором; розробленні алгоритму прогнозування продуктивності ерліфту з шнековим інтенсифікатором; виявлені області доцільного використання ерліфта з шнековим інтенсифікатором.

Виведено аналітичні залежності для визначення продуктивності та коефіцієнту корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором.

Створено ерліфтну установку з шнековим інтенсифікатором (патент України №130913), яка забезпечує зростання на 49,5% продуктивності розробки підводних ґрунтів на глибинах до 20 метрів, а коефіцієнт корисної дії збільшується на 13,7%.

Обґрунтованість та достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи забезпечується: коректним використанням математичного апарату; врахуванням чинників, що впливають на розв'язання наукового завдання; обґрунтованим вибором припущень і обмежень, прийнятих як вихідні дані при формулюванні наукових завдань; використанням апробованих результатів, коректним вибором показників і критеріїв, а також узгодженістю результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

### **Впровадження отриманих результатів.**

Основні результати досліджень були впроваджені:

– у Київському інституті водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій (акт впровадження від 28.06.2018 року) в навчальний процес при викладанні навчальної дисципліни «Суднові допоміжні установки, системи та технологічне обладнання» у розділі «Днопоглиблювальна техніка»;

– у науково-дослідній роботі «Розробка комплексного показника якості пасажирських круїзних суден змішаного плавання в системі безпересадкових круїзних перевезень між портами Дніпра, Чорного моря та Дунаю» (номер держреєстрації 0116U03946) в розділі покращення днопоглиблювальних робіт в акваторіях, виконаної в Київському інституті водного транспорту імені

гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій;

– у ТОВ «Стерлінг Пауер» (акт впровадження від 19.11.2018 року) в процес проектування модифікації малого днопоглиблювального судна проекту VM17.1150, яке призначене для експлуатації на невеликих глибинах для очищення дна відкритих та закритих водоймищ, фарватерів річок, каналів, загальних днопоглиблювальних робіт, видобутку нерудних матеріалів, та особливостю якого є те, що воно легко змінює насосну установку на ерліфтну, рекомендовану автором даної дисертаційної роботи;

– у департаменті днопоглиблення Адміністрації морських портів України (акт впровадження від 08.04.2019 року) на землесосі у порядку експерименту була обладнана експериментальна ерліфтна установка за запропонованими рекомендаціями, яка в процесі днопоглиблення підтвердила теоретичні та технічні рішення дисертаційної роботи та довела доцільність її використання у подальшій виробничій діяльності з днопоглиблення.

Одержані результати дослідження доведені до методів і моделей та мають високий ступінь готовності до використання. Копії актів впровадження результатів дисертаційного дослідження представлені у додатку Г.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертації опубліковані у 6 статтях, з яких 5 статей у виданнях, що занесені до переліку наукових фахових видань України в галузі технічні науки, з яких 1 включену у міжнародні наукометричні бази *Index Copernicus* та *Scientific Indexing Services* та 1 стаття у фаховому виданні Польщі. Отримано 1 патент на корисну модель. Крім того, за матеріалами дисертації опубліковано 15 тез доповідей на конференціях, з яких 6 міжнародні. Матеріали дисертації було використано в науково-дослідній роботі (номер держреєстрації 0116U03946).

Дисертаційна робота є самостійно виконаним дослідженням. Наукові результати, які викладено в дисертації та виносяться на захист, одержано автором особисто. В основних наукових роботах, які написані в співавторстві, здобувачу належать: [1.1] – проведено дослідження шляхів покращення ефективності експлуатації ерліфтною установки; [1.2] – проведено аналіз відомих

аналітичних підходів до визначення основних параметрів ерліфтної установки; [1.3] – запропоновано метод підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту; [1.4] – розроблено алгоритм знаходження основних конструкційних характеристик ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором; [2.1] – представлено метод підвищення ефективності днопоглиблювального флоту; [2.3] – проаналізовано особливості конструкції ерліфтного комплексу та умови використання відповідно до поставлених завдань; [2.5] – запропоновано математичну модель робочого процесу ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором; [2.7] – представлено метод знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки; [2.8] – проаналізовані методи покращення ефективності експлуатації ерліфтної установки.

**Апробація результатів дисертації.** У ході виконання дисертаційної роботи отримані результати проведених досліджень доповідалися на 15 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях та семінарах, опубліковані в тезах доповідей, основними з яких є: міжнародна науково-технічна конференція «Гідромеханіка в інженерній практиці». Київ, Кіровоград (2013 – 2015 р.); всеукраїнська студентська наукова конференція «Молодь: освіта, наука, духовність». Київ (2007 – 2009 р.); конференція молодих вчених, аспірантів та студентів КНУБА. Київ (2007 – 2009 р.); Науково-методичної конференції викладачів, аспірантів та студентів КДАВТ (ДУІТ). Київ (2017 – 2018 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем и элементов их конструкций». Севастополь (2010 р.); міжнародна науково-технічна конференція «Енергія 2010». Сімферополь (2010 р.); міжнародна наук.-практ. конференція «Водний транспорт: сучасний стан та перспективи розвитку». Київ (2019 р.).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків; викладена на 201 сторінки друкованого тексту та містить 161 сторінки основного тексту, 73 рисунки, 6 таблиць, список використаних джерел з 186 найменувань на 18 аркушах, 5 додатків на 22 аркушах.

# РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНОГО ФЛОТУ

## 1.1. Аналіз ефективності використання флоту

Річки є найдавнішими шляхами сполучення і до появи залізничного та автомобільного транспорту відігравали велику роль для зв'язку між населеними пунктами та розвитку держав шляхом обміну вантажами та спілкування між людьми. Річковий транспорт і в даний час є одним з провідних видів транспорту України, Росії, Німеччини, США та ін. Річковий транспорт Росії, наприклад, має особливе значення для північних і східних районів, де низька щільність автомобільних і залізних доріг або ж вони взагалі відсутні. У цих регіонах частка річкового транспорту в загальному вантажообігу складає від 60 до 90%.

Основу річкового транспорту складають: судна, водний шлях, порти, пристані, суднобудівні та судноремонтні заводи й засоби зв'язку [1].

*Флот* – головна активна частина річкового транспорту. Він складається з суден транспортного призначення, службово-допоміжних та технічних.

Специфічні умови судноплавства на річках (порівняно невеликі глибини річок, звивистість річкових шляхів, вузькість фарватеру та камер шлюзів) є причиною створення суден з незначною осадкою та малими габаритними розмірами. Річковий флот складається з: самохідних суден пасажирських, вантажопасажирських і вантажних, а також несамохідних (барж, поромів) різного призначення та буксирів – суден без власних вантажних приміщень, але з силовою установкою. Рухомий склад річкового флоту наведено на рисунку 1.1.

*Водний шлях* – це судноплавна частина річок, озер, водосховищ, каналів з гідротехнічними спорудами. Судноплавні умови водного шляху характеризуються габаритами суднового ходу: глибиною, шириною та радіусом заокруглень. Річкові шляхи в залежності від глибини і пропускної здатності діляться на 7 класів та 4 групи: здатністю поділяють на свержмагістралі (перший клас)

з найвищими гарантованими глибинами до 4 м і більше; магістралі (другий клас) до глибин 2,6 м; шляхи місцевого значення з глибинами 1,4 м (4 та 5-й класи) і малі річки з глибиною до 1 м (6 та 7-ий класи). До основних штучним спорудам ставляться спеціальні або поєднані з гідроелектростанціями гідровузли, шлюзи, греблі та ін.

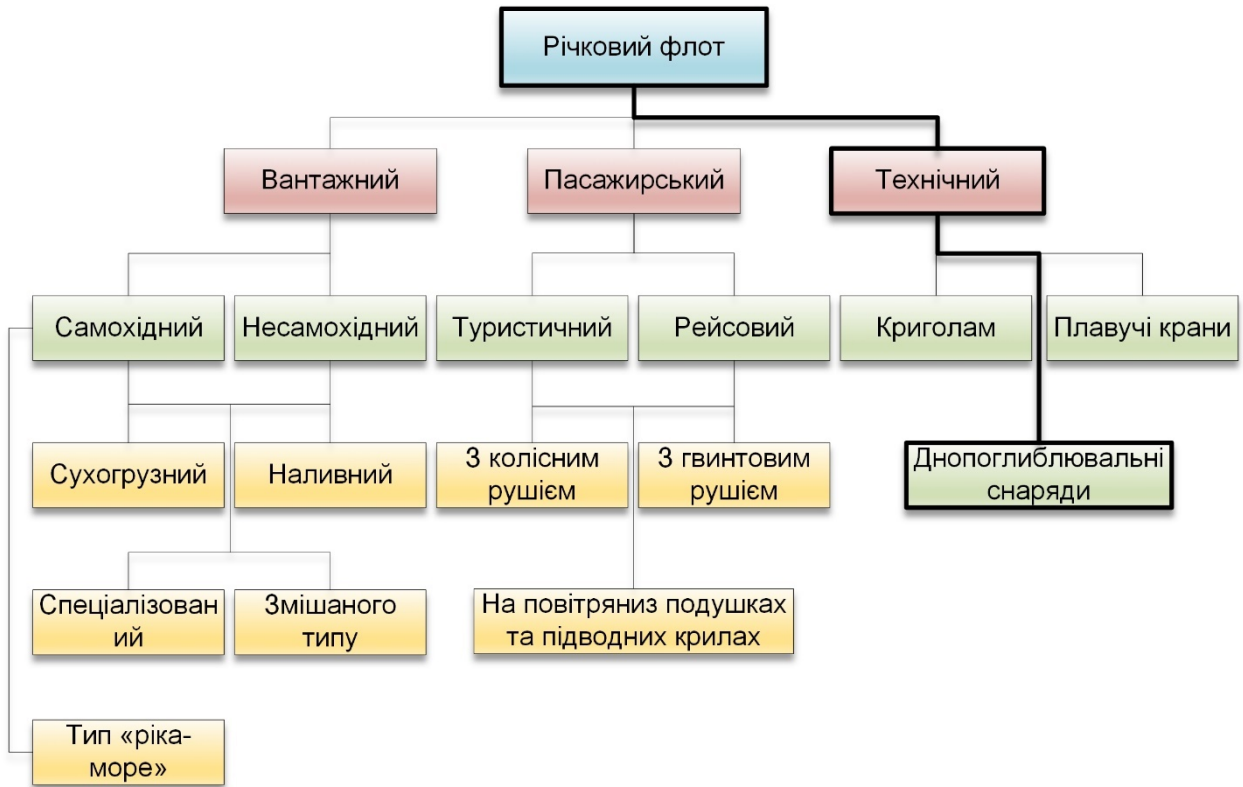


Рисунок 1.1 – Класифікація річкового флоту

*Порти* – основа берегового господарства річкового транспорту, де здійснюються основна завантаження та розвантаження суден, посадка і висадка пасажирів, а також по екіпіровці (оснащення) і технічного обслуговування суден.

*Пристань* – проміжний пункт, де судно має відносно короткочасну стоянку для посадки-висадки пасажирів та часткового розвантаження або довантаження судна.

Технологія роботи річкового транспорту включає операції з утримання та обслуговування суден та водних шляхів, а в портах і пристанях зводиться до забезпечення безпеки входу (в порт) і швартування (прив'язки) судів до спеціальних причалів, формуванню та розформуванню суднових составів (буксир

та баржі), виконання вантажних та пасажирських операцій, екіпіровку суден і технічне обслуговування, в тому числі заправку паливом, відчалування та вихід з порту, здійснення маневрових операцій та ін.

Основні техніко-експлуатаційні особливості та переваги річкового транспорту полягають у наступному:

- висока провізна здатність (до 2-х разів вище, ніж на двопутній залізниці);
- низька собівартість (в 2...3 рази нижче, ніж по паралельним залізничним коліям);
- питома витрата палива в 4 рази менше, ніж на автомобільному та в 15...20 разів менше, ніж на повітряному транспорті;
- невеликі капіталовкладення (в 10 разів менше, ніж на залізниці), так як водні шляхи є в основному природними;
- висока продуктивність та невисока трудомісткість;
- невисока металоємність в порівнянні з залізничним та автомобільним транспортом на 1 тону вантажопідйомності;
- питомі витрати енергії значно нижче, ніж на сухопутних видах транспорту через малого опору руху суден.

Відносними недоліками річкового транспорту є:

- сезонність роботи в північних регіонах країн з холодним кліматом (120...150 днів на рік);
- невисока швидкість руху суден та великий термін доставки вантажів (в 1,5...2 рази довший, ніж на залізничному і автомобільному транспорті та в 3...5 разів, ніж на повітряному);
- роз'єднаність річкових басейнів, розташованих переважно в меридіональному напрямку, тоді як основні вантажопотоки проходять в широтному напрямку;
- нерівномірність глибин, звивистість шляху;
- пасажирські перевезення здійснюються лише в денний (світле) час доби.

Наведені недоліки не зменшують ролі річкового транспорту особливо в тих регіонах, де інші види транспорту не розвинені за специфічними особливостями. Удосконалення рухомого складу річкового транспорту має велике значення для розвитку системи «річка-море», так як дозволяє використовувати суду не тільки після закриття річкової навігації, але й на морських незамерзаючих ділянках, що забезпечує безперевантажувальне плавання, збільшення обсягів перевезення та продуктивності, а також зберігає команду в міжсезоння.

*Морський транспорт* – вид транспорту, що здійснює перевезення вантажів і пасажирів морськими судами на міжнародних і внутрішніх лініях.

Технічне оснащення морського транспорту включає в себе: морські судна (флот), морські порти, судноремонтні заводи, інші пристрої та обладнання.

*Флот* – основа морського транспорту. Склад цивільного морського флоту займають торгові судна, призначені для перевезення вантажів та пасажирів, а також для морського промислу (рибальські, китобійні та ін.). Крім того, є судна з особливими функціями: для буксирування суден, підйому затонулих суден, санітарні, науково-дослідні, спортивні та ін.

Головне якість будь-якого морського судна – його мореплавство, яке складається із здатності плавати зі встановленим навантаженням в будь-яку погоду (плавучість), здатності повертатися у вихідне положення після впливу зовнішньої сили (стійкість), здатності залишатися на плаву при частковому затопленні приміщень (непотоплюваність), здатності розвивати відповідну потужність та швидкість (прохідність), здатності зберігати заданий напрямок руху і змінювати його під дією керма (керованість).

До характеристик маси відносяться: водотоннажність, рівне масі води, що витісняється судном при зануренні його до встановленої ватерлінії; повна вантажопідйомність, рівна масі вантажу плюс запасів палива, води, продуктів харчування і т.п. Класифікація рухомого складу морського транспорту наведена на рисунку 1.2.

*Морські порти* – важлива ланка морського транспорту; вони багато в чому визначають працездатність і ефективність використання флоту. Розрізняють порти загального призначення, спеціалізовані та комбіновані.

Порти загального призначення приймають всі судна, включаючи і пасажирські, та переробляють вантажі на загальних причалах.

Спеціалізовані порти призначаються для переробки вантажів певної групи або конкретного найменування (вугілля, руди, лісу, зерна, нафтовантажів та ін.) і при великих вантажопотоках обладнуються потужними перевантажувальними машинами. Найбільш великими є комбіновані порти, які мають окремі причали для переробки різних вантажів, ємні складські приміщення, складне залізничне господарство.

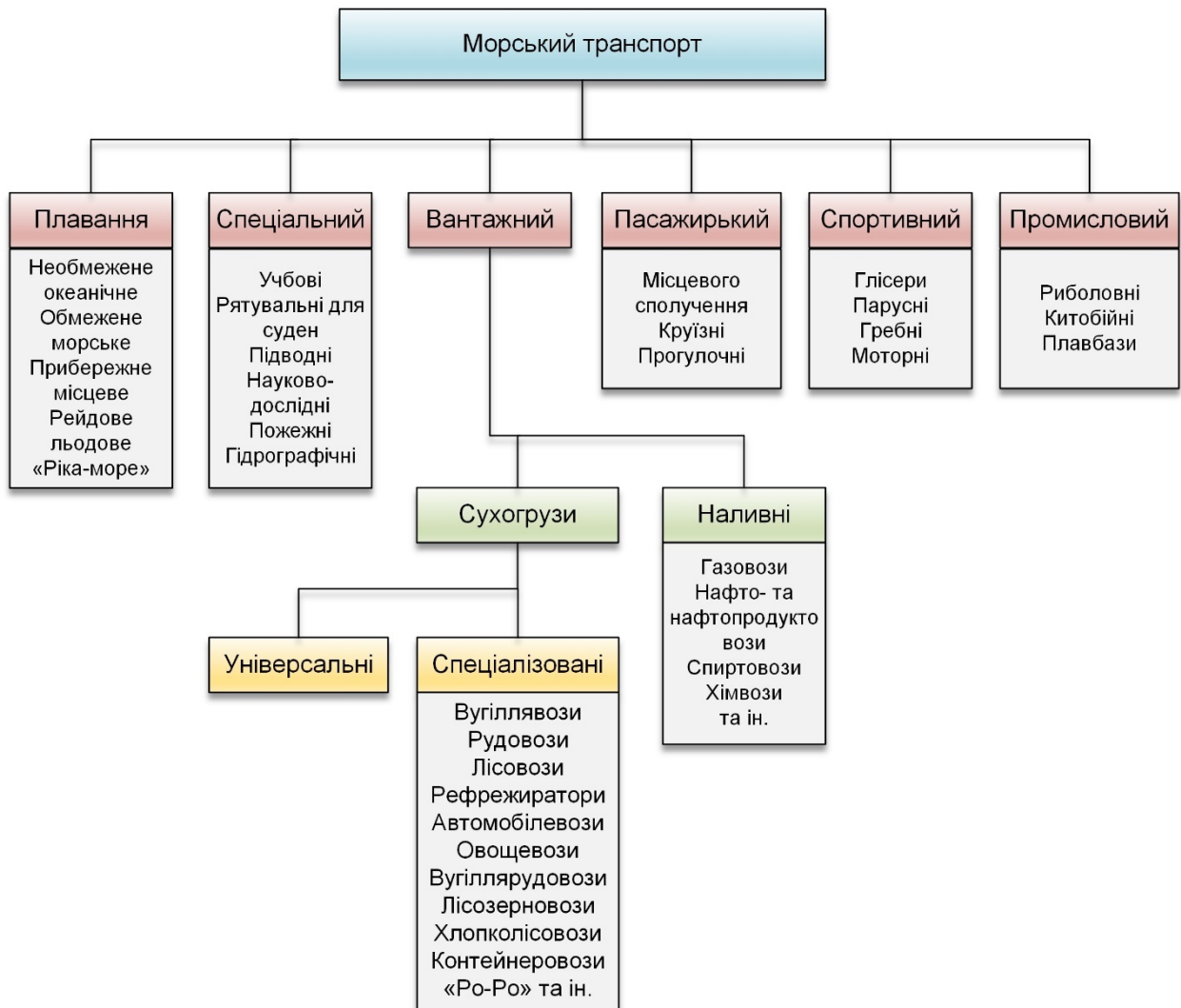


Рисунок 1.2 – Класифікація морського транспорту

*Морський шлях* – це водний простір морів і океанів, включаючи природні протоки і штучні канали, по якому рухаються морські судна в певних, заздалегідь встановлених напрямках. Характерною особливістю морських шляхів є те, що вони практично не вимагають попередніх робіт по їх спорудженню та підтримці в експлуатаційному стані.

Основними техніко-експлуатаційними особливостями та перевагами морського транспорту є:

- можливість забезпечення масових міжконтинентальних перевезень зовнішньоторговельного обороту, оскільки не обмежена лінійна пропускна здатність морів, що дозволяє створювати транспортні засоби великої вантажопідйомності (до кількох сотень тисяч тон);

- незначну питому витрату палива і витрати енергії на одиницю перевезень, тому що на водному транспорті опір руху значно менше, ніж на сухопутних видах;

- невисока собівартість перевезення, оскільки перевезення морським транспортом виконуються в основному на далекі та наддалекі відстані (середня дальність досягає близько 4000 км);

- висока продуктивність і високий рівень механізації перевантажувальних робіт;

- невеликі початкові капітальні вкладення в транспортні шляхи.

Відносними недоліками є:

- низькі швидкості руху;

- залежність від географічних особливостей (навігаційного періоду) і метеоумов (течій, штормів, сильних туманів, льодоставу в гирлах портів та ін.);

- необхідність створення дорогих портових господарств з високим рівнем механізації;

- обмежене застосування в прямому сполученні особливо в малому каботажі (в акваторії одного моря);

- висока вартість суден.

Технологія роботи морського транспорту визначається багатьма документами, настановами, інструкціями та являє собою збірне поняття про способи і порядок роботи портів, суден, судноремонтних та інших підприємств з метою забезпечення їх нормального і безпечного функціонування.

Технологічний процес роботи суден включає: подачу судна під навантаження, маневрування на акваторії порту при постановці до причалу, швартування та ін., Після постановки здійснюється навантаження і підготовка судна до рейсу (вивчається курс проходження, постачання судна паливом, водою, продовольством, матеріалами та документами). Після навантаження та підготовки судна до плавання здійснюється рух судна за курсом, в ході якого проводиться велика кількість різних операцій, що забезпечують нормальне і безпечне плавання.

У порту кінцевого призначення проводиться комплекс операцій, пов'язаних з вивантаженням вантажів і видачі вантажів одержувачу.

Підвищити ефективність експлуатації засобів водного транспорту можна за рахунок підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт.

Поглиблення дна таких водойм, як канали, акваторії, русла річок, озера і ставки – це надзвичайно важлива процедура, різновид складних земляних робіт, які проводяться під водою безпосередньо на дні водойми [2].

Днопоглиблювальні роботи проводять з метою: створення або поглиблення вже існуючих судноплавних водних шляхів; будівництва мостів, причалів та інших гідротехнічних споруд; прокладання різних трубопроводів під водою; розширення або збільшення глибини водойми.

Ці роботи зазвичай поділяються на: роботи капітального характеру (створення шляхів, будівництво мостів, прокладання трубопроводів); експлуатаційні роботи (поглиблення шляхів, розширення або збільшення глибини, випрямлення річкового русла).

Проведення днопоглиблювальних робіт експлуатаційного характеру необхідно виконувати з певною періодичністю, яка залежить від швидкості

замулювання й утворення наносів, що порушують можливість експлуатування судноплавних шляхів, а також різних гідротехнічних споруд.

Дані роботи, в основному, виконують за допомогою земснаряду, або землечерпалки. У свою чергу, для перевезення відпрацьованого в процесі ґрунту використовують пульпопровід, ґрунтовідвідні шаланди та звалища ґрунту.

Проведення днопоглиблювальних робіт, звичайно, не обмежується переліком, описаним в преамбулі цього розділу. Тому розглянемо ситуації, в яких ще використовується цей вид робіт, трохи докладніше [3].

Днопоглиблення річок проводиться з метою: запобігання обвалу берегів річки (виправлення русла); запобігання розмиву ґрунту; оптимізація руслових процесів.

Паралельно цим завданням можливе рішення і супутніх, а саме, формування пляжів, зон відпочинку за допомогою піднятих в процесі виїмки ґрунтів, формування штучних островів (в т.ч. житлових масивів).

Днопоглиблення озер і ставків часто проводиться з метою поліпшення екологічної обстановки на об'єкті. Адже зайва кількість донних відкладень, так зване замулювання водоймища, може привести до загибелі всієї водної флори і фауни. Також поглиблення дна озер, ставків та штучних водойм проводиться при падінні рівня ґрунтових вод, тобто при обмілнні водойми внаслідок зміни підземних горизонтів.

Днопоглиблення каналів необхідно в таких випадках: для запобігання осипання, обвалу берегів водойми; при поліпшенні загального екологічного стану водойми і його суднопропускної і пропускної здатностей; для розрахунку глибини днопоглиблення залежно від призначення водойми.

При днопоглибленні каналів збільшується перетин водного потоку, а тому значно знижується ризик для суден, що мають низьку посадку. Також цей метод використовується для поглиблення фарватеру річок, в яких сповільнюється течія, дно замулюється або ж забруднюється сміттям.

Днопоглиблення проводять досить часто, адже екосистеми водойм мають сильну біологічну активність.

## 1.2. Особливості використання днопоглиблювального флоту

За принципом дії всі днорозроблюючі машини можна розділити на два види – системи механічної та гідравлічної дії (рис. 1.3). До систем механічного принципу дії відносяться одно- і багатоковшеві драги. До систем гідравлічного принципу дії відносяться системи підйому з насосами, установленими вище рівня води, заглибними насосами, ерліфтні, ежекторні системи.

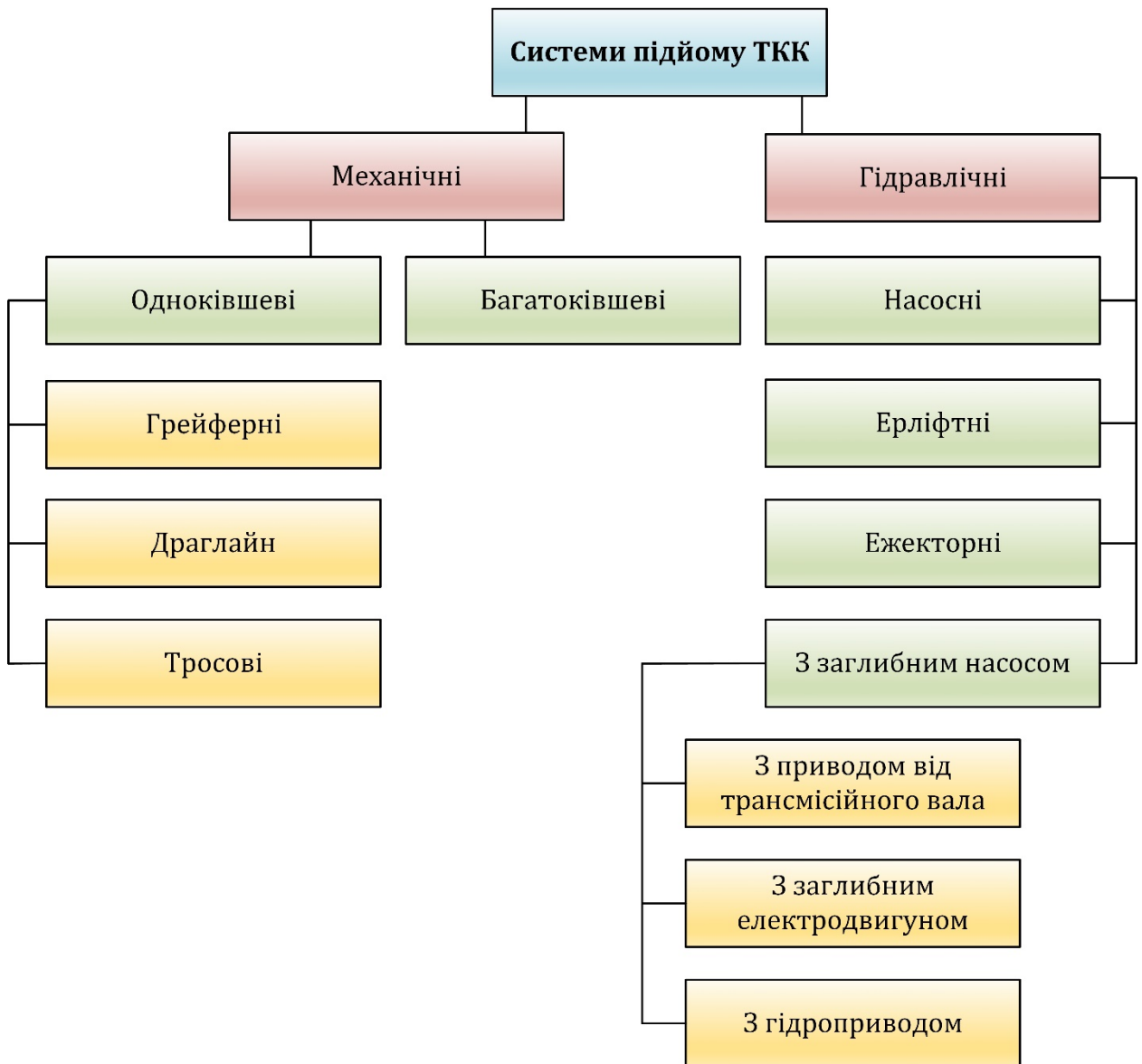


Рисунок 1.3 – Класифікація систем за принципом підйому ТКК

Одночерпакові драги характеризуються великою максимально можливою глибиною розробки (у випадку грейферних і тросових драг), однак низькою продуктивністю у зв'язку з невеликою гранично припустимою швидкістю

підйому заповненого ковша й значним часом, затрачуваним на його опускання на дно. Середня глибина розробки для земснарядів, оснащених ковшем типу «механічна лопата» становить 20 м, швидкість екскавації – 10...15 м<sup>3</sup> у хвилину, середня швидкість підйому черпаків – 50 м/хв, ємність черпаків від 25 до 900 л. З найбільш відомих грейферних машин, що можна відзначити, є комплекси «Таїланд» - максимальна глибина розробки – 75 м, продуктивність – 190 м<sup>3</sup>/год, число черпань у хвилину 10...15, розробка олов'янистих родовищ; «Мерсі» (Англія) глибина розробки – 25 м., «Би-Арриц» (Німеччина) – 30 м.

Багаточерпакові драги, навпаки, відрізняються більшою продуктивністю, але їхня глибина розробки набагато менша у зв'язку з тим, що при збільшенні глибини розробки значно збільшується маса рами, що утримує черпаки, що робить застосування таких комплексів для підйому ТКК із дна морів і океанів при глибинах більше 100 м непридатними. Зі збільшенням глибини розробки різко зростає металоємність і вартість будівлі драги. Наприклад, при однаковій продуктивності драга, призначена для видобутку із глибини 30 м, у шість разів важче подібної драги з максимальною глибиною розробки 15 м. При цьому, для таких засобів підйому, збільшення глибини розробки приводить до росту динамічних навантажень, гідравлічних опорів при переміщенні робочого органу, металоємності несучих елементів добувного комплексу. Крім того, із практики роботи багаточерпакової драги відомо, що вони змушені припиняти роботу при коливанні 2...3 бали та при силі вітру 3...4 бали. При такому коливанні жорстка черпакова рама піддається деформації і руйнуванню внаслідок динамічних ударів об дно водойми робочого органу [4]. Однак, існують глибоководні багаточерпакові драги, що не мають жорсткої рами для підвіски черпаків, наприклад, японська драга на базі судна «Чіюда Мару», що має канат довжиною 8200 м з 240 черпаками ємністю 45 кг кожний, що здійснювала підйом піску з глибини 1000 м та конкрецій із глибини 3500 м. При підйомі конкрецій потік води, що набігає, вимиває з ковшів пісок, у результаті чого відбувається збагачення конкрецій.

Ерліфтні земснаряди здійснюють підйом гідросуміші за допомогою стисненого повітря, яке подається в змішувач. Глибина розробки родовищ такими земснарядами значно обмежена максимальним тиском, який може створити компресор, а продуктивність земснаряду обмежується тільки продуктивністю компресора. У той же час до недоліків такого способу підйому можна віднести низький ККД і необхідність обов'язкового вертикального розташування піднімального трубопроводу. Відомі угорські ерліфтні земснаряди «Гідроп» і «Гідроп зонд», фірми «Коллінз» (США) ведуть видобуток нерудних матеріалів, піску й гравію, а також алмазів із глибин 40...60 м [4].

В основі земснарядів ежекторного типу лежить принцип підйому гідросуміші за рахунок подачі в усмоктувальну трубу потоку рідини й взаємодії її з потоком гідросуміші, що піднімається. Як і у випадку з ерліфтними земснарядами, продуктивність та глибина розробки ежекторних земснарядів визначається параметрами насоса, що подає воду до ежектора. Основним недоліком таких установок є низький ККД. Ежекторні земснарядні комплекси «Ейджа Гоу» і «Ейджа Гоу №1» виробництва Японії мають глибини розробки 70...100 м, ежекторні земснаряди фірми «Пасіфік» США – 60...65м, «Беве́р Мастер» виробництва Голландії – 30...35 м [4].

Головною перевагою ерліфтних та ежекторних земснарядів є відсутність рухомих частин у системі підйому, що забезпечує більшу надійність порівняно з іншими схемами підйому.

Земснаряди із ґрунтонасосами, установленими на борту вище рівня води, застосовуються, в основному, на невеликих глибинах – для очищення дна водоймищ і фарватерів рік, каналів, днопоглиблювальних робіт, видобутку нерудних матеріалів з невеликих глибин. Їхніми перевагами є відносяться конструктивна простота, можливість створення машин великої продуктивності. Однак головний недолік – мала можлива глибина розробки внаслідок обмеження тиску на вході в насос тиском насичених парів рідини (умова безкавітаційної роботи ґрунтонасоса) робить їх непридатними для розробки глибоких морських і океанських родовищ ТКК. Зазвичай робоча глибина таких

земснарядів становить 2...20 м, продуктивність же по твердому може досягати 500 м<sup>3</sup>/ч.

Земснаряди із заглибними насосами можна розділити по виду приводу на 3 категорії:

- заглиблені насоси з механічним приводом за допомогою трансмісійного вала, що з'єднує ротор насоса з валом приводного двигуна, встановленого на судні. Дана схема дозволяє уникнути проблем з герметизацією приводного електродвигуна, однак довгий трансмісійний вал є найменш надійною їхньою частиною, а також значно обмежує глибину розробки (існуючі земснаряди такого типу мають максимальні глибини розробки 5...35 м);

- заглиблені насоси в блоці з електродвигуном. Для гідропідйому корисних копалин із глибин до 200 м Московським гірничим інститутом були розроблені заглибні насосні агрегати «Молюск-5» і «Молюск-8». Особливістю цих насосів є герметичний маслозаповнений електродвигун, оснащений пристроєм, що компенсує теплове розширення масла й автоматично підтримує його тиск у двигуні таким, щоб воно перевищувало тиск навколишньої води. На базі насосів зазначених моделей для рішення проблеми підйому корисних копалин із дна Світового океану лабораторією при Донецькому політехнічному інституті (зараз Донецький національний технічний університет) був розроблений експериментальний заглибний насосний агрегат «Молюск-9», призначений для підйому гідросуміші із глибини до 6000 м при видобутку залізо-марганцевих конкрецій із дна океану [3]. Збільшення глибини підйому ТКК, а отже й напору насоса обмежено скоріше конструктивними міркуваннями – зі збільшенням числа ступенів подовжується вал, що веде до зниження його міцності й жорсткості, а також проблем з балансуванням довгого ротора.

- заглиблені насоси з гідроприводом. Використання для приводу насосного агрегату гідродвигуна об'ємної або гідродинамічної дії, що живиться водою від встановленого на судні насоса. Перспективним є використання для приводу заглибленого насоса активних турбін, встановлених на одному з насосом валу, що живляться через енергетичний трубопровід напірною водою

від усталовленого на судні приводного насоса. Перевагою такої схеми є можливість одержання більших напорів і подач, ніж у випадку із заглибним насосом з електроприводом, за рахунок збільшення частоти обертання валу насоса, відмова від високовольтного електричного кабелю, що перебуває у воді, і герметичного електродвигуна, можливість застосування гідравлічної енергії для приводу придонних механізмів, що здійснюють збір та здрібнювання конкрецій. До недоліків схеми можна віднести більшу конструктивну складність, більшу кількість пристроїв у ланцюзі, наявність другого трубопроводу, необхідність ретельного балансування ротора й особливі вимоги до складання турбо-насосного агрегату.

Традиційний шлях скорочення дефіциту будівельної сировини (піску), тобто збільшення обсягів видобування за рахунок континентальних родовищ, в більшості країн, включаючи і Україну, є неперспективним. Ця сировина на суходолі або відсутня, або знаходиться у вигляді бідних руд, розробка яких нерентабельна. Крім того, збільшення обсягів гірничо-видобувних робіт на суходолі призводить до втрати головного багатства країни – родючих земель (так, в Україні на теперішній час знищено гірничими роботами майже 200 тис. га родючих земель). Цю проблему можна вирішити шляхом видобування піску з дна водоймищ. Перспективним способом видобування сировини є застосування ерліфтних установок, які відрізняються від інших низькою енергоємністю та простотою конструкції.

### **1.3. Шляхи підвищення ефективності ерліфтної установки**

#### **1.3.1. Критерії ефективності роботи ерліфтної установки**

Головною метою роботи ерліфтної установки, як правило, є виїмка деякого обсягу ґрунту з дна водойми. Істотним при цьому є час виконання обсягу робіт. Тому показником, що дозволяє оцінити роботу ерліфту, є його продуктивність. Продуктивність ерліфта  $Q_e$  в одиницю часу, як правило, вимірюється в кубічних метрах ґрунту, що має пористість, відповідну його природного стану на дні водойми, за відповідний період часу роботи ерліфтної установки.

При цьому розрізняють кілька видів продуктивності: проектну, технічну, розрахункову та фактичну. Проектна продуктивність закладена в проекті ерліфтної установки та гарантується заводом-виробником при певних умовах виїмки ґрунту. Технічна продуктивність досягається ерліфтом при оптимальних умовах розробки й вилучення ґрунту. Розрахункова продуктивність визначається виходячи з технічної продуктивності з урахуванням умов, характерних для даної ділянки роботи, таких як властивості ґрунту і глибина його вилучення, товщина шару, що знімається, дальність транспортування ґрунту. Продуктивність, досягнута ерліфтною установкою при виконанні роботи, називається фактичною.

Фактична продуктивність ерліфтної установки залежить від багатьох природних, технічних та експлуатаційних факторів. В процесі експлуатації установки вона схильна до значних змін як довготривалих, так і з невеликим періодом. Однак, для нормування роботи ерліфтної установки необхідно базове значення продуктивності, яке, з використанням відповідних коефіцієнтів, може бути застосоване для нормування та планування роботи в реальних умовах роботи ерліфтної установки. В якості такого базового значення можна було б застосувати значення проектної продуктивності, яке встановлюється на етапі проектування установки та закріплюється за всіма судами даної серії. Проектну продуктивність визначають розрахунком виходячи з прийнятих для даного класу машин визначальних показників: у ерліфтів з шнековим інтенсифікатором це подача компресора та частота обертання шнека. Як правило, визначальні показники для нової ерліфтної установки приймають з урахуванням досвіду експлуатації близьких до нього за характеристиками ерліфтів. Однак після введення побудованих земснарядів в експлуатацію не завжди підтверджується їх проектна продуктивність. Тому для експлуатаційних цілей за базову приймають технічну продуктивність. Технічну продуктивність іноді змінюють у зв'язку з удосконаленням прийомів роботи. Такі зміни частіше характерні для днопоглиблювальних землесосів, так як їх продуктивність істотно

залежить від досконалості ґрунтозабірний пристроїв, характеристик ґрунтососної установки та технології виконання днопоглиблювальних робіт.

Час виконання робіт ерліфтною установкою на кожному об'єкті планують за розрахунковою продуктивністю, яку визначають шляхом множення технічної продуктивності на коефіцієнти, що враховують специфіку умов виконання робіт. Значення коефіцієнтів продуктивності встановлюють для типових земснарядів з досвіду експлуатації. Ними в різного ступеня враховуються властивості ґрунту, глибина його вилучення, товщина шару, що знімається. Також, для землесосів, враховуються відхилення від проектного діаметра, довжини і висоти підйому кінцевого перетину підйомного трубопроводу. Значення коефіцієнтів продуктивності, як правило, менше одиниці, тому розрахункова продуктивність зазвичай менше або дорівнює технічній. Лише в окремих випадках, в разі особливо легких умов роботи або вдосконаленого обладнання, застосовують коефіцієнт, більший одиниці. Цей коефіцієнт є коефіцієнтом використання ерліфтної установки по продуктивності, дорівнює відношенню розрахункової продуктивності до технічної.

Фактична продуктивність ерліфтної установки визначається за формулою:

$$Q_{\phi} = \frac{V}{T},$$

де  $V$  - об'єм ґрунту в природному стані, м<sup>3</sup>;

$T$  - час, витрачений на отримання цього об'єму ґрунту, год.

Для нормування робіт об'єм видобутого ґрунту  $V$  розраховується по укрупненому плану прорізи.

Збільшення фактичної продуктивності ерліфтної установки можна домогтися шляхом скорочення сумарних витрат робочого часу на розробку заданого обсягу ґрунту.

Використання робочого часу визначається коефіцієнтом використання робочого часу. Цей коефіцієнт враховує час виконання непродуктивних робіт і технологічних операцій (таких як перехід на нові об'єкти робіт, перекладка

якорів, зміна суден, що завантажується ґрунтом, перехід на нові траншеї, очищення від засміченості і т.п.) й дорівнює відношенню фактичного часу роботи до загального часу знаходження на ділянці.

Необхідно відзначити, що з плином часу продуктивність земснарядів поступово знижується у зв'язку із зносом технологічного обладнання. Так, у міру зношування робочого колеса та ущільнень ґрунтового насоса, знижуються тиск і витрата гідросуміші, що позначається на продуктивності землесоса. Особливо істотно впливає знос, що викликаний порушення герметичності всмоктуючої лінії. Однак коригування продуктивності на знос устаткування зазвичай не проводиться. Відсутні та узагальнені закономірності для врахування впливу зносу на продуктивність, так як впливає це по-різному на різних типах ерліфтів, залежить від властивостей ґрунту, режимів експлуатації і т.п. Коли знос починає помітно позначатися на продуктивності, замінюють зношені деталі та ремонтують обладнання. З урахуванням експлуатаційного досвіду встановлюють терміни профілактичного ремонту та наладки обладнання.

Інтенсивність зношування технологічного обладнання залежить не тільки від властивостей ґрунту, що розробляється, і матеріалів, з яких виготовлені деталі обладнання, а й від рівня технічної експлуатації. У ерліфтній установці і гідроперенавантажувачі в першу чергу необхідно прагнути до виключення роботи установки на режимах з кавітацією.

Режим роботи ерліфтної установки також впливає на знос устаткування. Інтенсивність зношування збільшується зі збільшенням швидкості транспортування гідросуміші. Підвищення швидкості викликає зростання інтенсивності зношування робочих поверхонь насоса та трубопроводів за такою залежністю [5]:

$$\delta = Av_{гс}^k, \quad (1.2)$$

де  $\delta$  - відношення зміни товщини деталі до обсягу переробленого ґрунту.

$A$  - коефіцієнт, що залежить від матеріалу деталі, властивостей ґрунту і консистенції гідросуміші.

$k$  - показник ступеня, за експериментальними даними становить 2,5 ... 3,0.

З формули (1.2) видно, що підвищення швидкості транспортування гідросуміші призводить до значного прискорення зносу обладнання, тому для збільшення продуктивності не слід без необхідності збільшувати подачу гідросуміші, тому що це викличе передчасний знос устаткування.

Періодична поява кавітації в гуртовому насосі пов'язано із засміченням захисної решітки всмоктуючого наконечника великими предметами, рослинністю і т.п. Помітний вплив засмічення решітки на показання вакуумметра виявляється тільки після засмічення більше 70% площі вхідного отвору решітки. Робота з засміченим наконечником неминуче пов'язана зі зниженою продуктивністю. Часткове засмічення, хоча й мало впливає на втрати напору, проте створює додатковий опір переміщенню всмоктуючого наконечника, і таким чином, в результаті зниження швидкості руху наконечника, консистенція гідросуміші та продуктивність падає.

Поява кавітації та зрив робочого процесу може викликати обвалення шару ґрунту на всмоктуючий наконечник при інтенсивному русі землесоса по станомому тросу при розробці зв'язних ґрунтів. В такому випадку практично повністю припиняється надходження води до всмоктуючого наконечника і в результаті опір всмоктуючого трубопроводу значно збільшується та перевищує граничну вакуумметричну висоту всмоктування, що призводить до виникнення кавітації.

У робочому режимі кавітація може виникнути при збільшенні опору у всмоктуючому трубопроводі до величини, що перевищує граничну вакуумметричну висоту всмоктування. Це може статися через збільшення консистенції усмоктуваної гідросуміші, швидкості перекачування або глибини ґрунтозабора.

Кавітація в насосі, крім підвищеного зносу, може викликати повну зупинку гідросуміші в трубопроводі і осадження ґрунту. Після такої зупинки пуск ерліфту в роботу пов'язаний зі значними витратами часу на промивку підйомного трубопроводу, часто при цьому доводиться від'єднувати частина підйомного трубопроводу для скорочення втрат в ньому, так як втрати в замуленому

трубопроводі повної довжини перевищують натиск, який може створити установка.

З режимами роботи ерліфтної установки, її продуктивністю, безпосередньо пов'язані питомі енергетичні витрати (витрата палива) та продуктивність праці екіпажу, які є найважливішими показниками ефективності роботи. Підвищення продуктивності сприяє зменшенню питомих енергетичних витрат, віднесених до обсягу видобутого ґрунту, і зростання продуктивності праці. Продуктивність праці пропорційна також коефіцієнту використання робочого часу. З підвищенням цього коефіцієнта зменшуються питомі енергетичні витрати, так як скорочується частка витрат енергії на допоміжні потреби.

### **1.3.2. Способи збільшення ефективності роботи ерліфтної установки**

Способи підвищення ефективності роботи ерліфтної установки в цілому можна розбити на дві основні групи: технічні та організаційні.

До технічних способів відносяться способи збільшення продуктивності ерліфтної установки за рахунок вибору оптимальних режимів роботи ерліфту для різних ґрунтових і технологічних умов, підбору параметрів трубопроводів, що забезпечують ефективний транспорт гідросуміші з скороченням ризику виникнення забою трубопроводу, розробки ґрунтозаборного пристрою, що забезпечує ефективну розробку ґрунту з різними параметрами, та запобігає зрив робочого процесу ерліфту при завалі ґрунтом всмоктуючого наконечника, постійне відстежування факторів, що впливають на продуктивність та управління ерліфтною установкою з метою підтримки її максимально ефективною роботи в постійно мінливих умовах роботи.

До організаційних способів можна віднести заходи, спрямовані на зниження часу непродуктивних простоїв землесоса, пов'язаних з постачанням паливом і матеріалами, пропуском суден, пов'язаних із зупинкою робочого процесу, буксируванням, перестановкою на нові ділянки роботи, та інші подібні витрати часу.

Надалі в цій роботі будуть розглядатися тільки технічні способи підвищення ефективності роботи ерліфту.

### **1.3.3. Фактори, що обмежують ефективність роботи ерліфтної установки**

Режим ерліфтної установки, а саме комплексу повітряного насоса, всмоктуючого та підйомного трубопроводів визначає обсяг виконаної землесосом роботи й енергетичні витрати на виконання роботи. Керуючи роботою ерліфту, слід вибирати режим роботи ерліфтної установки з умови досягнення максимальної продуктивності, можливої в ґрунтових та технологічних умовах даної прорізи. Залежно від пріоритетів, визначених при підготовці завдання на розробку, під ефективністю роботи ерліфтної установки можна розуміти або зниження питомих і сумарних енергетичних витрат, та ступеня зносу робочого обладнання при виконанні певного обсягу робіт, або досягнення максимальної продуктивності за одиницю часу й зменшення загального часу виконання заданого обсягу робіт. Зі збільшенням ефективності роботи земснаряду скорочуються терміни виконання роботи та / або зменшується питома і сумарний витрата палива, й знос устаткування.

Залежно від умов на кожному об'єкті та від технічного стану ерліфтної установки, її максимальна продуктивність обмежується або можливостями розробки ґрунту, або всмоктуючою, або гідротранспортуючою здатністю, або максимальною потужністю приводу ерліфтної установки. Для найбільш повного використання можливостей ерліфту в процесі управління його роботою важливо своєчасно виявляти обмежуючий фактор.

Умова обмеженого ґрунтозабора. Під час виконання днопоглиблювальних робіт продуктивність землесосів часто обмежується умовами розробки ґрунту. До факторів, що призводить до погіршення ґрунтозабора, відносяться: мала товщина шару, що знімається ґрунту; властивості і засміченість ґрунту; невідповідність всмоктуючого наконечника ґрунту або глибині розробки;

недостатня тримає здатність якорів, стримуюча швидкість просування землесоса.

Ознаками роботи ерліфту в умовах обмеженого ґрунтозабора можуть бути: неможливість підвищення швидкості робочого переміщення установки через надмірне натягнення оперативних тросів, «сповзання» якорів, обмеженою максимальної швидкості лебідок; необхідність частих очисток решітки наконечника або приймального патрубка насоса через велику засміченості ґрунту; зростання вакууму на вході в насос через велику глибину всмоктування або при розробці щільних замулених ґрунтів; поява перерахованих ознак характеризують обмежує ґрунтозабора лише в тому випадку, якщо дотримується плавне регулювання робочого режиму. Ривки, різкі зміни швидкості лебідок, а також глибини опускання ґрунтозабірної пристрої ведуть до порушень робочого режиму, не є наслідком того, що продуктивність ерліфту досягла межі.

У разі якщо продуктивність ерліфту обмежена можливістю розробки ґрунту, наконечник зустрічає опір своєму переміщенню, зростає навантаження на провідний оперативний трос.

Запас всмоктуючої здатності насоса не вичерпаний, показання консістомера вказують на низьку консистенцію гідросуміші .

Якщо при роботі ерліфта явно виявляється, що продуктивність обмежується можливостями ґрунтозабора, необхідно перш за все вжити заходів щодо його інтенсифікації. До таких заходів належать: закладка досконаліших або важких якорів, підключення гідравлічного розпушувача і правильний підбір розмірів і форми його соплових отворів, зміна всмоктуючого наконечника або захисної решітки, підбір технологічних параметрів (подача, ширина траншей, величина заглиблення наконечника), ретельне дотримання рівномірності робочого режиму.

Умова недостатньою всмоктуючої здатності. У випадках розробки ґрунту ерліфтом з великої глибини, виникнення локальної зони підвищеної консистенції гідросуміші у всмоктуючому трубопроводі, або значного засмічення

захисної решітки всмоктуючого наконечника, можливе підвищення тиску на вході в насос до величини, рівної граничній у всмоктуючому патрубку ґрунтового насоса на даній подачі, і, як наслідок, небезпека виникнення кавітації в ґрунтовому насосі. Про який обмежує вплив недостатньої всмоктуючої здатності свідчать характерні ознаки кавітації в ерліфтній установці: знижений тиск в напірній магістралі, а також підвищений шум і вібрація в насосі. Якщо знижений тиск, шум і вібрація спостерігаються при показаннях вакуумметра менш граничного вакууму насоса, то можливо вплив на роботу насоса підсосу повітря через нещільності у всмоктувальній магістралі.

Для запобігання обмеження по недостатньою всмоктуючої здатності і забезпечення продуктивної роботи ерліфту велике значення має постійний контроль за станом всмоктуючих наконечника та трубопроводу. Збільшення консистенції гідросуміші призводить до зростання вакууму, а отже, до більш інтенсивному проникненню повітря в ґрунтовий насос через нещільності і до падіння подачі гідросуміші. Тому наявність нещільності у всмоктувальній магістралі значно впливає на роботу ґрунтонасосної установки та вимагає вжиття заходів до негайного їх усунення. У той же час, нещільності з'єднань всмоктувального ґрунтопроводу, що знаходяться в процесі роботи під водою, не мають великого впливу на роботу ґрунтонасосної установки землесоса, так як проникнення води через них відносно небагато, і вони не впливають на виникнення кавітації в насосі.

У разі обмеження глибини розробки ґрунту по всмоктуючої здатності, ефективним заходом щодо подолання такого обмеження є зменшення втрат у всмоктуючому наконечнику і трубопроводі, а також застосування насосу.

Для зниження втрат на тертя у всмоктуючому трубопроводі застосовують зазвичай трубопровід збільшеного діаметру, в такому випадку швидкість руху гідросуміші знижується.

Крайнім випадком обмеження по всмоктуючої здатності є миттєве зростання втрат у всмоктуючому наконечнику в результаті його завалу шаром ґрунту та припинення надходження чистої води в наконечник. Завал відбувається

найчастіше при спробі інтенсифікації ґрунтозабора шляхом збільшення швидкості робочого переміщення землесоса.

При цьому в деяких випадках з фронтального боку всмоктуючого наконечника може утворитися нестійкий миттєвий укiс з великим кутом, який при подальшому просуванні наконечника обрушується і повністю перекриває надходження чистої води. У цій ситуації неминуче перевищення граничного тиску на вході в насос, виникнення кавітації і зрив робочого процесу ерліфтної установки. Оскільки при завалі всмоктуючого наконечника перевищення тиску відбувається практично миттєво, в якості основного заходу по запобіганню зриву робочого процесу застосовується попередження можливості завалу, тобто такий вибір режиму роботи і переміщення землесоса, при якому завал малоімовірний. Далі в якості альтернативної заходи буде розглянуто всмоктуючий наконечник, що забезпечує додаткове надходження чистої води в зону всмоктування, для якого основним робочим режимом є всмоктування ґрунту з масиву, і забезпечує збереження стабільного робочого процесу ерліфтної установки, в тому числі і при завалі наконечника.

Умова недостатньою гідротранспортної здатності. Недостатня гідротранспортна здатність визначається можливістю забою трубопроводу осаджувати з гідросуміші частинками ґрунту.

Обмеження продуктивності землесоса за умовами процесу транспортування ґрунту в трубопроводі може бути в наступних випадках: розробка ґрунтів, що містять велику кількість крупнозернистих фракцій (гравій, крупний пісок), робота зі збільшеною довжиною напірного трубопроводу та висотою його вихідного перетину, наявність несправностей в ґрунтовому насосі або двигуні, що викликають зниження напору насоса, що в свою чергу, призводить до зниження подачі гідросуміші, робота з підвищеною консистенцією гідросуміші, а також в разі зниженої подачі гідросуміші, викликаного, наприклад, засміченням вхідної решітки.

Транспортна здатність гідросуміші зберігається в повному обсязі при швидкості руху потоку вище певної, так званої критичної швидкості.

Критична швидкість - це така швидкість руху гідросуміші по трубопроводу, при якій починається випадання частинок ґрунту в осаді в нижній частині трубопроводу. Критична швидкість залежить від діаметра трубопроводу, крупності частинок перекачується ґрунту та консистенції гідросуміші. При збільшенні швидкості транспортування вище критичної осаду не спостерігається, при зниженні швидкості нижче критичної - шар осаду збільшується. Тут слід уточнити, що хоча швидкість, розрахована з подачі в середньому по всьому перетину трубопроводу та зменшується, фактична швидкість по живому перерізу трубопроводу підтримується на рівні критичної або трохи нижче її, тому що при зниженні швидкості нижче критичної частина ґрунту випадає в осад, зменшуючи прохідний перетин трубопроводу, що призводить до підтримання швидкості на приблизно постійному рівні.

Виникнення загрози забою трубопроводу визначають за таких явищ: при невеликому плавному збільшенні швидкості робочого переміщення землесоса вакуум на вході в насос спочатку зростає, а потім починає знижуватися внаслідок падіння витрати гідросуміші; показання манометра, встановленого на вихідному патрубку ґрунтового насоса збільшуються через збільшення опору в напірному трубопроводі; показання витратоміра зменшуються, шарометр реєструє наростання шару ґрунту в трубопроводі, консистенція гідросуміші за показаннями консістомера збільшується. Щоб запобігти забій трубопроводу, при появі перелічених ознак слід зменшити швидкість переміщення землесоса, а при необхідності й підняти раму ґрунтозабірного пристрою, тим самим припинивши забір ґрунту. Швидкість оперативного переміщення установки при роботі з обмежувачим гідротранспортом повинна регулюватися так, щоб не допустити можливості виникнення предзабійного стану.

Забій ґрунтопроводу може відбутися не тільки внаслідок недостатньої транспортує здатності ерліфтної установки, але і від раптового засмічення або завалу ґрунтом всмоктуючого наконечника, від виникнення підсосу повітря. Часто загроза забою трубопроводу виникає при недотриманні правил плавного регулювання робочого процесу землесоса, зокрема занадто швидке

заглиблення всмоктуючого наконечника в ґрунт, різкі бічні відхилення землесоса, наприклад, при вході в поздовжній створ, швидке нарощування швидкості переміщення землесоса призводять до різкого зростання вакууму на вході в насос і до падіння витрати гідросуміші при цьому, як уже говорилося вище, при зростанні вакууму вище граничної величини в насосі виникає кавітація, та натиск на виході насоса й подача різко падають.

У робочому режимі землесоса може відбуватися стабільне транспортування гідросуміші з утворенням осаду ґрунту в напірному ґрунтопроводу. Висота шару осадів ґрунту при цьому може досягати чверті діаметра ґрунтопроводу [6]. Наявність в напірному трубопроводі шару осадів ґрунту свідчить про роботу з консистенцією гідросуміші, близькою до гранично можливої.

При установці на експлуатованих землесос шнекового інтенсифікатора, що забезпечує можливість значного підвищення консистенції гідросуміші і продуктивності землесоса, основним обмежуючим фактором стає гідротранспортна здатність ерліфтної установки. Для підвищення продуктивності землесосів відповідно до можливостей нових інтенсифікуючих пристроїв, потрібно підбирати відповідні режими роботи ерліфтної установки, які необхідно навчитися розраховувати, або може знадобитися модернізація або заміна насосів з метою збільшення створюваного ними напору.

#### **1.4. Постановка загального завдання дослідження**

Як вже було сказано вище, ефективність роботи ерліфтних установки може визначатися різними критеріями, в залежності від розв'язуваних на даному об'єкті завдань та виставлених пріоритетів. В загальному, задача збільшення ефективності для будь-якого конкретного режиму роботи може вирішуватися за такою приблизною схемою:

1. Виявлення поточного пріоритету (цілі) - продуктивність ( $Q_e$ ); кофіцієнт корисної дії ( $\eta_e$ ); прискорене виконання обсягу робіт ( $T$ ) і т.п.

2. Визначення оптимального режиму роботи установки з урахуванням встановленого пріоритету та існуючих на об'єкті ґрунтових і технологічних умов

$$Q_e \rightarrow \text{MAX};$$

$$\eta_e \rightarrow \text{MAX};$$

$$T \rightarrow \text{MIN}.$$

3. Попереднє визначення можливих обмежуючих факторів, перешкоджають досягненню оптимального режиму роботи, і по можливості їх усунення.

$$0 \leq Q_{\text{п}} \leq Q_{\text{к max}};$$

$$0 \leq n_{\text{ш}} \leq n_{\text{дв max}},$$

де  $Q_{\text{п}}$  – подача повітря в підйомну трубу ерліфтної установки;

$Q_{\text{к max}}$  – максимальна подача повітря компресором;

$n_{\text{ш}}$  – оберти шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфтної установки;

$n_{\text{дв max}}$  – максимальні оберти привідного двигуна.

4. При неможливості усунення обмежуючого фактору вибір режиму роботи, максимально наближеного до оптимального, але з урахуванням діючого обмеження

$$Q_e \rightarrow \text{MAX} \text{ при } \begin{cases} \eta_e \leq \eta_{\text{зад}}; \\ T \leq T_{\text{зад}}. \end{cases}$$

5. Досягнення обраного режиму роботи, контроль, та його постійне коригування, з урахуванням технологічних параметрів, мінливих в процесі роботи, при цьому, по можливості слід уникати роботи в критичних режимах, тому що несподівана зміна, наприклад, складу перекачуючого ґрунту може привести до порушення роботи ерліфтної установки.

Для зняття одного з найбільш поширених обмежуючих факторів – тиску в системі можна задати певний, значення якого отримано вже відомими методами розрахунків інших авторів та є оптимальним.

## Висновки до розділу 1

1. Аналіз ефективності використання флоту показав, що удосконалення рухомого складу річкового транспорту має велике значення для розвитку системи «річка-море», так як дозволяє використовувати судно не тільки після закриття річкової навігації, але й на морських незамерзаючих ділянках, що забезпечує безперевантажувальне плавання, збільшення обсягів перевезення та продуктивності, а також зберігає команду в міжсезоння.

2. Проведено дослідження шляхів підвищення ефективності експлуатації засобів водного транспорту. Встановлено, що підвищити ефективність його можна за рахунок підвищення ефективності днопоглиблювальних робіт. Одним із основних перспективних напрямків є використання ерліфтної установки для днопоглиблення при роботах на глибинах до 20 метрів.

2. Визначено, що головною перевагою ерліфтних установок є відсутність рухомих частин у системі підйому, що забезпечує більш ефективну та надійну роботу порівняно з іншими схемами підйому. Але при використанні ерліфту на глибинах до 20 метрів він має невисокий коефіцієнт корисної дії.

3. Розглянуті критерії ефективності роботи ерліфтної установки. Визначено, що основним критерієм є продуктивність. Продуктивність ерліфтної установки – це величина, яка визначає кількість піднятого ґрунту з дна водоймища за одиницю часу.

4. Визначено оптимальні режими роботи ерліфтної установки з урахуванням встановлених пріоритетів та технологічних умов.

$$Q_e \rightarrow \text{MAX, при } \eta_e \leq \eta_{e \text{ зад}} \text{ та } T \leq T_{\text{зад}}.$$

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕРЛІФТНОЇ УСТАНОВКИ

### 2.1. Загальна методика досліджень

Виконання дисертаційної роботи відбувалось шляхом проведення теоретичних та експериментальних досліджень, а також лабораторно-виробничих випробувань, які виконувались поетапно. Так, експериментальні дослідження згідно плану роботи, виконувались в сумісництві з теоретичними.

Технічне рішення, щодо напрямку досліджень, отримали як результат аналізу відомих технологій та процесів, які застосовуються при днопоглибленні. Де звертали увагу на продуктивність та енергозатрати. Як підсумок була запропонована нова технологія та конструкції ерліфтної установки, доцільність використання яких обґрунтували теоретичними та експериментальними дослідженнями.

Теоретичні дослідження виконувались після глибокого аналізу відомих наукових праць, у технічній літературі, за напрямком гідродинамічні процеси багатофазного середовища, та проведених лабораторних випробувань експериментальної установки ерліфту з шнековим інтенсифікатором. Підсумком таких досліджень стало обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів установки та побудови зони доцільного використання. Випробування ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором підтвердили його роботоздатність, дали очікуваний позитивний результат та низку переваг у порівнянні з іншими відомими розробками. Загальну схему планування та проведення досліджень для вирішення поставлених у роботі завдань наведено на рис. 2.1. Завдання досліджень передбачало визначення мети та вибору методів досліджень об'єктів, що висувались.

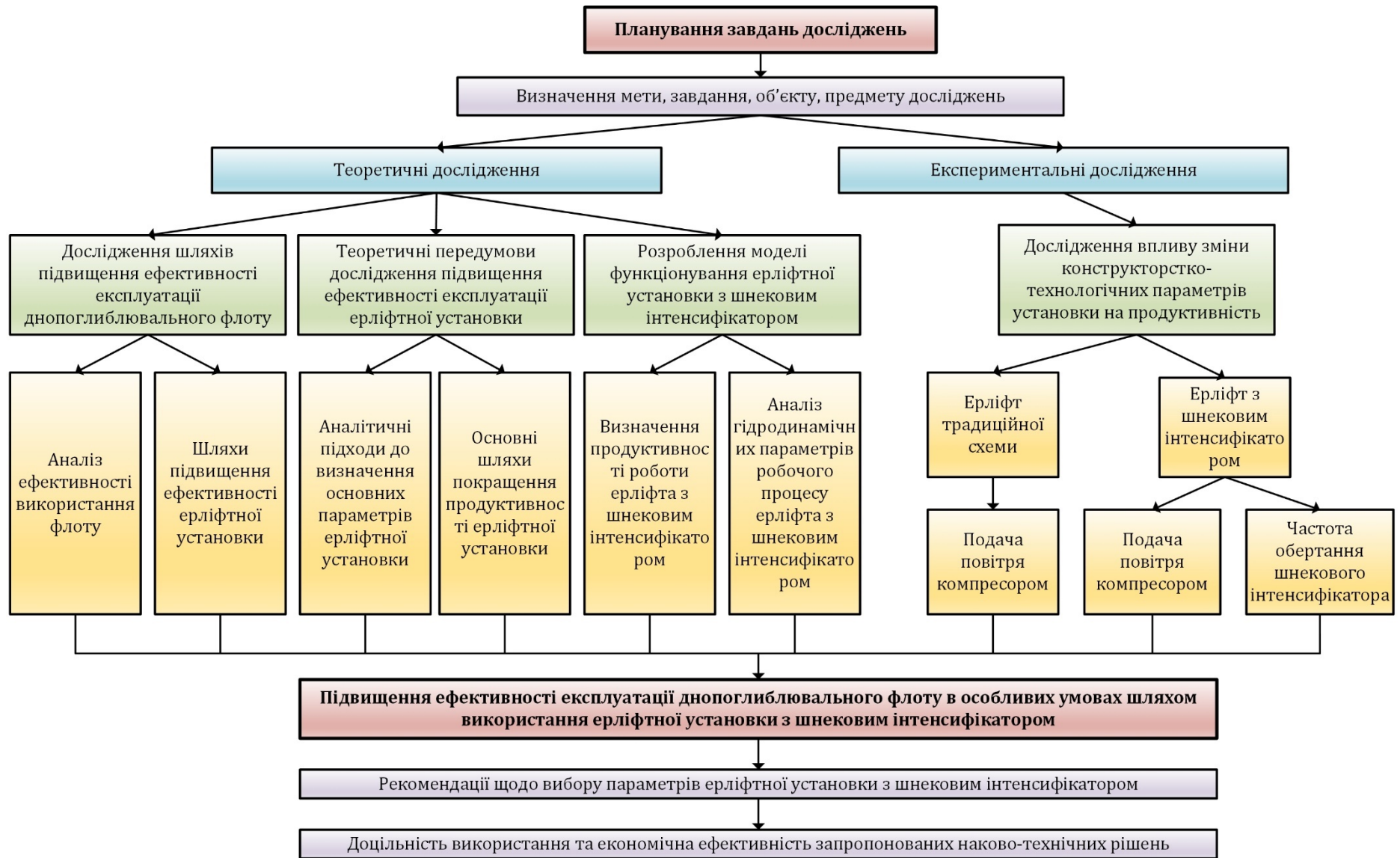


Рисунок 2.1 – Схема планування реалізації досліджень

## 2.2. Конструкційні особливості та класифікація існуючих ерліфтів

Працюючим в області експлуатації земних надр часто доводиться стикатися із застосуванням ерліфтних установок. Одним з напрямків розвитку нової технології і техніки в розглянутому випадку є використання ерліфтного підйому.

Значний внесок у вирішення зазначеної проблеми внесли Андріасов Р.А., Архангельський В.А., Багдасаров В.Г., Белов І.Г., Вількер Д.С., Газієв Н. Г., Герман А.П., Гейер В.Г., Герсеванов Н.М., Гриценко А.І., Груба В.І., Гужов А.І., Дюнін А.К., Кириченко О.А., Клапчук О.В., Козлов Б.К., Козиряцкий Л.Н., Костенко А.Г., Крилов А. П., Логвінов М.Г., Малєєв В.Б., Мамаєв В.А., Меліков В.С., Муравйов І.М., Нігматулін Б.І., Одішарія Г.Е., Пак В.В., Пірвердян А.М., Рахматуллин Х.А., Рєпін М.М., Шищенко Р.І., Шоу С.Ф. та інші.

З учених далекого зарубіжжя істотний внесок у дослідження питань, що розглядаються внесли Акагава К., Безе Х., Берінгер Г., Верслуїс С., Вонг Т., Гріффітс П., Даклер А., Зуберт Н., Ібеле В., Клаус Г., Кох Дж., Леві С., Локарт Р., Мартін С., Мартінеїлі Р., Мойссіс Р., Мердок Дж., Полярській М., Роуз Р., Свенсон Х., Стеннінг А., Тонг Л., Уолліс Г., Хол-Тейлор Н., Хьюїтт Дж., Чен Шефу та інші.

*Ерліфт* - це пристрій, призначений для підйому речовин з деякої глибини на певну висоту за допомогою стиснутого повітря.

Зазвичай ерліфти застосовуються для: подачі води з свердловин; видобування корисних копалин з дна водоймищ; будівельних та днопоглиблюваних робіт; подачі активного циркуляційного мула і підйому стічної рідини на велику висоту на каналізаційних очисних спорудах; для подачі хімічних реагентів на водопровідних очисних спорудах.

Ерліфт складається зі всмоктуючого пристрою з підвідною трубою, змішувача, підйомної труби, повітровідокремлювача, зливного і повітроподаючих трубопроводів, компресора (рис.2.2). Всмоктувальний пристрій призначено для забезпечення рівномірною і дозованою подачі твердого матеріалу в

підвідну трубу. В системі відбувається змішування пульпи і стислого повітря для передачі енергії повітря до рідини.

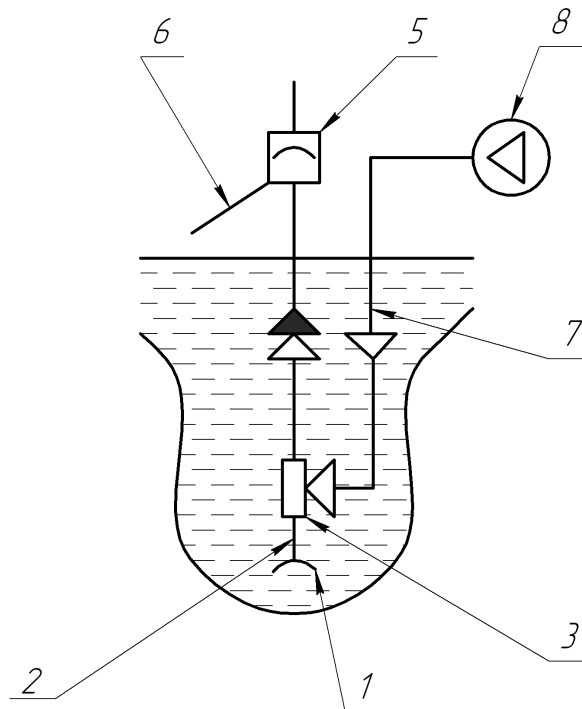


Рисунок 2.2 – Гідравлічна схема ерліфтної установки для розробки підводних ґрунтів: 1 – всмоктуючий пристрій; 2 – підвідна труба; 3 – змішувач; 4 – підйомна труба; 5 – повітровідокремлювач; 6 – зливна труба; 7 – повітроподаюча труба; 8 – компресор

Підйомна труба призначена для переміщення трифазної гідросуміші (вода + повітря + твердий матеріал) від змішувача до повітровідокремлювача. В останньому трифазний потік гідросуміші розділяється на двофазний (повітря + пульпа), при цьому пульпа прямує в зливний трубопровід, а повітря – в атмосферу. Повітроподаючий трубопровід призначений для подачі стислого повітря від компресора до змішувача.

Принцип роботи ерліфта полягає в наступному. Якщо в нижню частину труби, зануреної у воду, ввести повітря під достатнім тиском, то повітряна емульсія (суміш води і повітря), що утворилася в ній, підніматиметься завдяки різниці питомих мас емульсії в трубі і води в забої. Густина емульсії зменшується зі збільшенням у ній повітря.

До переваг ерліфта відносяться: простота конструкції, в якій відсутні рухомі деталі; вміст у рідині, яка подається, суспензії в необмежених кількостях; можливість легко монтувати та демонтувати ерліфт, елементи якого з'єднуються між собою за допомогою різьблення (така процедура може знадобитися при реконструкції пристрою, а також при виконанні його технічного обслуговування); стійкість внутрішньої частини труб, з яких складається ерліфт, до заростання; стійкість до хімічно агресивних середовищ, що забезпечується використанням в ерліфті труб, виготовлених з відповідних матеріалів; тривалий термін експлуатації.

До недоліків ерліфтів треба віднести:

- порівняно малий ККД установки;
- неможливість підйому речовин з дна водоймища малої глибин.

У даний час в різних галузях народного господарства використовується велика кількість різноманітних ерліфтних установок. Вченими ДонДТУ [8] дана класифікація ерліфтів (рис. 2.3) за наступними їх основними ознаками: тип нагнітача стисненого повітря, гідравлічна, схемна, вид середовища, що транспортується, виробниче призначення.

Гідравлічна класифікація ерліфтів підрозділяє їх на довгі та короткі. До коротких ерліфтом відносяться ті, у яких

$$\frac{H+h}{D} \leq 200 \text{ та } \frac{P_{зм}}{P_{вих}} \leq 2, \quad (2.1)$$

де  $H$  - висота підйому пульпи над рівнем плеса води, м;  $h$  - глибина геометричного занурення змішувача, при обмеженні  $h = (4...10)$  м;  $D$  - діаметр піднімальної труби ерліфта, м;  $P_{зм}$  - тиск у змішувачі, кПа;  $P_{вих}$  - тиск на виході з підйомної труби ерліфтової установки (атмосферний), кПа.

До довгих ерліфтів відносяться ті, у яких

$$\frac{H+h}{D} \geq 200 \text{ та } \frac{P_{зм}}{P_{вих}} \geq 2 \quad (2.2)$$

при обмеженні по  $h = (40...120)$  м.

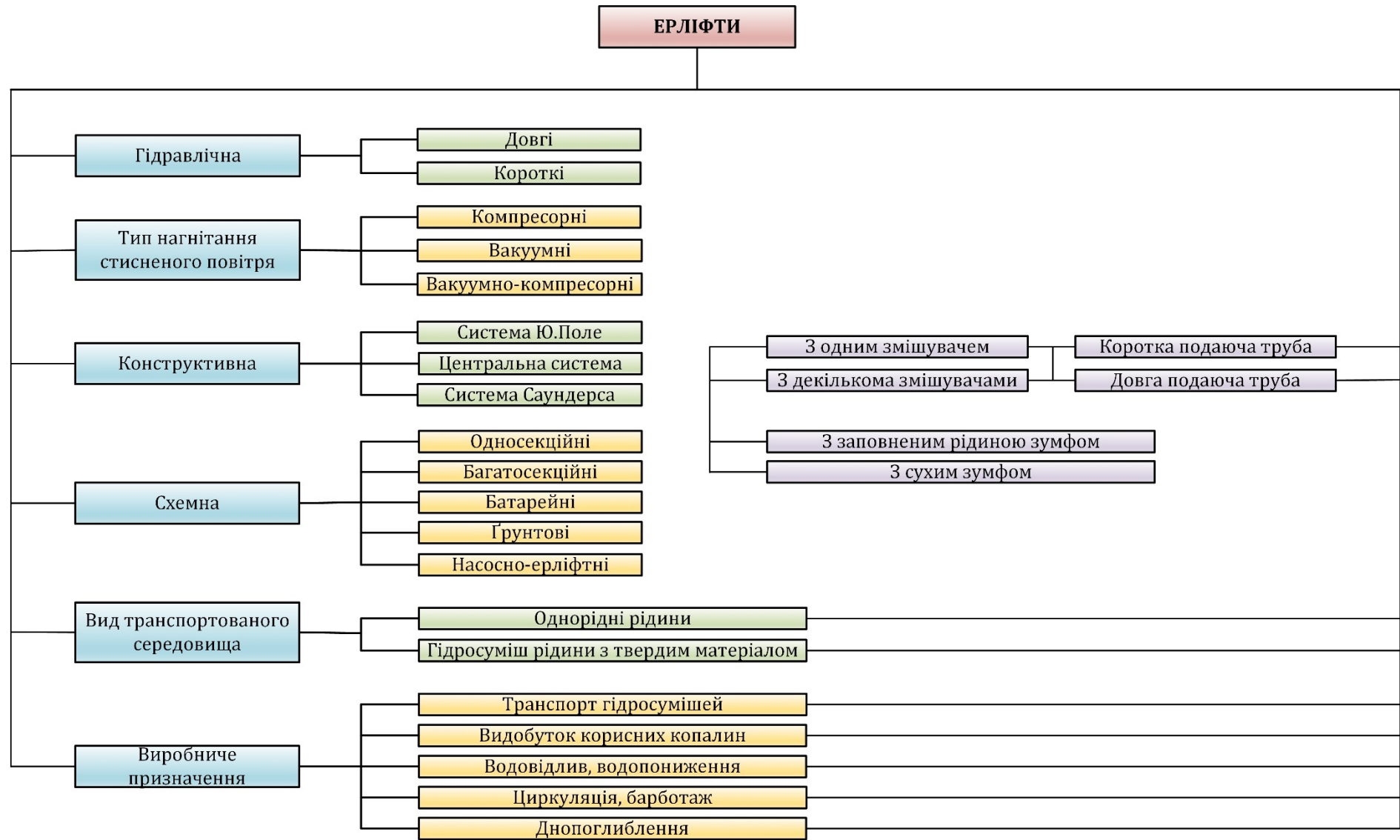


Рисунок 2.3 – Класифікація ерліфтів ДонДТУ

За способом введення газу (повітря) в підйомну трубу ерліфтні установки діляться на компресорні (стиснене повітря від компресора подається в підйомну трубу через змішувач), вакуумні (за допомогою вакуум-насоса, приєднаного до повітровідокремлювача, в підйомній трубі створюється розрідження, за рахунок якого атмосферне повітря через повітропровід усмоктується в змішувач) і змішані, тобто вакуумно-компресорні.

За конструктивною ознакою ерліфтні установки підрозділяються залежно від розташування повітропідвідної труби відносно підйомної (рис. 2.4, 2.5). Система Ю. Поле – зовнішній повітропровід, розташований паралельно підйомного трубопроводу. Центральна система – повітропровід розташований концентрично всередині підйомної труби (суміш рідини і повітря рухається по кільцевому простору). Система Саундерса – підйомна труба розташована концентрично всередині повітропідвідної труби (повітря рухається по кільцевому простору).

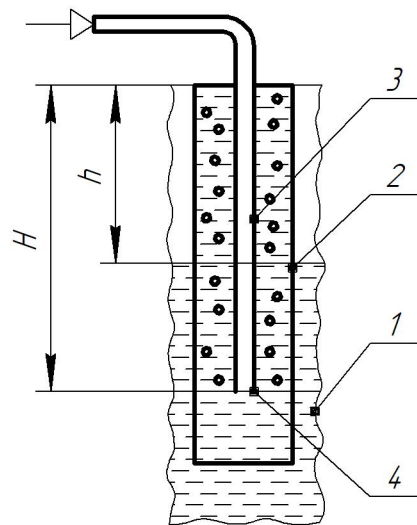


Рисунок 2.4 – Схема ерліфта при концентричному розташуванні водопідйомної та повітропровідної колон: 1 – скважина; 2 – водопідйомна колона; 3 – повітропровідна колона; 4 – змішувач;  $H$  – відстань від змішувача до рівня виливу;  $h$  – відстань від динамічного рівня до рівня виливу.

Всі вищеперелічені типи ерліфтних установок відносяться до так званих дворядних. При свердловинному гідровидобутку використовується

однорядний ерліфт (в якості одного з рядів труб використовується обсадна труба свердловини).

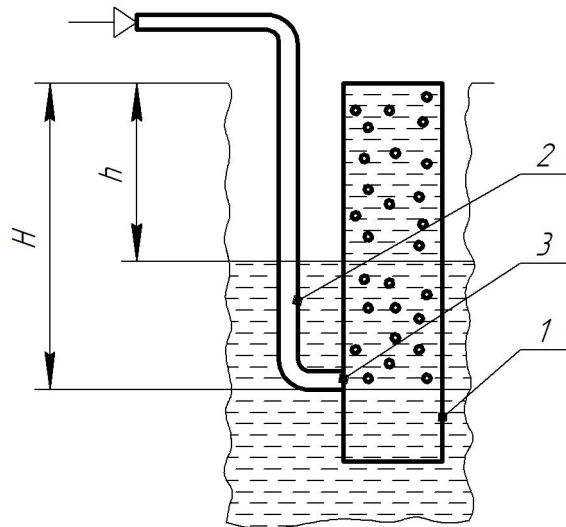


Рисунок 2.5 – Схема ерліфта з паралельним розташуванням колон:

1 – колона для водоповітряного потоку; 2 – повітропровідна колона;

3 – змішувач;  $H$  – відстань від змішувача до рівня виливу;

$h$  – відстань від динамічного рівня до рівня виливу.

Класифікація ерліфтів за схемною ознакою визначає їх гідравлічну схему залежно від величини тиску джерела стиснутого повітря, висоти підйому над плесом води, глибини занурення змішувача, необхідної продуктивності та інших технічних вимог.

За виробничим призначенням ерліфти підрозділяються на транспортні, видобувні та циркуляційно-барботажні.

За видом середовища, що транспортується, розрізняють ерліфти для підйому однорідних рідин і для підйому гідросумішей (рідина і твердий матеріал). При цьому властивості рідини, що транспортується або пульпи і виробниче призначення ерліфтної установки визначають її гідравлічну схему і склад технологічних елементів.

Найбільшого поширення набули односекційні ерліфтні установка (див. рис. 2.4 та 2.5).

## 2.1. Аналітичні підходи до визначення основних параметрів ерліфтної установки

Математичні описи ерліфтів в 1920-60 р.р. в переважній більшості випадків ґрунтувалися на гомогенній фізичній моделі за аналогією з однофазною однорідною рідиною. Досить повний аналіз даних методик наведено в [8], де всі вони розділені на три групи.

### 2.1.1. Група А

Довільне спрощення механізму двофазного руху без експериментального обґрунтування, що виключало можливість їх практичного використання (Лоренц Г., Верслуїс С., Герсеванов Н.М., Шищенко Р.І., Бакланов Б.Д. та ін.).

Теорію ерліфта було засновано у 1909 р. після опублікування роботи Г. Лоренца, в якій рух газорідинній суміші у вертикальній трубці (рис. 2.6) розраховувався на основі рівняння Бернуллі, як для гомогенної рідини [9]

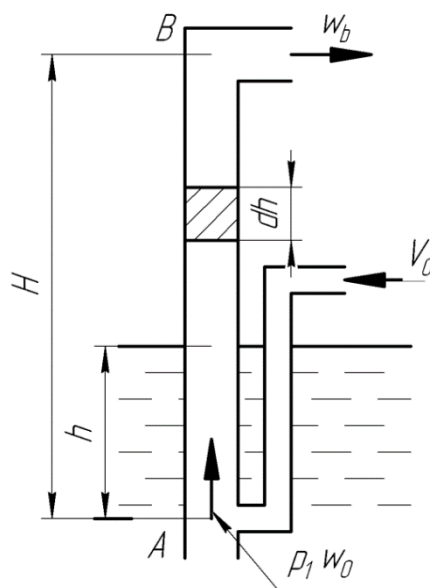


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема Лоренца

$$z_a + \frac{p_a}{\gamma_a} + \frac{w_a^2}{2g} = z_b + \frac{p_b}{\gamma_b} + \frac{w_b^2}{2g} = h_f, \quad (2.3)$$

де  $z_a$  і  $z_b$  – геометричні висоти початку та кінця ділянки шляху;  $p_a$  і  $p_b$  – тиск рідини у відповідних місцях;  $\gamma_a$  і  $\gamma_b$  – об’ємні маси рідини або суміші на початку та кінці шляху;  $w_a$  і  $w_b$  – швидкості потоку у цих точках;  $h_f$  – витрати на ділянці шляху.

Тут приймається допущення про те, що вилучення рідини з басейну відбувається з нескінченно великої ємкості та при постійній подачі ерліфта і швидкості повітря.

Оскільки характери руху поза підйомною трубою та всередині її різко відрізняються один від одного, увесь шлях від поверхні рідини до входу труби розбивається на дві ділянки: від поверхні рідини до змішувача та від змішувача до входу підйомної труби.

Для кожної ділянки шляху складено відповідний закон руху. Для першої ділянки

$$z_a = h; \quad z_b = 0; \quad w_a = dw; \quad w_b = w_1;$$

$$\gamma_a = \gamma = \gamma_{ж}; \quad p_a = p_0; \quad p_b = p_1.$$

Підставивши в рівняння (2.3), отримано залежність

$$\left[ h + \frac{(dw)^2}{2g} + \frac{p_0}{\gamma_{ж}} \right] - \left[ 0 + \frac{w_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_{ж}} \right] = \frac{p_k}{\gamma_{ж}}, \quad (2.4)$$

де  $p_0$  – атмосферний тиск;  $p_1$  – робочий тиск;  $p_k$  – втрати тиску на місцеві опори у башмаку;  $\gamma_{ж}$  – об’ємна вага рідини;  $w_1$  – швидкість суміші у башмаку.

Відношення  $\frac{p_k}{\gamma_{ж}} = h_k$  є витратою напору на місцевий опір у башмаку. Тоді, позначивши коефіцієнт місцевого опору в башмаку через  $\xi_1$ ,

$$h_k = \xi_1 \frac{w_1^2}{2g}.$$

Нехтуючи нескінченно малою величиною  $\frac{(dw)^2}{2g}$ , з рівняння (2.4) можна одержати

$$h - \frac{p_1 - p_0}{\gamma_{ж}} = (1 + \xi_1) \frac{w_1^2}{2g}. \quad (2.5)$$

Для другої ділянки ерліфта

$$z_a = h'; \quad z_b = h' + dh; \quad w_a = w; \quad w_b = w + dw;$$

$$p_a = p; \quad p_b = p + dp; \quad \gamma_a = \gamma_b = \gamma.$$

Підставивши ці рівняння в (2.3), маємо

$$\left( h' + \frac{w^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} \right) - \left[ h' + dh + \frac{(w + dw)^2}{2g} + \frac{p + dp}{\gamma} \right] = dh_f, \quad (2.6)$$

де  $h'$  – відстань від башмака до ділянки  $dh$ ;  $w$  – швидкість руху суміші на ділянці  $dh$ ;  $p$  і  $\gamma$  – тиск та густина суміші на ділянці  $dh$ .

Нехтуючи аналогічною величиною, переносючи член  $dh_f$  у ліву частину та помінявши знаки на протилежні, рівняння (2.6) набуває вигляду

$$dh + \frac{wdw}{g} + \frac{dp}{\gamma} + dh_f = 0. \quad (2.7)$$

Для зведення рівняння (2.7) до виду, зручного для інтегрування, Лоренцом зроблено три допущення:

- робота в підйомній трубі повітряного підйомника здійснюється за рахунок ізотермічного розширення повітря;
- втрати енергії в ерліфті дорівнюють втратам швидкісного напору, втратам на тертя суміші під час руху в підйомній трубі, інших втрат немає;
- втрати в ерліфті дорівнюють напору, розрахованому за швидкістю біля виходу рідини із труби, тобто

$$\int_A^B dh_f = \xi_2 \frac{w_2^2}{2g}.$$

Проінтегрувавши рівняння (2.5) та (2.7), отримано основне рівняння Лоренца для повітряних підйомників

$$\frac{G_z}{G_{жс}} \cdot \frac{p_0}{\gamma_m} \ln \frac{p_1}{p_0} = h_0 + (1 + \xi_2) \frac{w_1^2}{2g} + \xi \frac{w_2^2}{2g}. \quad (2.8)$$

Недоліком цієї моделі є те, що питома вага в ерліфті змінюється на кожному диференціалі шляху, а згідно з теорією Лоренца вона постійна.

Ця проблема вирішена Н. Свіндіним [10], який ввів поняття про середні величини (швидкості суміші, питомої ваги та ін.), про теоретичну висоту підйому (рис. 2.7), як висоту, на яку рідина була б піднята, якби не існувало ніяких втрат.

Усі втрати автор виражає сумою відповідних втрат напору газонасиченої рідини із середньою питомою вагою

$$h'_0 = h_0 + h_a + h_f + h_w + h_s + h_k, \quad (2.9)$$

де  $h'_0$  – теоретична висота підйому, на яку рідина може піднятися без переливання;  $h_0$  – висота подачі рідини;  $h_a = \frac{\gamma_{\text{ж}} w_1^2}{\gamma_{\text{т}} 2g} \left( \frac{1}{c^2} - 1 \right)$  – втрати при вході в башмак внаслідок звуження струменя;  $h_f = i(h_0 + h)$  – витрати напору на тертя;  $h_w = \left( \frac{V_0 + Q_e}{F} \right)^2 / 2g$  – витрати швидкісного напору;  $h_s = \frac{H}{w_{\text{т}}} w_s$  – витрати напору внаслідок відносного руху;  $h_k = \frac{\gamma_{\text{ж}} Q_e V_{p1} (V_{p1} + 2Q_e)}{\gamma_{\text{т}} 2lgF^3}$  – втрати напору від прискорення в башмаку.

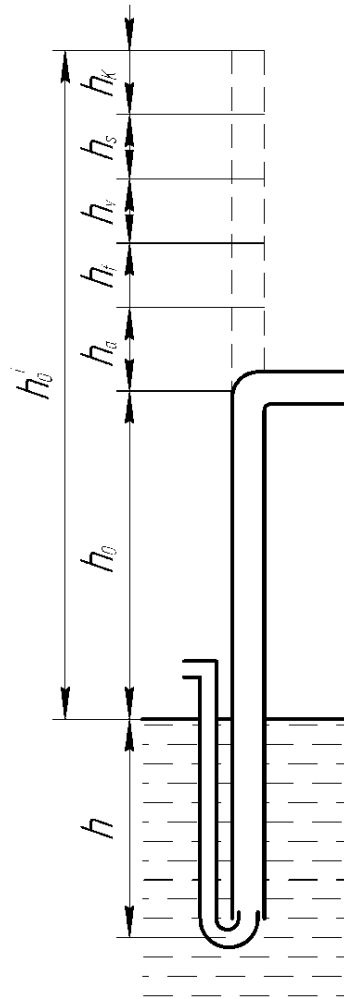


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема Свіндіна

Підставивши ці значення до рівняння (2.9) та скоротивши його, отримаємо теоретичну висоту підйому рідини у вигляді

$$h'_0 = \frac{w_1^2}{2g} \cdot \frac{\gamma_{жс}}{\gamma_m} \left( \frac{1}{c^2} - 1 \right) + i_m (h_0 + h) + \frac{(V_0 + Q_e)^2}{2g} + \frac{h_0 + h}{w_m} w_s + \frac{\gamma_{жс} Q_e V_{p1} (V_{p1} + 2Q_e)}{\gamma_m 2 \lg F^2}.$$

Модель доктора Верслуїса (рис. 2.8) засновано на балансі енергій [11], яка є рівнянням руху суміші у вигляді суми робіт, спричинених силами, що діють в ерліфті,

$$dL_1 + dL_2 + dL_3 + dL_4 + dL_5 + dL_6 = 0, \quad (2.10)$$

де  $dL_1 = -aQ_e dp$  – робота тиску при проходженні суміші через нижній переріз підйомної труби;  $dL_2 = -Q_e(\gamma_{жс} + n\gamma_0)dy$  – робота сили тяжіння;

$dL_3 = \psi \frac{16nQ_e^2}{\pi^2 d^4 g} \cdot \frac{p+n}{p^2} (\gamma_{жс} + n\gamma_0) dp$  – робота на збільшення живої сили;

$dL_4 = -\frac{32\phi Q_e^2}{d^5} (\gamma_{жс} + n\gamma_0) \left( \frac{p+n}{p} \right)^2 dy$  – робота із подолання турбулентного опору;

$dL_5 = -\frac{anQ_e}{p} dp$  – робота, що виконується за рахунок розширення газів;

$dL_6 = -b\gamma_{жс} \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{p}{p+n} dy$  – робота, що витрачається на відносний рух.

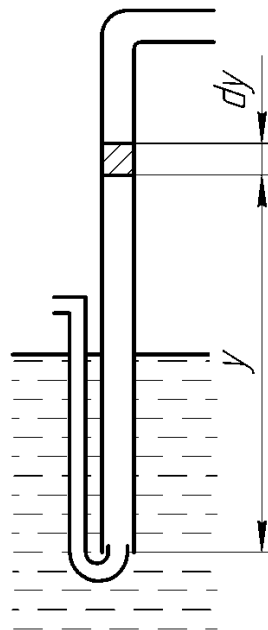


Рисунок 2.8 – Розрахункова схема Верслуїса

Підставивши ці складові у рівняння (2.8) та скоротивши його, отримаємо основне рівняння Верслуїса

$$Q_e(\gamma_{ж} + n\gamma_0) \left[ 1 + \phi \frac{32Q_e^3}{d_5^3} \left( \frac{p+n}{p} \right)^2 \right] + b\gamma_{ж} \frac{\pi d^2}{4} \frac{p}{p+n} = [aQ_e \frac{p+n}{p} - \psi \frac{16nQ_e^2}{\pi^2 g d^4} \times \\ \times \frac{p+n}{p^3} (\gamma_{ж} + n\gamma_0)] \frac{dp}{dy} = 0, \quad (2.11)$$

де  $p$  – тиск на висоті;  $n$  – відношення  $\frac{V_0}{Q_e}$ ;  $\phi$ ,  $\psi$ ,  $a$  та  $b$  – коефіцієнти, які визначаються експериментальним шляхом;  $d$  – діаметр підйомної труби;  $Q_e$  – подача ерліфта;  $V_0$  – подача компресора.

Цей підхід так і не набув практичного значення із-за складності визначення змінних коефіцієнтів.

### 2.1.2. Група Б

Емпіричне узагальнення значного експериментального матеріалу, отриманого для конкретних умов застосування газорідинних підйомників (як правило - свердловинної видобутку і нафтовидобутку; Шоу С.Ф., Сурен-Янц Я.С., та ін.).

### 2.1.3. Група В

Інтегрування диференціальних рівнянь руху з використанням даних експериментальних досліджень (Крилов А.П., Багдасаров В.Г., Вількер Д.С., Меліков В.С., Берінгер Г. та ін.).

Модель А.П. Крилова [12] є викладенням принципів дії ерліфта, де основою є отримання експериментальних даних.

Загальне рівняння руху

$$h = h_{кор} + h_{вр} + h_{тер}, \quad (2.12)$$

де  $h_{кор}$  – напір, що застосовується для корисної роботи,

$$h_{кор} = \frac{Q_e}{V_p + Q_e};$$

$h_{вр}$  – напір, що витрачається на відносний рух газу,

$$h_{вр} = \frac{Q_e + 0,5d^2}{V_p + Q_e + 0,5d^2} - \frac{Q_e}{V_p + Q_e};$$

$h_{тер}$  – напір для подолання сил тертя;

$$h_{тер} = \frac{0,12V_p Q_e}{d^5};$$

$V_p$  – об’єм рідини в підйомній трубі ерліфта.

Запропонований метод набув поширення на практиці завдяки простоті його застосування. Складові рівняння руху мають менше змінних параметрів і дають точніші за результати інших моделей.

Відсутність надійних експериментальних даних по обчисленню газовмісту і гідравлічних втрат на тертя, за висновком [8], унеможлиблює розробку достовірного способу розрахунку ерліфта по методу, віднесеному до третьої групи (групи в).

Виходячи з викладеного, в [8] обґрунтовується, як прийнятний на той момент, метод розрахунку ерліфтів на основі теорії подібності, авторами якого вважаються академік Герман А.П. [13] та професор Аргунов П.П. [14] і Гейер В.Г. [15-18].

Основним критерієм подібності цими вченими обґрунтовано прийнято відносне занурення ерліфта  $a = h / (H + h)$ , визначальне для даного діаметра підйомної труби  $D$ , витрати повітря  $Q_n$  і подачі ерліфта  $Q_e$ . В [16] показано, що відносне занурення ерліфта правомірно розглядати як утворення з критеріїв Фруда і Ейлера  $a = Fr - Eu$  (в якості характерного лінійного розміру в критерії Фруда в [8] прийнята довжина підйомної труби  $H+h$  на відміну від традиційно прийнятого в гідромеханіці діаметра труби  $D$ ).

Найбільшого поширення набула методика професора Гейєра В.Г. [17], багато в чому базувалася на виконаних ним раніше дослідях [19-20]. Правомірність розробленої методики підтверджена багаточисельними ефективно працюючими ерліфтними установками.

В основу розрахунку покладено баланс потужностей потоків рідини і газу в підйомнику при прийнятій відносній швидкості фаз, рівній 0,3 м/с. Основне рівняння, отримане професором Гейєр В.Г., має вигляд:

$$Q_e = \sqrt{\frac{23q \cdot \log\left(\frac{h}{10} + 1\right) - H}{(q + 1)^2 \frac{D^5}{D_B^4} + 0,022(H + h) + 23q \cdot \log\left(\frac{h}{10} + 1\right)}}, \quad (2.13)$$

де  $D_b$  - діаметр вихідного торця підйомної труби.

Позначивши вираз під коренем, помножений на 0,125, через коефіцієнт продуктивності  $C$ , рівняння (2.13) представляють наступним чином

$$Q_e = C \cdot D^{2,5}. \quad (2.14)$$

Витрата повітря обчислюється за виразом

$$Q_e = qQ_e \quad (2.15)$$

Значення коефіцієнта продуктивності і питомої витрати повітря визначаються за емпіричними залежностями  $C=f(a)$  та  $q=f(a)$ .

Численні теоретичні та експериментальні роботи вчених школи професора Гейера В.Г. [8, 21-39 та ін.] дозволили уточнити метод розрахунку ерліфта в оптимальному режимі роботи (при максимальному енергетичному ККД) [40-42].

Згідно із зазначеними роботами подача ерліфта визначається за залежністю

$$Q_e = K_Q \sqrt{gD_e^5}, \quad (2.16)$$

де  $K_Q$  - коефіцієнт подачі.

Для коротких ерліфтів ( $\frac{H+h}{D_e} \leq 200$  та  $\frac{\rho'gh}{p_0} \leq 2$ , тут  $\rho'$  - щільність ліфтує-

мої рідини;  $g$  - прискорення вільного падіння;  $p_0$  - атмосферний тиск) рекомендуються емпіричні залежності для визначення [41]:

- питомої витрати повітря

$$q = 0,767\alpha^{-2,2} \text{ (при } \alpha = 0,15 \dots 0,50; h = 4 \dots 10 \text{ м)} \quad (2.17)$$

- коефіцієнта подачі

$$K_Q = 3,68\sqrt{\alpha} \frac{\sqrt{q + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}}{1 + q}. \quad (2.18)$$

Для довгих ерліфтів рекомендуються емпіричні залежності для визначення [41]:

- питомої наведеного витрати повітря

$$q_n = 60e^{-9\alpha} \text{ (при } \alpha = 0,15\dots0,50; h = 40\dots120 \text{ м);} \quad (2.19)$$

- питомої витрати повітря

$$q = q_n \frac{p_0 + \frac{\rho'gh}{2}}{p_0}; \quad (2.20)$$

- коефіцієнта подачі

$$K_Q = 5\sqrt{\alpha} \frac{\sqrt{q_n + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}}{1 + q_n}. \quad (2.21)$$

До недоліків розробленої математичної моделі ерліфта слід віднести прийняту гомогенну фізичну модель і сталість значень коефіцієнтів опорів в оптимальному режимі роботи ерліфта (як короткого, так і довгого) для всіх реалізованих в підйомнику структур двофазних потоків [43]. У той же час відомо [44, 45], що гідравлічні втрати в двофазних потоках є функцією багатьох параметрів і в першу чергу визначаються структурою газорідинної суміші, яка може набувати в підйомній трубі ерліфта ряд форм [8, 24, 42, 46].

Підтвердженням викладеного є порівняння експериментальних і розрахункових параметрів ерліфтів з підйомними трубами діаметрами  $D = 25\dots624$  мм і довжинами  $H+h = 2,1\dots316,0$  м. Як випливає з результатів порівняння, при задовільній збіжності значень питомих витрат повітря (похибка обчислень в більшості випадків не перевищує 30%), розрахункові значення подач ерліфтів, отримані згідно рівнянь (2.16), (2.18), (2.21), відрізняються від дійсних у 2,0...2,5 разів.

Відомі теоретичні методи розрахунків ерліфтів з короткими і довгими підйомними трубами вчених Г. Грабова, Г. Клауса, Х. Безе, Уекі-Хіро, Хазі Теодороу, М. Полярського, аналіз основних з яких наведено в [47]. Однак вони не враховують структури газорідинних сумішей і не дозволяють з прийнятною точністю визначати параметри газорідинних підйомників.

Математичні моделі робочих процесів газорідинних підйомників з урахуванням структур водоповітряних потоків професорами М. Вебером,

Е.А. Кириченко, В.Є. Давідсоном [48, 49] розроблено для спеціальних ерліфтів (глибоководних, що транспортують крупнокусковий твердий матеріал та ін.), які мають принципові відмінності у фізичних основах процесів, що відбуваються, тому не можуть бути однозначно застосовані для розрахунку загальнопромислових ерліфтів, для яких не визначені критерії кордонів структур газорідних сумішей.

Також відомі призначені або уточнені в останні 20...30 років методики розрахунку газорідних підйомників, які або належать до умов нафтовидобутку [50-52] з характерними особливостями, або є досить близьким аналогом методу професора Гейєра В.Г. [53-55]. Теоретична модель газорідного підйомника зі снарядною структурою суміші в [56] розроблена, виходячи з допущення незмінної щільності повітря по висоті підйомної труби, що прийнятно для ряду конкретними умов застосування, але для промислових ерліфтів зі значними геометричними зануреннями змішувача може призводити до відчутних похибок. Значний оригінальний виклад має теорія і методика розрахунку ергазліфта [57], однак, їх застосування обмежене.

ККД ерліфта обчислюють [41, 42] як відношення корисно витраченої потужності до витраченої потужності

$$\eta_e = \left[ \rho'gQ_e \left( H + \frac{w_{\text{вих}}'^2}{2g} \right) \right] / \left[ Q_e p_0 \ln \frac{p_0 + p_{\text{зм}}}{p_0} \right], \quad (2.22)$$

або, нехтуючи, в переважній більшості випадків, величину швидкісного напору потоку ліфтованої рідини на виході з підйомної труби  $w_{\text{вих}}'^2/2g$  і беручи надлишковий тиск у змішувачі  $p_{\text{зм}}$  рівним гідростатичному тиску  $p_{\text{пс}}$  геометричного занурення змішувача  $p_{\text{зм}} = p_{\text{пс}} = \rho'gh$ , отримують

$$\eta_{eh} = H / \left[ q \frac{p_0}{\rho'g} \ln \left( 1 + \frac{\rho'gh}{p_0} \right) \right], \quad (2.23)$$

де  $w_{\text{вих}}'$  - швидкість ліфтованої рідини на виході з підйомної труби.

Аналогічний підхід до визначення енергетичної ефективності ерліфтів застосовували в своїх роботах багато відомих учених, у тому числі Крилов А.П., Козлов Б.К., Багдасаров В.Г. та ін.

Відома пропозиція оцінювати ефективність ліфта об'ємним ККД, що є відношенням дійсної подачі  $Q_e$  до теоретичної подачі  $Q_{et}$  ідеального ліфта, під яким розуміють підйомник, позбавлений гідравлічних втрат і втрат відносного руху фаз [58]. Однак, з фізичних міркувань, вираз для ККД ерліфта, наведений в [58], аналогічний виразам (2.22) і (2.23).

Потужнісний метод при оцінці ефективності роботи газових підйомників використовується також при газліфтному видобутку нафти [53, 59], в тому числі періодичними газліфтами [60, 61].

Неадекватність виразів (2.22) і (2.23) при побудові залежностей  $\eta_e = f(Q_B, h)$  для ерліфтів, що включають в свою конструкцію подаючої труби, полягає в прийнятті сталості тиску в змішувачі  $p_{зм} = \rho'gh = const$  для розглянутої витратної характеристики  $Q_e = f(Q_B, h)$  при  $h = const$ . Вдійсності, через гідравлічні втрати в подаючій трубі тиск в змішувачі по «довжині» характеристики ерліфта (в діапазоні зміни витрат повітря від барботажного  $Q_{B6}$  до максимально реалізованого) не є величиною постійною  $p_{зм} \neq \rho'gh$ . У зв'язку з цим виникає також питання правомірності визначення енергетично оптимального режиму роботи ерліфта по точці дотику дотичної, проведеної з початку координат, з видатковою характеристикою ерліфта [41, 42] (тобто як режиму з мінімальною питомою витратою повітря).

Питання зміни тиску в змішувачі ерліфта при  $h = const$  розглядалися в роботах [47, 62, 63], однак вплив такої зміни на ККД підйомника в межах витратної характеристики  $Q_e = f(Q_B)$  не вивчався.

Вираз для визначення робочого тиску в змішувачі з урахуванням гідравлічних втрат у подаючій трубі і густини транспортваної гідросуміші в [64] отримано виходячи з розгляду подаючої труби як довгого трубопроводу із

нехтуванням місцевими опорами, що правомірно для глибоководних ерліфтів з довжинами подаючих труб до декількох кілометрів [47, 65-67].

Таким чином, існуючі методики оцінки енергетичної ефективності ліфтів правомірно ґрунтуються на потужнісному підході, однак стосовно загальнопромислових ерліфтів вимагає уточнення питання кількісної значущості зміни ККД повітряного підйомника по «довжині» характеристики  $Q_e = f(Q_v)$  при  $h = const$  з урахуванням зменшення тиску в змішувачі через гідравлічні втрати в подаючій трубі. Необхідно отримати аналітичні залежності та експериментальні підтвердження кількісної значущості їх застосування для розрахунку ККД загальнопромислового ерліфта, що містить подаючу трубу.

У роботах [41, 68-70] досліджувалися зміни щільності газорідинної суміші, тиску по висоті підйомної труби та інші параметри барботажного режиму ерліфта. Однак представлені математичні моделі не дозволяють вахувати кількісні гідродинамічні параметри компонентів двофазного стовпа рідини і газу. Необхідно розробити математичну модель барботажного режиму ерліфта з описом роздільного двофазного водоповітряного шару.

Складність і маловивченість процесів руху двофазних сумішей у вертикальних трубах послужили підставою розробки методу побудови витратних характеристик ерліфта на основі теорії подібності з використанням експериментальних даних [71, 72]. Розроблений метод розрахунку витратних характеристик газорідинного підйомника на основі універсальних безрозмірних характеристик забезпечує прийнятну точність кількісних співвідношень між витратою повітря і подачею води при заданих геометричних і технологічних параметрах ерліфта, проте, будучи емпіричним, виключає можливість його використання для аналізу фізичних процесів ліфтування рідини стисненим газом.

Математичне обґрунтування правомірності опису безрозмірної характеристики ерліфта рівняннями дуги кола або квадратичної параболи [73, 74] не позбавляє даний метод емпіризму з його відомими недоліками.

Ці ж недоліки властиві і роботам [75, 76], в основі яких закладена ідея емпіричних безрозмірних витратних характеристик газорідинного підйомника.

Відомі роботи щодо дослідження впливу ряду конструктивних і гідродинамічних параметрів на подачу газорідинного підйомника, в тому числі з використанням ЕОМ [77, 78], також не вирішують завдання можливості побудови витратних характеристик ерліфта на основі теоретичної моделі з прийнятними припущеннями.

В [79] на основі гомогенної моделі двофазної суміші для абстрактної структури водоповітряного потоку отримано аналітичні залежності, які значною мірою якісно пояснюють характер зміни подачі ерліфта при змінах занурення змішувача і (або) витрат повітря. Виконати адекватний кількісний аналіз гідродинамічних параметрів водоповітряного потоку і його компонентів у підйомній трубі ерліфта розроблені аналітичні залежності не дозволяють.

Методика отримання дійсних характеристик натурних ерліфтів в результаті досліджень модельних установок [80-82] припускає постановку експерименту, що вимагає відомих витрат.

Отже, потрібна розробка аналітичних методик побудови характеристик газорідинних підйомників, які відображають достовірно фізичні процеси, що відбуваються.

Основними, що мають місце в ерліфтах, гідродинамічними процесами є, переважно вертикальний, висхідний газорідинний потік. Аналогічні процеси мають місце в газліфті при нафтовидобутку [83-91], парогенеруючих трубопроводах теплових і атомних електростанцій [92-102], обладнанні хімічного виробництва [103-110] та ін.

При русі газорідинних сумішей мають місце відносні швидкості фаз [111-121], що характеризуються відмінністю в значеннях витратного і дійсного газозмісту [122-128].

Оцінка гідравлічних втрат в двофазних потоках має суттєві відмінності від їх розрахунків для однофазних рідин [129-137].

Виконані теоретичні та експериментальні роботи в області двофазних течій можуть служити підставою для розвитку теорії робочого процесу ерліфта, однак з урахуванням особливостей гідродинамічних явищ, що відбуваються в ньому.

Таким чином, існуючі методики кількісної оцінки гідродинамічних параметрів газорідинних потоків у підйомнику вимагають уточнення, що, в свою чергу, тягне за собою необхідність розробки адекватних фізичних і математичних моделей робочого процесу ерліфта. При цьому залежно від режимів роботи газорідинного підйомника можуть мати місце різні структури водоповітряних сумішей, в тому числі змінні по висоті підйомних труб.

У дисертаційній роботі Кириченко Є.О. [138] вирішена наукова проблема, яка полягає в науковому обґрунтуванні параметрів ерліфтних трубних систем (підйом корисних копалин з дна Світового океану), що забезпечують працездатність та енергозбереження гідропідйомів у складі гірничо-морських видобувних комплексів.

Розроблена комплексна математична модель процесів пружної взаємодії трубного поставу гідропідйому з пульпою, яка протікає по ньому, і навколишнім морським середовищем (разом з морськими течіями) враховує основні чинники, що визначають працездатність та енергоємність ерліфтною системи підйому. Розглянуто характерні режими стаціонарного і нестаціонарного руху ТП, виконано оцінки деформаційних та силових параметрів цих режимів, на основі чого спрощена загальна система рівнянь стосовно вирішення задач, пов'язаних з проектуванням та експлуатацією ГЕГ.

У 2007 році Кононенко А.П. захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за темою «Теорія і робочий процес ерліфтів» [139]. Ця робота пов'язана з теоретичним узагальненням і перспективним вирішення наукової проблеми, що полягає в обґрунтуванні теорії робочого процесу ерліфтів з вертикальними висхідними снарядними, емульсійними і кільцевими водоповітряними потоками, що дозволяє визначати раціональну область експлуатації газорідинних підйомників і оптимальний режим їх роботи.

Такі ерліфти дають можливість понизити витрати на транспортування рідин (гідросумішей) на 10...15% за рахунок зменшення енергоспоживання. Визначено критерії меж структур водоповітряних потоків в загальнопромислових ерліфтах, у піднімальних трубах яких переважно реалізуються снарядна, емульсійна і кільцева двофазні суміші

В дисертації Кириченко В.Є. [140] обґрунтуванні раціональні занурення змішувача та відповідних витрат повітря й об'ємної концентрації твердого матеріалу, які дозволяють з урахуванням впливу перехідних процесів підвищити ККД гідропідйомів на 5...7%. Також обґрунтовані базові параметри керування перехідними процесами в елементах ГЕГ, а саме швидкість звуку й інерційність системи, що є вхідними даними для розробки АСУТП гірничо-морських комплексів.

У 2012 році захистив дисертацію Євтеєв Володимир Васильович за темою «Обґрунтування параметрів глибоководних ерліфтів з урахуванням динаміки твердих частинок в снаряжному потоці» [141]. У ній вирішена задача, що полягає у встановленні закономірності зміни швидкості транспортування твердих частинок газовими снарядами та рідинними корками вздовж снарядної структури течії з урахуванням уповільнення підйому частинок у газових снарядах, а також змін розмірів газових снарядів та рідинних корків для обґрунтування конструктивних та експлуатаційних параметрів глибоководних ерліфтів, що підвищують ефективність установок при забезпеченні стійкого підйому корисних копалин в підйомному трубопроводі.

У 2013 році Карпушиним М.Ю. [142] вирішена задача, що полягає в підвищенні енергетичної ефективності роботи і розширенні діапазону можливих подач ерліфтної установки в умовах зміни притоку рідини (гідросуміші), обґрунтуванні раціональних параметрів робочого процесу підйомника при підводі додаткового припливу в проміжний зріз підйомної труби, що дозволяє підвищити максимальну подачу удвічі порівнянно з ерліфтом традиційної конструкції та збільшити ККД робочого процесу на 8...10%.

У дисертації Калиниченко В.В. [143] вирішена науково-технічна задача підвищення енергетичної ефективності роботи ерліфтів за рахунок перетворення снарядного водоповітряного потоку, що розвивається, у близький до розвиненого зі збільшенням довжин рідинних пробок у піднімальних трубах дискретною подачею стисненого повітря, що забезпечує зниження енергоємності газорідинних підйомників на 21...22% порівнянно з традиційно працюючими.

### 1.3.5. Основні шляхи покращення продуктивності ерліфтної установки для розробки підводних ґрунтів

Основними шляхами покращення працездатності ерліфтної установки є вдосконалення процесів: подачі повітря; змішування; всмоктування; транспортування; відведення повітря; покращення технології ліквідації закупорок в патрубках.

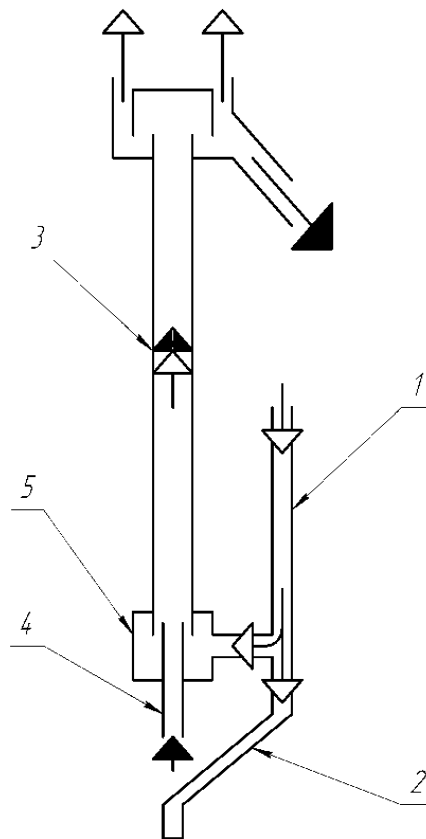


Рисунок 2.9 – Ерліфтна установка з повітряним розмивом ґрунту:

1 – повітропровід; 2 – розмивочний патрубок; 3 – підйомна труба;

4 – всмоктуюча труба; 5 – змішувач

1.3.5.1. Для покращення всмоктування ерліфтної установки (рис. 2.9) використовується розмив ґрунту шляхом подачі повітря в зону всмоктування [144]. Застосовується він тільки для легких мулистих ґрунтів.

Пристрій (рис. 2.10) дозволяє це усунути. Ерліфт складається з: підйомної труби зі змішувачем; повітропроводу; всмоктувального патрубку, встановленого з можливістю осевого переміщення відносно підйомної труби, причому підйомна труба оснащена в нижній частині боковими вікнами, а в верхній – запобіжним кільцем, взаємодіючим з упорами [145].

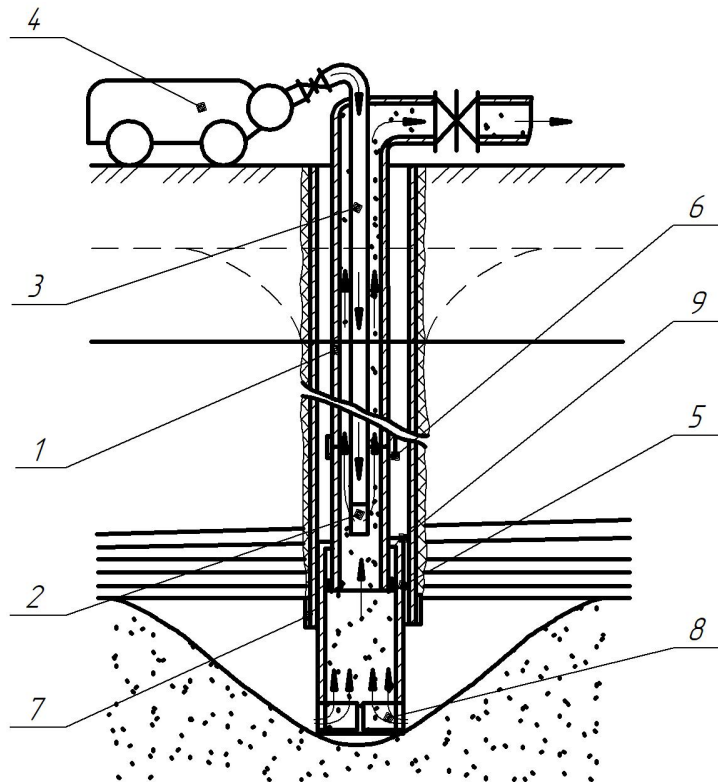


Рисунок 2.10 – Ерліфтна установка з рухомих всмоктуючим патрубком:

- 1 – підйомна труба; 2 – всмоктуюча камера; 3 – повітропровід;  
 4 – компресор; 5 – всмоктуючий патрубок; 6 та 7 – упори; 8 – бокові вікна;  
 9 – запобіжне кільце

Зі збільшенням розмірів порожнини розробки, всмоктуючий патрубок рухається вниз під власною вагою до упору своїм запобіжним кільцем в упор підйомної труби. Бокові вікна, розташовані по колу в нижній частині всмоктуючого патрубка забезпечать всмоктування на постійній висоті від поверхні піску. Це дозволить відбирати воду, зберігаючи інтенсивність захвату піску,

постійну мутність води та швидкості розробки. Конструкція такої установки не дозволяє здійснювати розробку під шаром ґрунту.

У іншому ерліфті (рис.2.11) подаюча труба виконана з можливістю обертання. Її нижній кінець введено в ґрунтозабірний пристрій, на якому укріплено вихроутворювач. На вході в корпус-змішувач на подаючій трубі встановлено повітряну турбіну із сопловим апаратом. Корпус-змішувач розміщено у перфорованому кожусі з утворенням в ньому камери підживлення, яка сполучена з вихроутворювачем [146].

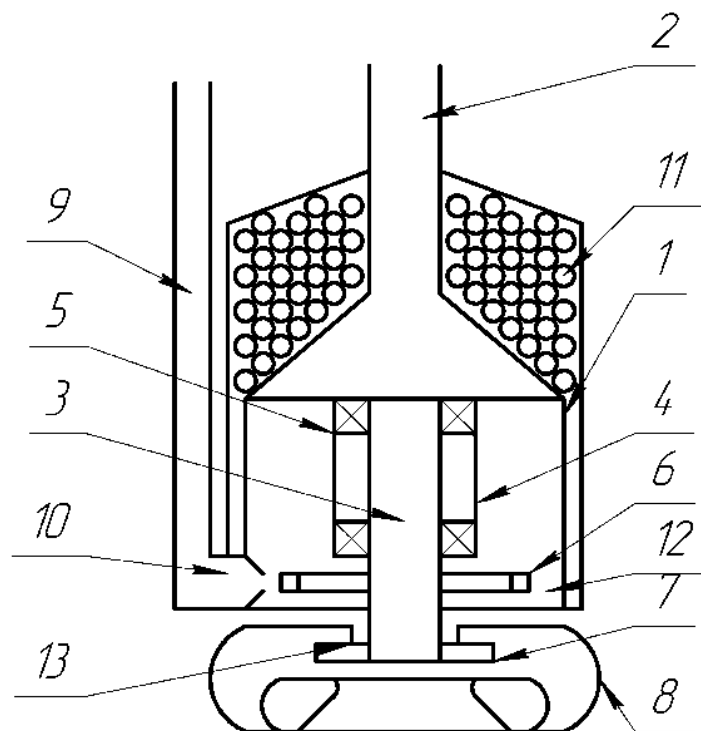


Рисунок 2.11 – Ерліфтна установка з вихроутворювачем: 1 – корпус-змішувач; 2 – підйомний патрубков; 3 – подаюча труба; 4 – стакан; 5 – підшипник; 6 – турбіна; 7 – вихроутворювач; 8 – ґрунтозабірний пристрій; 9 – повітряний трубопровід; 10 – сопловий апарат; 11 – перфорований кожух; 12 – камера живлення; 13 – канал

Одночасно з робочим процесом вихроутворювач буде подавати відфільтровану кожухом воду на розмив ґрунту під ґрунтозабірним пристроєм. У разі роботи під шаром ґрунту, зменшується всмоктування пульпи через подаючу трубу. Збільшується всмоктування чистої води в камеру підживлення та на

вихроутворювач. Подача води через ґрунтозабірний пристрій виконується інтенсивніше, що призводить до розмиву завалу під ґрунтом.

1.3.5.2. *Покращення змішування суміші в ерліфтах виконують за рахунок збільшення повноти передачі енергії повітря до речовини, що підіймається.* Так, згідно з авторським свідоцтвом СРСР №1257300 повітря по повітропроводах надходить у нижню частину підйомної труби (рис.2.12). Завдяки зустрічному співвісному розташуванню повітропроводів швидкість потоків робочого тіла згасає та знижується практично до нуля. Це призводить до зменшення проковзування робочого тіла відносно транспортованого середовища в аерогідросуміші, що рухається по підйомній трубі [147]. Проте збільшення ККД установку, не надає можливості розробки важких ґрунтів.

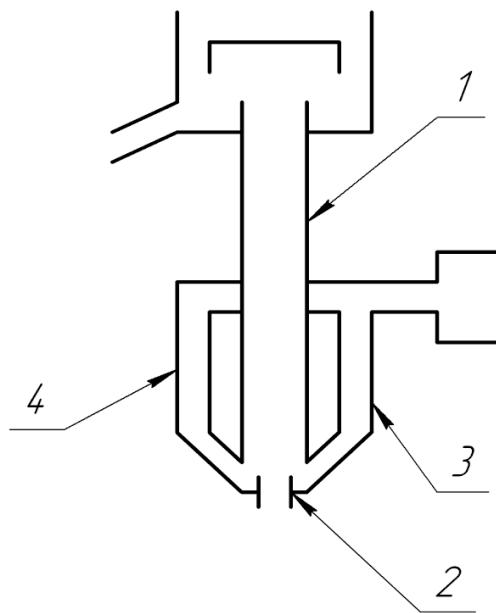


Рисунок 2.12 – Ерліфтна установка з додатковим співвіснорозташованим повітродомом: 1 – підйомна труба; 2 – всмоктуючий патрубок; 3 та 4 –повітропроводи

Певним чином цю проблему дозволяє вирішити ерліфт (рис.2.13), який містить: підйомну трубу зі змішувачем в нижній частині; повітропровід; розподільний пристрій; диспергатор повітря, який виконаний принаймні з одного ряду тороподібних кілець.

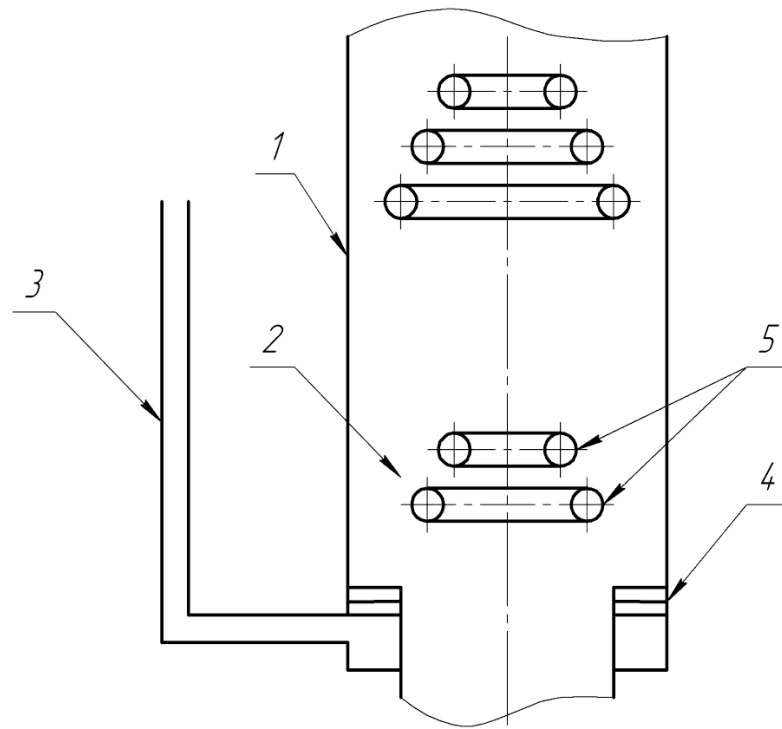


Рисунок 2.13 – Ерліфтна установка з диспергатором повітря: 1 – підйомна труба; 2 – змішуюча камера; 3 – повітропровід; 4 – розподільний пристрій; 5 – тореобразне кільце

Збільшення ККД досягається шляхом поперечної турбулізації потоку, оскільки при обтіканні кілець в рідинному середовищі над ними створюються вихрові доріжки (доріжки фон Кармана), котрі забезпечують збурення потоку. Це сприяє покращенню змішування багатофазного потоку. При цьому розміщення кілець з зазором забезпечують турбулізацію всього об'єму суміші. А розміщення їх наступного ряду сприяє виникненню синфазних процесів, що характеризуються малими втратами [148]. Ерліфт цієї конструкції не дає змогу піднімати великогабаритні шматки ґрунту.

Дифузори та кофузори в конструкції ерліфта (рис. 2.14) сприяють процесу передачі енергії від повітря до речовини та створенню однорідності потоку по всьому поперечному перерізу. В кофузорі та дифузорі виникають нові пристінні вихори, котрі зривають зворотні течії рідини зі стінок труби та переміщують їх до центру. Рідина, що стікає з верхньої ступені підхвачується

повітрям нижньої ступені, що знижує проковзування повітря та збільшує ефект ліфтування [149].

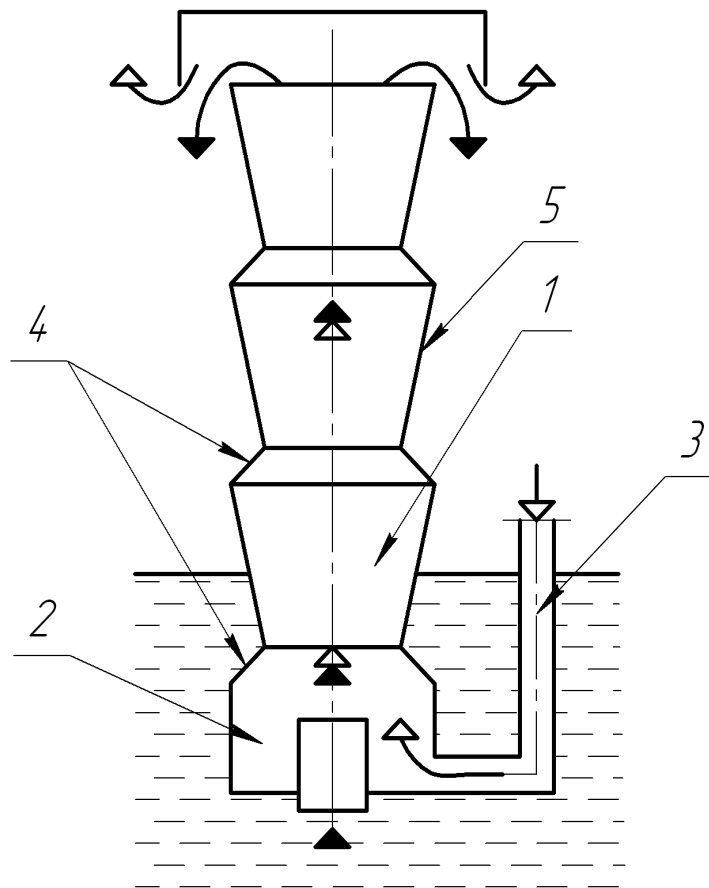


Рисунок 2.14 – Ерліфтна установка з підйомною трубою у вигляді спряжених дифузорів та конфузоров: 1 – підйомна труба; 2 – змішувач; 3 – повітропровід; 4 – конфузорм; 5 – дифузор

1.3.5.3. *Покращення подачі повітря* виконують шляхом забезпечення більш рівномірної його витрати.

Так, в ерліфті (рис. 2.15) підйомний трубопровід та всмоктуючий патрубок розташовані ексцентрично відносно друг друга. Точка приєднання нагнітача в місці найбільшого їх зближення. Це приводить до більш рівномірної подачі повітря, за рахунок того, що щілина біля кільцевого колектору вужча, а в іншій стороні – ширша. Але дана технічне рішення не дає потрібної чутливості регулювання подачі повітря [150].

Згідно з авторським свідоцтвом СРСР №54594 регулювання подачі повітря виконується самою форсункою (рис. 2.16). Повітряний патрубок в місці виходу повітря оточений нерухомим стаканом. Вище отворів розташована конічна насадка, яка утворює щілину з його стінками. Регулювання відбувається шляхом піднімання та опускання повітряної труби [151]. Недоліком є присутність оператора.

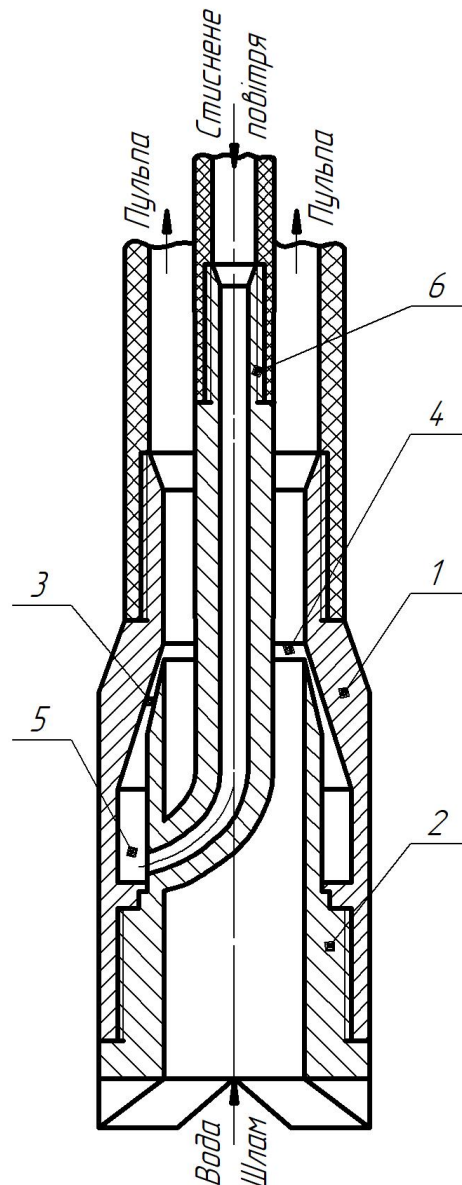


Рисунок 2.15 – Ерліфтна установка з підйомним трубопроводом ексцентрично розташованим відносно всмоктуючого: 1 – підйомний трубопровід; 2 – всмоктуючий патрубок; 3 – ежектор; 4 – кільцеве сопло; 5 – кільцевий колектор; 6 – нагнітач

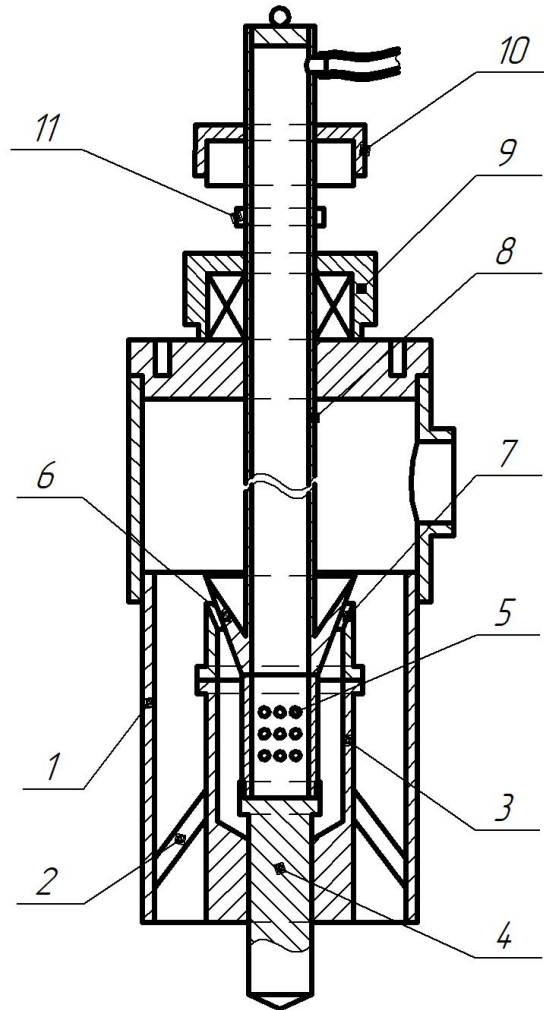


Рисунок 2.16 – Ерліфтна установка з можливістю регулювання подачі повітря: 1 – підйомна труба; 2 – планка; 3 – стакан; 4 – підп’ятник; 5 – отвори; 6 – конічна насадка; 7 – кругова щілина; 8 – повітряна труба; 9 – сальник; 10 – гайка; 11 – ключ

Цей недолік можна усунути за допомогою встановлення саморегулюючих пристроїв. В ерліфті [152] форсунка складається з корпусу та підпружиненого стакана. Силою стисненого повітря стакан відводиться від корпусу. Через щілину (рис. 2.17), що з’явилась, повітря надходить у камеру змішування. Прохідний переріз щілини зменшується до нуля залежно від тиску перед форсункою, що збільшує надійність ерліфту та ефективність його роботи.

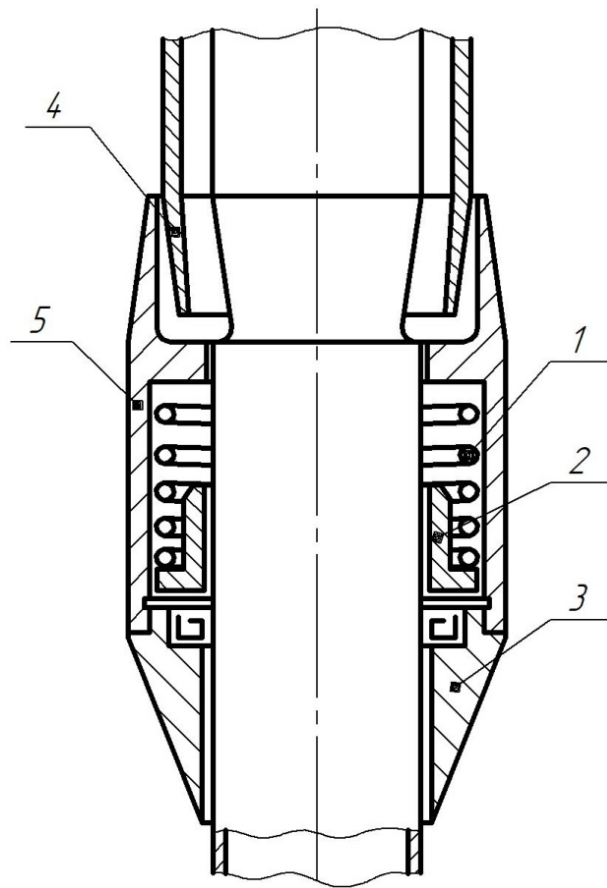


Рисунок 2.17 – Ерліфтна установка з саморегулюючою форсункою:

1 – пружина; 2 – втулка; 3 – гайка; 4 – корпус; 5 – стакан

1.3.5.4. Для покращення транспортування пульпи використовують пристрої, стабілізуючі режими роботи установки.

Для цього, згідно з авторським свідоцтвом СРСР №1180562, на всмоктувальній трубі ерліфту встановили регулюючий дросель (рис.2.18). За допомогою нього виконується стабільніше переключення між верхнім та нижнім змішувачами. Спочатку ерліфт працює на воді через верхній змішувач. Після встановлення стабільного режиму роботи дросель перекривають до тих пір поки тиск в нижньому змішувачі не стане рівним тиску в повітряній трубі. Після чого припиняють подачу повітря в верхній змішувач. Ерліфт починає працювати на нижньому [153]. Дроселі відкривають.

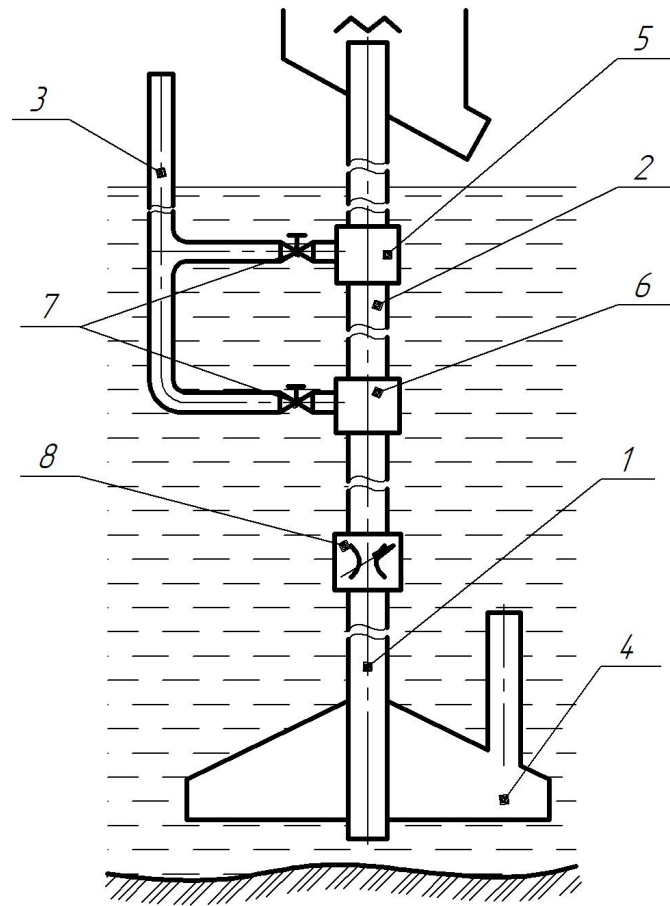


Рисунок 2.18 – Ерліфтна установка з регулюючим дроселем на всмоктувальній трубі: 1 – всмоктувальна труба; 2 – підйомна труба; 3 – повітряна труба; 4 – камера живлення; 5 – верхній змішувач; 6 – нижній змішувач; 7 – пускорегулююча апаратура; 8 – регулюючий дросель

1.3.5.5. Для покращення відведення повітря використовують ефективніші відокремлювачі.

Так, у технічному рішенні (рис. 2.19) у відокремлювач повітря встановили додаткові відбивачі з можливістю коливання. Недоліком є мала надійність та громісткість конструкції [154].

Ці недоліки усунуто в авторському свідоцтві СРСР №1622644. Запропонований тут ерліфт оснащено переривачем потоку у вигляді баку з лопатями (рис. 2.20). Після надходження пульпи в переривач вона змінює напрямки за допомогою лопатів на його корпусі. Це призводить до зменшення швидкості та відділення повітря [155].

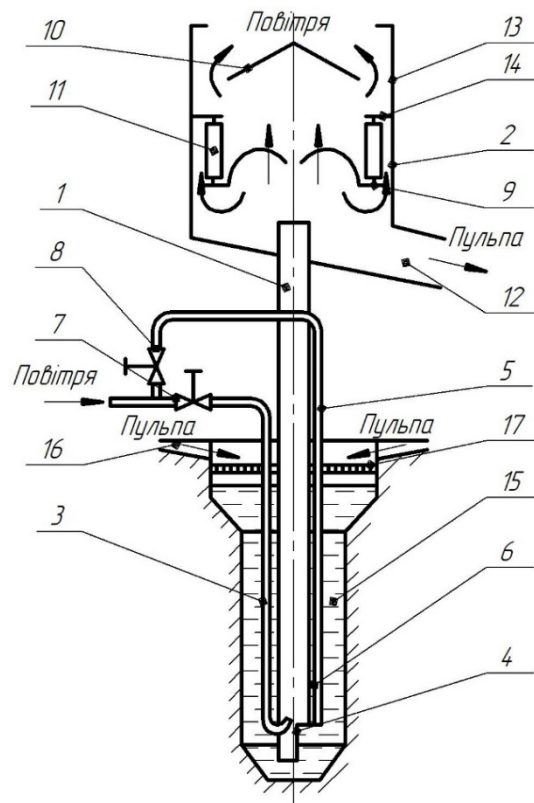


Рисунок 2.19 – Ерліфтна установка з додатковими відбивачами: 1 – підйомна труба; 2 – повітровідокремлювач; 3 – повітропровід; 4 – вікно; 5 – додатковий повітропровід; 6 – форсунка; 7 та 8 – клапани; 9 – додатковий відбивач; 10 – відбивач; 11 – демпфируючий пристрій; 12 – зливний патрубок; 13 – верхня обичайка; 14 – нижня обичайка; 15 – зумпф; 16 – дренажний клапан

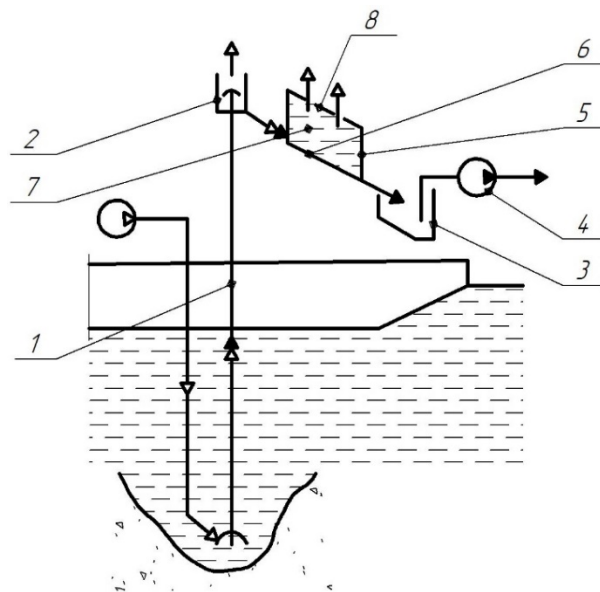


Рисунок 2.20 – Ерліфтна установка з преривачем потоку: 1 – ерліфт; 2 – повітровідокремлювач; 3 – накопичувальна ємкість; 4 – відкачуючий пристрій; 5 – бак; 6 – днище; 7 – лопасті; 8 – отвори

1.3.5.6. Технологія ліквідації закупорок в патрубках покращується шляхом використання в ерліфті ефективніших пристроїв їх видалення.

В ерліфті (рис. 2.21) в камеру змішування встановили еластичну перегородку з вікнами, яка закриває отвори повітропроводу. При зупинці ерліфту вона притискується до внутрішніх стінок камери змішування та перешкоджає попаданню твердих включень у кільцевий колектор [156]. Недоліком цієї конструкції є низька працездатність.

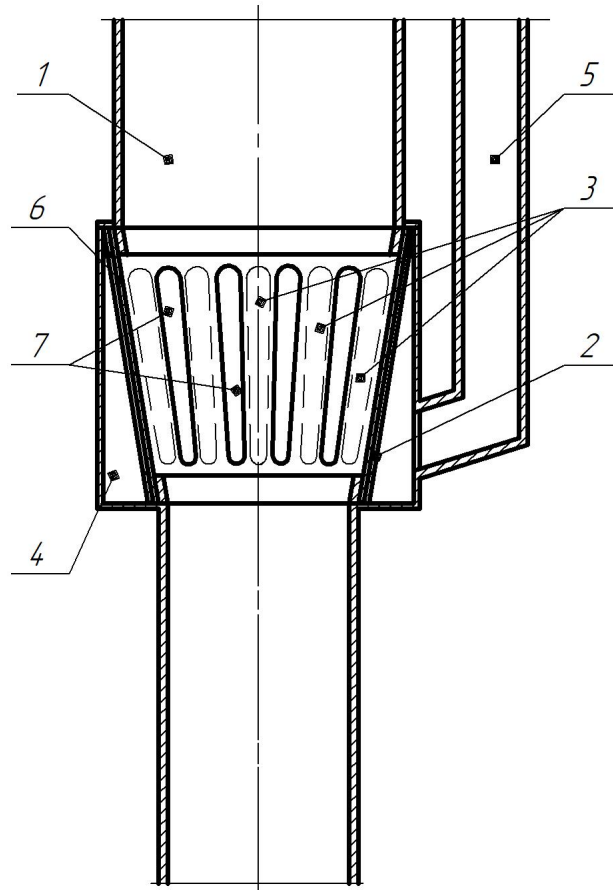


Рисунок 2.21 – Ерліфтна установка з еластичною перегородкою в камері змішування: 1 – підйомна труба; 2 – камера змішування; 3 – вікна; 4 – кільцевий колектор; 5 – повітропровід; 6 – еластична перегородка; 7 – вікна

Відповідно до авторського свідоцтва №348769 ерліфт оснащений шибером у вигляді циліндра (рис. 2.22). Він може ковзати уздовж осі напірного трубопроводу. Після закінчення роботи шибер опускається вниз. Таким чином подача пульпи зупиняється. Повітря, що продовжує надходити в напірний

трубопровід, виштовхує залишки пульпи. Після очистки трубопровода подача повітря припиняється [157].

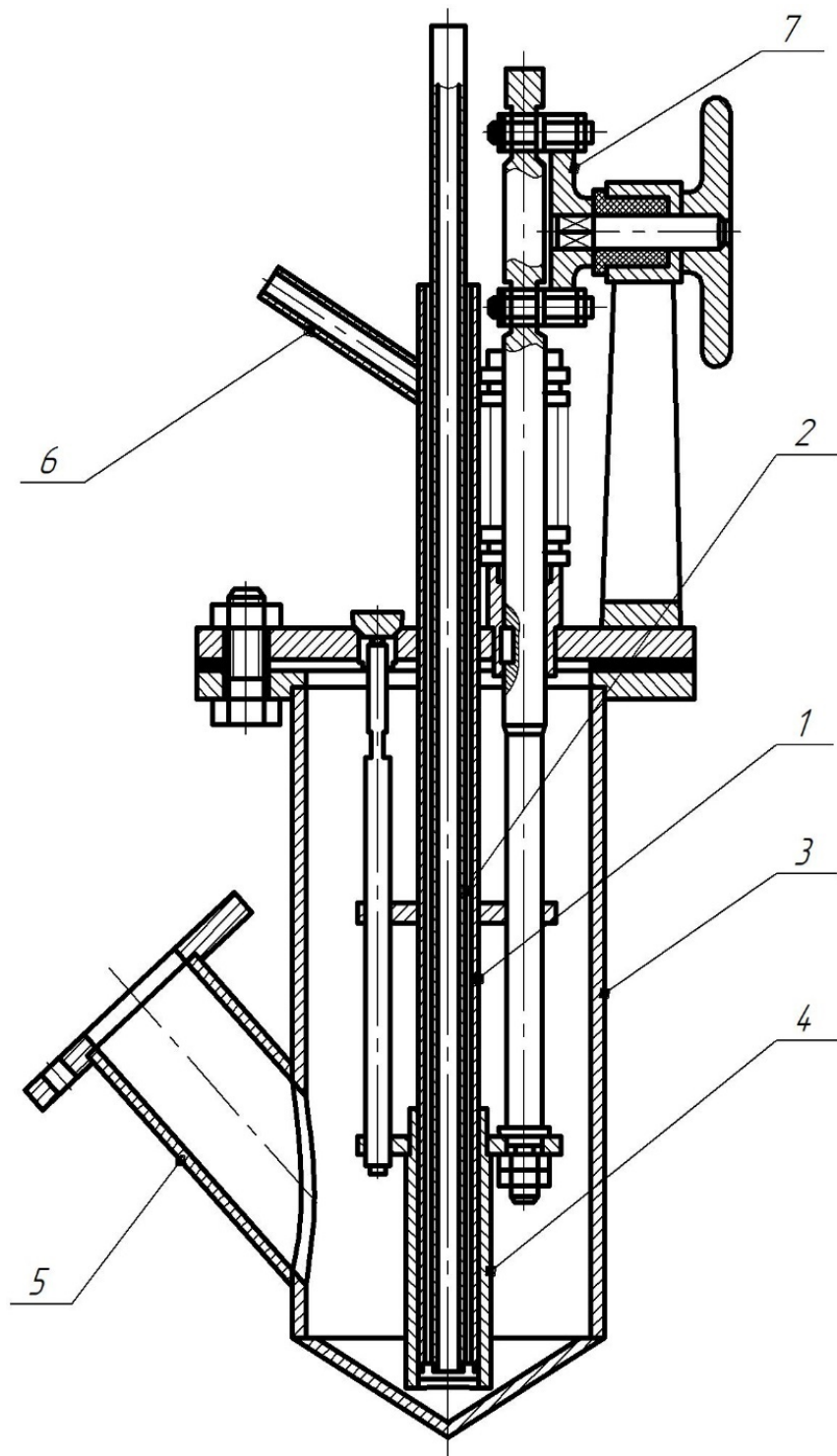


Рисунок 2.22 – Ерліфтна установка з шиберам: 1 – повітропровід; 2 – напірна труба; 3 – резервуар; 4 – циліндр; 5 та 6 – штуцер; 7 – механізм підйому та опускання шибера

## **Висновки до розділу 2**

1. Проаналізовано основні розрахункові моделі ерліфтного підйому газонасиченої суміші, що базуються на рівнянні Бернуллі для гомогенної рідини. Перспективними шляхами є моделі з врахуванням втрат напору рідини під час її руху у підйомній трубі, балансу робіт при проходженні суміші, а також експериментального методу розрахунку напорів при переміщенні матеріалу.

2. Проаналізовано основні шляхи покращення продуктивності ерліфтною установки при розробці підводних ґрунтів. Найефективнішими з них є всмоктування та підйом пульпи, оскільки вони дозволяють суттєво зменшити енергоємність відповідного процесу за рахунок повнішої передачі енергії від робочого тіла (повітря) до речовини, що піднімається.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕРЛІФТНОЇ УСТАНОВКИ З ШНЕКОВИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ

### 3.1. Фізична модель ерліфту з шнековим інтенсифікатором

На сьогоднішній день відомі різноманітні конструкції ерліфтів для транспортування рідини. Недоліком цих підйомників є те, що зі збільшенням густини суміші або додаванням до неї твердих включень, збільшуються сили опору підйому (сили тертя), що в свою чергу призводить до зменшення продуктивності.

Продуктивність ерліфтної установки – це величина, яка визначає кількість піднятого ґрунту з дна водоймища за одиницю часу.

Мета запропонованої конструкції ерліфту полягає в тому, щоб створити такий ерліфт, в якому б сили тертя не перешкождали руху трикомпонентної (повітря – вода – тверді частинки) суміші вгору, а допомагали її підйому.

На рисунку 3.1 схематично зображено ерліфтний підйомник.

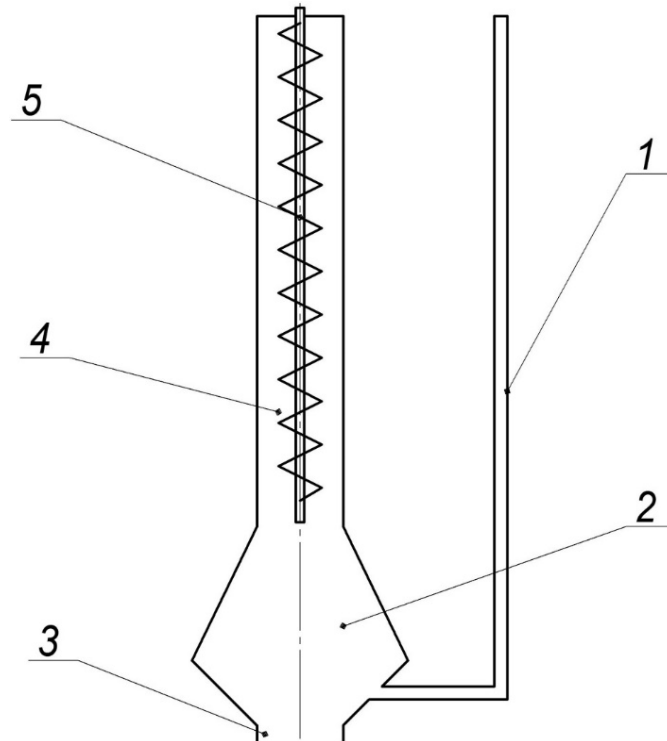


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення ерліфту з шнековим інтенсифікатором:

*1* – повітряна труба; *2* – змішувач; *3* – всмоктуючий патрубковий напір;

*4* – підйомна труба; *5* – шнек

Ерліфтна установка складається з підйомної труби 4 круглого перерізу, до якої знизу приєднаний змішувач 2. Всмоктуючий патрубок 3 знаходиться в нижній частині змішувача 2. Повітря до змішувача 2 подається через повітряну трубу 1. Шнек 5 встановлено в підйомну трубу 4 та може обертатися навколо своєї осі за допомогою двигуна. Діаметр шнеку значно менший за внутрішній діаметр підйомної труби.

Наявність у такому ерліфті суттєвих відмінностей забезпечує технічний результат, який виражається у покращенні змішування трикомпонентної суміші по всій висоті підйомної труби, що призводить до повнішої віддачі енергії від повітря до твердого компоненту, а це в свою чергу збільшує коефіцієнт корисної дії і підвищує продуктивність.

Ерліфтний підйомник працює наступним чином.

Стисле повітря по повітряній трубі 1 надходить до змішувача 2, де змішується з рідиною. У всмоктуючому патрубку виникає розрідження, що, в свою чергу, призводить до засмоктування твердих частинок. У змішувачі утворюється трикомпонентна суміш, яка рухається по підйомній трубі 4. Шнек 5, що обертається, постійно збурює суміш в підйомній трубі, не дозволяючи проковзувати твердим часточкам, а це збільшує віддачу енергії від повітря до твердого матеріалу та забезпечує підвищення коефіцієнту корисної дії.

Таким чином, застосування цієї конструкції ерліфта, забезпечить зростання ефективності розробки підводних ґрунтів.

### **3.2. Постановка задачі про рух гідросуміші в ерліфті з гвинтовим шнеком. Основні співвідношення**

Для адекватного опису динаміки гідросуміші виникає потреба у використанні відповідної моделі рідини. В загальному випадку математична модель базується на законах природи (закони збереження маси (рівняння нерозривності), основних принципах динаміки (законів про зміну кількості руху, про збереження повної енергії), рівнянні стану) та певних гіпотезах (припущеннях).

Закон збереження маси визначає, що зміна маси гідросуміші у будь-якому об'ємі рівна її потоку через поверхню, що оточує цей об'єм:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (3.1)$$

де  $v_x$ ;  $v_y$ ;  $v_z$  – проекції швидкості гідросуміші в даній точці на осі прямокутної декартової системи координат;  $\rho$  – густина гідросуміші в цій точці;  $t$  – час. Рівняння (3.1) зв'язує локальні та конвективні зміни густини гідросуміші зі змінами швидкості при переході від даної фіксованої точки.

Закон збереження кількості руху визначає, що зміна кількості руху гідросуміші в малому фіксованому об'ємі рівна потоку кількості руху через поверхню, що оточує цей об'єм, складеному з масовими та поверхневими силами, що прикладені до цього об'єму:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \theta^*; \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \theta^*; \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \mu \theta^*, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $F_k$  – позначає проекцію об'ємної сили на вісь  $k$ ;  $\mu$  – в'язкість рідини.  $\theta^*$  – визначається рівнянням

$$\theta^* = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (3.3)$$

За законом збереження енергії у фіксованому малому об'ємі гідросуміші зміна повної енергії, що складається з кінетичної та внутрішньої енергії, дорівнює потоку кінетичної та внутрішньої енергії через поверхню, що оточує цей

об'єм, та тепловому потоку через цю ж поверхню, складеного з роботою напруження над цим об'ємом:

$$\rho \left( \frac{\partial E}{\partial t} + v_x \frac{\partial E}{\partial x} + v_y \frac{\partial E}{\partial y} + v_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) = \varepsilon - p\theta^* + \frac{1}{A} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + D, \quad (3.4)$$

де  $E$  – внутрішня енергія одиниці маси;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності гідросуміші;  $T$  – температура частки гідросуміші;  $\varepsilon$  – підведення тепла за одиницю часу в одиниці об'єму внаслідок причин, відмінних від теплопровідності;  $A$  – термічний еквівалент роботи;  $\theta^*$  визначається рівнянням (3.3);  $D$  – дисипативна функція, що представляє собою механічну роботу сил в'язкості і характеризує енергію, що виділилась незворотно у вигляді тепла в одиниці об'єму гідросуміші за одиницю часу:

$$D = \mu \left[ \begin{aligned} &2 \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \\ &+ \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \right] - \frac{2}{3} \mu \theta^{*2}. \quad (3.5)$$

Таким чином, загальна задача енергетичного аналізу потоку гідросуміші зводиться до спільного розв'язування рівнянь (3.1) – (3.4).

Якщо гідросуміш має густину і обидва коефіцієнти в'язкості залежні лише від тиску, то для розв'язання основної задачі гідроаеродинаміки (тобто для відшукування поля швидкості, тиску і густини гідросуміші) достатньо рівнянь (3.1) та (3.2).

При цьому шуканий тиск повинен бути неперервним, скінченним та додатнім, а шукані швидкості – неперервними та обмеженими і на нерухомих стінках їх значення мають бути рівними нулю:

$$v_{x\text{ц}} = u_{\text{ц}} = 0; \quad v_{y\text{ц}} = v_{\text{ц}} = 0; \quad v_{z\text{ц}} = w_{\text{ц}} = 0. \quad (3.6a)$$

На рухомих поверхнях тіл указані швидкості рівні швидкостями точок цих поверхонь:

$$v_{x\text{ш}} = u_{\text{ш}} = u_{\text{т}}; \quad v_{y\text{ш}} = v_{\text{ш}} = v_{\text{т}}; \quad v_{z\text{ш}} = w_{\text{ш}} = w_{\text{т}}, \quad (3.6б)$$

а на вільних границях нормальна складова напруження має бути рівною постійному тиску, а дотична рівною нулю, тобто

$$p_{nn} = -p_0; \quad p_{nt} = 0. \quad (3.6в)$$

Рівняння динаміки в'язкої нестисливої рідини мають і експериментальне і теоретичне обґрунтування, але присутність конвективних доданків зумовлює нелінійність цих диференціальних рівнянь, а отже створює труднощі при їх інтегруванні. У зв'язку з вищевикладеним, на практиці застосовують певні спрощення та припущення.

Будемо розглядати рух гідросуміші на ділянці  $AB$  висотою  $H+h$ , де гідросуміш заповнює підйомну трубу від камери змішування до повітровідокремлювача. Рух потоку в підйомній трубі вважається усталеним (тобто незмінним за часом). Шнек обертається з постійною кутовою швидкістю.

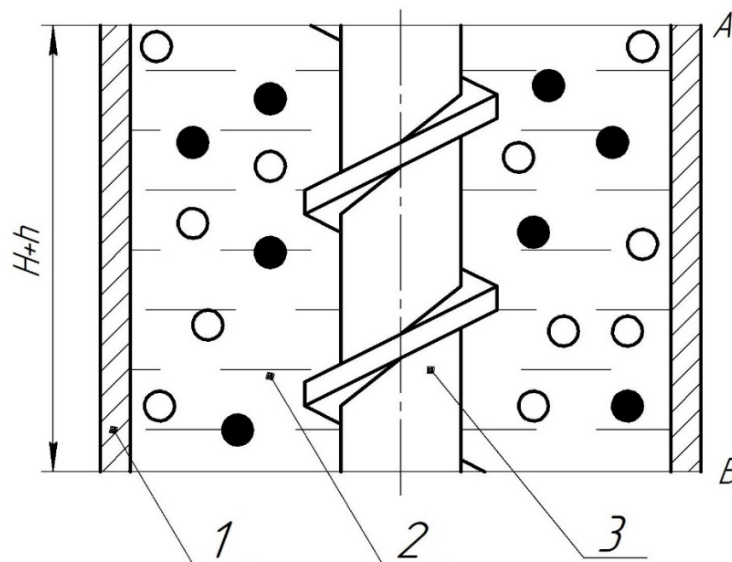


Рисунок 3.2 – Схема ділянки ерліфта з шнеком: 1 – підйомна труба,  
2 – гідросуміш, 3 – шнек

Вважаємо, що підйомна труба є циліндром круглого перерізу і є абсолютно твердим тілом. Шнек представлений у вигляді жорсткого гвинта (див. рис. 3.3), основні параметри якого такі:  $D_{ш}$  – зовнішній діаметр шнеку;  $d_{ш}$  – внутрішній діаметр шнеку;  $H_{ш}$  – крок витка;  $a$  – зазор між гребенем гвинта та циліндром;  $b$  – товщина гребня гвинта;  $E$  – висота гребня;  $\alpha_{ш}$  – кут підйому гвинтової лінії.

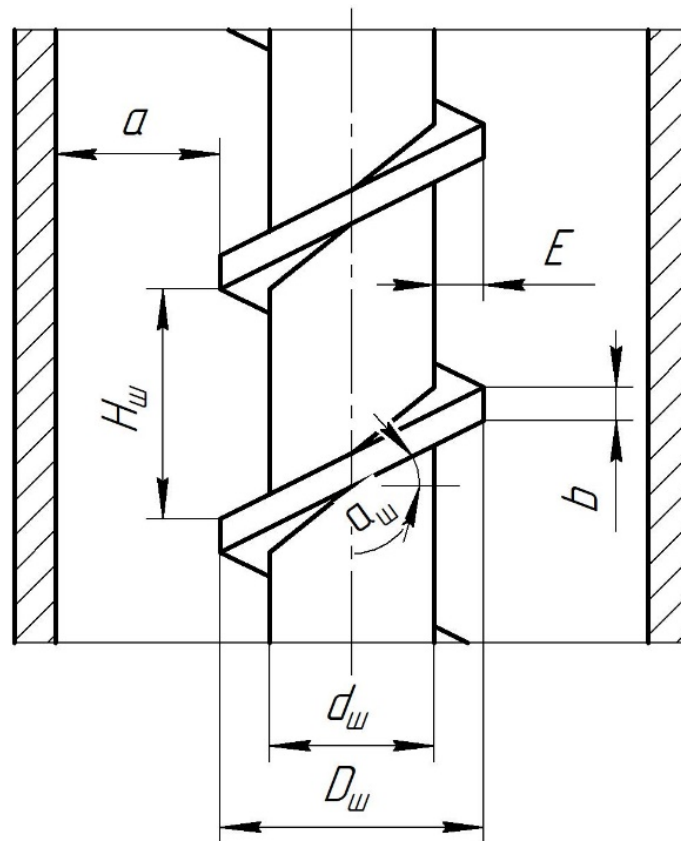


Рисунок 3.3 – Геометрія шнека

Площа поперечного перерізу підйомної труби (див. рис. 3.4) має складну форму та обчислюється наступним чином:

$$S_{\text{пер}} = S_D - S_{d_{\text{ш}}} - S_{\text{гр}}, \quad (3.7)$$

де  $S_D = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$  – площа поперечного перерізу циліндра;  $S_{d_{\text{ш}}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ш}}^2}{4}$  – площа осердя шнека;  $S_{\text{гр}}$  – площа перерізу гребня в горизонтальній площині (див. рис. 3.5).

Площа перерізу гребня в горизонтальній площині (рис. 3.5) визначається за формулою:

$$S_{\text{гр}} = S_{\text{пр}} + S_{\text{сег}_1} - S_{\text{сег}_2}, \quad (3.8)$$

де  $S_{\text{пр}}$  – площа прямокутної області,  $S_{\text{пр}} = a \cdot b_{\text{ш}}$ ;

$S_{\text{сег}_i}$  – площа сегменту ( $i=1; 2$ ).

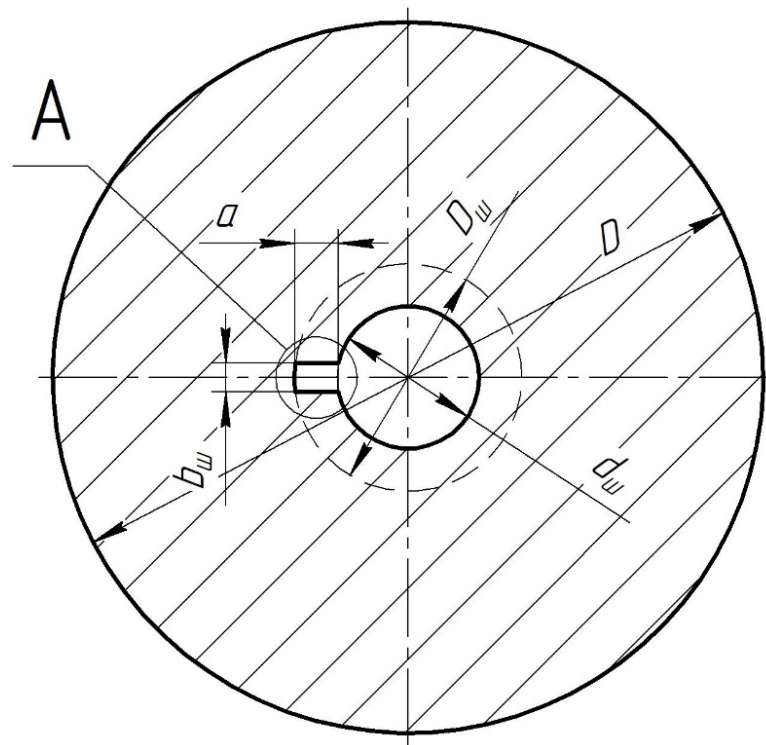


Рисунок 3.4 – Ескіз поперечного перерізу підйомної труби:  $D$  – внутрішній діаметр циліндра;  $D_{\text{ш}}$  – зовнішній діаметр шнека;  $d_{\text{ш}}$  – діаметр осердя шнека;  $a$  – висота гребня шнека;  $b_{\text{ш}}$  – ширина гребня шнека в поперечній площині ( $b_{\text{ш}} = b \cdot \text{tg}\alpha$ )

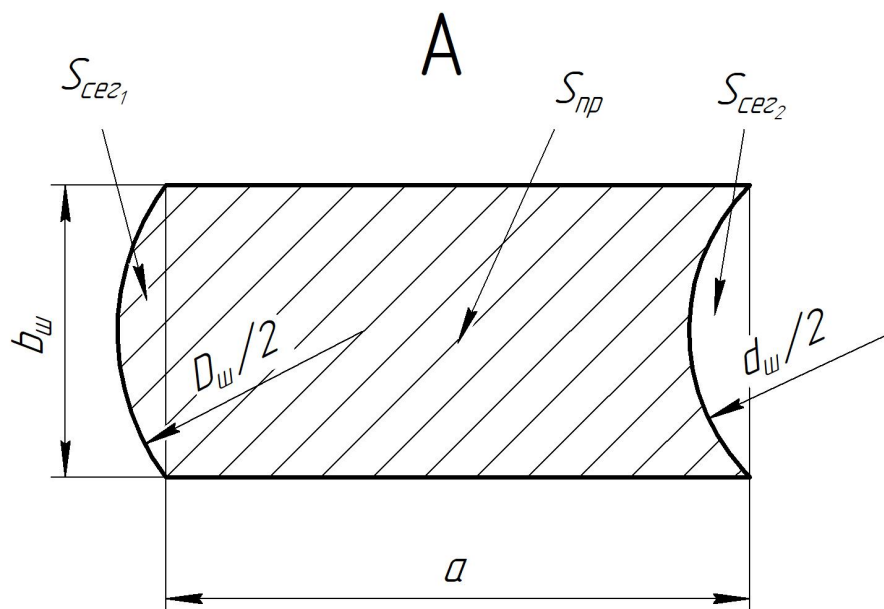


Рисунок 3.5 – Ескіз перерізу гребня в горизонтальній площині

Площа сегмента дорівнює

$$S_{\text{сег}_i} = \frac{1}{2} R^2 (\alpha - \sin\alpha), \quad (3.9)$$

де  $\alpha$  – кут сегмента,  $\alpha = 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{2R}\right)$ ;

$R$  – радіус кривизни сегмента.

$$S_{\text{сег}} = \frac{1}{2}R^2 \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{2R}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{2R}\right) \right] \right). \quad (3.10)$$

Підставивши відповідні значення, отримуємо:

$$\begin{aligned} S_{\text{сег}_1} &= \frac{1}{2}\left(\frac{D_{III}}{2}\right)^2 \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{2\frac{D_{III}}{2}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{2\frac{D_{III}}{2}}\right) \right] \right) = \\ &= \frac{D_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] \right). \end{aligned} \quad (3.11)$$

Аналогічно

$$S_{\text{сег}_2} = \frac{d_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] \right). \quad (3.12)$$

Підставляємо (2.11) та (2.12) у формулу (2.8) та отримуємо

$$\begin{aligned} S_{\text{гр}} &= ab_{III} + \left( \frac{D_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] \right) \right) - \\ &- \left( \frac{d_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] \right) \right). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Підставляємо у загальну формулу (2.7)

$$\begin{aligned} S_{\text{пер}} &= \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_{III}^2}{4}; - (ab_{III} + \left( \frac{D_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] \right) \right) - \\ &- \left( \frac{d_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] \right) \right). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Розкривши дужки, отримаємо

$$\begin{aligned} S_{\text{пер}} &= \frac{\pi}{4}(D^2 - d_{III}^2) - ab_{III} - \frac{D_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{D_{III}}\right) \right] \right) + \\ &+ \frac{d_{III}^2}{8} \left( \left[ 2\arcsin\left(\frac{b_{III}}{d_{III}}\right) \right] - \sin \left[ 2\arcsin\left(\frac{bb_{III}}{d_{III}}\right) \right] \right). \end{aligned} \quad (3.15)$$

Оскільки труба має циліндричну форму, то рівняння (3.1) – (3.2) доцільно записати у циліндричних координатах  $r, \theta, z$  ( $x = r \cdot \cos\theta, y = r \cdot \sin\theta, z = z$ ):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} &= F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left( \Delta V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_\theta V_r}{r} &= F_\theta - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\mu}{\rho} \left( \Delta V_\theta - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \Delta V_z, \end{aligned} \quad (3.16)$$

де

$$\Delta = \frac{\partial}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}.$$

*Гідросуміш* – це суміш бульбашок повітря, рідини та твердих частинок. Бульбашки повітря вважаємо сферичної форми та малого діаметру. Рідина є ньютонівська. Тверді частинки мають сферичну форму та малий діаметр.

Розміри бульбашок газу малі порівняно з відстанями між ними, що дозволяє знехтувати взаємодію сусідніх бульбашок, а отже не розглядати процеси зіштовхування, дробіння, злипання бульбашок, тощо, що дає змогу будувати математичну модель на основі вивчення закономірностей поведінки однієї бульбашки при дії на неї зовнішніх сил, а потім одержані результати перенести на сукупність наявних в рідині бульбашок.

Розглянемо особливості руху в рідині бульбашки та твердої частинки. Вільно спливаючу бульбашку повітря в необмеженому об'ємі води можливо розглядати як певну дисперсну частинку, що має істотну властивість – дисперсність. Дисперсність – найважливіша ознака об'єктів незначних розмірів. З ростом дисперсності підвищується роль поверхневих явищ, що впливають на частинку, так як збільшується кількість її поверхневих молекул, збільшується питома поверхня, сильніше проявляються гетерогенні властивості.

Гетерогенність або багатофазність – ознака об'єкта, яка вказує на наявність міжфазової поверхні, тобто поверхневого шару. Дисперсність

(роздробленість) – ознака об'єкта, пов'язана з його розмірами і геометрією. Дисперсність бульбашки повітря визначається такими характеристиками, як лінійний та дисперсний розмір бульбашки, коефіцієнт дисперсності, коефіцієнт форми та питома площа поверхні бульбашки повітря.

Оскільки поперечний розріз бульбашки повітря завжди є колом, то за його лінійний розмір приймається діаметр поперечного перерізу  $d_6$  найбільшої площі. Тоді площа поперечного перерізу бульбашки повітря

$$f_6 = \frac{\pi d_6^2}{4}, \text{ м}^2. \quad (3.17)$$

Дисперсний розмір бульбашки є відношенням об'єму бульбашки повітря  $W_6$  (м<sup>3</sup>) до площі його поверхні  $S_6$  (м<sup>2</sup>):

$$\delta_6 = \frac{W_6}{S_6}, \text{ м}. \quad (3.18)$$

і для бульбашки сферичної форми такий:

$$\delta_6 = \frac{W_6}{S_6} = \frac{\pi d_6^3}{6} \frac{1}{\pi d_6^2} = \frac{d_6}{6}, \text{ м}.$$

Коефіцієнт дисперсності – відношення лінійного розміру бульбашки повітря до її дисперсного розміру:

$$K_d = \frac{d_6}{\delta_6}.$$

Тоді

$$\delta_6 = \frac{d_6}{K_d}. \quad (3.19)$$

Для бульбашки сферичної форми  $K_d = 6$ .

Коефіцієнт форми бульбашки повітря – відношення площі поверхні бульбашки повітря до площі її поперечного перерізу:

$$K_\phi = \frac{S_6}{f_6}.$$

Тоді

$$S_6 = K_\phi f_6, \text{ м}^2. \quad (3.20)$$

Для бульбашки, що має сферичну форму:

$$K_{\phi} = \pi d^2 \cdot \frac{4}{\pi d^2} = 4; \quad S_{\phi} = K_{\phi} f_{\phi} = 4 f_{\phi}, \text{ м}^2.$$

Питома площа поверхні бульбашки повітря – відношення площі поверхні бульбашки  $S_{\phi}$  до її об'єму  $W_{\phi}$ :

$$A_{\phi} = \frac{1}{\delta_{\phi}} = \frac{S_{\phi}}{W_{\phi}}, \text{ м}^{-1}. \quad (3.21)$$

Для бульбашки сферичної форми

$$A_{\phi} = \frac{1}{\delta_{\phi}} = \frac{6}{d_{\phi}}, \text{ м}^{-1}.$$

Величину питомої площі поверхні бульбашки іноді називають її дисперсністю  $D_{\text{п}}$ .

На вільну бульбашку повітря, розміщену в достатньо великий об'єм води, діє сила виштовхування  $F_{\text{р}}$ , яка змушує спливати бульбашку зі швидкістю  $V_{\phi}$ .

$$F_{\text{р}} = W_{\phi} g (\rho - \rho_{\text{п}}), \text{ Н}, \quad (3.22)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ );  $\rho$ ,  $\rho_{\text{п}}$  – відповідно питомі густини води та повітря,  $\text{кг/м}^3$ .

У стаціонарному режимі руху бульбашки діюча на неї виштовхуюча сила зрівноважується силою гідравлічного опору руху бульбашки  $F_{\text{г.о}}$ .

$$F_{\text{г.о}} = f_{\phi} \rho \zeta \frac{V_{\phi}^2}{2}, \text{ Н}, \quad (3.23)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт гідравлічного опору бульбашки.

Тоді

$$F_{\text{р}} = F_{\text{г.о}};$$

$$W_{\phi} g (\rho - \rho_{\text{п}}) = f_{\phi} \rho \zeta \frac{V_{\phi}^2}{2};$$

$$V_{\phi} = \sqrt{\frac{2g W_{\phi} \rho - \rho_{\text{п}}}{\zeta f_{\phi} \rho}} = \sqrt{\frac{2g}{\zeta} \delta_{\phi} K_{\phi} \frac{\rho - \rho_{\text{п}}}{\rho}}, \text{ м/с}. \quad (2.24)$$

Для бульбашки сферичної форми

$$V_6 = \sqrt{\frac{2g d_6}{\zeta} \cdot 4 \frac{\rho - \rho_{\Pi}}{\rho}} = \sqrt{\frac{4g d_6 \rho - \rho_{\Pi}}{3 \zeta \rho}}, \text{ м/с.} \quad (3.25)$$

Коефіцієнт гідравлічного опору  $\zeta$ , у формулі (3.25) є змінною величиною, його величина залежить від режиму обтікання бульбашки рідини в процесі її спливання. Режим обтікання є функцією числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V_6 d_6}{\nu},$$

де  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м<sup>2</sup>/с.

Спливання твердої частинки характеризується певними режимами її руху [159]. Ламінарний режим спливання (область повзучої течії, в'язкого обтікання, стоксовський режим спливання) спостерігається при  $\text{Re} < 1$ . Перехідний режим спливання спостерігаємо при  $1 < \text{Re} \leq 500$ . Турбулентний режим спливання в області квадратичного закону опору (область першого автомодельності режиму спливання) спостерігається при  $5 \cdot 10^2 < \text{Re} < 10^5$ .

В межах бульбашкової структури течії розміри бульбашок стислого повітря менше внутрішнього діаметру підйомного трубопроводу ерліфту. Відомі моделі бульбашкового потоку базуються на припущенні, що тверді частинки переносяться несучим середовищем. Несучим середовищем для даної структури розглядається приведена до усереднених параметрів суміш рідини з бульбашками повітря. Малі значення об'ємного газовмісту суміші підтримують високу транспортуючу можливість потоку. Результати розрахунків параметрів транспортування твердого матеріалу бульбашковим водоповітряним потоком та водою при інших рівних умовах близькі між собою [48, 49].

У роботі [160] зазначено, що для забезпечення стійкого режиму роботи ерліфту без шнекового інтенсифікатора по підйому твердого матеріалу, швидкість потоку аерогідросуміші на вході в підйомну трубу повинна бути більше критичної.

Критична швидкість транспортування твердого матеріалу аерогідросуміші по вертикальному трубопроводу, м/с

$$u_{\text{кр}} = u_p'' + K \sqrt{a_z S_z g D_{\text{вн}}}, \quad (3.26)$$

де  $u_p''$  – швидкість стисненого падіння часток в рідині, м/с;  $K$  – експериментальна константа, яка залежить від розміру твердих часточок  $d_k$  (при  $0 < d_k < 3$  мм  $K = 2,5$ ; при  $3 < d_k < 10$  мм  $K = 2,5 \dots 3,0$ ; при  $10 < d_k < 18$  мм  $K = 3 \dots 3,5$ );  $a_z$  – диференціальна відносна густина потоку в  $z$ -ому перерізі підйомної труби;  $S_z$  – об'ємна концентрація твердого матеріалу в аерогідросуміші в  $z$ -ому перерізі підйомної труби;  $D_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр підйомної труби, м.

$$a_z = \frac{\rho_T}{\rho} (q_z + 1) - 1, \quad (3.27)$$

$$S_z = \frac{S}{(q_z + 1)}, \quad (3.28)$$

де  $\rho_T$  – густина твердого матеріалу, що транспортується, кг/м<sup>3</sup>;  $q_z$  – питомі витрати повітря, приведенні до тиску в  $z$ -ому перерізі підйомної труби

$$q_z = q \frac{p_a}{p_a + p_z}, \quad (3.29)$$

де  $p_a$  – атмосферний тиск, Па;  $p_z$  – тиск в  $z$ -ому перерізі підйомної труби, Па;  $\rho_z = \rho \cdot g \cdot \alpha \cdot z$ . Розрахунок критичної швидкості транспортування проводять для входу в підйомну трубу при максимальній глибині занурення змішувача, при цьому  $p_z = p_{\text{зм}} = \rho \cdot g \cdot h_{\text{max}}$ .

Швидкість стисненого падіння частинок твердого матеріалу в рідині, м/с:

$$u_p'' = u_p (1 - S_z)^2 \left[ 1 - \left( \frac{d_k}{D_{\text{вн}}} \right)^2 \right], \quad (3.30)$$

де  $u_p$  – швидкість вільного падіння твердих частинок в рідині, м/с

$$u_p = \sqrt{\frac{3}{4} g \frac{d_k}{C_0} a_z}, \quad (3.31)$$

де  $C_0$  – коефіцієнт опору руху твердих часточок в водоповітряному потоці;  $C_0 = 0,86$  [161].

Дійсна швидкість потоку аерогідросуміші на вході в підйомну трубу, м/с

$$u_{\text{вх.д}} = \frac{4 \cdot Q_e (1 + q_z)}{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}. \quad (3.32)$$

Діаметр труби підбирають так, щоб  $u_{\text{вх.д}} > u_{\text{кр}}$ , то це означає, що на початку руху по підйомній трубі досягнута швидкість, яка забезпечує сталий режим

роботи по підйому твердого матеріалу в ерліфті, а по-скільки з переміщенням вгору швидкість аерогідросуміші збільшується завдяки розширенню стиснутого повітря, то і по всій довжині підйомної труби швидкість потоку аерогідросуміші буде вище критичної. А якщо умова  $u_{\text{вх.д}} > u_{\text{кр}}$  не виконується, то слідє вибрати трубу з меншим діаметром.

Достовірний математичний опис та кількісний аналіз робочого процесу ерліфта, основою якого є вертикальний висхідний водоповітряний потік, вимагає застосування, як і для однофазної рідини, усереднених рівнянь руху (нерозривності руху та кількості руху) двофазної рідини [162]. З огляду на різноманіття режимів та структур газорідинної суміші в ерліфті виникає завдання обґрунтувати їх отримання з закону збереження маси і теореми імпульсів стосовно до двофазної рідини.

Побудовані Телетовим С.Г., уточнені Франклом Ф.І., Рахматуліним Х.А., Дюнін А.К., Фідманом Б.А. диференціальні рівняння гідродинаміки газорідинної суміші замкнуті Мамаєвим В.А. рівняннями балансу турбулентної енергії [163].

Межі розділу в двофазному потоці розглядають як поверхні розриву. Відповідно закони збереження для кожної фази записують у вигляді диференціальних рівнянь в частинних похідних, а для поверхонь розділу вони формуються у вигляді умов стрибка (граничних умов) [45, 164].

Локальні миттєві рівняння збереження в [163] представлені для контрольного об'єму  $V$  в момент часу  $t$ . Об'єм  $V$  поверхнею розділу фаз  $\omega_i(t)$  поділено на дві частини  $V_1(t)$  та  $V_2(t)$ , обмежені відповідно поверхнями  $\Omega_1(t) \div \omega_i(t)$  та  $\Omega_2(t) \div \omega_i(t)$ .

Зміна маси в контрольному об'ємі  $V$  дорівнює масовій витраті в об'ємі  $V$  через границю розділу  $\Omega$ :

$$\frac{d}{dt} \int_{V_1(t)} \rho_1 dV + \frac{d}{dt} \int_{V_2(t)} \rho_2 dV = - \int_{\Omega_1(t)} \rho_1 v_1 \cdot n_1 d\Omega - \int_{\Omega_2(t)} \rho_2 v_2 \cdot n_2 d\Omega, \quad (3.33)$$

де  $\rho_k$  та  $v_k$  - щільність і вектор швидкості фаз  $k$  ( $k = 1, 2$ );

$\vec{n}_k$  – одиничний вектор нормалі в заданій точці поверхні  $\Omega_k(t)$ , спрямований назовні; тоді  $v_k \cdot n_k$  – швидкість зсуву поверхні.

Зміна кількості руху в контрольному об'ємі  $V$  дорівнює сумі потоку кількості руху в об'єм  $V$  через граничну поверхню  $\Omega$  та зовнішніх масових і поверхневих сил.

Тоді баланс імпульсу

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{V_1(t)} \rho_1 v_1 dV + \frac{d}{dt} \int_{V_2(t)} \rho_2 v_2 dV = & - \int_{\Omega_1(t)} \rho_1 v_1 (v_1 \cdot n_1) d\Omega - \\ & - \int_{\Omega_1(t)} \rho_2 v_2 (v_2 \cdot n_2) d\Omega + \int_{V_1(t)} \rho_1 F dV + \int_{V_2(t)} \rho_2 F dV + \int_{\Omega_1(t)} n_1 T_1 d\Omega \\ & + \int_{\Omega_2(t)} n_2 T_2 d\Omega, \end{aligned} \quad (3.34)$$

де  $F$  - одинична зовнішня масова сила;

$T_i$  - тензор напружень ( $i = 1; 2$ ).

Застосовавши для рівнянь (3.33) і (3.34) правила Лейбніца та теореми Гауса, отримують суму двох інтегралів по об'єму та інтеграла по поверхні [163, 165, 166]. Інтеграли по об'єму формують локальні миттєві диференціальні рівняння збереження в частинних похідних для кожної фази, а інтеграли по поверхні – локальні миттєві умови стрибка на поверхні розділу

Для можливості перетворення рівнянь збереження звичайними методами математичного аналізу осереднення гідродинамічних параметрів виконується або просторово-тимчасовим методом [167-170], або імовірнісним методом [171]. Аналіз виконаних робіт наведено в [172].

Для побудови рівнянь збереження з метою аналізу робочого процесу ерліфта зі снарядної, емульсійної і кільцевої структурами водоповітряного потоку в підйомній трубі та барботажного режиму газорідного підйомника доцільно використовувати комбіновано-осередненні вирази, наведені в [163]. Використовуючи основне співвідношення операторів осереднення в даній

роботі доведена тотожність рівнянь, осереднених по простору-часу або часу-простору.

Застосувавши ряд прийнятних припущень для умов висхідного двофазного потоку у вертикальній трубі (зокрема, сталість тиску в поперечному перерізі потоку, вертикальну симетричність потоку та ін.), автори [163] пропонують наступні спрощені рівняння збереження для кожної з фаз та для суміші в цілому.

Рівняння збереження маси:

для фаз ( $k = 1, 2$ )

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_k \rho_k) + \frac{\partial}{\partial z}(R_k \rho_k w_k) = -\frac{1}{\omega} \int_{c(z,t)} \dot{m}_k \frac{dc}{n_k \cdot n_{kc}}; \quad (3.35)$$

для суміші

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_1 \rho_1 + R_2 \rho_2) + \frac{\partial}{\partial z}(R_1 \rho_1 w_1 + R_2 \rho_2 w_2) = 0, \quad (3.36)$$

де  $R_k$  – відносна частина площі поперечного перерізу вертикальної труби, яку займає фаза  $k$ ;

$w_k$  – компонента вектора швидкості  $v_k$  по вертикальній осі  $z$ ;

$\dot{m}_k$  – масова витрата через одиницю площі поверхні розділу фаз  $\omega_i(t)$ ;

$\omega$  – площа поперечного перерізу труби;

$\omega_k(z, t)$  – зайнята фазою частина площі поперечного перерізу труби  $\omega$ ;

$c(z, t)$  – межа між фазами в поперечному перерізі труби  $\omega$ ;

$n_{kc}$  – одиничний вектор, розташований в площині поперечного перерізу  $\omega_k(z, t)$  та спрямований від фази  $k$  в точці перетину поверхні розділу  $\omega_i(z, t)$  й площині поперечного перерізу  $\omega_k(z, t)$ .

Рівняння збереження кількості руху:

для фаз ( $k = 1, 2$ )

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_k \rho_k w_k) + \frac{\partial}{\partial z}(R_k \rho_k w_k^2) - R_k \rho_k F_z + R_k \frac{\partial p}{\partial z} =$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{\omega} \int_{c(z,t)} n_z (\dot{m}_k \cdot v_k - n_k \tau_k) \frac{dc}{n_k \cdot n_{kc}} + \\
&+ \frac{1}{\omega} \int_{c_k(z,t)} n_z \cdot (n_k \cdot \tau_k) \frac{dc}{n_k \cdot n_{kc}};
\end{aligned} \tag{3.37}$$

для суміші

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t} (R_1 \rho_1 w_1 + R_2 \rho_2 w_2) + \frac{\partial}{\partial z} (R_1 \rho_1 w_1^2 + R_2 \rho_2 w_2^2) - \\
&-(R_1 \rho_1 + R_2 \rho_2) F_z + \frac{\partial p}{\partial z} = \\
&= \frac{1}{\omega} \sum_{k=1,2} \int_{c_k(z,t)} n_z (n_k \cdot \tau_k) \frac{dc}{n_k \cdot n_{kc}},
\end{aligned} \tag{3.38}$$

де  $F_z$  – проекція одиничної масової сили на вісь  $z$ ;

$p$  – тиск;

$n_z$  – одиничний вектор у напрямку осі  $z$ ;

$\tau_k$  – тензор в'язкісних напружень;

$c_k(z,t)$  – межі між фазами та стінкою труби в поперечному перерізі  $\omega$ .

Горизонтальна лінія над членами правих частин рівнянь (3.35), (3.37) і (3.38) означає оператор усереднення за часом.

Використовуюючи спрощені рівняння збереження маси та кількості руху (3.35) – (3.38), отримано диференціальні залежності для аналізу робочого процесу ерліфта зі снарядної, емульсійної та кільцевої структурами водоповітряного потоку, які переважно мають місце в підйомній трубі [41, 42], а також для барботажного режиму підйомника.

При моделюванні водоповітряного потоку в ерліфті залежно від виду структури його можна розглядати однокомпонентним (гомогенним) або двокомпонентним.

Однією з підстав застосування однокомпонентної моделі є досить хороша диспергованість однієї з фаз. З урахуванням рекомендацій [163, 169]

вважається, що перенесення кількості руху відбувається досить швидко та середні швидкості обох фаз рівні між собою

$$w_1 = w_2 = w. \quad (3.39)$$

Густина однокомпонентного потоку  $\rho$  обчислюється через витратний об'ємний газівміст  $\beta$  за відомими залежностями [45, 167, 168, 173 та ін.].

Однокомпонентною (гомогенною) моделлю в ерліфті доцільно описувати водоповітряний потік з емульсійною структурою, яка є проміжною між снарядною і кільцевою, і яка характеризується високим ступенем дроблення фаз та їх хаотичним взаємним розподілом [42].

Рівняння руху рідини для однокомпонентної емульсійної моделі можна отримати з рівнянь фаз спрощеної системи (3.35) і (3.37), виключаючи інтеграли з поверхнею розділу між фазами  $c(z, t)$  та вважаючи  $R_k \equiv 1$ .

Тоді рівняння нерозривності руху

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (3.40)$$

яке для сталого потоку

$$\rho w = G = \text{const}, \quad (3.41)$$

де  $G$  - масова швидкість.

У розглянутих умовах одинична масова сила  $F_z \equiv -g$ . Позначивши другий член правої частини рівняння (3.37), що виражає втрати тиску на подолання сил тертя, через  $\left(-\frac{\chi}{\omega} \tau_w\right)$ , рівняння кількості руху записують у вигляді

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} + \rho g + \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w, \quad (3.42)$$

яке для сталого потоку набуває вигляду:

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d\rho w^2}{dz} - \rho g, \quad (3.43)$$

де  $\chi$  – периметр поперечного перерізу труби;

$\tau_w$  – дотичне напруження на стінці.

Рівняння (3.43) часто представляють у вигляді [45, 163, 167-170]

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{тер}} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{пр}} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{г}}, \quad (3.44)$$

приймаючи, що повні втрати тиску  $dp/dz$  складаються з втрат тиску внаслідок тертя  $(dp/dz)_{\text{тер}}$ , а також динамічної  $(dp/dz)_{\text{пр}}$  та гідростатичних  $(dp/dz)_{\text{г}}$  складових. Інтегрування рівняння (3.44) виконується в межах довжини підйомної труби ерліфта  $0 \leq z \leq H + h$ .

Двокомпонентну модель правомірно застосовувати для опису в ерліфті снарядної структури водоповітряного потоку [168, 169]. Спрощені рівняння збереження для двокомпонентної моделі доцільно отримати з рівнянь для суміші (3.36) та (3.38), прийнявши  $R_1 \equiv 1 - \varphi$ ,  $R_2 \equiv \varphi$  ( $\varphi$  - дійсний газовміст; індекс 1 відноситься до рідкої фази, індекс 2 - до газоподібної),  $F_z \equiv -g$  та, за аналогією з вищевикладеним, позначивши член правої частини рівняння (3.38) через  $(-\frac{\chi}{\omega} \tau_w)$ .

Тоді рівняння нерозривності руху для снарядної структури

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2] + \frac{\partial}{\partial z} [(1 - \varphi)\rho_1 w_1 + \varphi\rho_2 w_2] = 0, \quad (3.45)$$

яке для сталого потоку

$$(1 - \varphi)\rho_1 w_1 + \varphi\rho_2 w_2 = G = \text{const}. \quad (3.46)$$

Рівняння кількості руху для суміші в сталих умовах

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d}{dz} [(1 - \varphi)\rho_1 w_1^2 + \varphi\rho_2 w_2^2] - [(1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2]g. \quad (3.47)$$

З (3.47) видно, що повні втрати тиску, як і в однокомпонентному потоці, складаються зі складових втрат на тертя, прискорення та гідростатичної складової, тобто рівняння (3.47) можна також представити у вигляді залежності (3.44).

Характер потоку гідросуміші в ерліфті за наявності в ньому шнекового інтенсифікатора є досить складним. Тому в цьому випадку розглядатимемо рух гідросуміші вздовж труби як суперпозицію одномірного висхідного потоку, зумовленого подачею компресора, та потоку в аксіальному напрямі, створеного за рахунок обертання гвинтового інтенсифікатора.

### 3.3. Визначення продуктивності роботи ерліфта з шнековим інтенсифікатором

Продуктивність ерліфта з шнековим інтенсифікатором визначатимемо за формулою:

$$Q_{\text{еш}} = Q_e + Q_{\text{ш}}, \quad (3.48)$$

де  $Q_e$  – продуктивність ерліфтної установки;

$Q_{\text{ш}}$  – продуктивність шнекового інтенсифікатора.

Приймаючи рух гідросуміші в підйомній трубі квазіусталений, можна записати:

$$\rho \cdot g \cdot h = \rho_{\text{сум}} \cdot g \cdot (H + h + a_e \cdot Q_{\text{сум}}^2) \quad (3.49)$$

Ліва частина (3.49) описує тиск на вході в змішувач, обумовлений геометричною глибиною його занурення, а права – тиск, який визначається висотою підйому гідросуміші (відраховуючи від змішувача) та витратами напору при її русі;  $a_e$  – гідравлічний опір підйомної труби ерліфту;  $Q_{\text{сум}}$  – витрати аерогідросуміші, приведені до середнього тиску в підйомній трубі:

$$Q_{\text{сум}} = Q_e \left( 1 + q \frac{p_a}{p_a + \rho \cdot g \cdot h/2} \right). \quad (3.50)$$

Підставивши (3.49) в рівняння (3.50), та розрахувавши його відносно подачі ерліфту, отримаємо **основне рівняння ерліфта**

$$Q_e = \frac{1}{1 + q \frac{p_a}{p_a + \rho \cdot g \cdot h/2}} \sqrt{\frac{h}{a_e} \left( 1 + q \frac{p_a}{p_a + \rho \cdot g \cdot h/2} - \frac{1}{\alpha} \right)}, \quad (3.51)$$

чи

$$Q_e = \frac{1}{1 + q_{\text{п}}} \sqrt{\frac{h}{a_e} \left( 1 + q_{\text{п}} - \frac{1}{\alpha} \right)}. \quad (3.52)$$

Залежності (3.51) та (3.52) свідчать, що подача ерліфту при постійному відносному зануренні значною мірою залежить від подачі повітря. Залежність подачі повітря від витрат повітря визначає **витратну характеристику ерліфта**. Більш надійно її можна отримати експериментальним шляхом.

Опір ерліфта можна визначити за допомогою залежності

$$a_e = \frac{8\lambda(H+h)}{\pi^2 g D_e^5} = \frac{8\lambda}{\pi^2} \cdot \frac{h}{\alpha g D_e^5} = \psi \frac{h}{\alpha g D_e^5}, \quad (3.53)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт опору ерліфта. Підставивши цей вираз в формулу (3.53):

$$Q_e = \frac{1}{1+q_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left(1+q_{\text{п}} - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot g \cdot D_e^5}, \quad (3.54)$$

де  $q_{\text{п}}$  – питома витрата повітря;

$\alpha$  – відносне занурення  $\alpha = h / (H + h)$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$D_e$  – еквівалентний діаметр ерліфта (для ерліфтої установки з шнековим інтенсифікатором  $D_e = D - D_{\text{ш}}$ );

Відомо [174], що об'ємна продуктивність шнекового конвеєра (шнека, розташованого в циліндричному корпусі з мінімальним зазором  $a$  (рис. 3.3)), визначається наступною формулою, м<sup>3</sup>/с:

$$Q_{\text{ш}} = \frac{\pi(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}{4} \left(H_{\text{ш}} - \frac{b}{\cos\alpha_{\text{ш}}}\right) n K_{\text{ш}}, \quad (3.55)$$

де  $D_{\text{ш}}$ ,  $d_{\text{ш}}$  – зовнішній та внутрішній діаметр шнека;

$H_{\text{ш}}$  – крок витка;  $b$  – товщина гребеня гвинта;

$\alpha_{\text{ш}}$  – кут підйому гвинтової лінії;  $n$  – частота обертання шнека;

$K_{\text{ш}}$  – загальний коефіцієнт, що зменшує завантаження шнека

$$K_{\text{ш}} = K_3 \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{ст}},$$

де  $K_3$  – коефіцієнт завантаження ( $K_3 = 0,8 \dots 0,95$ );

$K_{\text{п}}$  – коефіцієнт подачі продукту шнеком ( $K_{\text{п}} = 0,7 \dots 0,8$ );

$K_{\text{ст}}$  – коефіцієнт стиснення сипучих матеріалів ( $K_{\text{ст}} = 0,8 \dots 0,85$ ).

Підставивши вирази (3.54) та (3.55) в вираз (3.48) отримуємо основне рівняння продуктивності роботи ерліфта з шнековим інтенсифікатором

$$Q_{\text{еш}} = \frac{(D - D_{\text{ш}})^{2,5}}{1 + q_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\alpha}{\psi} \left(1 + q_{\text{п}} - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot g} + \frac{\pi(D_{\text{ш}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}{4} \left(H_{\text{ш}} - \frac{b}{\cos\alpha_{\text{ш}}}\right) n K_{\text{ш}}. \quad (3.56)$$

### 3.4. Визначення коефіцієнту корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором

Енергетична характеристика ерліфту з шнековим інтенсифікатором визначається коефіцієнтом корисної дії ерліфту, що є відношенням корисної потужності для підйому гідросуміші до потужності підведеного потоку повітря:

$$\eta_e = \frac{N_k}{N_{\Pi}}; \quad N_k = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q_e; \quad N_{\Pi} = Q_{\Pi} \cdot p_a \cdot \ln\left(\frac{p_a + \rho \cdot g \cdot h}{p_a}\right), \quad (3.57)$$

де  $N_k$  – корисна потужність;  $N_{\Pi}$  – потужність потоку повітря, який подається в змішувач (при ізотермічному процесі). Маємо:

$$\eta_e = \frac{(\rho_T - \rho) \cdot g \cdot H \cdot Q_e}{Q_{\Pi} \cdot p_a \cdot \ln\left(\frac{p_a + \rho \cdot g \cdot h}{p_a}\right)}, \quad (3.58)$$

або

$$\eta_e = \frac{H}{q \cdot h_a \cdot \ln\left(1 + \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_a}\right)}, \quad (3.59)$$

де  $h_a = p_a / \rho \cdot g$  – висота стовпа рідини, яка відповідає атмосферному тиску.

Коефіцієнт корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором визначається за виразом:

$$\eta_e = \frac{N_k}{N_{\Pi} + N_{\text{ш}}}, \quad (3.60)$$

де  $N_{\text{ш}}$  – потужність, яка необхідна для обертання шнеку.

$$N_{\text{ш}} = \frac{K_3 \cdot Q_{\text{ш}} \cdot (H + h)}{367 \cdot \eta_{\text{пр}}} (\omega_3^1 + 1), \quad (3.61)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу;  $\eta_{\text{пр}}$  – ККД приводу ( $\eta_{\text{пр}} = 0,8 \dots 0,9$ );  $\omega_3^1$  – загальний коефіцієнт опору на шнеку (коефіцієнт тяги) ( $\omega_3^1 = 6,5 \dots 8,3$ ).

Підставивши (3.57) та (3.61) в (3.60) отримуємо:

- для інженерних розрахунків

$$\eta_{\text{еш}} = \frac{(\rho_T - \rho) \cdot g \cdot H \cdot Q_{\text{еш}}}{Q_{\Pi} \cdot p_a \cdot \ln\left(\frac{p_a + \rho \cdot g \cdot h}{p_a}\right) + \frac{K_3 \cdot Q_{\text{ш}} \cdot (H + h)}{367 \cdot \eta_{\text{пр}}} (\omega_3^1 + 1)}, \quad (3.62)$$

- для аналітичних досліджень

$$\eta_{\text{еш}} = \frac{H}{q \cdot h_a \cdot \ln\left(1 + \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_a}\right) + \frac{K_3 \cdot Q_{\text{ш}} \cdot (H + h)}{367 \cdot \eta_{\text{пр}}} (\omega_3^1 + 1)}. \quad (3.63)$$

Адекватність отриманих рівнянь підтверджена даними експериментальних досліджень (розділ 4).

### 3.5. Аналіз гідродинамічних параметрів робочого процесу ерліфта з шнековим інтенсифікатором

Метою аналізу гідродинамічних параметрів робочого процесу ерліфта з шнековим інтенсифікатором є порівняння його ККД з аналогічними показниками традиційної (без шнека) ерліфтною установки, а також встановлення області доцільності використання запропонованої нової конструкції замість традиційної.

Чисельний розрахунок за виведеними вище формулами виконано на ПЕОМ за допомогою програми *Excel 2016* [додаток Б1] і розглянуто на прикладі експериментальної установки газорідного підйомника з діаметром підйомної труби  $D = 0,1$  м, повітряної труби  $d = 0,052$  м, довжиною підйомної труби  $H + h = 1,5$  м, геометричним зануренням  $h = 1$  м. Результати обчислень подано у вигляді графічних залежностей на рисунках 2.6 та 2.7.

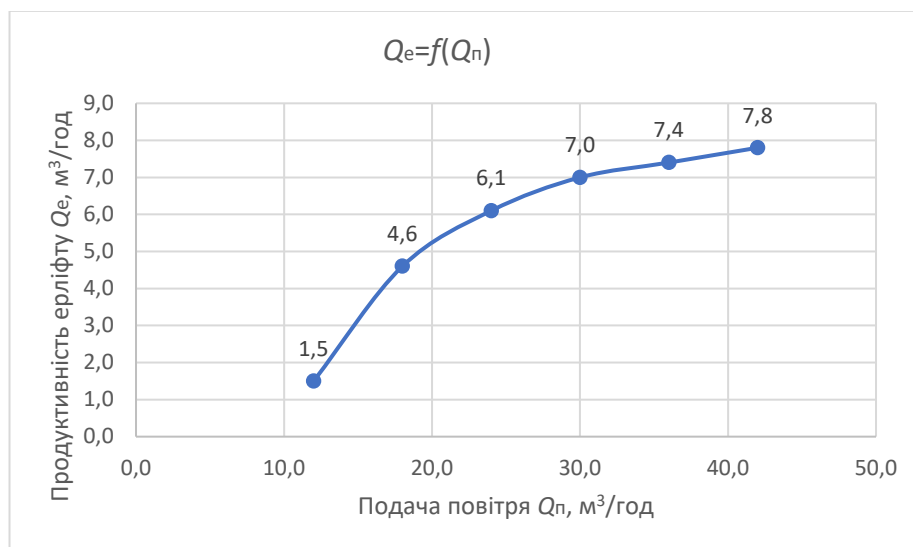


Рисунок 3.6 – Розрахункова витратна характеристика ерліфта при традиційній схемі роботи [додаток Б1, табл. Б1.1]  
( $D = 0,1$  м,  $d = 0,052$  м,  $H + h = 1,5$  м,  $h = 1$  м)

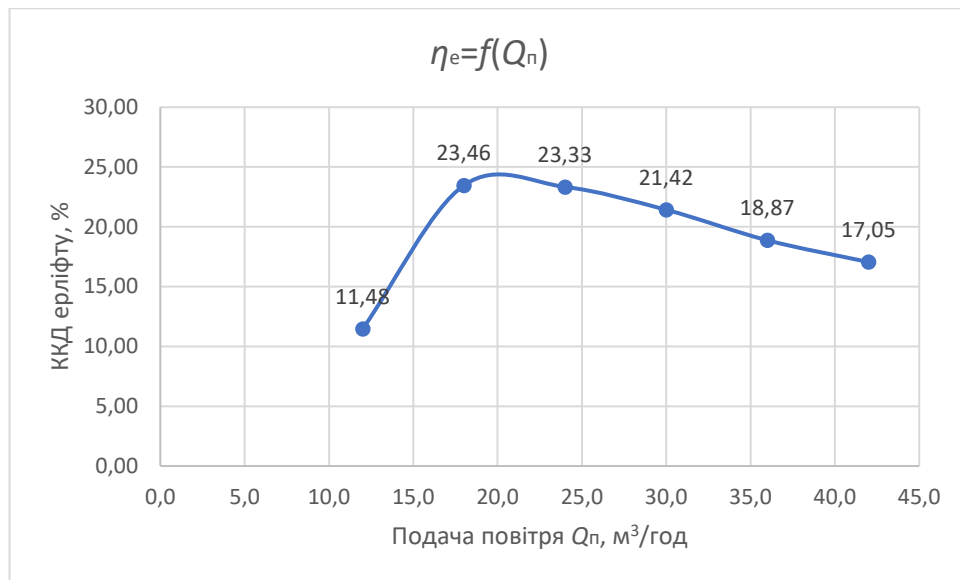


Рисунок 3.7 – Коефіцієнт корисної дії ерліфта при традиційній схемі роботи [додаток Б1, табл. Б1.1]

$$(D = 0,1 \text{ м}, d = 0,052 \text{ м}, H + h = 1,5 \text{ м}, h = 1 \text{ м})$$

При розрахунку ерліфтною установки з шнековим інтенсифікатором було використано шнек з такими основними геометричними параметрами: зовнішній діаметр  $D_{\text{ш}} = 0,032$  м; внутрішній діаметр  $d_{\text{ш}} = 0,02$  м; крок витка  $H_{\text{ш}} = 0,032$  м; товщина гребня гвинта  $b = 0,005$  м; кут підйому гвинтової лінії  $\alpha_{\text{ш}} = 30^\circ$ .

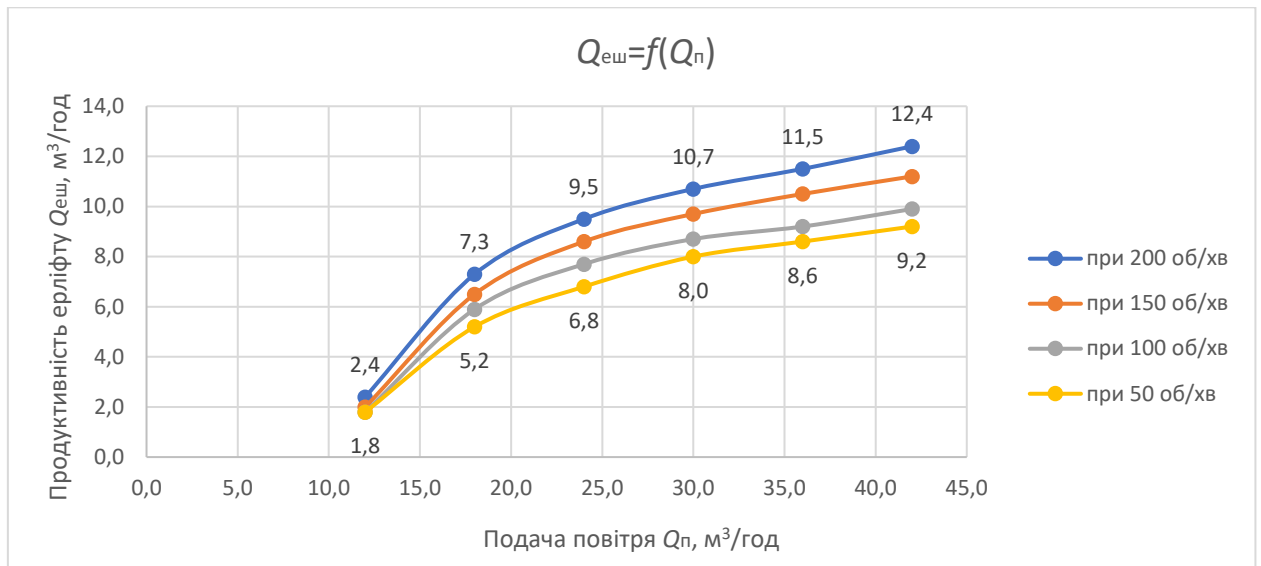


Рисунок 3.8 – Розрахункова витратна характеристика ерліфтною установки з шнековим інтенсифікатором [додаток Б1, табл. Б1.2-1.5]

$$(D = 0,1 \text{ м}, d = 0,052 \text{ м}, H + h = 1,5 \text{ м}, h = 1 \text{ м}, D_{\text{ш}} = 0,032 \text{ м}, d_{\text{ш}} = 0,02 \text{ м}, H_{\text{ш}} = 0,032 \text{ м}, n = 50 \dots 200 \text{ об/хв})$$

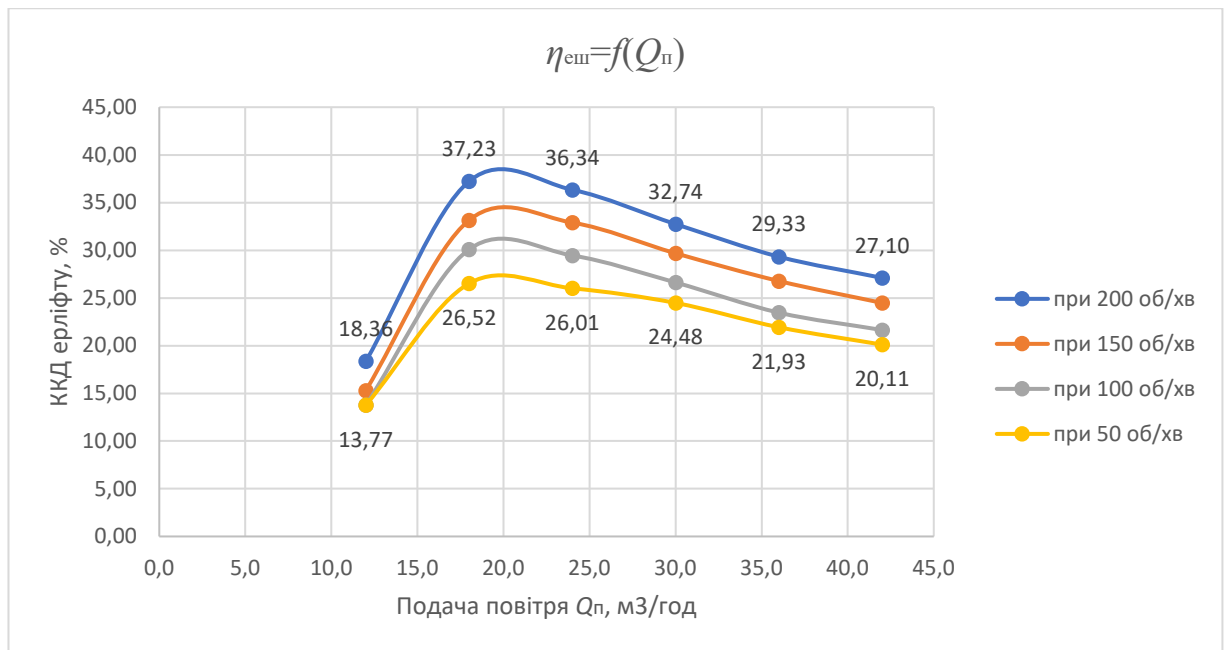


Рисунок 3.9 – Коефіцієнт корисної дії ерліфтної установки

з шнековим інтенсифікатором [додаток Б1, табл. Б1.2-1.5]

( $D = 0,1$  м,  $d = 0,052$  м,  $H + h = 1,5$  м,  $h = 1$  м,  $D_{\text{ш}} = 0,032$  м,  $d_{\text{ш}} = 0,02$  м,

$H_{\text{ш}} = 0,032$  м,  $n = 50 \dots 200$  об/хв)

Аналіз та узагальнення отриманих результатів дозволили визначити зону доцільного використання ерліфту з шнековим інтенсифікатором (рис. 3.10). Вона знаходиться в межах подачі повітря  $15,0 \dots 35,0$  м<sup>3</sup>/год, це обумовлено тим, що ККД ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором не знижується менше 30%.

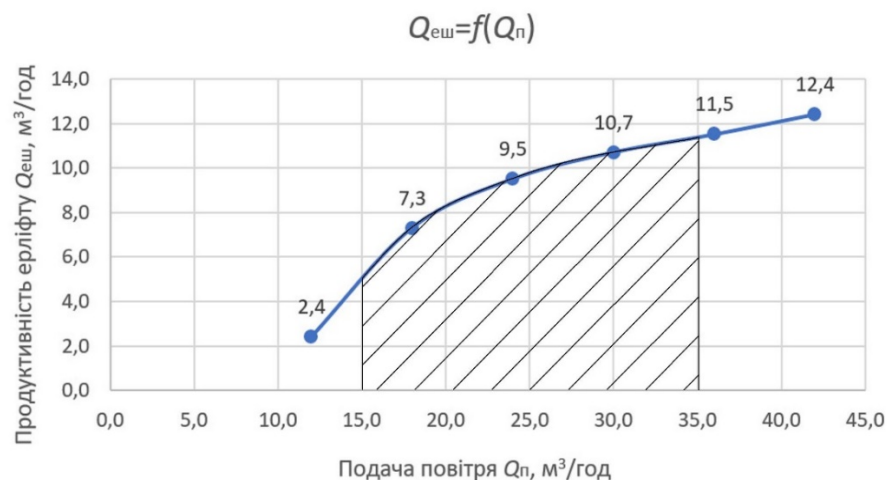


Рисунок 3.10 – Зона доцільного використання ерліфту з шнековим

інтенсифікатором ( $D = 0,1$  м,  $d = 0,052$  м,  $H + h = 1,5$  м,  $h = 1$  м,

$D_{\text{ш}} = 0,032$  м,  $d_{\text{ш}} = 0,02$  м,  $H_{\text{ш}} = 0,032$  м,  $n = 50 \dots 200$  об/хв)

Таким чином використання шнекового інтенсифікатора доцільне. На кожні 50 об/хв інтенсифікатора спостерігається зростання не лише продуктивності (приблизно, на 10%), а й коефіцієнта корисної дії (на 13,7%) у всьому діапазоні подач повітря. Це пояснюється тим, що відбувається більш повна передача енергії від повітря до твердого матеріалу за рахунок збурювання гідросуміші по всій довжині підйомної труби ерліфту.

### **Висновки по розділу 3**

1. Створено фізичну модель ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором.

2. Розроблено математичну модель функціонування ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором, яка базується на законах природи (законі збереження маси (рівнянні нерозривності), основних принципах динаміки (законнах про зміну кількості руху, про збереження повної енергії), рівнянні стану) та певних гіпотезах (припущеннях).

3. Визначено продуктивність ерліфта з шнековим інтенсифікатором на основі розгляду руху гідросуміші вздовж труби як суперпозиції одномірного висхідного потоку, зумовленого подачею компресора, та потоку в аксіальному напрямі, створеного за рахунок обертання гвинтового інтенсифікатора.

4. Визначено коефіцієнт корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором, який є відношенням корисної потужності для підйому гідросуміші до суми потужностей підведеного потоку повітря та обертання шнекового інтенсифікатора.

5. Побудовано область доцільного використання ерліфта з шнековим інтенсифікатором. Вона знаходиться в межах подачі повітря від 15,0 до 35,0 м<sup>3</sup>/год, і зумовлена тим, що величина ККД ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором не опускається нижче 30%.

6. Доведено енергетичну ефективність використання в ерліфтній установці шнекового інтенсифікатора. Наявність шнеку в ерліфті призводить до

збільшення величини ККД порівняно з традиційним ерліфтом на 13,7% на всьому діапазоні подач повітря компресором.

7. Отримано вирази для визначення продуктивності та величини ККД ерліфтової установки з шнековим інтенсифікатором. Досліджено залежність продуктивності та величини ККД ерліфтової установки з шнековим інтенсифікатором залежно від режимів подачі повітря компресором.

## РОЗДІЛ 4. ПІДТВЕРДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНИХ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ПО РОЗРОБЦІ ЕРЛІФТНОЇ УСТАНОВКИ З ШНЕКОВИМ ІНТЕНСИФІКАТОРОМ

### 4.1. Експериментальні дослідження робочих процесів традиційно працюючого ерліфта та ерліфта з шнековим інтенсифікатором

#### 4.1.1. Завдання та обґрунтування вибору об'єкта експериментальних досліджень

Основним критерієм подібності ерліфтів згідно [80, 175, 176] є відносне (динамічне) занурення змішувача  $\alpha$  ( $\alpha_d$ ) та відношення довжини підйомної труби до її діаметру  $(H+h)/D$ . При випробуваннях ерліфту, які відносяться до натурних, критерій подібності  $(H+h)/D$  дозволяє встановити геометричні розміри газорідних підйомників, на які правомірно поширити отримані результати досліджень. При цьому не рекомендується брати для моделей діаметри підйомних труб  $D < 30$  мм для виключення істотного впливу сил поверхневого натягу [80, 175]. Через зміни тиску в змішувачі при зміні витрати стисненого повітря виконання сталості критерію подібності  $\alpha_d$  є важким, тому застосовується критерій  $\alpha$ .

Експериментальні дослідження проводитимуться при відносному геометричному зануренні змішувача  $\alpha = 0,33$ , що дозволяє забезпечити сталу роботу висхідного водоповітряного потоку в підйомній трубі ерліфта [177]. Конструкція ерліфтною установки дозволяє здійснювати додавання до неї шнекового інтенсифікатора.

До технічних робочих параметрів, які досліджуються, відносяться: продуктивність ерліфтною установки з шнековим інтенсифікатором та без нього, подача компресора, частота обертання шнеку в підйомній трубі. Вплив геометричних розмірів шнеку не розглядається, у зв'язку з вибором їх оптимальних значень за відомими методиками [172-174].

#### 4.1.2. Експериментальна установка та вимірювальний комплекс

Експериментальну установку було створено в лабораторії кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки ВМУРоЛ «Україна».

Вона складається з основного баку 1 об'ємом 250 л (рис. 4.1), в який встановлено підйомну трубу 3 діаметром  $\text{Ø}116 \times 8 \text{ мм}$  ( $D=100 \text{ мм}$ ) та довжиною 1,5 м. Труба зафіксована таким чином, щоб змішувач 2, який прикріплено на ній знизу, мав занурення 1,0 м. Повітровідокремлювач 9 прикріплено до підйомної труби 3 зверху, відповідно, 0,5 м над рівнем води.

Зливний патрубок 7  $\text{Ø}116 \times 8 \text{ мм}$  з'єднує повітровідокремлювач 9 та контрольну ємність 6 об'ємом 50 л, яка має насічки з відповідним вказаним об'ємом, через витратомір 8 марки Ергомера-125.АА. Контрольна ємність 6 має зливний патрубок у основну ємність 1.

За допомогою компресора С416М ( $p_n = 10 \text{ бар}$ ,  $Q_n = 1 \text{ м}^3/\text{хв}$ ) 17 (рис. 4.11) повітря через повітропровід 21 діаметром  $\text{Ø}60 \times 4 \text{ мм}$  ( $d = 52 \text{ мм}$ ) подається у змішувач 2, тиск в якому вимірюється датчиком тиску 22 *SML-20.0* (рис. 4.8). Тиск повітря регулюється релем 16 *SDE5-D10-O*, а перевіряється датчиком *SDE-10-10V/20mA* (рис. 4.6). Потік регулюється за допомогою запірної арматури 19 *DN50*, а контроль – витратоміром 20 *SFAB-1000U-M12* (рис. 4.7). Привід у запірній арматурі 19 пневматичний 18 фірми *FESTO* марка *DAPS-0060-090-R-F0305-S.S* (рис. 4.9).

У підйомну трубу 3 встановлено шнек 4 ( $d_{\text{зов}}=32 \text{ мм}$ ;  $d_{\text{вн}}=20 \text{ мм}$ ;  $t=32 \text{ мм}$ ), який обертається завдяки електродвигуну 10 *SIEMENS 1LE15010CB321AA4-Z* ( $P = 0,37 \text{ кВт}$ ;  $n = 1380 \text{ об/хв}$ ) (рис. 4.13). Регулювання частоти обертів виконується за допомогою частотного перетворювача 11 *SIEMENS PM 240-2* (рис. 3.14), а контроль – енкодером 12 *1XP8012-10/1024* тієї ж фірми (рис. 4.13).

Усі сигнали від датчиків (8, 12, 13, 20, 22) надходять до блоку керування та реєстрації показників 14. Блок керування складається з АЦП *D:HW-Easyport-USB-D16A* (рис. 4.3) та блоку входів *Anschlussinheit-AF TN162247 Serie M8* (рис. 4.4). Його живлення забезпечує блок живлення *Netz4,5A TN 162*



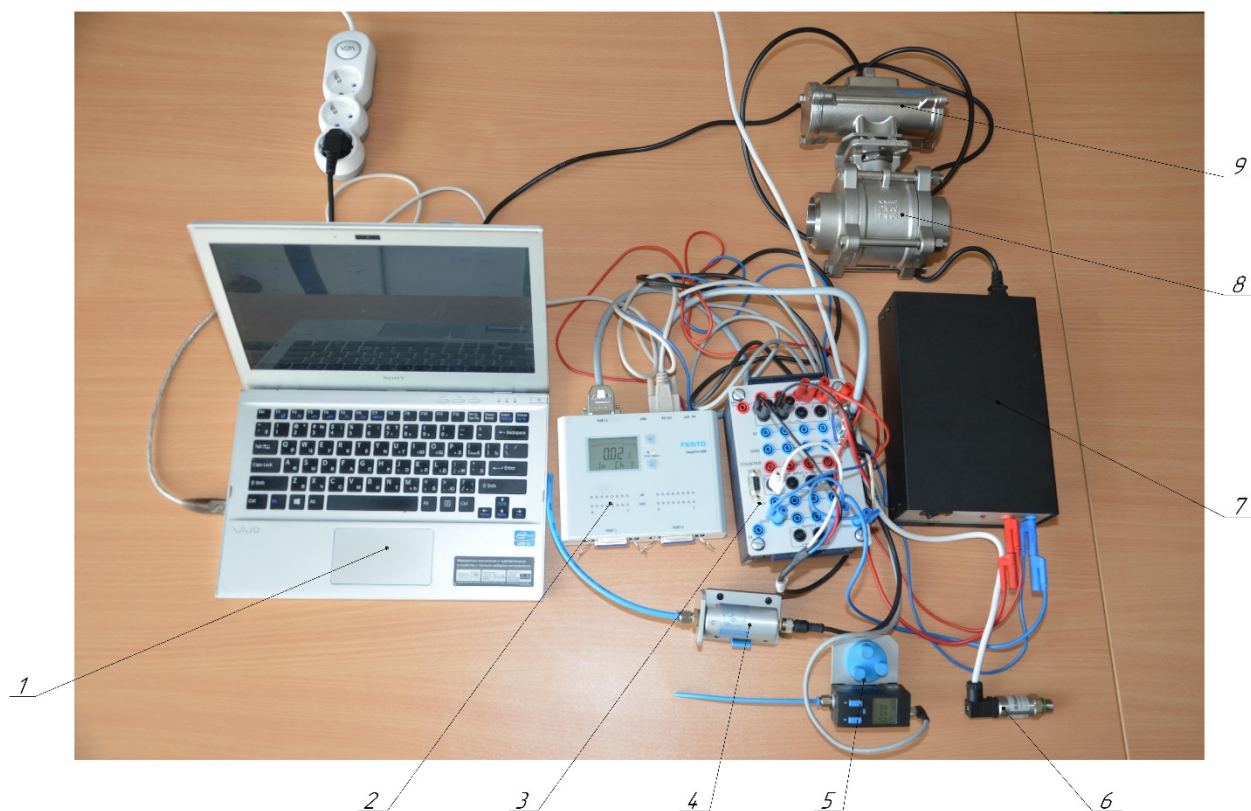


Рисунок 4.2 – Контрольно-вимірювальний комплекс: 1 – комп'ютер; 2 – аналоговоцифровий перетворювач; 3 – блок входів аналоговий; 4 – датчик тиску повітря; 5 – витратомір повітря; 6 – датчик тиску в змішувачі; 7 – блок живлення; 8 – запірні арматура; 9 – привід запірної арматури.



Рисунок 4.3 – Аналоговоцифровий перетворювач *D:HW-Easyport-USB-D16A*



Рисунок 4.4 – Блок входів аналоговий *Anschlussinheit-AF TN162247 Serie M8*



Рисунок 4.5 – Блок живлення *Netz4.5A TN 162 416 Serie R3*



Рисунок 4.6 – Датчик тиску повітря *SDE-10-10V/ 20mA*



Рисунок 4.7 – Датчик витрат повітря *SFAB-1000U-M12*



Рисунок 4.8 – Датчик тиску в змішувачі *SML-20.0*



Рисунок 4.9 – Запірна арматура *DN50* з пневмоприводом *DAPS-0060-090-R-F0305-S.S*



Рисунок 4.10 – Компакт-диск з ліцензійним програмним забезпеченням фірми *FESTO*



Рисунок 4.11 – Компресорна установка *S416M*



Рисунок 4.12 – Загальний вигляд органів установки для керування обертами шнеку: 1 – електродвигун; 2 – енкодер; 3 – системний блок комп'ютера; 4 – частотний перетворювач; 5 – монітор; 6 – клавіатура; 7 – мишка



Рисунок 4.13 – Електродвигун 1LE15010CB321AA4-Z з енкодером 1XP8012-10/1024

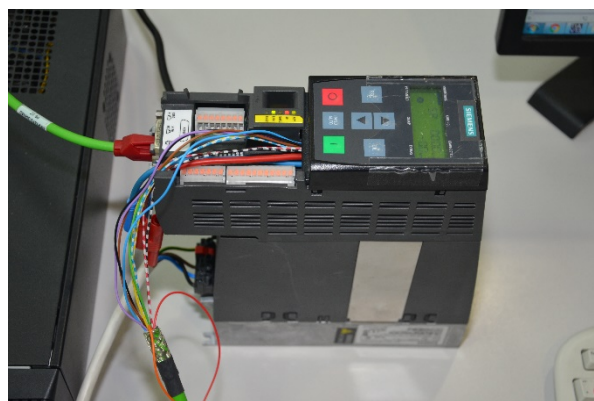


Рисунок 4.14 – Частотний перетворювач PM 240-2

416 *Serie R3* (рис. 4.5). Всі налаштування та регулювання виконуються через комп'ютер 15.

Експериментальні дослідження мають виконуватися таким чином. На дно основного баку 1 насипається просіяний пісок 15 кг та набирається вода з

труби центрального водопостачання до раніше зробленої відмітки, яка відповідає зануренню ерліфту 1 м.

Першим етапом є дослідження роботи ерліфту за традиційною схемою, тобто робота без шнекового інтенсифікатора. Для цього виймаємо з підйомної труби 3 шнек 4.

Вмикається комп'ютер 15 та перевіряється працездатність усіх датчиків. На них має висвітлитися «0». Перекривається клапан, що розташований після компресора (на схемі не вказано). Запускається компресор 17 та очікується в ресивері встановлення оптимального тиску 10 бар.



Рисунок 4.15 – Шнековий інтенсифікатор

Усі регулювання та налаштування виконуються через комп'ютер. Для цього на нього встановлюється ліцензійне програмне забезпечення компанії FESTO. Сигнали від електронних датчиків передаються через АЦП на комп'ютер та записуються спеціальною програмою (рис. 4.16, 4.17).

Встановлюється реле тиску повітря 16 на значення 1,5 бар та відкривається клапан подачі повітря. Значення 1,5 бар розраховане відповідно методики [151]. Запірною арматурою 19 налаштовується подача компресора на значення 0,2 м<sup>3</sup>/хв, це виконується шляхом перекривання повітряної труби поворотом клапана за допомогою пневматичного приводу 18. Після досягнення сталого режиму роботи ерліфту зливається гідросуміш з контрольної ємності 6 в основний бак 1, а потім закривається зливний кран та набирається ємність знову. Це потрібно для контролю концентрації піску в суміші. Контролюються та записуються показання усіх показників шляхом натискання кнопки «Запис» у спеціальній програмі (рис. 4.16).

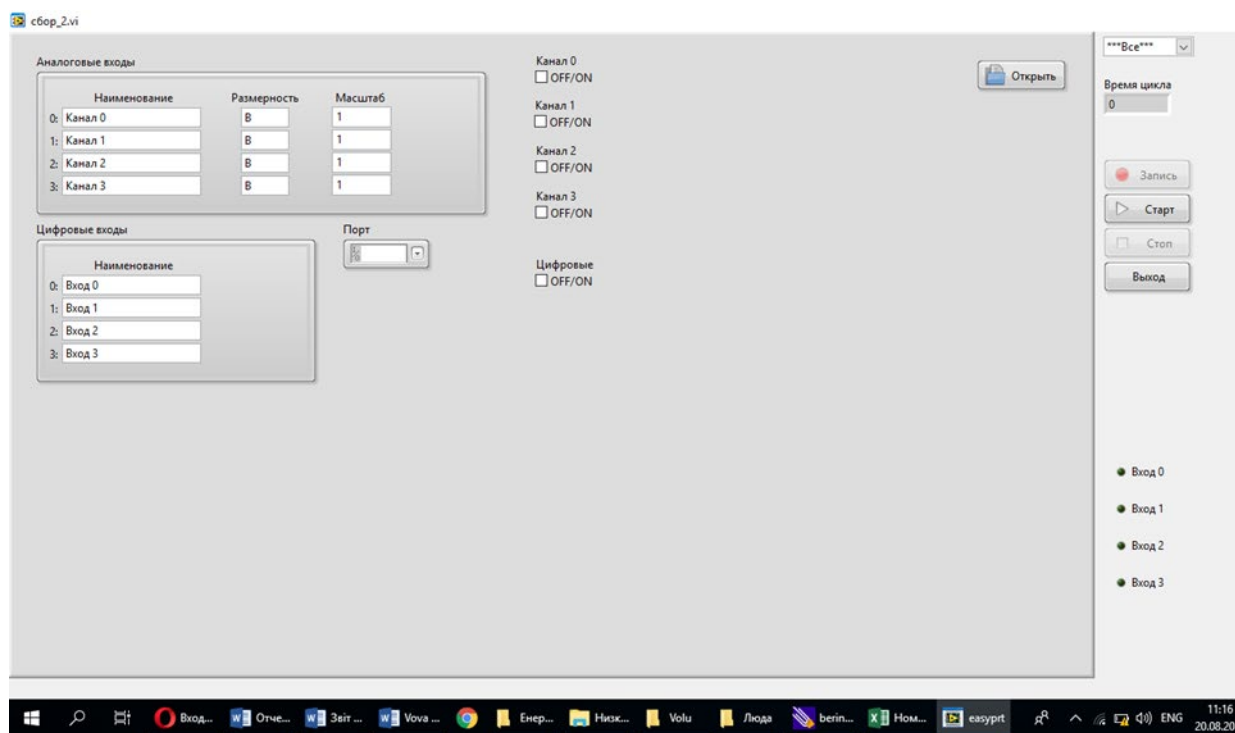


Рисунок 4.16 – Початкове вікно спеціальної програми для експериментальних дослідження

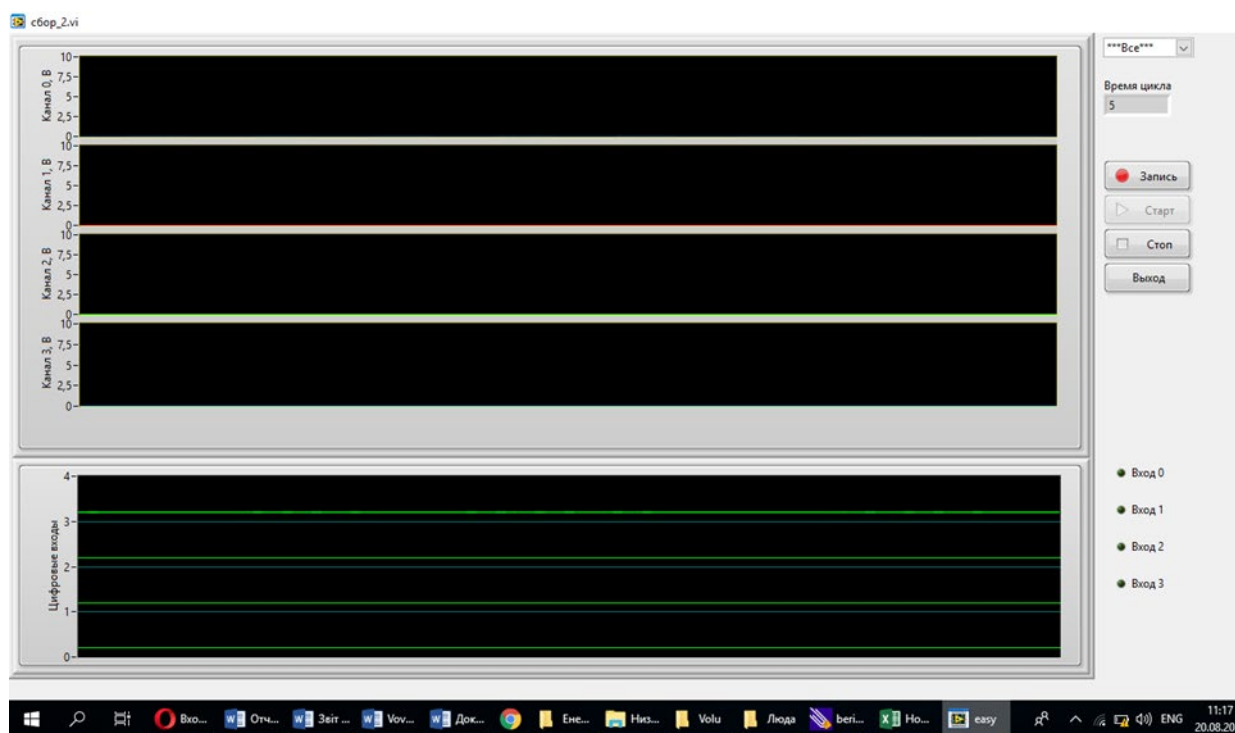


Рисунок 4.17 – Вікно спеціальної програми призначене для візуального контролю за датчиками

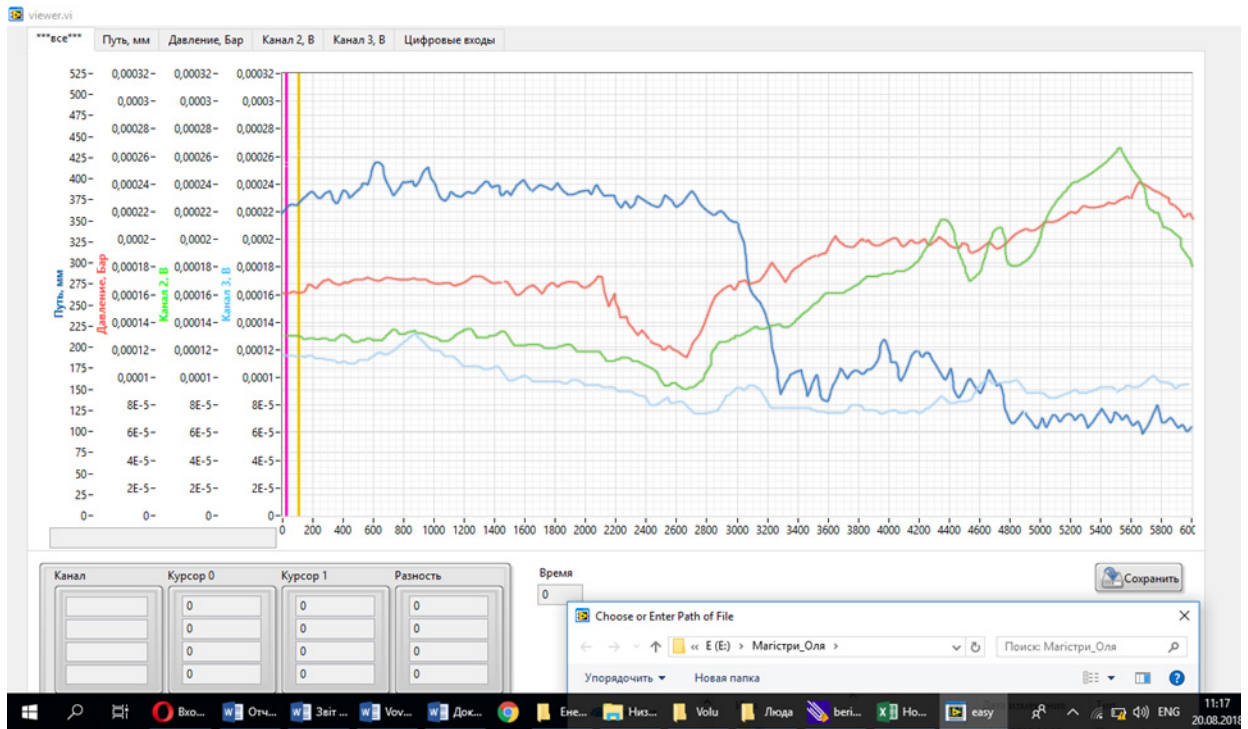


Рисунок 4.18 – Вікно спеціальної програми, призначене для запису та перегляду збережених показань датчиків

Продуктивність ерліфтної установки визначається ультразвуковим витратоміром Ергомера-125.АА (рис. 4.19). Монтаж і експлуатація ультразвукового витратоміра (УЗВ) виконуються відповідно до вимог (рис. 4.20) [178].



Рисунок 4.19 – Ультразвуковий витратоміром Ергомера-125.АА

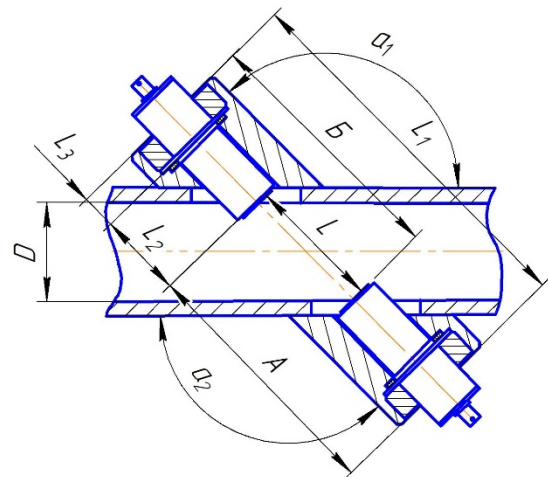


Рисунок 4.20 – Розміщення ультразвукових датчиків витратоміра Ергомера-125.АА на зливній трубі ерліфту

Розглянемо принцип роботи лічильника. В УЗВ витрата рідини обчислюється як добуток швидкості потоку рідини (вимірюваної витратоміром) і площі перетину трубопроводу

$$q = V \cdot S \cdot K(v: s),$$

де  $V$  - швидкість потоку рідини в трубопроводі;  $S$  - перетин трубопроводу;  $K(v: s)$  - змінний коефіцієнт приведення вимірної швидкості потоку по ультразвуковому променю до середньої по перетину, визначається при калібруванні приладу на проливній установці.

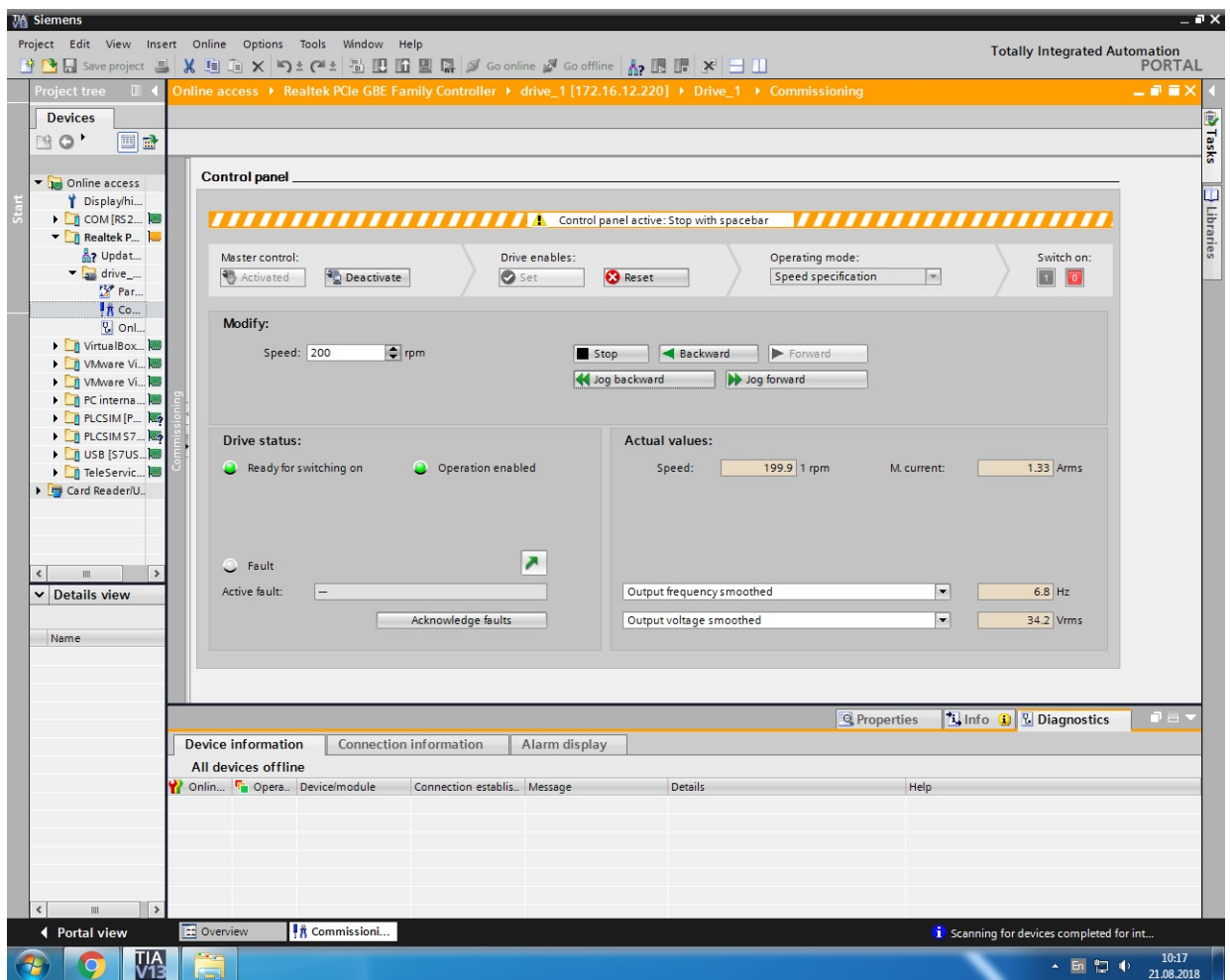


Рисунок 4.21 – Вікно ліцензійного програмного забезпечення від компанії *SIEMENS* для керування частотою обертання шнеку

Принцип вимірювання швидкості рідини полягає в тому, що швидкість поширення ультразвуку в рухомому середовищі відносно обраної нерухомої

точки вимірювання є геометричною сумою швидкості ультразвуку в нерухомому середовищі та проекції середньої швидкості руху середовища ( $V$ ) на напрямок ультразвукового променя. Вимірявши час проходження ультразвуку за ( $T_{по}$ ) і проти ( $T_{пр}$ ) потоку, лічильник обчислює швидкість потоку рідини ( $V$ ) та витрати ( $q$ ).

Потім встановлюється подача повітря 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 м<sup>3</sup>/хв та знову проводиться запис значень основних показників.

На другому та подальших етапах експериментальних досліджень роботи ерліфтної установки до неї додається шнековий інтенсифікатор (рис. 4.15).

Частота обертання шнеку регулюється за допомогою частотного перетворювача *SIEMENS PM 240-2*, що керується з комп'ютера ліцензійним програмним забезпеченням від компанії *SIEMENS* (рис. 4.21). Встановлюється спочатку 50 потім 100, 150, 200 об/хв.

Таблиця 4.1 – Характеристика енергетичних елементів експериментальної установки

| № п/п | Найменування елемента   | Короткі технічні дані  | Примітки |
|-------|---|--|----------|
| 1     | Компресорна установка C416M                                     | $p_H = 10$ бар<br>$Q_H = 1$ м <sup>3</sup> /хв   |          |
| 2     | Електродвигун<br><i>SIEMENS</i><br>1LE15010CB321AA4-Z           | $P = 0,37$ кВт<br>$n = 1380$ об/хв   |          |
| 4     | Частотний перетворювач<br><i>SIEMENS</i><br><i>PM 240-2</i>     | <i>Input: 1/3ØAC 200-240V ±10%</i><br><i>7,5/4,2A</i><br><i>Output: 3ØAC 0-INPUT V</i><br><i>In=3,2A</i><br><i>Motor: 0,45hp</i> |          |
| 3     | Блок живлення<br><i>Netz.4,5A</i><br><i>TN 162 416 Serie R3</i> | $I = 4,5$ А<br>$U_{вх} = 85...265$ В<br>$U_{вих} = 24$ В   |          |

Таблиця 4.2 – Характеристика елементів експериментальної установки

| № п/п | Найменування елемента   | Компанія-виготовлювач           | Одиниці вимірювання показників | Діапазон вимірювання | Похибка вимірювання | Примітки     |
|-------|---|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|--------------|
| 1     | АЦП <i>D:HW-Easyport-USB-D16A</i>                                   | <i>Festo</i> , Німеччина        | мс                             | 4                    | –                   | 16 розрядний |
| 2     | Блок входів аналоговий <i>Anschlusseinheit-AF TN162247 Serie M8</i> | <i>Festo</i> , Німеччина        | шт.                            | 8                    | –                   | –            |
| 3     | Електронний датчик тиску <i>SDE-10-10V/20mA</i>                     | <i>Festo</i> , Німеччина        | бар                            | 0...10               | ±2,0 %              | -            |
| 4     | Електронний датчик тиску <i>SML-20.0</i>                            | <i>ADZ Nagan</i> , Німеччина    | бар                            | 0...10               | ±0,5 %              | -            |
| 5     | Витратомір Ергомера-125. АА   | ЧНПП "Ергомера", Україна        | м <sup>3</sup> /год            | 0,8...140            | ±2,0%               | -            |
| 6     | Витратомір <i>SFAB-1000U-M12</i>                                    | <i>Festo</i> , Німеччина        | л/хв                           | 0...1000             | ±2,0 %              |              |
| 7     | Датчик обертів (енкодер) <i>1XP8012-10 / 1024</i>                   | <i>SIEMENS</i> , Великобританія | імп/об                         | 1024                 | ±1,5%               | –            |
| 8     | Привід запірної арматури <i>DAPS-0060-090-R-F0305-S.S</i>           | <i>Festo</i> , Німеччина        | Нм                             | 60                   | –                   | –            |
| 9     | Запірна арматура <i>DN50</i>  | <i>Festo</i> , Німеччина        | <i>inch</i>                    | 2"                   | –                   | –            |
| 10    | Реле тиску <i>SDE5-D10-O</i>  | <i>Festo</i> , Німеччина        | бар                            | 0...10               | ±2,0%               | –            |

Випробування дрібномасштабних моделей ерліфтів та інших конструкцій часто використовуються для оцінки їх технічних характеристик внаслідок неможливості проведення випробувань в натуральну величину. Слід зазначити, що при використанні цих моделей існує ряд, труднощів пов'язаних з масштабними коефіцієнтами, при інтерпретації результатів для натурних умов, і має бути врахований ряд важливих факторів, таких як розмір частинок, щільність ґрунту, технологія видобутку, жорсткість матеріалів та ін.

Експериментально встановлено, що розмір часток не впливає на несучу здатність при переході від дрібномасштабної моделі в тому випадку, коли  $D_{50} / D < 0,1$  (де  $D_{50}$  - діаметр частинок ґрунту, в суспензії якого міститься 50% і більше за масою,  $D$  – діаметр підйомної труби) [179]. У планованому експерименті це відношення складає 0,008. Іншою рекомендацією щодо дрібномасштабних досліджень є використання більш розпушеного, порівняно з реальними умовами, піску, тому насипання піщаного ґрунту в бак здійснюватиметься без ущільнення.

#### **4.1.3. Методика та результати експериментальних досліджень**

Випробування ЕУШІ проведені в такому обсязі та послідовності:

- а) отримання витратної характеристики ерліфта при роботі без шнеку в підйомній трубі (традиційна схема);
- б) отримання витратної характеристики ЕУШІ при частоті обертання шнеку 50 об/хв;
- в) отримання витратної характеристики ЕУШІ при частоті обертання шнеку 100 об/хв;
- г) отримання витратної характеристики ЕУШІ при частоті обертання шнеку 150 об/хв;
- д) отримання витратної характеристики ЕУШІ при частоті обертання шнеку 200 об/хв.

Необхідна кількість дослідів на кожному з етапів досліджень визначалася згідно рекомендацій [180-182], виходячи з потрібної точності вимірювання режимних параметрів. Для досягнення відносної похибки результатів 5...10% при довірчій ймовірності 0,9...0,95 необхідно проводити не менше 5 і не більше 18 вимірів на одному рівні контрольованих факторів.

Для отримання витратної характеристики традиційного ерліфта, геометричне занурення змішувача  $h = 1$  м забезпечувалося повним заповненням (до переливу) основної ємності 1. Перед пуском установки проводилися вимірювання атмосферного тиску, вологості повітря і температури навколишнього середовища. Після підготовки установки до проведення експериментів проводився запуск компресора. Закриттям вентиля, встановленого після ресивера (на схемі не показаний), в останньому створювався надлишковий тиск із значенням  $1,5 \text{ кгс/см}^2$ , після чого поступово відкривалася засувка, встановлена після ресивера, і стиснене повітря надходило до загального повітропроводу. Після встановлення постійного тиску на ресивері (незмінності витрати стисненого повітря) і сталості рівня води в водозливні, проводилися вимірювання тиску в змішувачі, витрат повітря та продуктивність ерліфту (протокол 1, додаток Б).

Для отримання достовірних даних витратної характеристики ерліфта традиційної схеми було виконано 5 вимірювань при майже однакових витратах стисненого повітря (протоколи №1...5, додаток А).

Таким чином, були отримані при витраті повітря  $Q_{\text{п}} = 0,2 \text{ м}^3/\text{хв}$  такі значення подачі ерліфта  $Q_{\text{е}} = 1,2; 1,2; 1,5; 1,5; 1,4 \text{ м}^3/\text{год}$ .

Математичне очікування значень подачі ерліфта, отриманих в 5 дослідях

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.1)$$

де  $x_i$  – значення подачі ерліфту в  $i$  – ому досліді;  $n$  – кількість дослідів.

Тоді

$$\bar{x} = \frac{1,2 + 1,2 + 1,5 + 1,5 + 1,4}{5} = 1,36 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Середньоквадратичне відхилення

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}}, \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} S_x &= \\ &= \sqrt{\frac{(1,2 - 1,36)^2 + (1,2 - 1,36)^2 + (1,5 - 1,36)^2 + (1,5 - 1,36)^2 + (1,4 - 1,36)^2}{5 - 1}} \\ &= 0,152 \text{ м}^3/\text{год}. \end{aligned}$$

Дисперсія

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}, \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} S_x^2 &= \\ &= \frac{(1,2 - 1,36)^2 + (1,2 - 1,36)^2 + (1,5 - 1,36)^2 + (1,5 - 1,36)^2 + (1,4 - 1,36)^2}{5 - 1} \\ &= 0,023 \text{ м}^6/\text{год}^2. \end{aligned}$$

Мінімальні та максимальні значення результату вимірювання на межі довірливого інтервалу

$$x_{min} = \bar{x} - h \cdot S_x,$$

$$x_{max} = \bar{x} + h \cdot S_x.$$

Параметр  $h$  вибираємо з таблиці [183] залежно від обсягу вибірки  $n = 5$ , з імовірністю  $P = 0,95$ , відповідно  $h = 1,67$ .

$$x_{min} = 1,36 - 1,67 \cdot 0,152 = 1,11 \text{ м}^3/\text{год},$$

$$x_{max} = 1,36 + 1,67 \cdot 0,152 = 1,61 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Результати обробки експериментальних даних подачі ерліфта при інших значеннях витрати стисненого повітря наведені в таблиці 4.3.

Розрахунковий критерій Фішера

$$F_{розр} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2}, \quad (4.4)$$

$$F_{розр} = \frac{0,023}{0,007} = 3,29.$$

Табличне значення критерію Фішера [183] за ступенями свободи

$$f_{max} = n_{max} - 1 = 5 - 1 = 4, \quad f_{min} = n_{min} - 1 = 4 - 1 = 3 \quad \text{склало} \quad F_{табл} = 9,12.$$

За умовою  $F_{\text{табл}} > F_{\text{розр}}$ , яка виконується ( $9,12 > 3,29$ ), порівнювані дисперсії однорідні.

Таблиця 4.3 – Результати обробки експериментальних даних подачі ерліфта, що працює за традиційною схемою

| Витрата стисненого повітря $Q_{\text{п}}, \text{м}^3/\text{хв}$ | Подача ерліфту $Q_{\text{е}}, \text{м}^3/\text{год}$ | Математичне очікування $\bar{x}_i, \text{м}^3/\text{год}$ | Середньоквадратичне відхилення $S_x, \text{м}^3/\text{год}$ | Дисперсія $S_x^2, \text{м}^6/\text{год}^2$ | Значення на межі довірливого інтервалу $x_{\text{min}} \dots x_{\text{max}}, \text{м}^3/\text{год}$ |
|---|--|---|---|--|---|
| 0,2   | 1,2;<br>1,2;<br>1,5;<br>1,5;<br>1,4                  | 1,36  | 0,152   | 0,023                                      | 1,11...1,61   |
| 0,3   | 4,5;<br>4,6;<br>4,4;<br>4,4;<br>4,7                  | 4,52  | 0,130   | 0,017                                      | 4,30...4,74   |
| 0,4   | 6,0;<br>5,9;<br>6,0;<br>5,9;<br>6,1                  | 5,98  | 0,084   | 0,007                                      | 5,84...6.12   |
| 0,5   | 7,0;<br>7,1;<br>6,9;<br>7,0;<br>6,9                  | 6,98  | 0,084   | 0,007                                      | 6,84...7,12   |
| 0,6   | 7,4;<br>7,5;<br>7,5;<br>7,4;<br>7,6                  | 7,48  | 0,084   | 0,007                                      | 7,34...7,62   |
| 0,7   | 7,8;<br>7,9;<br>8,0;<br>8,0;<br>8,1                  | 7,96  | 0,114   | 0,013                                      | 7,77...8,15   |

Таблиця 4.4 – Розрахункові значення подачі ерліфта

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}$ , м <sup>3</sup> /хв | Подача ерліфта $Q_{е}$ , м <sup>3</sup> /год | Відхилення розрахункових даних від експериментальних $\Delta$ , % |
|---|--|---|
| 0,2   | 1,5  | 10,3%   |
| 0,3   | 4,6  | 1,8%  |
| 0,4   | 6,1  | 2,0%  |
| 0,5   | 7,0  | 0,3%  |
| 0,6   | 7,4  | -1,1%   |
| 0,7   | 7,8  | -2,0%   |

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики отримано за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,68%:

$$Q_{е} = -158,33x^4 + 361,67x^3 - 315,92x^2 + 130,7x - 14,777. \quad (4.5)$$

Розрахункові значення подачі ерліфта  $Q_{е}$  при відповідній витраті стисненого повітря  $Q_{п}$  наведено в таблиці 4.4.

Результат проведеної обробки експериментальних і розрахункових даних ерліфта традиційної конструкції дозволив побудувати витратні характеристики (рис. 4.22).

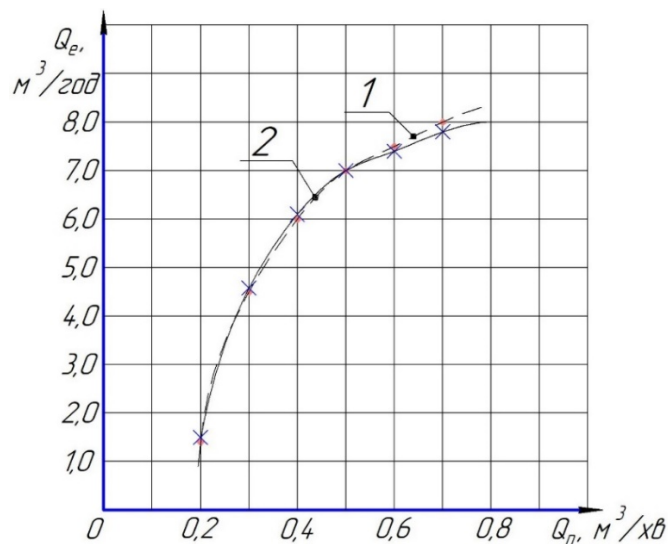


Рисунок 4.22 – Витратна характеристика ерліфту при традиційній роботі:

1 – експериментальна; 2 – розрахункова [додаток Б, табл. Б.1]

Середнє відхилення значень в точках характеристики отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{10,3 + 1,8 + 2,0 + 0,3 - 1,1 - 2,0}{6} = 1,9\%.$$

Для отримання наступної витратної характеристики ЕУШІ з частотою обертання шнеку 50 об/хв вставляємо шнек у підйомну трубу, задаємо відповідні обороти електродвигуна та повторюємо усі дії описані вище.

Для даного експерименту та всіх наступних, які при отриманні витратної характеристики традиційного ерліфта, було проведено по п'ять паралельних дослідів. У додатках подано усереднений протокол відповідного експерименту.

Результати експерименту ерліфта з шнековим інтенсифікатором після їх обробки (додаток В, табл. В.1) дозволили побудувати його витратну характеристику (рис. 4.23).

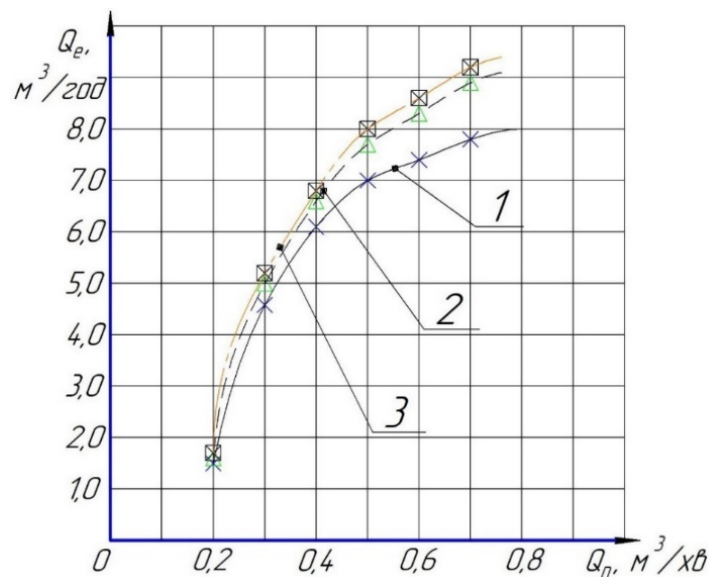


Рисунок 4.23 – Витратна характеристика ерліфта: 1 – розрахункова витратна характеристика при традиційній схемі роботи ерліфта; 2 – експериментальна витратна ЕУШІ при 50 об/хв шнека; 3 – розрахункова витратна ЕУШІ при 50 об/хв шнека

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики отримано за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,94%:

$$Q_e = -187,5x^4 + 431,02x^3 - 374,38x^2 + 152,23x - 17,088.$$

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{18,4 + 2,8 + 3,3 + 3,9 + 4,6 + 3,8}{6} = 6,1\%.$$

Наступним етапом експериментальних досліджень є отримання витратних характеристик ерліфта з шнековим інтенсифікатором з частотою обертанням шнеку 100 об/хв.

За результатами експерименту ерліфта з шнековим інтенсифікатором, після їх обробки (додаток В, табл. В.3) побудовано його витратну характеристику (рис. 4.24).

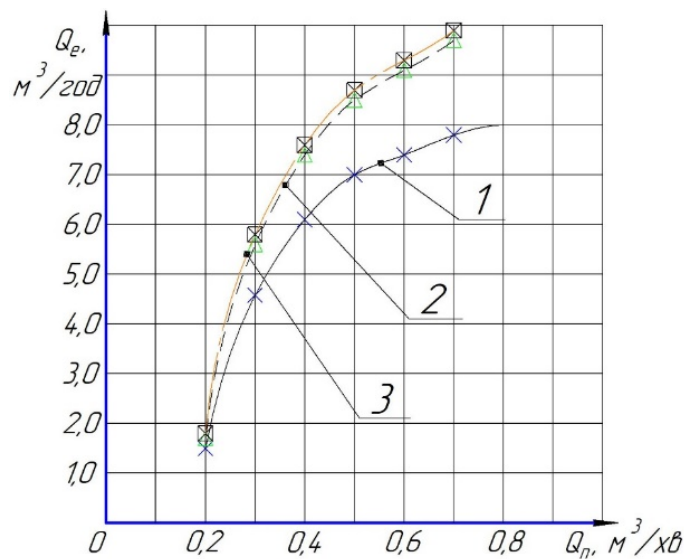


Рисунок 4.24 – Витратна характеристика ерліфта: 1 – розрахункова витратна характеристика при традиційній схемі роботи ерліфта; 2 – експериментальна витратна ЕУШІ при 100 об/хв шнека; 3 – розрахункова витратна ЕУШІ при 100 об/хв шнека

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики отримано за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,64%

$$Q_e = -150x^4 + 381,11x^3 - 360,5x^2 + 156,79x - 18,08.$$

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,4 + 5,0 + 4,1 + 2,1 + 1,5 + 1,6}{6} = 3,8\%.$$

Наступним етапом експериментальних досліджень є отримання витратних характеристик ерліфта з шнековим інтенсифікатором з частотою обертанням шнеку 150 об/хв.

За результатами експерименту ерліфта з шнековим інтенсифікатором після їх обробки (додаток В, табл. В.5), побудовано його витратна характеристика (рис. 4.25).

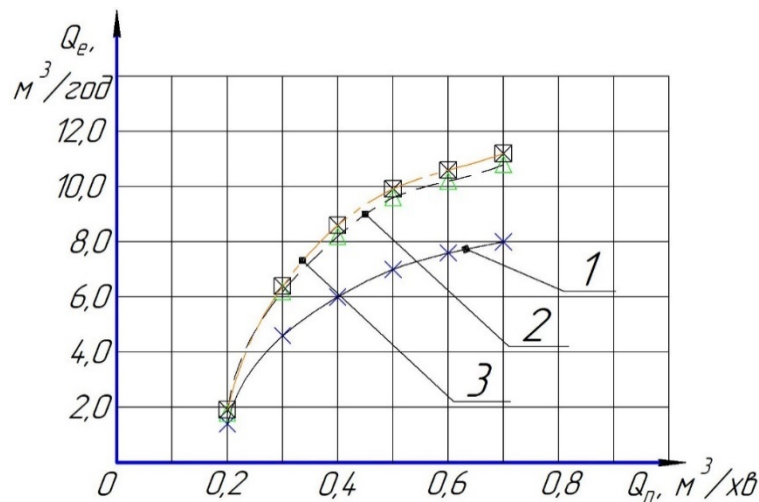


Рисунок 4.25 – Витратна характеристика ерліфта: 1 – розрахункова витратна характеристика при традиційній схемі роботи ерліфта; 2 – експериментальна витратна ЕУШІ при 150 об/хв шнека; 3 – розрахункова витратна ЕУШІ при 150 об/хв шнека

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики отримано за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,38%:

$$Q_e = -216,67x^4 + 512,96x^3 - 457,83x^2 + 189,61x - 21,541.$$

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{9,9 + 3,8 + 3,9 + 2,8 + 4,0 + 3,9}{6} = 4,7\%.$$

Наступним етапом експериментальних досліджень є отримання витратних характеристик ерліфту з шнековим інтенсифікатором з частотою обертанням шнеку 200 об/хв.

Результати експерименту ерліфта з шнековим інтенсифікатором, після їх обробки (додаток В, табл. В.7), дозволили побудувати його витратну характеристику (рис. 4.26).

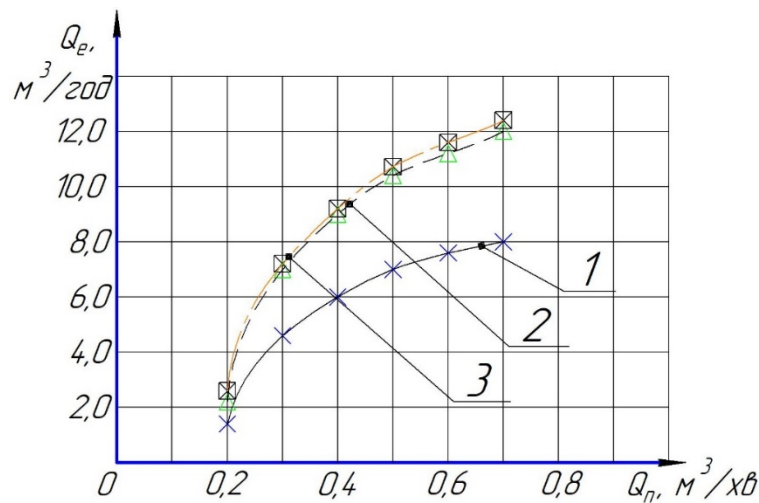


Рисунок 4.26 – Витратна характеристика ерліфта: 1 – розрахункова витратна характеристика при традиційній схемі роботи ерліфта; 2 – експериментальна витратна ЕУШІ при 200 об/хв шнека; 3 – розрахункова витратна ЕУШІ при 200 об/хв шнека

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики, отримане за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,5%,

$$Q_e = -220,83x^4 + 541,02x^3 - 494,04x^2 + 206,9x - 23,405.$$

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{10,1 + 3,4 + 3,3 + 2,5 + 3,8 + 4,2}{6} = 4,6\%.$$

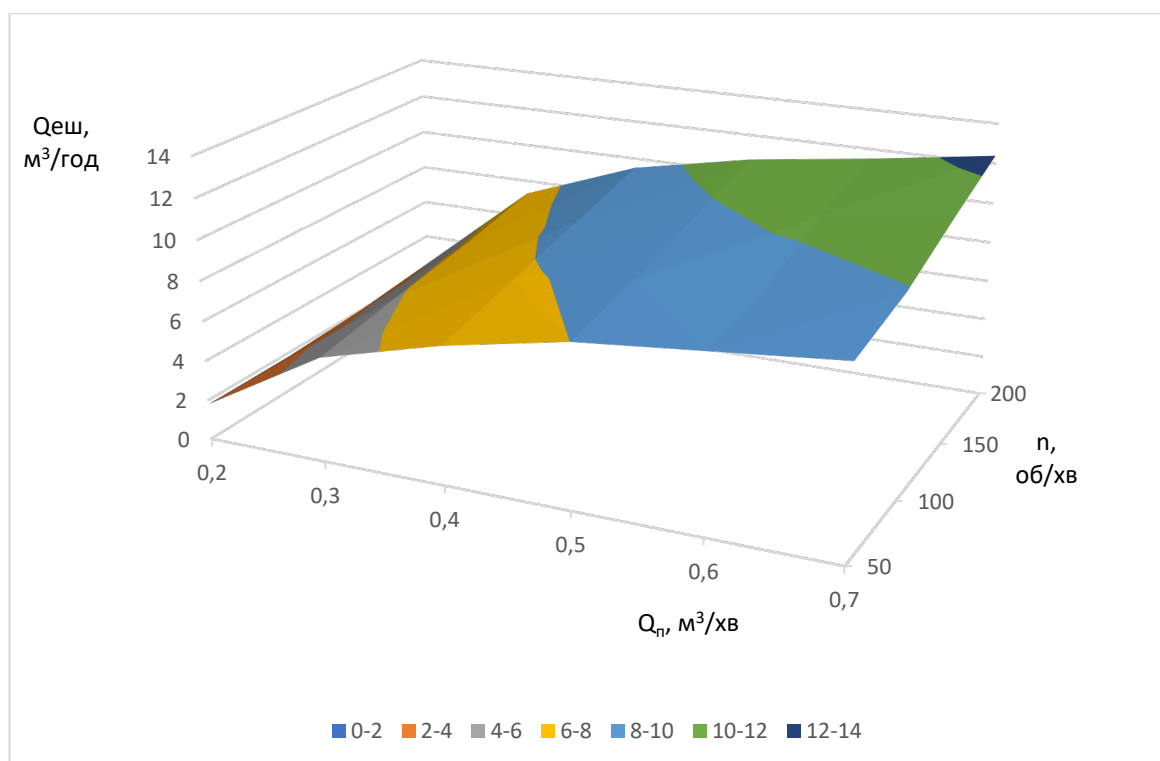


Рисунок 4.27 – Зведена експериментальна витратна характеристика ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором ( $H + h = 1,5$  м,  $D = 0,1$  м,  $d = 0,052$  м,  $\alpha = 0,67$ )

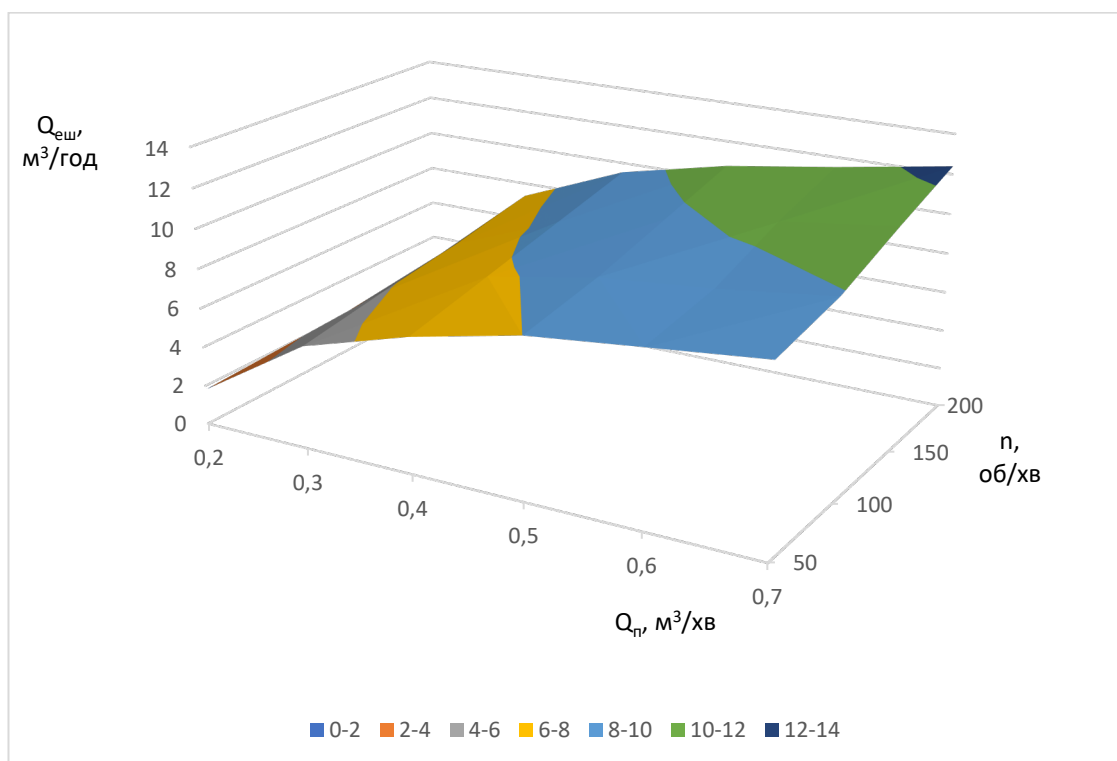


Рисунок 4.28 – Зведена розрахункова витратна характеристика ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором ( $H + h = 1,5$  м,  $D = 0,1$  м,  $d = 0,052$  м,  $\alpha = 0,67$ )

Рівняння регресії експериментальних витратних характеристик ерліфту з шнековим інтенсифікатором та похибки наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Рівняння регресії експериментальних витратних характеристик

| № позн. | Частота обертання шнеку, об/хв | Рівняння регресії  | Середня похибка, % |
|---------|--------------------------------|--|--------------------|
| 1       | 50                             | $Q_e = -187,5Q_{\Pi}^4 + 431,023 Q_{\Pi}^3 - 374,38Q_{\Pi}^2 + 152,23Q_{\Pi} - 17,088$ | 0,94               |
| 2       | 100                            | $Q_e = -150Q_{\Pi}^4 + 381,11Q_{\Pi}^3 - 360,5Q_{\Pi}^2 + 156,79Q_{\Pi} - 18,08$       | 0,64               |
| 3       | 150                            | $Q_e = -216,67Q_{\Pi}^4 + 512,96Q_{\Pi}^3 - 457,83Q_{\Pi}^2 + 189,61Q_{\Pi} - 21,541$  | 0,38               |
| 4       | 200                            | $Q_e = -220,83Q_{\Pi}^4 + 541,02Q_{\Pi}^3 - 494,04Q_{\Pi}^2 + 206,9Q_{\Pi} - 23,405$   | 0,50               |

Побудувавши зведену експериментальну витратну характеристику ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором (рис. 4.27), що представляє собою параболоїд, за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів отримано залежність

$$Q_{eш} = 0,00002n_{ш}^2 - 40,429Q_{\Pi}^2 + 0,028n_{ш}Q_{\Pi} - 0,002n_{ш} + 48,457Q_{\Pi} - 6,71,$$

де  $Q_{eш}$  – продуктивність ерліфту з шнековим інтенсифікатором, м<sup>3</sup>/год;

$n_{ш}$  – частота обертання шнеку в підйомні трубі, об/хв;

$Q_{\Pi}$  – подача повітря компресором, м<sup>3</sup>/хв.

Середня похибка склала 2,55% .

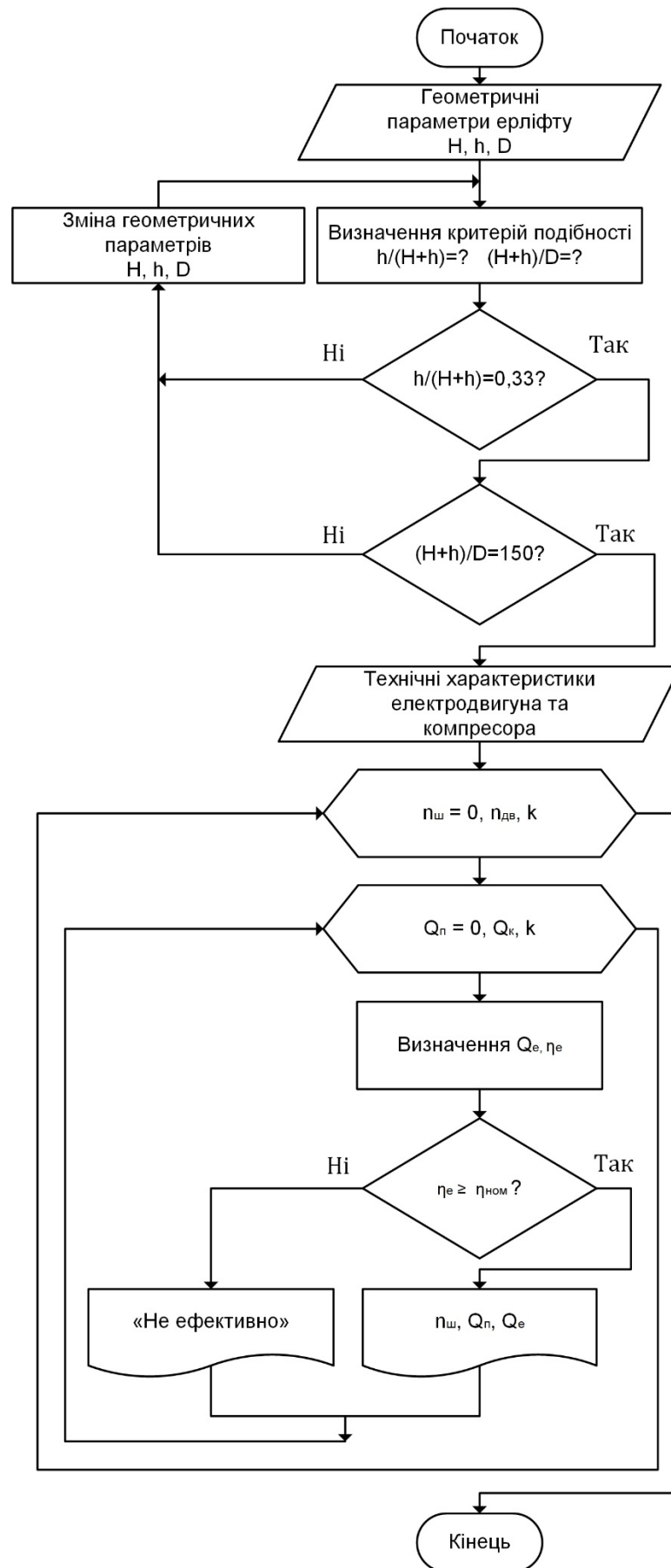


Рисунок 4.29 – Блок-схема алгоритму прогнозування продуктивності ерліфту з шнековим інтенсифікатором

## 4.2. Методика знаходження оптимальних робочих та конструкційних параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором

Зі збільшенням глибини занурення ККД ерліфтної установки збільшується, тому наведемо приклад розрахунку для найбільш важких умов її роботи – при підйомі матеріалу з невеликих глибин [3]. Вихідні дані для проектування (рис. 4.30): необхідна подача ерліфта  $Q_e = 250 \text{ м}^3/\text{год}$ ; висота підйому  $H = 3 \text{ м}$ ; глибина занурення змішувача  $h = 5 \dots 20 \text{ м}$  [184].

### 4.2.1. Знаходження геометричних параметрів підйомної труби

Ерліфт повинен забезпечувати надійну безперебійну роботу у всьому діапазоні абсолютних занурень від 5 до 20 м (можливо і більше) при постійній висоті підйому гідросуміші  $H = 3 \text{ м}$ . Відносне занурення ерліфту:

$$A_{min} = \frac{h_{min}}{H+h_{min}} = 0,63; \quad A_{max} = \frac{h_{max}}{H+h_{max}} = 0,87.$$

Питома витрата повітря для підйому  $1 \text{ м}^3$  пульпи  $q = q_e k_p$  розраховується по експериментальній залежності  $q_e = f(A)$ , показаній на рис. 4.31, або за емпіричною формулою  $q_e = 0,567 A^{-2,2}$  з урахуванням коефіцієнту режиму  $k_p = 1,5$ .

Коефіцієнт подачі  $k_q = 3,68 \sqrt{A \frac{\sqrt{q+(1-1/A)}}{1+q}} = 1,1$ . Еквівалентний діаметр підйомної труби  $D_e = \sqrt[3]{\frac{Q_e}{k_q g}} = 0,2 \text{ м}$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

В подальшому розрахунку беруть підйомну трубу постійного перетину по всій довжині з зовнішнім діаметром 219 мм і товщиною стінки 7 мм. При експлуатації землевсмоктуючих комплексів зношення стінок підйомних труб, всмоктуючих пристроїв та повітровідокремлювачів, за винятком колін повітровідокремлювачів, складає 0,8 ... 1,0 мм на рік. За цими даними і вихідними вимогами (20000 годин роботи ерліфта) вибирають товщину стінки підйомної труби. Витрата повітря приведена до нормальних умов  $Q_n = q Q_e = 9,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ .

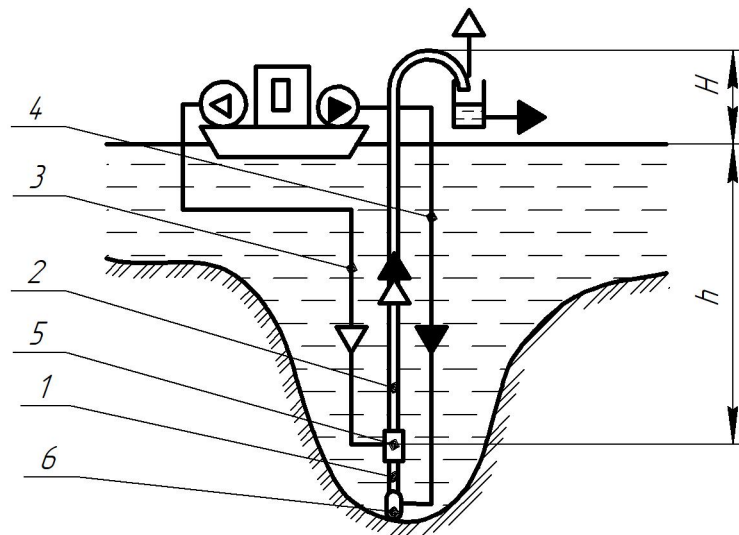


Рисунок 4.30 – Розрахункова схема ерліфтної установки: 1 – підвідна труба; 2 – підйомна труба; 3 – повітроподаючий трубопровід; 4 – водопровід розмиву ґрунту; 5 – змішувач; 6 – ґрунтозабірний пристрій

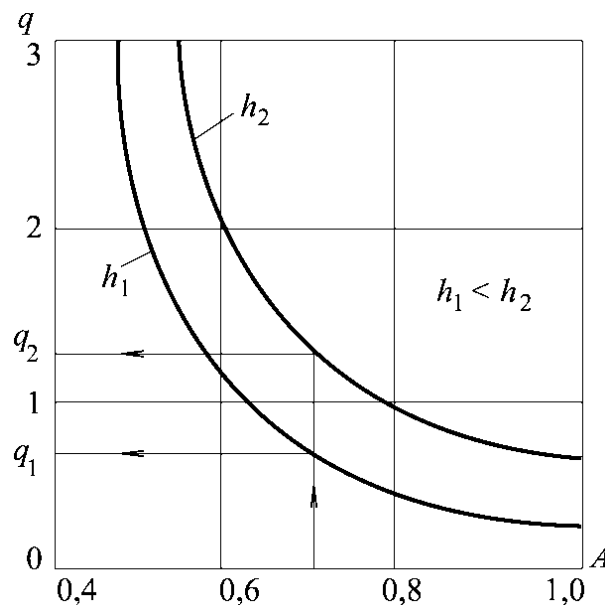


Рисунок 4.31 – Експериментальна залежність питомої витрати повітря  $q$  від відносного занурення  $A$

#### 4.2.2. Знаходження швидкості аерогідросуміші

Критична швидкість при транспортуванні твердого матеріалу по вертикальній трубі  $v_{кр} = v_{оп} + k\sqrt{a_z S_z q D_{вн}}$ , м/с, де  $v_{оп}$  – швидкість обмеженого падіння твердих частинок;  $k$  – дослідна константа, що залежить від крупності часток  $d_k$ : якщо  $k = 2,5$ , то  $d_k = (0...3)$  мм; якщо  $k = (2,5...3,0)$ , то  $d_k = (3...10)$  мм; якщо  $k = (3,0...3,5)$ , то  $d_k = 10$  мм;

$a_z = \frac{\rho_r}{\rho_{ж}}(q_z + 1) - 1 = 3,025$  – диференціальна відносна щільність потоку в  $z$ -му перетині труби. Тут  $\rho_r = 2300 \text{ кг/м}^3$  – густина транспортованого твердого матеріалу;  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$  – густина рідини;  $S_z = \frac{S}{q_z + 1} = 0,29$  – об'ємна концентрація твердого матеріалу в  $z$ -му перерізі підйомної труби;  $S$  – об'ємна концентрація твердого матеріалу в рідині. Ерліфт забезпечує концентрацію  $S = 50\%$ , тобто витрати рідини  $Q_{ж}$  і твердого матеріалу  $Q_r$  майже рівні.

Питома витрата повітря  $q_z = \frac{q P_a}{P_a + P_z} = 0,75$  приведена до тиску в  $z$ -му перерізі підйомної труби;  $P_a = 10^5 \text{ Па}$  – атмосферний тиск;  $P_z$  – тиск в  $z$ -му перерізі труби, Па. Якщо прийняти закон розподілу тисків у підйомній трубі лінійним, то тиск на вході в підйомну трубу, нехтуючи втратами в трубі, що підводиться, буде  $P_z = \rho g h = 1,96 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Для умови входу в підйомну трубу  $q_z = q_{вх}$ .

Швидкість вільного падіння частинок:

$$v_{вп} = \sqrt{\frac{4}{3} g \frac{d_k}{C_0} a_z} = 0,37 \text{ м/с},$$

де  $C_0 = 0,86$  – коефіцієнт опору руху твердих частинок у повітряному потоці; крупність частинок приймаємо  $d_k = 3 \text{ мм}$ .

Швидкість обмеженого падіння частинок твердого матеріалу:

$$v_{оп} = v_{жс} (1 + S_z)^2 \left(1 - \frac{d_k}{D_{вн}}\right)^2 = 0,188 \text{ м/с},$$

де  $D_{вн} = 205 \text{ мм}$  – внутрішній діаметр підйомної труби.

Таким чином, критична (мінімальна) швидкість транспортування матеріалу  $v_{кр} = 1,77 \text{ м/с}$ . Швидкість руху пульпи на вході в підйомну трубу  $v_{вх} = \frac{4Q_{ж}(1+q_{вх})}{3600\pi D_{вн}^2} = 3,7 \text{ м/с}$ .

Швидкість частинок на вході в трубу перевищує критичне значення швидкості:  $v_{вх} > v_{кр}$ . Це означає, що на початку руху по підйомній трубі вже досягається швидкість, що забезпечує стійкий режим роботи з підйому твердого матеріалу в ерліфті. При русі вгору швидкість аерогідросуміші зростає в результаті розширення стисненого повітря. Тому можна стверджувати, що і в вихідному перерізі труби  $v_{вих} > v_{кр}$ .

Перевірці розрахунком піддається найбільш несприятливий щодо досягнення транспортних швидкостей ділянка підйомної труби. Таким чином, підйомна труба з внутрішнім діаметром  $D_{\text{вн}} = 205$  мм відповідає вимогам створення необхідних швидкостей для транспортування пульпи.

#### 4.2.3. Знаходження геометричних параметрів підвідної труби

Швидкість у підвідній трубі, необхідна для транспортування твердого матеріалу:

$$v_n = v_n + k_3 \sqrt{\frac{g d_k}{C_b} \frac{2}{3} \left( \frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right)} = 0,82 \text{ м/с},$$

де  $v_n = 0,5$  м/с – початкова швидкість руху гідросуміші;  $k_3 = 1,2$  – коефіцієнт запасу;  $C_b = 0,25$  – коефіцієнт опору при русі твердого тіла в воді.

Дійсна швидкість гідросуміші (твердий матеріал + вода) у підвідній трубі при обраному її діаметрі  $d_3 = 158$  мм і товщині стінки  $\delta = 8$  мм:

$$v_n^d = \frac{4Q_3}{3400\pi d_{\text{вн}}^2} = 4,3 \text{ м/с},$$

де  $d_{\text{вн}} = d_3 - 2\delta = 143$  мм – внутрішній діаметр підвідної труби. Так як  $v_n^d > v_n$ , то у підвідній трубі забезпечуються надійні умови для транспортування твердого матеріалу.

#### 4.2.4. Знаходження геометричних параметрів трубопроводу, що подає повітря

Діаметр повітряподаючого трубопроводу визначають, виходячи з того, що втрати в повітропроводі не повинні перевищувати  $0,1\rho gh$  (м):

$$d_{\text{п}} = \sqrt[3]{\frac{8D\rho_{\text{п}}^{\text{сп}} l_{\text{п}} Q_{\text{п}}^2}{\pi^2 g (0,1\rho h + \rho_{\text{п}}^{\text{сп}} H_{\text{п}})'}}$$

де  $D = 0,03$  – коефіцієнт Дарсі;  $l_{\text{в}} = h + 8 = 28$  м – довжина повітропроводу;  $H_{\text{в}} = 20$  м – довжина вертикальної частини повітропроводу, м;  $\rho_{\text{п}}^{\text{сп}} = 1,3$  кг/м<sup>3</sup> – середня густина повітря в повітропроводі. Розрахункове значення діаметра повітропроводу  $d_{\text{в}} = 0,072$  м. Тому приймають трубу із зовнішнім діаметром  $d_{\text{п}} = 75$  мм

та товщиною стінки  $\delta = 4$  мм. Тоді внутрішній діаметр труби  $d_{\text{вн}} = d_3 - 2\delta = 67$  мм.

#### **4.2.5. Знаходження геометричних параметрів шнекового інтенсифікатора**

Зовнішній діаметр шнеку  $D_{\text{ш}} = D / 3 = 68,33$  мм. Приймаємо шнек за ГОСТ 24328-80 з зовнішнім діаметром  $D_{\text{ш}} = 80$  мм, внутрішнім  $d_{\text{ш}} = 32$  мм та кроком  $H_{\text{ш}} = 56$  мм.

Таким чином, гідравлічний розрахунок ерліфтної установки виконаний. Далі вибирають основне і допоміжне обладнання [185]: компресор, насос розмиву ґрунту і підживлення (якщо воно необхідне), розраховують всмоктуючий пристрій, змішувач, повітровідокремлювач, прийомну ємність, конструкцію порталу та ін.

Послідовність розрахунку основних геометричних та технологічних параметрів визначається за алгоритмом інженерного розрахунку ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором (рис. 4.32).

Ерліфтна установка забезпечує велику глибину розробки (до сотень метрів), високу концентрацію та розмір твердої фракції при підйомі ТКК. Продуктивність установки в 2,0 ... 2,5 рази вище, ніж у земснарядів аналогічного типу. Вона має більший діапазон по подачі твердого матеріалу в пульпі.

Дальність транспортування пульпи при рівній її концентрації збільшується на 20 ... 30% завдяки зменшенню опору на всмоктуванні ґрунтозбірною пристроєм. Питоме енергоспоживання на  $1 \text{ м}^3$  твердого матеріалу в середньому на 20% нижче, ніж при земснарядному способі видобутку.

Установка дозволяє добувати і транспортувати ТКК, не порушуючи природного ландшафту, що відповідає найвищим вимогам екології та безпечності виконання робіт.

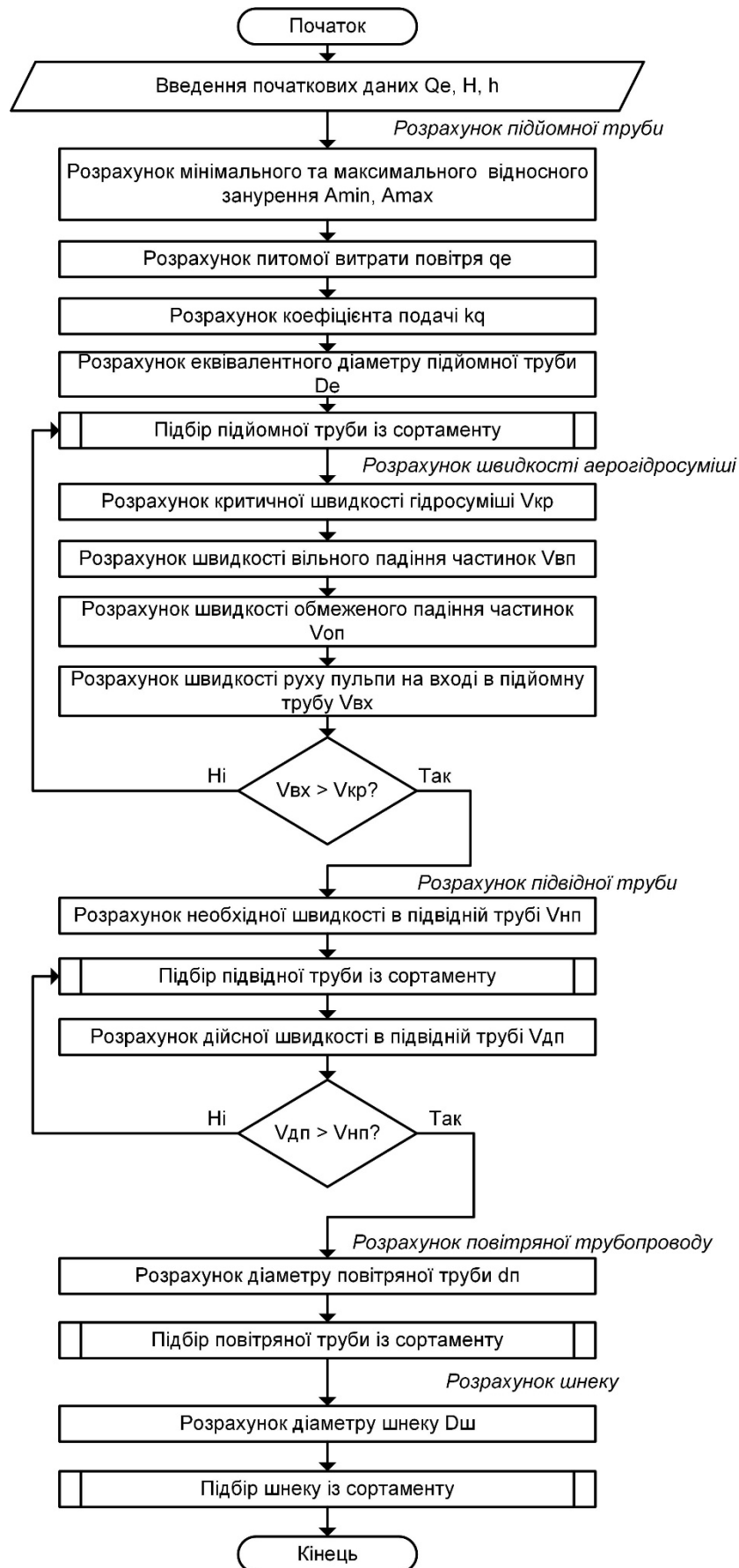


Рисунок 4.32 – Блок-схема алгоритму розрахунку ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором

### 4.3. Автоматичне регулювання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором

#### 4.3.1. Автоматичне регулювання подачі стисненого повітря компресором ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором

Ми визначили, що ерліфтні установки відрізняються плаваючими витратними характеристиками та їх похідними (кривими питомих витрат, кривими ККД та ін.). Положення перерахованих характеристик в плоских системах координат в значній мірі визначається глибиною занурення та тиском у вузлі змішування гідросуміші зі стисненим повітрям.

Висока енергоємність та велика питома витрата енергії пов'язана з некерованою витратою стиснутого повітря в підйомній трубі ерліфта. Відношення витрати вільного повітря до подачі ерліфта  $q = \frac{Q_6}{Q_3}$  є найважливішим безрозмірним енергетичним параметром ерліфта - питомою витратою повітря. Питома витрата повітря пропорційна ККД ерліфтної установки, який визначається відношенням корисної потужності до потужності потоку стисненого повітря, що вводиться:

$$\eta = \frac{\rho gh}{qp_a \ln \left( 1 + \frac{\rho gh}{p_a} \right)} \quad (4.6)$$

В умовах роботи шнекового інтенсифікатора для досягнення оптимального режиму роботи ерліфта, нагнітач повинен мати широкий діапазон робочих зон і регулювати подачу повітря залежно від притоку рідини  $Q_{пр}$ . У свою чергу, властивість саморегулювання спрощує побудову систем автоматичного управління їх витратними параметрами.

Тому для досягнення енергоефективного режиму установки має сенс використовувати систему автоматичного регулювання продуктивності компресора ерліфтної установки.

Основне завдання регулювання режиму роботи компресорів полягає в підтримці постійного заданого тиску стисненого повітря в подаючій трубі

шляхом зміни продуктивності компресорів і відповідно споживання стисненого повітря. У загальному випадку таке регулювання може бути здійснено впливом на комунікації, компресор або його привід.

*Регулювання дроселюванням на всмоктуванні* передбачає встановлення у всмоктуючому трубопроводі керованого дроселюючого пристрою (заслінки). Зменшуючи прохідний перетин дроселя, збільшують його опір і знижують тиск повітря, що надходить у нагнітач або компресор. При плавній зміні тиску повітря також плавно змінюється продуктивність компресора. Таке регулювання просте в реалізації, але не економне.

Найбільш ефективно та перспективно регулювання продуктивності компресорів впливом на їх привід. Один з видів такого регулювання – періодичні зупинки компресора, здійснювані зупинкою двигуна або від'єднанням компресора від двигуна за допомогою електромагнітних або гідравлічних муфт. Регулювання продуктивності в обох випадках ступінчасте. Регулювання зупинкою двигуна проводиться, як правило, на компресорах з приводними двигунами потужністю до 300 кВт (продуктивністю до 60 м<sup>3</sup>/хв) [186].

Автоматичне регулювання продуктивності компресорів здійснюється в системах автоматичної стабілізації тиску стисненого повітря. Такі системи можуть бути дискретними і неперервними та реалізуються за допомогою різних регуляторів загального призначення відповідно дискретної і неперервної дії. Вони будуються на основі гідравлічних та електричних ПІ-регуляторів. У даний час найбільш перспективними для контролю витрати повітря в пневмомережі та компресорній станції є мембранні електричні дифманометри *ДМЕ*.

У зв'язку з цим пропонується структурна схема системи автоматичного регулювання продуктивності (САР), яка здійснює регулювання частоти обертання приводного електродвигуна компресорної установки.

Об'єкт регулювання в САК водовідливної установкою – водозбірник  $B$ , а його вихідний параметр – рівень води  $H$ , який необхідно підтримувати постійним шляхом зміни продуктивності  $Q_n$  компресора. Збурюючий вплив у цій системі – притік води  $Q_{пр}$ . Диференціальне рівняння такого об'єкта:

$$\frac{dH}{dt} = k_B (Q_{np} - Q_n), \quad (4.7)$$

де  $dH/dt$  – швидкість зміни рівня води в водозбірнику, м/с;  $Q_{np}$  – притік води, м<sup>3</sup>/с;  $k_B = 1/F$  – передавальний коефіцієнт об'єкта ( $F$  – площа водозбірника, м<sup>2</sup>);  $Q_n$  – продуктивність насоса, м<sup>3</sup>/с.

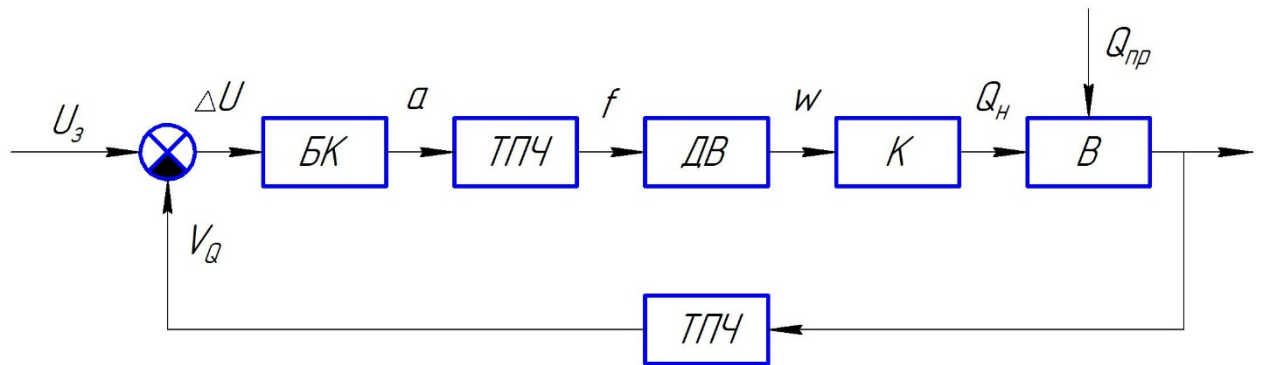


Рисунок 4.33 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання тиску

Об'єкт являє собою астатичну ланку першого порядку, передавальна функція якого:

$$W_B(p) = \frac{H(p)}{(Q_{np} - Q_n)(p)} = \frac{k_B}{p} \quad (4.8)$$

Нагнітач характеризується кутовою швидкістю робочого колеса  $\omega$  на вході та продуктивністю  $Q_n$  на виході. Він може бути представлений аперіодичною ланкою першого порядку з передавальною функцією:

$$W_H(p) = \frac{k_H}{T_H p + 1}. \quad (4.9)$$

Кутова швидкість робочого колеса нагнітача змінюється шляхом зміни частоти  $f$  напруги, що живить електродвигун. Регулювання цієї частоти в САК здійснюється тиристорним перетворювачем частоти ТПЧ, на який подається сигнал управління  $\alpha$  від блоку управління БК. Вимірювання вихідного параметра об'єкта  $H$  проводиться датчиком рівня ДР. Знак та рівень сигналу неузгодженості  $\Delta U$  між фактичним  $U_\phi$  та заданим  $U_3$  значеннями рівнів визначає характер вихідного сигналу блоку управління БК. Сигнали  $U_3$  та  $U_\phi$  відповідно



Основною вимогою до налаштування системи автоматичного регулювання продуктивності компресорної установки, є те, що перерегулювання вихідної величини (тиску в пневматичній мережі) не повинно перевищувати 25% від заданого. Невиконання цієї вимоги може призвести до аварійної ситуації або до виходу з ладу установки.

У структурній схемі системи автоматичного регулювання є два контури регулювання. Головний контур – зовнішній контур даної схеми, утворений датчиком тиску для вимірювання тиску на найбільш віддаленій ділянці подаючої труби і регулятором тиску. Внутрішній контур утворено тахогенератором для вимірювання частоти обертання двигуна і регулятором частоти обертання приводного електродвигуна компресора. Внутрішній контур проектованої САР забезпечуватиме підтримання необхідної частоти обертання електродвигуна в усьому діапазоні регулювання тиску.

САР (рис. 4.34) складається з ланок:

$W_{\text{рег.т.}}$  – передавальна функція регулятора тиску;

$W_{\text{рег.ч.о}}$  – передавальна функція регулятора частоти обертання приводного електродвигуна компресора;

$W_{\text{пер}}(p) = \frac{k_{\text{пер}}}{T_{\text{пер}}p+1} = \frac{1}{0,01p+1}$  – передавальна функція автономного інвертора АВК;

$W_{\text{ЕД}}(p) = \frac{k_{\text{Д}}}{T_{\text{е}}p+1} = \frac{197,636}{0,03p+1}$  – передавальна функція електромагнітної складової двигуна;

$W_{\text{МД}}(p) = \frac{1}{T_{\text{м}}p+1} = \frac{1}{1,082p+1}$  – передавальна функція механічної складової двигуна;

$W_{\text{к}}(p) = \frac{1}{T_{\text{к}}p+1} = \frac{0,5}{1,5p+1}$  – передавальна функція компресора;

$W_{\text{н.с.}}(p) = \rho_{\epsilon} \frac{1-me^{-\varphi}}{1+me^{-\varphi}} = 0,29125 \frac{1-0,333e^{-41,44p}}{1+0,333e^{-41,44p}}$  – передавальна функція пневмомережі;

$W_{\text{д.ч.о.}}$  – передавальна функція датчика частоти обертання;

$W_{\text{д.т.}}$  – передавальна функція датчика тиску.

Інерційністю датчиків тиску та частоти обертання можна знехтувати. Для практичних розрахунків їх можна представити у вигляді пропорційних ланок. У дослідженні використані поодинокі зворотні зв'язки, тоді  $W_{\text{д.ч.о.}}(p) = k_{\text{д.ч.о.}} = 1$ ;  $W_{\text{д.т.}}(p) = k_{\text{д.т.}} = 1$ .

За допомогою програми виконано моделювання реакції внутрішнього контуру регулювання частоти обертання двигуна на вхідний вплив без регулятора частоти обертання і після його введення.

Для регулювання частоти обертання був використаний інтегруючий регулятор з налаштуванням на модульний оптимум. Налаштування на модульний оптимум необхідне для підтримки частоти обертання двигуна на певному рівні.

Передавальна функція І-регулятора:

$$W_{\text{рег.ч.о.}}(p) = \frac{\beta_{\text{ч.о.}}}{p},$$

де  $\beta_{\text{ч.о.}} = 0,002$ .

Передавальна функція ПІ-регулятора тиску:

$$W_{\text{рег.т.}}(p) = \frac{\beta_{\text{т.}}(T_{\text{рег.т.}}p + 1)}{T_{\text{рег.т.}}p},$$

де  $\beta_{\text{т.}} = 1,39$ ;  $T_{\text{рег.т.}} = 1,122$  с.

#### **4.3.2. Модель системи автоматичного регулювання витрати повітря компресора**

Структурна схема змодельованого внутрішнього контуру, який складається з передавальної функції автономного інвертора Х1, передавальної функції механічної складової асинхронного двигуна Х2, передавальної функції електромагнітної складової асинхронного двигуна Х3 і передавальної функції регулятора частоти обертання Х4, наведена на рисунку 4.6.

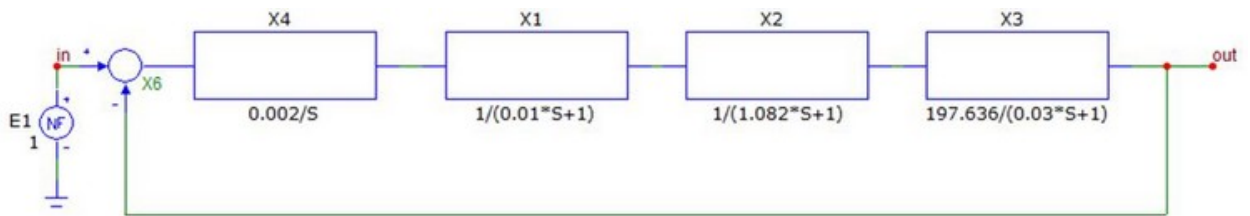


Рисунок 4.35 – Структурна схема внутрішнього контуру САР з регулятором частоти обертання

Перехідні процеси, які отримані при моделюванні представлені на рисунку 4.36.

На рисунку позначено: крива 1 – до введення регулятора частоти обертання, крива 2 – з регулятором частоти обертання, 3 – вхідний поетапний вплив. Як видно, введення регулятора, налаштованого на модульний оптимум, дозволив звести до нуля статичну похибку, а також зменшити величину перерегулювання до  $\sigma = 3.5\%$  (до введення регулятора частоти обертання  $\sigma = 21.8\%$ ).

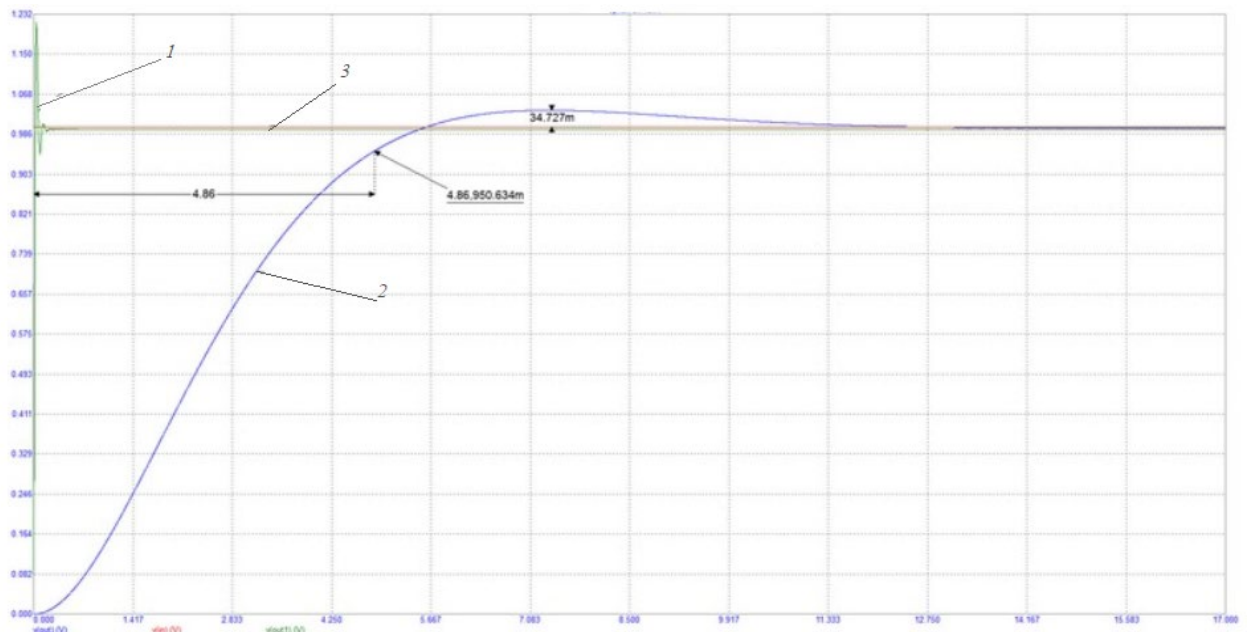


Рисунок 4.36 – Перехідні характеристики моделювання внутрішнього контуру САР

Для зовнішнього контуру регулювання САР було виконано моделювання при використанні різних типів регуляторів, з метою вибору найбільш

оптимального. Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором тиску в зовнішньому контурі та І-регулятором частоти обертання у внутрішньому контурі при подачі збурюючого впливу в зовнішній контур регулювання наведена на рисунку 4.37.

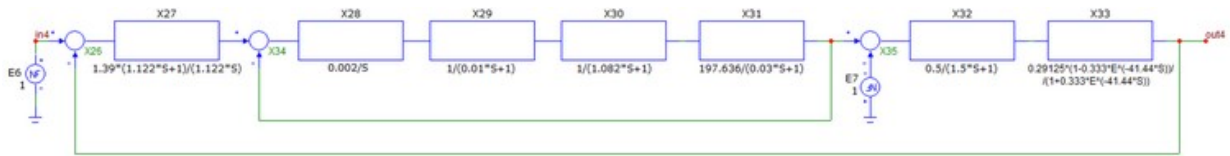


Рисунок 4.37 – Структурна схема моделювання САР з ПІ-регулятором тиску в зовнішньому контурі та І-регулятором частоти обертання у внутрішньому контурі при подачі збурюючого впливу в зовнішній контур регулювання

Перехідні процеси досліджуваної САР при використанні різних типів регуляторів в зовнішньому контурі регулювання наведені на рисунку 4.38.

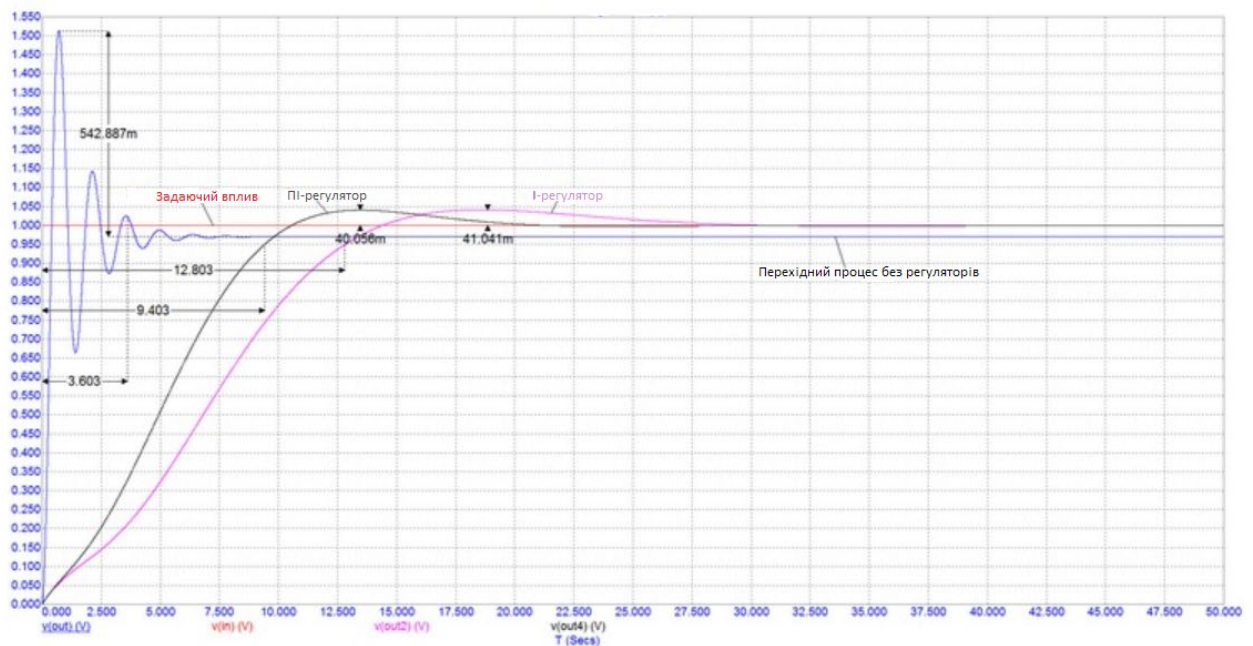


Рисунок 4.38 – Перехідний процес досліджуваної САР при використанні різних типів регуляторів тиску в зовнішньому контурі регулювання та І-регулятора частоти обертання у внутрішньому контурі регулювання

Аналізуючи перехідний процес досліджуваної САР (рис. 4.38), бачимо, що спочатку не регульована система має значну величину перерегулювання –

54.3%, що може призвести до виходу з ладу установки. Показники якості САР при використанні І-регулятора в зовнішньому контурі досліджуваної системи не відповідають налаштуванню на технічний оптимум через те, що час перехідного процесу  $t_{п.п} = 12,8$  с перевищує розрахункове значення  $t_{п.п} = 12,32$  с. Перехідний процес з використанням ІІІ-регулятора тиску в зовнішньому контурі регулювання та І-регулятора частоти обертання приводного електродвигуна нагнітача у внутрішньому контурі регулювання забезпечує необхідні показники якості системи і налаштування САР на технічний оптимум.

Отже, для забезпечення стабілізації тиску повітря в подаючій трубі в ерліфтній установці з шнековим інтенсифікатором було розроблено автоматичну систему регулювання продуктивності компресорної установки шляхом регулювання частоти обертання приводного електродвигуна компресора. При цьому шляхом моделювання САР в середовищі *MATLAB Simulink* встановлено, що для двоконтурної САР необхідно застосовувати у внутрішньому контурі регулювання І-регулятор частоти обертання приводного електродвигуна компресора, а в зовнішньому контурі ІІІ-регулятор тиску повітря.

#### **4.4. Розрахунок економічної ефективності застосування ерліфту з шнековим інтенсифікатором**

За вихідні дані беремо ерліфт на базі спеціального судна днопоглиблювального флоту *DRW-400*. Продуктивність такої ерліфтної установки була 600 м<sup>3</sup>/год. Після модернізації продуктивність зросла на 49,5% та склала 897 м<sup>3</sup>/год.

Капітальні вкладення.

Капітальні вкладення пов'язані з витратами на придбання  $K_0$  [грн] ерліфта, вартість монтування ерліфта на палубу судна та його монтажу  $K_m$  [грн], вартість будівельно-монтажних робіт, пов'язаних з введенням ерліфту в експлуатацію на даному об'єкті –  $K_c$  [грн].

Вартість ерліфта для днопоглиблювальних робіт продуктивністю  $\Pi = 897$  м<sup>3</sup>/год, та маса ерліфта  $m_{\text{пр}} = 25,4$  т, складатиме:

$$K_0 = K'_0 \frac{m_{\text{пр}}}{m'_{\text{пр}}}, [\text{грн}]$$

де  $K'_0$  - вартість ерліфта з продуктивністю 600 м<sup>3</sup>/год (ближчого за своєю масою до розрахункової);  $K'_0 = 948200$  грн;  $m'_{\text{пр}}$  – маса вихідного ерліфта, т;  $m'_{\text{пр}} = 25,1$  т.

$$K_0 = 948200 \frac{25,4}{25,1} = 959533,1 \text{ грн.}$$

Вартість монтажу і доставки ерліфта визначаємо за формулою:

$$K_M = C_M m_{\text{пр}}, [\text{грн}]$$

де  $C_M$  – питома вартість монтажу, грн/т;  $C_M = 2326,5$  грн/т;

$$K_M = 2326,5 \cdot 25,1 = 58395,15 \text{ грн.}$$

У кожному випадку додаткові будівельно-монтажні роботи із введення ерліфта в експлуатацію не проводяться. Однак, при монтажі слід враховувати, що в обсяг поставки ерліфту не входять і забезпечується замовником наступні матеріали і вироби: мастильні матеріали для заповнення редукторів та змащення механізмів, пристосування і підйомні засоби для монтажу, інструмент для монтажу. Запасні частини на ерліфт також постачаються за окрему плату.

Вартість системи керування складає:

$$K_k = C_k N, [\text{грн}]$$

де  $C_k$  – питомі витрати на придбання системи керування, грн/кВт;  $C_k = 2000$  грн/кВт;

$N$  – потужність електродвигунів, кВт;  $N = 250$  кВт;

$$K_k = 2000 \cdot 250 = 500000 \text{ грн.}$$

Підраховуємо капітальні вкладення на один ерліфт:

– базова машина

$$K' = K'_0 + K_M = 948200 + 58395,5 = 1006595,5 \text{ грн;}$$

– модернізована машина

$$K'' = K_0 + K_M + K_k = 959533,1 + 58395,5 + 500000 = 1517928,6 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування.

Норми амортизаційних відрахувань встановлені у відсотках від балансової вартості основних фондів. Амортизаційні відрахування для фінансування капітального ремонту є цільовим фондом і знаходяться в розпорядженні підприємства або організації

$$A = \frac{KH_a}{100 \% \text{ річних}}, [\text{грн}]$$

де  $H_a$  – норма амортизаційних відрахувань, %:  $H'_a = 8,8$ ;

$H''_a = 8,0$  % - за рахунок подовження терміну експлуатації ерліфту.

Амортизаційні відрахування:

– базова машина

$$A' = \frac{K'H'_a}{100} = \frac{1006595,5 \cdot 8,8}{100} = 88580,4 \text{ грн};$$

– модернізована машина

$$A'' = \frac{K''H''_a}{100} = \frac{1517928,6 \cdot 8,0}{100} = 121434,3 \text{ грн.}$$

Заробітна плата.

За зміну на ерліфтній установці працюють два працівники: оператор та помічник.

Відповідно до єдиного тарифно-кваліфікаційного довідника робіт та професій робітників керування ерліфтом, оснащеним різними вантажо-завантажувальними пристроями, з продуктивністю  $\Pi = 600 \text{ м}^3/\text{год}$  при виконанні робіт по днопоглибленню середньої складності виконується оператором третього розряду. Помічник оператора має другий розряд. При модернізації ерліфту розряди робітників підвищуються до відповідно четвертого та третього.

Основна заробітна плата за зміну робітників, зайнятих на обслуговуванні ерліфту

$$C_{з.о.} = (z_{он} + z_{доп}) t_p, [\text{грн}]$$

де  $z_{он}$  – середня погодинна тарифна ставка працівника (оператора), грн/год ;

$z_{\text{доп}}$  – середня погодинна тарифна ставка помічника працівника, грн/год;

$t_p$  – тривалість зміни, год;  $t_p = 8$  год;

Основна заробітна плата з обслуговування:

– базової машини:

$$C'_{3.0} = (z'_{\text{оп}} + z'_{\text{доп}})t_p = (44,88 + 40,04) \cdot 8 = 679,36 \text{ грн};$$

– модернізованої машини:

$$C''_{3.0} = (z''_{\text{оп}} + z''_{\text{доп}})t_p = (52,14 + 45,44) \cdot 8 = 780,64 \text{ грн.}$$

Величина заробітної плати за зміну обслуговуючого персоналу з врахуванням доплат до основної заробітної плати та нарахувань до неї:

$$C_{3.с.} = K_{\text{д}} K_{\text{н}} C_{3.0.} \text{ [грн]}$$

де  $K_{\text{д}}$  – коефіцієнт, враховуючий доплати до основної заробітної плати,  $K_{\text{д}}=1,25$ ;

$K_{\text{н}}$  – коефіцієнт, враховуючий нарахування на заробітну плату,  $K_{\text{н}}= 1,08$ ;

Заробітна плата за зміну з обслуговування:

– базової машини:

$$C'_{3.с.} = K_{\text{д}} K_{\text{н}} C'_{3.0.} = 1,25 \cdot 1,08 \cdot 679,36 = 917,14 \text{ грн};$$

– модернізованої машини:

$$C''_{3.с.} = K_{\text{д}} K_{\text{н}} C''_{3.0.} = 1,25 \cdot 1,08 \cdot 780,64 = 1053,86 \text{ грн.}$$

Витрати на заробітну плату за рік при двозмінній роботі:

$$C'_3 = C'_{3.с.} n_{3\text{М}} t_{3\text{М}}, \text{ [грн]}$$

де  $n_{3\text{М}}$  – кількість робочих днів в одному році;  $n_{3\text{М}}=260$ ;

$t_{3\text{М}}$  – кількість змін в робочому дні;  $t_{3\text{М}}= 2$ .

Витрати на заробітну плату за рік з обслуговування :

– базової машини:

$$C'_3 = C'_{3.с.} n_{3\text{М}} t_{3\text{М}} = 917,14 \cdot 260 \cdot 2 = 476912,8 \text{ грн};$$

– модернізованої машини :

$$C''_3 = C''_{3.с.} n_{3\text{М}} t_{3\text{М}} = 1053,86 \cdot 260 \cdot 2 = 548007,2 \text{ грн.}$$

Затрати на поточний ремонт та технічне обслуговування.

Вказані витрати плануються відповідно до нормативними міжремонтних термінів, тривалості та трудомісткості ремонту обладнання ерліфта.

Нормативно-попереджувальна система ремонту ерліфта, призначена для підтримки його в робочому стані. Для знаходження даних витрат необхідно підрахувати трудомісткості ремонту в мото-годинах (крім капітального) та визначити річні витрати на поточний ремонт та технічні огляди з врахуванням вартості придбання запасних частин і ремонтних матеріалів.

Річні витрати на ремонт ерліфту визначаємо з врахуванням дійсного числа годин роботи:

$$C_p = \frac{C_{об}}{T_{кап}} T_{річ}, [\text{грн}]$$

де  $C_{об}$  – вартість утримання ерліфта в робочому стані протягом періоду між капітальними ремонтами, грн

$$C'_{об} = 155000 \text{ грн}; \quad C''_{об} = 160000 \text{ грн};$$

$T_{кап}$  - число годин роботи машини між капітальними ремонтами;

$$T_{кап} = 24300 \text{ год};$$

$T_{річ}$  - фактичне число годин роботи машини протягом року;

$$T_{річ} = t_p n_{зм} t_{зм} = 8 \cdot 260 \cdot 2 = 4160 \text{ год.}$$

– на базову машину:

$$C'_p = \frac{C'_{об}}{T_{кап}} T_{річ} = \frac{155000}{24300} 4160 = 26535 \text{ грн};$$

– на модернізовану машину:

$$C''_p = \frac{C''_{об}}{T_{кап}} T_{річ} = \frac{160000}{24300} 4160 = 27391 \text{ грн.}$$

Вартість за рік витрат електроенергії, що споживається електродвигунами механізмів ерліфту, розраховуємо за формулою

$$C_e = N \left( \alpha_1 t_2 T_{зм} t_3 n_{зм} t_{зм} + \frac{\alpha_2}{\cos \varphi} \right), [\text{грн}]$$

де  $N$  – встановлена потужність електродвигунів, кВт;

$\alpha_1$  – тариф за 1 кВт/год витраченої енергії, грн;

$$\alpha_1 = 1,68 \text{ грн} \cdot \text{кВт/год};$$

$t_2$  – коефіцієнт, що враховує неодноразовість роботи електродвигунів,

$$t_2 = 0,6;$$

$T_{зм} = t_1 t_p$  – чистий час роботи машини в зміну, год;

$t_1$  – коефіцієнт, що враховує тривалість роботи двигунів в зміну,  $t_1 = 0,85$ ;

$$T_{зм} = 0,85 \cdot 8 = 6,8 \text{ год};$$

$t_3$  – коефіцієнт, що враховує завантаження двигунів по потужності,

$$t_3 = 0,9;$$

$\alpha_2$  – річний тариф за 1 кВт встановленої потужності  $\alpha_2 = 739,2$  грн/кВт;

$\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності,  $\cos \varphi = 0,85$ ;

$$C'_e = 250 \left( 1,68 \cdot 0,6 \cdot 6,8 \cdot 0,9 \cdot 260 \cdot 2 + \frac{739,2}{0,85} \right) = 1019376,56 \text{ грн.}$$

Для модернізованого ерліфта споживання електроенергії на 7% менше ніж базового, отже маємо

– для базової машини:

$$C'_e = 1019376,56 \text{ грн};$$

– для модернізованої машини :

$$C''_e = 1019376,56 \cdot 0,93 = 948020,2 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали (мастильні та витратні матеріали) для ерліфту приймаємо в розмірі 0,022 грн на кВт·год сповивальної потужності:

$$C_{вн} = 0,022 N_t (\text{грн});$$

де  $N_t = N t_2 t_{зм} t_3 n_{зм} t_{зм} = 250 \cdot 0,6 \cdot 6,8 \cdot 0,9 \cdot 260 \cdot 2 = 477360$  кВт·год;

Отже маємо для:

– базової машини:

$$C'_{вн} = 0,022 N_t = 0,022 \cdot 477360 = 10501,92 \text{ грн};$$

– модернізованої машини:

$$C''_{вн} = 0,022 \cdot 0,93 N_t = 0,022 \cdot 0,93 \cdot 477360 = 9766,79 \text{ грн};$$

Приведені затрати на річний об'єм перероблюваного ерліфта обчислюємо за формулою:

$$C_{пр} = C + E_H K = [A + C_3 + C_p + C_e + C_{вн}] + E_H K, [\text{грн}]$$

де  $C$  – річні експлуатаційні витрати, грн;

$K$  – капіталовкладення, грн;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень,  $E_n = 0,1$ ;

– базова машина:

$$C'_{\text{пр}} = [88580,4 + 476912,8 + 26535 + 1019376,56 + 10501,92] + 0,1 \\ \cdot 1006595,5 = 1722566,23 \text{ грн};$$

– модернізована машина :

$$C''_{\text{пр}} = [121434,3 + 548007,2 + 27391 + 948020,2 + 9766,79] + 0,1 \\ \cdot 1517928,6 = 1806412,35 \text{ грн};$$

Річний дохід визначається за формулою:

$$D_p = \Pi \cdot V_{\Pi} \cdot K_{\text{ТМ}} \cdot T_{\text{ЗМ}} \cdot t_{\text{ЗМ}} \cdot n_{\text{ЗМ}} \cdot k_{\text{пр}}, [\text{грн}]$$

де  $\Pi$  – продуктивність ерліфта, м<sup>3</sup>/год;  $V_{\Pi}$  – вартість підйому ґрунту,  $V_{\Pi} = 40$  грн/м<sup>3</sup>;  $K_{\text{ТМ}}$  – концентрація твердого матеріалу в гідросуміші,  $K_{\text{ТМ}} = 10\%$ ;  $k_{\text{пр}}$  – коефіцієнт простою ерліфта пов'язаного з ремонтом та технічним оглядом, пошуком клієнта, затрат часу на транспортування,  $k_{\text{пр}} = 0,65$

– базова машина:

$$D'_p = 600 \cdot 40 \cdot 0,1 \cdot 6,8 \cdot 2 \cdot 260 \cdot 0,65 = 5516160 \text{ грн};$$

– модернізована машина:

$$D''_p = 897 \cdot 40 \cdot 0,1 \cdot 6,8 \cdot 2 \cdot 260 \cdot 0,65 = 8246659,2 \text{ грн.}$$

Балансовий прибуток

$$\Pi_{\text{б}} = D_p - C_{\text{пр}}, [\text{грн}]$$

– базова машина:

$$\Pi'_{\text{б}} = 5516160 - 1722566,23 = 3793593,77 \text{ грн};$$

– модернізована машина:

$$\Pi''_{\text{б}} = 8246659,2 - 1806412,35 = 6440246,85 \text{ грн.}$$

Чистий прибуток

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi_{\text{б}} - \Pi_{\text{б}} \cdot H_{\text{пр}}, [\text{грн}]$$

де  $H_{\text{пр}}$  – податок на прибуток,  $H_{\text{пр}} = 25\%$ .

– базова машина:

$$П'_ч = 3793593,77 - 3793593,77 \cdot 0,25 = 2845195,32 \text{ грн};$$

– модернізована машина:

$$П''_ч = 6440246,85 - 6440246,85 \cdot 0,25 = 4830185,13 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект від впровадження модернізації ерліфту становитиме

$$E_{річ} = П''_ч - П'_ч = 4830185,13 - 2845195,32 = 1984989,81 \text{ грн.}$$

Термін окупності

$$T_{ок} = \frac{C''_{пр} - C'_{пр}}{E_{річ}},$$

$$T_{ок} = \frac{1806412,35 - 1722566,23}{1984989,81} = 0,42 \text{ роки} = 5 \text{ міс.}$$

Результати розрахунків зведені в таблицю 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати розрахунку економічної ефективності від впровадження системи модернізації ерліфту

| Показник                                 | Умовні позначення | Одиниці вимірювання | Числове значення |                      |
|--|-------------------|---------------------|------------------|----------------------|
|  |                   |                     | Базова машина    | Модернізована машина |
| Капіталовклад на один ерліфт             | $K$               | грн                 | 1006595,5        | 1517928,6            |
| Амортизац. відрахування                  | $A$               | грн                 | 88580,4          | 121434,3             |
| Заробітна плата                          | $C_z$             | грн                 | 476912,8         | 548007,2             |
| Річні витрати персоналу                  | $C_p$             | грн                 | 26535            | 27391                |
| На ремонт і ТО витрати на електроенергію | $C_e$             | грн                 | 1019376,56       | 948020,2             |
| Витрати на допоміжні матеріали           | $C_{вм}$          | грн                 | 10501,92         | 9766,79              |
| Приведені витрати                        | $C_{пр}$          | грн                 | 1722566,23       | 1806412,35           |
| Річний дохід                             | $D_p$             | грн                 | 5516160          | 8246659,2            |
| Балансовий прибуток                      | $П_б$             | грн                 | 3793593,77       | 6440246,85           |
| Чистий прибуток                          | $П_ч$             | грн                 | 2845195,32       | 4830185,13           |
| Річний ефект                             | $E_{річ}$         | грн                 |                  | 1984989,81           |
| Термін окупності                         | $T_{ок}$          | міс                 |                  | 5                    |

## Висновки до розділу 4

1. На базі лабораторії кафедри автомобільного транспорту та соціальної безпеки Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна» створена експериментальна ерліфтна установка ( $H + h = 1,5$  м,  $D = 0,1$  м,  $d = 0,052$  м,  $\alpha = 0,67$ ) з шнековим інтенсифікатором.

2. Експериментально отримано витратні характеристики ерліфта традиційної конструкції та конструкції з шнековим інтенсифікатором з частотою обертання шнека 50, 100, 150, 200 об/хв.

3. Порівняння розрахункових даних з експериментальними виявило, що різниця між ними по всіх розглянутих характеристиках складає 6,1%, що свідчить про адекватність розробленої математичної моделі.

4. Розроблено алгоритм прогнозування продуктивності ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором.

5. Розроблено методика вибору оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором.

6. Розроблено модель системи автоматичного регулювання витрат повітря компресором. Встановлено, що для двоконтурної системи автоматичного регулювання необхідно застосовувати у внутрішньому контурі регулювання І-регулятор частоти обертання приводного електродвигуна компресора, а в зовнішньому контурі ІІІ-регулятор тиску повітря.

7. Виконано розрахунок економічної ефективності застосування ерліфту з шнековим інтенсифікатором. Річний економічний ефект після впровадження модернізації склав 1,98 млн. грн. Термін окупності 5 місяців.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання, спрямоване на підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту за допомогою використання методу шнекової інтенсифікації ерліфтної установки при роботах у водоймищах глибиною до 20 м. Використання шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту дає змогу збільшити продуктивність установки на 49,5%, а коефіцієнт корисної дії – на 13,7%.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному.

1. Проведено дослідження шляхів підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту. Встановлено, що підвищити ефективність експлуатації днопоглиблювального флоту у водоймищах глибиною до 20 метрів, можливо шляхом використання ерліфтної установки. Це обумовлено низькою металоємністю та високою надійністю, за рахунок відсутності складних частин в конструкції.

2. Проаналізовано основні способи підвищення ефективності експлуатації ерліфтної установки для виконання днопоглиблення в акваторіях на глибинах до 20 метрів. Виявлено, що найперспективнішим шляхом є покращення процесу підйому пульпи. Він дозволяє суттєво зменшити енергоємність процесу за рахунок повнішої передачі енергії від робочого тіла (повітря) до речовини, що піднімається.

3. Вперше розроблено метод підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту, який відрізняється від відомих, застосуванням шнекового інтенсифікатора в підйомній трубі ерліфту, який дозволяє покращити змішування трикомпонентної суміші по всій висоті підйомної труби, що призвело до збільшення на 13,7% коефіцієнту корисної дії та на 49,5% продуктивності ерліфтної установки.

4. Отримала подальший розвиток математична модель робочого процесу ерліфтної установки, яка відрізняється від відомих врахуванням впливу шнекового інтенсифікатора на підйом гідросуміші в підйомній трубі, як

суперпозиція одномірного висхідного потоку, зумовленого подачею компресора, та потоку в аксіальному напрямі, створеного за рахунок обертання гвинтового інтенсифікатора, що дозволяє спрогнозувати продуктивність та коефіцієнт корисної дії установки. Вперше виведено аналітичні залежності для визначення коефіцієнту корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором, як відношення корисної потужності для підйому гідросуміші до потужності підведеного потоку повітря та потужності, витраченої для обертання шнекового інтенсифікатора, що дають змогу визначити енергетичну ефективність використання ерліфту з шнековим інтенсифікатором. Чисельний аналіз математичної моделі робочого процесу ерліфта з шнековим інтенсифікатором дозволив обґрунтувати області енергетично доцільного його використання (з умови перевищення ККД запропонованого ерліфта над ККД традиційного при інших рівних умовах) та розробити алгоритм прогнозування продуктивності ерліфту з шнековим інтенсифікатором.

5. Удосконалено метод знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки, який відрізняється від відомих урахуванням значень експлуатаційних параметрів шнекового інтенсифікатора, що дозволяє більш ефективно використовувати днопоглиблювальний флот.

6. Розроблено аналітичні залежності та алгоритм знаходження оптимальних робочих параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором.

7. Розглянуто автоматичне регулювання ерліфтних установок з шнековим інтенсифікатором. Розроблено модель системи автоматичного регулювання витрат повітря компресора. Встановлено, що для двоконтурної САР необхідно застосовувати у внутрішньому контурі регулювання І-регулятор частоти обертання приводного електродвигуна компресора, а в зовнішньому контурі ІІІ-регулятор тиску повітря.

8. Підтверджена адекватність математичної моделі робочого процесу ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором за результатами експериментальних досліджень дослідної установки, при забезпеченні рівності критерію подібності відносного геометричного занурення змішувача  $\alpha$ , параметра  $(H +$

$h) / D$ , аналогічному критерію натурних установок. Середні відхилення значень в точках витратних характеристик, визначених аналітично, від значень в точках характеристик, отриманих внаслідок регресійної обробки експериментальних даних, в окремих розглянутих режимах роботи ерліфта не перевищили 6,1%, що свідчить про прийнятну узгодженість розробленої математичної моделі з експериментом.

Дисертаційна робота є завершеною, її мета та завдання досягнуті.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дедов А.Н. Единая транспортная система : учебник. Караганда: КарГТУ, 2006. 117 с.
2. Доманевский Н. А. Дноуглубление : учебник для речных училищ и техникумов / изд. 2-е, перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1971. 271 с.
3. Пашкин В.П., Яковлев П.И., Соколов В.Т. Дноуглубительные, рефулерные и гидромеханизированные работы : учеб. пособ. Одесса: Астропринт, 1999. 432 с.
4. Алиев Н.А., Шулико В.П. Концептуальные проблемы организации рентабельной разработки полезных ископаемых со дна морей и океанов : сборник трудов НИИГМ им. М.М. Федорова. Донецк, 2009.
5. Стариков А.С. Технологические процессы земснарядов. Москва : Транспорт, 1989. 220 с.
6. Стариков А.С. Технология работы речных земснарядов. Москва : Транспорт, 1969. 240 с.
7. Мисик Г.А. Основи меліорації та ландшафтознавства. Київ, 2005.
8. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт : дис. ... канд. техн. наук. Донецк : ДПИ, 1963, том I. 209 с., том II. 140 с.
9. Багдасаров В.Г. Теория, расчет и практика эргазлифта. Москва : ГНТИНГТЛ, 1947. 372 с.
10. Swindin N.S. The Modern Theory and practice of pumping. London, 1924.
11. Versluis D-r Petroleum Development and Technology. D. 1930.
12. Пороло Л.В. Воздушно-газовые подъемники жидкости (эргазлифты). Основы теории и методы расчета. Москва : Машиностроение, 1969. 160 с.
13. Герман А.П. Применение эксплуатационных кривых к расчету воздушного подъемника для жидкостей. *Записки ЛГИ*. Том 17-18. 1948. С. 127-169.

14. Аргунов П.П. Исследование работы эрлифта и его расчет. *Строительное водопонижение, гидромеханика и физика грунтовых вод* : труды НИИ оснований и фундаментов Министерства строительства СССР. Сборник №20. Москва, 1953. С. 38-52.
15. Гейер В.Г. Опыт откачки шахты им. Ворошилова эрлифтами. *Вестник Сталинугля*. 1945. №1. С. 9-14.
16. Гейер В.Г. Воздушные подъемники (эрлифты) как водоотливные средства при проходке вертикальных стволов. *Уголь*. 1953. №11. С.23-26.
17. Гейер В.Г. Определение основных параметров эрлифтной установки для откачки затопленных шахт : сб. статей к 25-летию ДИИ 1921 – 1946 г.г. Москва : Углетехиздат. 1946. С. 79-92.
18. Гейер В.Г., Костанда В.С. Гидравлический подъем пульпы эрлифтными и углесосно-эрлифтными установками. *Механизация и автоматизация производства*. 1959. №9. С. 52-56.
19. Гейер В.Г. Теория гидрокомпрессоров и перспективы применения их в горной промышленности СССР : дисс. ... докт. техн. наук: 05.173. Донецк : ДПИ, 1952. 285 с.
20. Гейер В.Г. Основы теории гидрокомпрессоров непрерывного действия и перспективы применения их в горной промышленности. *Труды ДИИ*. Выпуск 4. Том XXII. Харьков, 1959. С. 63-81.
21. Усков Е.В. Исследование эрлифтов как средств водоотлива из глубоких шахт : дисс. ... канд. техн. наук : 05.173. Донецк : ДПИ, 1972. 220 с.
22. Логвинов Н.Г. Исследование динамики эрлифтов с целью создания автоматизированных гидроподъемов шахт большой глубины : дисс. ... докт. техн. наук : 05.173. Донецк : ДПИ, 1970. – 370 с.
23. Малыгин С.С. Применение эрлифтов для водоотлива шахт : дисс. ... канд. техн. наук: 05.173. Донецк : ДПИ, 1966. 264 с.
24. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности : дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1976. 197 с.

25. Каплюхин А.А. Исследование и разработка эрлифтных систем шахтного водоотлива : дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1980. 242 с.
26. Антонов Я.К. Совершенствование эрлифтных подъемов для выдачи горной массы из глубоких шахт : дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1985. 198 с.
27. Костанда В.С. Экспериментальные исследования эрлифта с переменным  $\alpha$  и  $D$  в условиях откачки ствола. *Труды ДПИ*. Выпуск 12. Том 62. 1961. С. 103-113.
28. Костанда В.С. К расчету эрлифтных установок. *Труды ДПИ*. Выпуск 12. Том 62. 1961. С. 93-101.
29. Малыгин С.С. Расчет гидротранспортных эрлифтов малой длины. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 20. Киев : Техника, 1970. С. 130-136.
30. Малыгин С.С. Основы расчета эрлифта с внутренним воздухопроводом. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 52. Киев : Техника. 1973. С. 65-68.
31. Козыряцкий Л.Н. Определение основных параметров эрлифта. *Уголь Украины*. 1975. № 12. С. 35-36.
32. Гейер В.Г. Исследование движения твердых тел в подъемной трубе эрлифта. *Уголь*. 1976. №5. С. 28-30.
33. Малеев В.Б. Исследование и разработка сифонно-вакуумного эрлифта для очистки шахтных водоотливных емкостей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1980. 289 с.
34. Малыгин С.С., Сорокин Л.Н. Определение удельного расхода воздуха и подачи коротких эрлифтов. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 64. Киев : Техника. 1983. С. 83-86.
35. Малеев В.Б., Малыгин С.С., Холоша А.С. Энергетические параметры коротких эрлифтов. *Наукові праці Донецького державного технічного університету*. Випуск 27. Донецьк : ДонДТУ. 2001. С. 263-269.

36. Логвинов Н.Г. Дифференциальные уравнения движения жидкости в пневмогидравлических трактах насосно-эрлифтной установки в период пуска. *Наукові праці Донецького державного технічного університету*. Випуск 27. Донецьк : ДонДТУ. 2001. С. 242-246.
37. Логвинов Н.Г. и др. Определение числа Рейнольдса и кинематической вязкости смеси в подъемной трубе. *Наукові праці Донецького державного технічного університету*. Випуск 42. Донецьк : ДонДТУ. 2002. С. 144-148.
38. Логвинов Н.Г. и др. Расчет газосодержания потока в эрлифте. *Горная энергомеханика и автоматика* : труды междун. науч.-техн. конф. Том 1. Донецк : ДонНТУ. 2003. С. 139-141.
39. Логвинов Н.Г. и др. Деформация газожидкостного потока в эрлифте. *Горная энергомеханика и автоматика* : труды междун. науч.-техн. конф. Том 1. Донецк : ДонНТУ. 2003. С. 142-146.
40. Гейер В.Г. Новые технологические схемы и средства шахтного водоотлива. Донецк : ДЛИ, 1972. 35 с.
41. Гейер В.Г. и др. Эрлифтные установки : учебное пособие. Донецк : ДПИ, 1982. 64 с.
42. Папаяни Ф.А. и др. Энциклопедия эрлифтов. Москва : Информсвязь-издат, 1995. 592с.
43. Гейер В.Г. и др. Основы теории эрлифта : деп. в УкрНИИНТИ. № 1884. 1980. 14 с.
44. Телетов С.Г. О коэффициенте сопротивления при течении двухфазных смесей. *Доклады АН СССР*. Том LI. 1946. №8. С. 579-582.
45. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. Москва : Энергия, 1976. – 296 с.
46. Козлов Б.К. Режимы и формы движения воздушно-водяной смеси в вертикальной трубе. *Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления*. Москва : Изд. АН СССР, 1955. С. 11-20.

47. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1982. 323 с.
48. Кириченко Е.А. Выбор и обоснование рациональных параметров глубоководной эрлифтной установки с учетом влияния питающей пневмосистемы : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Днепропетровск: ДГИ, 1989. 172 с.
49. Кириченко Е.А. Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъема полезных ископаемых : дис. ... докт. техн. наук : 05.05.06. Днепропетровск: НГАУ, 2001. 337 с.
50. Алескеров А.С. Расчет газожидкостного подъемника. *Нефтяное хозяйство*. 1980. №2. С. 37-38.
51. Андриасов Р.С. и др. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Добыча нефти. / под общ. ред. Ш.К. Гиматудинова. Москва : Недра, 1983. 455 с.
52. Зайцев Ю.В. и др. Теория и практика газлифта. Москва : Недра, 1987. 256 с.
53. Коновалов В.Л. К расчету эрлифтных устройств. *Труды проектного и НИИ "Гипроникель"*. Выпуск 51. Л., 1971. С. 126-142.
54. Белов Б.А. Характеристика эрлифта и инженерный метод расчета. *Изв. ВУЗов, Геология и разведка*. 1975. № 11. С. 182-190.
55. Раздольный В.А., Пушкарев В.Ф. Влияние гидравлических сопротивлений подъемной трубы на характеристику эрлифта. *Тр. ВНИИнеруда*. Выпуск 38. Тольятти, 1974. С. 66-71.
56. Стеннинг А., С. Мартин Теоретическое и экспериментальное исследование рабочих характеристик эрлифтных насосов. *Энергетические машины и установки* : труды Американского общества инженеров-механиков, серия А. Том 90. 1968. №2. С. 10-15.
57. Пороло Л.В. Воздушно-газовые подъемники жидкости (эргазлифты). Основы теории и методы расчета. Москва : Машиностроение, 1969. 160 с.

58. Алескеров А.С. К вопросу определения КПД лифта. *Известия ВУЗов, Нефть и газ*. 1973. №2 С. 41-44.
59. Гейер В.Г. Совершенствование эрлифтных систем ГЗУ, авторский надзор за монтажом и эксплуатацией эрлифтов Экибастузской ГРЭС-1 : Отчет о НИРХ-81-72 (заключительн.) / ДПИ. Руководитель В.Г. Гейер : №ГР81051696; Инв. №02860016668. Донецк, 1985. 100с.
60. Белов И.Г. Теория и практика периодического газлифта. Москва : Недра, 1975. 142 с.
61. Рылов Б.М. Оценка энергетической эффективности периодического газлифта. *Нефтяное хозяйство*. 1982. №11. С. 28-30.
62. Стегниенко А.П. Исследование и разработка методов управления режимами работы шахтных эрлифтов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1978. 242 с.
63. Шевченко В.Ф. Исследование и разработка узла подвода пневматической энергии в эрлифте : дисс. ... канд. техн. наук : 05.173. Донецк: ДПИ, 1974. 183 с.
64. Малеев В.Б., Малыгин С.С. Динамическое и геометрическое погружение эрлифтов для добычи полезных ископаемых. *Труды Донецкого государственного технического университета*. Выпуск 7. Серия горно-электроэнергетическая. Донецк : ДонГТУ, 1999. С. 162-166.
65. Скорынин Н.И. Исследование и разработка глубоководных многогосмесительных эрлифтных установок для подъема горных масс : Дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06. Донецк : ДПИ, 1983. 277 с.
66. Гейер В.Г. и др. Экспериментальное исследование эрлифта с подающей трубой большой длины. *Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР (угольная и горнорудная промышленность)*. Выпуск 10. Киев : Вища школа, 1976. С. 21-22.
67. Логвинова Е.Н. Минимизация удельного расхода энергии на транспорт гидросмеси вертикальным морским эрлифтом. *Труды Донецкого*

*государственного технического университета*. Выпуск 7. Серия горно-электромеханическая. Донецк : ДонГТУ, 1999. С. 157-161.

68. Логвинов Н.Г. и др. Расчет барботажного режима эрлифта. *Наукові праці Донецького державного технічного університету*. Выпуск 42. Серія гірничо-електромеханічна. Донецьк : ДонДТУ, 2002. С. 149-154.

69. Малеев В.Б. Определение параметров газожидкостной смеси при барботажном режиме в эрлифте. *Наукові праці Донецького державного технічного університету*. Выпуск 42. Серія гірничо-електромеханічна. Донецьк : ДонДТУ, 2002. С. 155-160.

70. Брин Е.С. К вопросу теории газлифта (нулевой режим). *Изв. ВУЗов, Нефть и газ*. 1977. №8. С. 55 - 58.

71. Гейер В.Г., Костанда В.С. Универсальные характеристики подъемной трубы эрлифта. *Гидравлическая добыча угля*. Выпуск 4(26). Москва : Недра, 1965. С. 30-34.

72. Гейер В.Г., Костанда В.С. Безразмерные характеристики эрлифта. *Гидравлическая добыча угля*. Выпуск № 7 (29). Москва : Недра, 1965. С. 34-38.

73. Гейер В.Г., Логвинов Н.Г. Математическое описание безразмерных характеристик эрлифтов. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 29. Киев : Техника, 1972. С. 119-127.

74. Гейер В.Г., Логвинов Н.Г. О свойствах безразмерных характеристик эрлифтов. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 31. Киев : Техника. 1973. С. 51-56.

75. Логвинов Н.Г. и др. Особенности безразмерных эксплуатационных характеристик эрлифта. *Труды Донецкого государственного технического университета*. Выпуск 7. Серия горно-электромеханическая. Донецк : ДонГТУ, 1999. С. 153-156.

76. Стегниенко А.П., Масло Ю.О. Определение действительных характеристик эрлифта в условиях дефицита опытных данных. *Горная энергомеханика и автоматика* : труды междунар. науч.-техн. конф. Том 1. Донецк : ДонНТУ. 2003. С. 293-295.

77. Раздольный В.А., Пушкарев В.Ф. Влияние гидравлических сопротивлений подъемной трубы на характеристику эрлифта. *Труды ВНИИнеруда*. Выпуск 38. Тольятти, 1974. С. 66-71.
78. Сахаров В.А., Такач Г.Т. Точность расчета параметров газожидкостного подъемника. *Нефтяное хозяйство*. 1984. №4. С.55-58.
79. Козыряцкий Л.Н. и др. Уравнение безразмерной характеристики длинных эрлифтов. *Наукові праці Донецького державного технічного університету*. Выпуск 27. Серія гірничо електромеханічна. Донецьк : ДонДТУ, 2001. С. 210-214.
80. Малеев В.Б. Основы подобия и моделирования эрлифтов. *Наука-практика : научно-метод. сб.* Выпуск 4. Донецк : ДонГТУ, 1999. С. 173-192.
81. Малеев В.Б. Сходственные режимы эрлифтных установок. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. Дніпропетровськ: НГАУ, 1999. №2(61). С. 168-173.
82. Малеев В.Б. Соотношение между основными параметрами подобных эрлифтов. *Науковий вісник НГА України*. 1999. №2. С. 49-50.
83. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Проектирование разработки / Под ред. Ш.К. Гиматудинова. Москва : Недра, 1983. 464 с.
84. Мулица И.С. и др. Комбинирование методов расчета газожидкостного подъемника по промысловым данным. *Нефтяное хозяйство*. 1984. №6. С. 45-46.
85. Розенберг Г.Д., Райский Ю.Д., Ларионов С.В. Течение двухфазных многокомпонентных систем по вертикальным трубам при наличии фазовых переходов. *Механика многофазных многокомпонентных систем*. Выпуск №200. Москва : МИНГ им. И.М. Губкина, 1986. С. 156-164.
86. Пронченко Г.А. и др. Оптимальное рабочее давление для газлифта на многопластовом месторождении. *Нефтяное хозяйство*. 1987. №9. С. 46-49.

87. Пронченко Г.А. Повышение точности гидродинамических расчетов газлифтной эксплуатации на месторождении Котур-Тепе. *Нефтяное хозяйство*. 1988. №8. С. 60.
88. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений / Под ред. Ш.К. Гиматудинова. Москва : Недра, 1988. 302 с.
89. Семенов В.Ф. Гидродинамический расчет дисперсно-кольцевых потоков в газовых скважинах. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ*. 1989. №10. С. 46-52.
90. Мустафаев С.Д., Мамедханов Р.Г. Расчеты пускового давления компрессорных скважин с однорядным ступенчатым лифтом. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ*. 1990. №6. С. 44-50.
91. Исмаилов Р.Ш. К теории двухфазной среды с массообменом. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ*. 1991. №5 С.57-61.
92. Архангельский В.А. Расчет движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах. *Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления*. – Москва : Изд-во АН СССР, 1955. С. 21-34.
93. Кириллов П.Л. Методика гидравлического расчета вертикального парогенерирующего канала. *Теплоэнергетика*. 1980. №2. С. 71-74.
94. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред. Москва : Энергоиздат, 1981. 471 с.
95. Накоряков В.Е. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах. Новосибирск: Институт теплофизики, 1983. 238 с.
96. Кутателадзе С.С. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 302с.
97. Дейч М.Е. Двухфазные течения в элементах теплоэнергетического оборудования. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 326 с.
98. Кащеев В.М. и др. Численное исследование двухфазных систем с помощью двумерной математической модели. *Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика*. АН СССР, Отд-е физ.- техн. проблем энергетики. Л.: Наука, 1987. С. 74-83.

99. Прядко Н.А. К расчету теплогидродинамических параметров восходящего дисперсно-кольцевого потока. *Труды ЦКТИ*. Выпуск 241. Л. 1988. С. 90-96.
100. Кутателадзе С.С. Движение парожидкостной смеси в трубах и обобщенные координаты для его анализа. *Академик Кутателадзе С.С.* : сб. тр. Новосибирск : Наука. 1989. С. 45-63.
101. Кутателадзе С.С. Экспериментальные исследования волновых процессов в газо- и парожидкостных средах. *Академик Кутателадзе С.С.* : сб. тр. Новосибирск : Наука. 1989. С. 311-321.
102. Накоряков В.Е. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. Москва : Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
103. Касаткин А.Г. Уравнение движения двухфазного потока. *Исследования в области процессов и аппаратов*. Выпуск 40. Москва : Труды МХТИ. 1963. С. 48-52.
104. Меликян Р.Н. Гидродинамика газлифта и вывод уравнений для его расчета. *Журнал прикладной химии*. Выпуск 11. Том. 42. 1969. С. 2439-2544.
105. Положий С.В. К вопросу о теоретических и экспериментальных исследованиях газодинамики двухфазных потоков. *Изв. Томск. политехи. ин-та*. Том 245. Томск, 1975. С. 3-8.
106. Алескеров А.С. Об одном приближенном методе расчета эргазлифта. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ*. 1972. №10. С. 64-68.
107. Татюхиро Уэда. Исследование потока воздушно-водных смесей. *Bulletin of the JSME*. Том. 1. 1958. №2. С. 139-145.
108. Федоткин И.М. Исследование истинного объемного воздухо содержания и коэффициента скольжения газа при движении двухфазного потока в вертикальных трубах в условиях глубокого вакуума. *Изв. ВУЗов. Энергетика*. 1974. №4. С. 87-91.
109. Соу С. Гидродинамика многофазных систем : пер. с англ. Москва : Мир, 1971. 536 с.

110. Умаров А.И. Влияние концентрации смеси на высоту подъема в эрлифтных установках. *Аэрогидродинамика многофазных сред*. Ташкент: Фан. 1969. С. 12-14.

111. Козлов Б.К. Относительные скорости при движении газожидкостных смесей в трубах. *Докл. АН СССР*. Том ХСVII. 1954. №6 С. 987-990.

112. Костерин С.И. Относительные скорости пароводяных течений в вертикальных необогреваемых трубах. *Теплоэнергетика*. 1961. №1. С. 58-65.

113. Мамаев В.А. Об относительной скорости газа при движении газожидкостного потока в трубах. *Гидравлика газожидкостных смесей и потоков при сверхкритическом давлении*. Выпуск 59. Л.: Труды ЦКТИ, 1965. С. 90-97.

114. Андриасов Р.А. О расчете средней скорости движения газожидкостной смеси в трубах. *Транспорт и хранение нефти и газа* : труды Московского института нефтехимической и газовой промышленности им. И.М. Губкина. Выпуск 73. Москва : Недра, 1967. С. 143-146.

115. Болотов А.А. Исследование структуры потока при движении парожидкостной смеси в вертикальных трубах. *Теплоэнергетика*. 1967. №11. С. 79-84.

116. Айтемиров З.А. Проскальзывание газовой фазы в газонефтяном потоке. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ*. 1969. №9. С. 45-47.

117. Петрик М. О зависимости между распределениями фаз и относительными скоростями в двухфазном потоке. *Достижения в области теплообмена*. Москва : Мир, 1970. С. 90-106.

118. Истомин А.З. О скольжении фаз при движении газожидкостных смесей в вертикальных трубах. *Изв. ВУЗов. Нефть и газ*. 1971. №2 С. 35-39.

119. Бурдуков А.П. и др. Распределение профиля скоростей жидкой фазы в газожидкостном потоке при малых газосодержаниях. *Прикладная механика и техническая физика*. 1975. №6. С. 29-32.

120. Белогорцев Г.П. Определение относительной скорости газа по результатам промысловых исследований газлифтных скважин. *Нефтяное хозяйство*. 1986. №2. С. 58-61.

121. Берченко В.И. Определение относительной скорости газа в газлифтных скважинах. *Нефтяное хозяйство*. 1991. №3. С. 30-31.

122. Махин В.А. Оценка точности измерения паросодержания методом акустического зондирования. *Промышленная теплотехника*. 1981. №4. С. 83-86.

123. Корольков Б.П. Исследование динамики истинного объемного паросодержания в парогенерирующем канале. *Теплоэнергетика*. 1982. №12. С. 45-47.

124. Лабунцов Д.А. и др. Основные закономерности изменения паросодержания равновесных и неравновесных двухфазных потоков в каналах различной геометрии. *Теплоэнергетика*. 1984. №9. С. 45-47.

125. Иванников В.Г. Экспериментальное определение газосодержания в двухфазном потоке в вертикальных трубах. *Механика многофазных многокомпонентных систем*. Выпуск №200. Москва : МИНГ им. И.М. Губкина, 1986. С. 164-168.

126. Храменкова М.В. Исследование истинного паросодержания адиабатного двухфазного потока в замкнутом контуре с естественной циркуляцией. *Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсионных системах*. Иркутск: ИПИ, 1989. С.41-46.

127. Лабунцов Д.А. Паросодержание двухфазного адиабатного потока в вертикальных каналах. *Физические основы энергетики* : изб. труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. Москва : Из-во МЭИ, 2000. С. 204-212.

128. Лабунцов Д.А. Основные закономерности изменения паросодержания равновесных и неравновесных двухфазных потоков в каналах различной геометрии. *Физические основы энергетики* : избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. Москва : Из-во МЭИ, 2000. С. 235-239.

129. Lockhart R.W., Martinelli R.C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.*, 1949. 45 (1). P. 39-48.

130. Кириллов П.Л. Расчет гидравлических потерь в адиабатном пароводяном потоке высокого давления. *Теплоэнергетика*. 1977. №10. С. 59-62.

131. Малыгин С.С. Определение гидравлических потерь при движении газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 48. Киев : Техника, 1977. С. 29-33.

132. Бобе Л.С. Расчет гидравлического сопротивления нерасслоенных газожидкостных потоков на основе предельных законов трения. *Теплофизика высоких температур*. – Том 16. – 1978. – №4. – С. 826-831.

133. Печеркин Н.И., Чехович В.Ю. Исследование массоотдачи и трения в кольцевом двухфазном потоке. *Теплообмен при фазовых превращениях*. Новосибирск : Институт теплофизики. 1983. С. 58-69.

134. Елин Н.Н. О коэффициенте сопротивления при кольцевом течении газожидкостных смесей в трубах. *Энергетика*. 1984. №7. С. 83-87.

135. Миропольский З.Л., Шнеерова Р.И., Меклер В.Ш. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и паросодержания при вскипании жидкости в протяженных трубопроводах. *Теплоэнергетика*. 1984. №2. С. 55-58.

136. Печеркин Н.И. Экспериментальное исследование касательного напряжения на стенке при вынужденном течении двухфазного потока в вертикальной трубе. *Теплофизика и гидрогазодинамика в процессах кипения и конденсации*. Новосибирск : Институт теплофизики, 1985. С. 7-24.

137. Чехович В.Ю., Печеркин Н.И. Теплообмен и трение на стенке в вертикальном газожидкостном потоке. *Труды ЦКТИ*. Выпуск 241. Ленинград 1988. С. 75-84.

138. Кириченко Є.О. Наукове обґрунтування параметрів трубних систем для гідропідйому корисних копалин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.06 / Національна гірничча академія України. Дніпропетровськ, 2001. 337 с.

139. Кононенко А.П. Теорія і робочий процес ерліфтів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.17 / Національний технічний ун-т "Харківський політехнічний ін-т". Харків, 2007. 565 с.

140. Кириченко В.Є. Обґрунтування параметрів глибоководних ерліфтів з урахуванням перехідних процесів : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Національна гірнична академія України. Дніпропетровськ, 2009. 174 с.

141. Євтеєв В.В. Обґрунтування параметрів глибоководних ерліфтів з урахуванням динаміки твердих частинок в снарядному потоці : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Національна гірнична академія України. Дніпропетровськ, 2012. 150 с.

142. Карпушин М.Ю. Обґрунтування параметрів робочого процесу ерліфти в умовах змінних припливу рідини (гідросуміші) : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.17 / Сумський державний університет. Суми, 2013. 120 с.

143. Калиниченко В.В. Підвищення ефективності роботи ерліфта дискретною подачею стисненого повітря : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.17 / Сумський державний університет. Суми, 2015. 242 с.

144. Эрлифт : патент №1551834 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 23.03.90, Бюл. №11. 2с.

145. Эрлифт : патент №943442 СССР : МКИ F04F 1/20. опубл. 15.07.82, Бюл. №26. 3с.

146. Эрлифтная установка для перекачивания пульпы : патент №637554 СССР : МКИ F04F 1/20. опубл. 15.12.78, Бюл. №46. 2с.

147. Эрлифт : патент №1257300 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 15.09.84, Бюл. №34. 2с.

148. Эрлифт : патент №1751439 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 30.07.92, Бюл. №28. 3с.

149. Эрлифт : патент №1504375 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 30.08.89. Бюл. №32. 2с.

150. Эрлифтная установка : патент №1178961 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 15.09.85, Бюл. №34. 3с.

151. Форсунка для эрлифта : патент №54594 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 31.03.39, Бюл. №1216. 2с.
152. Эрлифт : патент №383899 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 23.05.73, Бюл. №24. 2с.
153. Эрлифтная установка : патент №1180562 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 23.09.85, Бюл. №35. 2с.
154. Эрлифт для подъёма пульпы : патент №1712672 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 15.02.92, Бюл. №6. 3с.
155. Эрлифтно-землесосная система : патент №1622644 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 23.01.91, Бюл. №3. 2с.
156. Эрлифт : патент №409007 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 30.22.74, Бюл. №48. 2с.
157. Эрлифт : патент №348769 СССР : МКИ F04F 1/18. опубл. 23.08.72, Бюл. №25. 2с.
158. Создать, освоить в производстве и внедрить эрлифтные подъемы типа ЭО-С-1 и ЭС-3-2. Т. 2 : *Отчет о НИР (промежуточн.)* / ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. Шифр темы Х-77-30 ; №ГР76085379 ; Инв. №02860040824. Донецк, 1985. 60 с.
159. Максимова С.В. Совершенствование систем аэрации сооружений биологической очистки сточных вод с использованием вихревых эрлифтных устройств : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. Пенза, 2006. 135 с.
160. Финкельштейн З.Л. Средства гидромеханизации : учеб. пособ. Алчевск : ДонГТУ, 2013. 168 с.
161. Малеев В.Б. Водоотлив и дегазация угольных шахт. Москва : Недра, 1995. 208 с.
162. Бойко А.В. Гидрогазодинамика : учеб. пособ. Харьков : НТУ «ХПИ», 2006. 413 с.

163. Делайе Дж., Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 424 с.
164. Струтинський В.Б., Колот О.М. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів. Краматорськ : ЗАТ „Тираж-51”, 2005. 530 с.
165. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Москва : Наука, Гл. ред. физ. - мат. лит., 1978. 832 с.
166. Струтинський В.Б. Тензорні математичні методи процесів та систем: підручник. Житомир: ЖДТУ, 2005. 635 с.
167. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. II. Москва : Наука, Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. 360 с.
168. Гриценко А.И., Клапчук О.В., Харченко Ю.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. Москва : Недра, 1994. 238 с.
169. Мамаев В.А. и др. Движение газожидкостных смесей в трубах. Москва : Недра, 1978. 271 с.
170. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. I. Москва : Наука, Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. 464 с.
171. Дейч М.Е. Уравнения закона сохранения количества движения при течении двухфазной среды с фазовыми превращениями. *Теплофизика высоких температур*. Том 6. 1968. №1. С. 111-115.
172. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Киев: Наукова думка, 2001. 346 с.
173. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. Москва : Мир, 1972. 440 с.
174. Керженцев В.А., Перова Н.В. Повышение точности расчетов шнековых конвейеров путем переопределения независимой переменной (аргумента). *Научный вестник НГТУ*. Том 61. № 4. 2015. С. 48-62.

175. Малыгин С.С. Подобие эрлифтов. *Разработка месторождений полезных ископаемых*. Выпуск 88. Киев : Техніка. 1991. С. 51-58.
176. Малеев В.Б. Сходственные режимы эрлифтных установок. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. Дніпропетровськ : НГАУ. 1999. №2(61). С. 168-173.
177. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов. *Вісник Сумського державного університету / Технічні науки*. Суми : СДУ, 2005. №12(84). С. 38-48.
178. Счетчики жидкости ультразвуковые накладные «Эргомера-120-Н2» : инструкция по монтажу ЭУС120.00.Н2 ИМ. 2003 г. URL: <http://www.ergo-mer.com.ua>. (дата звернення: 15.11.2018).
179. Nasr A.M. Behavior of strip footing on fiber-reinforced cemented sand adjacent to sheet pile wall. *Geotextiles and geomembranes*. 2014. № 42. С. 599-610.
180. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Москва : Наука, 1971. 192 с.
181. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. Киев : Вища школа, 1976. 184 с.
182. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. Москва : Металлургия, 1974. 264 с.
183. Тимошенко Г.М., Зима П.Ф. Теория инженерного эксперимента : учеб. пособ. Киев : УМК ВО, 1991. 124 с.
184. Сукач М.К. Добыча и гидротранспортирование сапропелей. *Транспортное строительство*. 1994. №11. С. 23-25.
185. Фомин А.И. Технология добычи местных удобрений (сапропелей) : учеб. пособ. Москва : Высшая шк. – 1999. – 269 с.
186. Teitel Y. Two-phase slug flow. *Adv. Heat Transfer*. 2008. №20. P. 83-132.

**ЗВЕДЕНІ ДАНІ ПРОТОКОЛІВ**

експериментальних досліджень роботи ерліфта

з шнековим інтенсифікатором з діаметром підйомної труби  $D = 100$  мм та довжиною  $H + h = 1,5$  м, геометричним зануренням змішувача  $h = 1,0$  м

| № п/п   | Тиск повітря, кгс/см <sup>2</sup> | Частота обертання шнеку, об/хв | Подача повітря, м <sup>3</sup> /хв | Тиск в змішувачі (надл), кгс/см <sup>2</sup> | Середня подача ерліфту, м <sup>3</sup> /год |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|---|
| 1   | 2                                 | 3                              | 4                                  | 5  | 6   |
| Протокол №1   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 3 червня 2015 р.  |                                   |                                |                                    |  |   |
| Традиційно працюючий ерліфт   |                                   |                                |                                    |  |   |
| Барометричний тиск $p_6 = 740$ мм.рт.ст. Температура повітря $t_a = 20^\circ\text{C}$ . |                                   |                                |                                    |  |   |
| Відносна вологість повітря $\varphi = 40\%$ .   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 1   | 1,50                              | –                              | 0,2                                | 0,929  | 1,36  |
| 2   | 1,50                              | –                              | 0,3                                | 0,930  | 4,52  |
| 3   | 1,51                              | –                              | 0,4                                | 0,930  | 5,98  |
| 4   | 1,49                              | –                              | 0,5                                | 0,929  | 6,98  |
| 5   | 1,50                              | –                              | 0,6                                | 0,931  | 7,48  |
| 6   | 1,49                              | –                              | 0,7                                | 0,930  | 7,96  |
| Протокол №2   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 3 червня 2015 р.  |                                   |                                |                                    |  |   |
| Ерліфт з шнековим інтенсифікатором,<br>частота обертання шнека $n_{ш} = 50$ об/хв       |                                   |                                |                                    |  |   |
| Барометричний тиск $p_6 = 738$ мм.рт.ст. Температура повітря $t_a = 20^\circ\text{C}$ . |                                   |                                |                                    |  |   |
| Відносна вологість повітря $\varphi = 42\%$ .   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 1   | 1,51                              | 50                             | 0,2                                | 0,929  | 1,52  |
| 2   | 1,50                              | 50                             | 0,3                                | 0,931  | 5,06  |
| 3   | 1,50                              | 50                             | 0,4                                | 0,930  | 6,58  |
| 4   | 1,50                              | 50                             | 0,5                                | 0,930  | 7,70  |
| 5   | 1,49                              | 50                             | 0,6                                | 0,929  | 8,22  |
| 6   | 1,50                              | 50                             | 0,7                                | 0,931  | 8,86  |
| Протокол №3   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 3 червня 2015 р.  |                                   |                                |                                    |  |   |
| Ерліфт з шнековим інтенсифікатором,<br>частота обертання шнека $n_{ш} = 100$ об/хв      |                                   |                                |                                    |  |   |
| Барометричний тиск $p_6 = 740$ мм.рт.ст. Температура повітря $t_a = 20^\circ\text{C}$ . |                                   |                                |                                    |  |   |
| Відносна вологість повітря $\varphi = 41\%$ .   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 1   | 1,50                              | 100                            | 0,2                                | 0,931  | 1,66  |
| 2   | 1,50                              | 100                            | 0,3                                | 0,930  | 5,62  |
| 3   | 1,51                              | 100                            | 0,4                                | 0,930  | 7,44  |
| 4   | 1,51                              | 100                            | 0,5                                | 0,932  | 8,52  |
| 5   | 1,50                              | 100                            | 0,6                                | 0,929  | 9,06  |
| 6   | 1,51                              | 100                            | 0,7                                | 0,931  | 9,74  |

| № п/п   | Тиск повітря, кгс/см <sup>2</sup> | Частота обертання шнеку, об/хв | Подача повітря, м <sup>3</sup> /хв | Тиск в змішувачі (надл), кгс/см <sup>2</sup> | Середня подача ерліфту, м <sup>3</sup> /год |
|---|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--|---|
| Протокол №4   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 3 червня 2015 р.  |                                   |                                |                                    |  |   |
| Ерліфт з шнековим інтенсифікатором,<br>частота обертання шнека $n_{ш} = 150$ об/хв      |                                   |                                |                                    |  |   |
| Барометричний тиск $p_b = 738$ мм.рт.ст. Температура повітря $t_a = 20^\circ\text{C}$ . |                                   |                                |                                    |  |   |
| Відносна вологість повітря $\varphi = 40\%$ .   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 1   | 1,50                              | 150                            | 0,2                                | 0,929  | 1,82  |
| 2   | 1,50                              | 150                            | 0,3                                | 0,929  | 6,26  |
| 3   | 1,49                              | 150                            | 0,4                                | 0,930  | 8,28  |
| 4   | 1,49                              | 150                            | 0,5                                | 0,930  | 9,44  |
| 5   | 1,50                              | 150                            | 0,6                                | 0,929  | 10,10                                       |
| 6   | 1,51                              | 150                            | 0,7                                | 0,931  | 10,78                                       |
| Протокол №5   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 3 червня 2015 р.  |                                   |                                |                                    |  |   |
| Ерліфт з шнековим інтенсифікатором,<br>частота обертання шнека $n_{ш} = 200$ об/хв      |                                   |                                |                                    |  |   |
| Барометричний тиск $p_b = 740$ мм.рт.ст. Температура повітря $t_a = 20^\circ\text{C}$ . |                                   |                                |                                    |  |   |
| Відносна вологість повітря $\varphi = 40\%$ .   |                                   |                                |                                    |  |   |
| 1   | 1,50                              | 200                            | 0,2                                | 0,929  | 2,18  |
| 2   | 1,50                              | 200                            | 0,3                                | 0,932  | 7,06  |
| 3   | 1,49                              | 200                            | 0,4                                | 0,930  | 9,20  |
| 4   | 1,49                              | 200                            | 0,5                                | 0,931  | 10,44                                       |
| 5   | 1,50                              | 200                            | 0,6                                | 0,929  | 11,08                                       |
| 6   | 1,51                              | 200                            | 0,7                                | 0,931  | 11,90                                       |

**Результати розрахунку ерліфта  
( $H + h = 1,5$  м;  $h = 1,0$  м;  $D = 0,1$  м;  $d = 0,052$  м)**

Таблиця Б.1 – Результати розрахунку ерліфта традиційної схеми

|       |        |       |       |       |       |       |       |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H=    | м      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| h=    | м      | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| Q_e=  | м3/год | 1,5   | 4,6   | 6,1   | 7,0   | 7,4   | 7,8   |
| Q_п=  | м3/год | 12,0  | 18,0  | 24,0  | 30,0  | 36,0  | 42,0  |
| ρo=   | кг/м3  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  |
| ρo_т= | кг/м3  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  |
| p_a=  | Па     | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 |
| g=    | м/с2   | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  |

|         |   |       |       |       |       |       |       |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ета_еш= | % | 11,48 | 23,46 | 23,33 | 21,42 | 18,87 | 17,05 |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Таблиця Б.2 – Результати розрахунку ерліфта з шнековим інтенсифікатором  
(при  $n_{ш} = 50$  об/хв)

|            |        |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H=         | м      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| h=         | м      | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| Q_еш=      | м3/год | 1,8   | 5,2   | 6,8   | 8,0   | 8,6   | 9,2   |
| Q_п=       | м3/год | 12,0  | 18,0  | 24,0  | 30,0  | 36,0  | 42,0  |
| Q_ш=       | м3/год | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
| D_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| d_ш=       | м      | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| H_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| b=         | м      | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| alfa_ш=    | рад    | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 |
| n=         | об/хв  | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    |
| K_ш=       |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| ρo=        | кг/м3  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  |
| ρo_т=      | кг/м3  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  |
| p_a=       | Па     | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 |
| g=         | м/с2   | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  |
| K_з=       |        | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| ета_пр=    |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| омега_з_1= |        | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   |

|         |   |       |       |       |       |       |       |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ета_еш= | % | 13,77 | 26,52 | 26,01 | 24,48 | 21,93 | 20,11 |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Таблиця Б.3 – Результати розрахунку ерліфта з шнековим інтенсифікатором  
(при  $n_{ш} = 100$  об/хв)

|            |        |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H=         | м      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| h=         | м      | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| Q_еш=      | м3/год | 1,8   | 5,9   | 7,7   | 8,7   | 9,2   | 9,9   |
| Q_п=       | м3/год | 12,0  | 18,0  | 24,0  | 30,0  | 36,0  | 42,0  |
| Q_ш=       | м3/год | 0,07  | 0,07  | 0,07  | 0,07  | 0,07  | 0,07  |
| D_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| d_ш=       | м      | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| H_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| b=         | м      | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| alfa_ш=    | рад    | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 |
| n=         | об/хв  | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   | 100   |
| K_ш=       |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| ρо=        | кг/м3  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  |
| ρо_т=      | кг/м3  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  |
| p_a=       | Па     | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 |
| g=         | м/с2   | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  |
| K_з=       |        | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| ета_пр=    |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| омега_з_1= |        | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   |

|         |   |       |       |       |       |       |       |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ета_еш= | % | 13,77 | 30,09 | 29,45 | 26,62 | 23,46 | 21,64 |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Таблиця Б.4 – Результати розрахунку ерліфта з шнековим інтенсифікатором  
(при  $n_{ш} = 150$  об/хв)

|            |        |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H=         | м      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| h=         | м      | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| Q_еш=      | м3/год | 2,0   | 6,5   | 8,6   | 9,7   | 10,5  | 11,2  |
| Q_п=       | м3/год | 12,0  | 18,0  | 24,0  | 30,0  | 36,0  | 42,0  |
| Q_ш=       | м3/год | 0,10  | 0,10  | 0,10  | 0,10  | 0,10  | 0,10  |
| D_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| d_ш=       | м      | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| H_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| b=         | м      | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| alfa_ш=    | рад    | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 |
| n=         | об/хв  | 150   | 150   | 150   | 150   | 150   | 150   |
| K_ш=       |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| ρо=        | кг/м3  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  |
| ρо_т=      | кг/м3  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  |
| p_a=       | Па     | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 |
| g=         | м/с2   | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  |
| K_з=       |        | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| ета_пр=    |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| омега_з_1= |        | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   |

|         |   |       |       |       |       |       |       |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ета_еш= | % | 15,30 | 33,15 | 32,90 | 29,68 | 26,78 | 24,48 |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Таблиця Б.5 – Результати розрахунку ерліфта з шнековим інтенсифікатором  
(при  $n_{ш} = 200$  об/хв)

|            |        |       |       |       |       |       |       |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H=         | м      | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   | 0,5   |
| h=         | м      | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     |
| Q_еш=      | м3/год | 2,4   | 7,3   | 9,5   | 10,7  | 11,5  | 12,4  |
| Q_п=       | м3/год | 12,0  | 18,0  | 24,0  | 30,0  | 36,0  | 42,0  |
| Q_ш=       | м3/год | 0,14  | 0,14  | 0,14  | 0,14  | 0,14  | 0,14  |
| D_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| d_ш=       | м      | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,020 |
| H_ш=       | м      | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 | 0,032 |
| b=         | м      | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| alfa_ш=    | рад    | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 | 0,523 |
| n=         | об/хв  | 200   | 200   | 200   | 200   | 200   | 200   |
| K_ш=       |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| ρo=        | кг/м3  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  | 1000  |
| ρo_т=      | кг/м3  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  | 2750  |
| p_a=       | Па     | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 | 98100 |
| g=         | м/с2   | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  | 9,81  |
| K_з=       |        | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| ета_пр=    |        | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   | 0,9   |
| омега_з_1= |        | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   | 8,3   |
| ета_еш=    | %      | 18,36 | 37,23 | 36,34 | 32,74 | 29,33 | 27,10 |

### Результати обробки експериментальних даних

Таблиця В.1 – Результати обробки експериментальних даних подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{ш} = 50$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}, \text{м}^3/\text{хв}$ | Подача ерліфта $Q_e, \text{м}^3/\text{ГОД}$ | Математичне очікування $\bar{x}_i, \text{м}^3/\text{ГОД}$ | Середньоквадратичне відхилення $S_x, \text{м}^3/\text{ГОД}$ | Дисперсія $S_x^2, \text{м}^6/\text{ГОД}^2$ | Значення на кордоні довірливого інтервалу $x_{min} \dots x_{max}, \text{м}^3/\text{ГОД}$ |
|--|---|---|---|--|--|
| 0,2  | 1,4; 1,5;<br>1,6; 1,6;<br>1,5               | 1,52  | 0,084   | 0,007                                      | 1,38...1,66  |
| 0,3  | 5,0; 5,0;<br>5,1; 5,2;<br>5,0               | 5,06  | 0,089   | 0,008                                      | 4,91...5,21  |
| 0,4  | 6,7; 6,5;<br>6,5; 6,6;<br>6,6               | 6,58  | 0,084   | 0,007                                      | 6,44...6.72  |
| 0,5  | 7,7; 7,7;<br>7,6; 7,8;<br>7,7               | 7,70  | 0,071   | 0,005                                      | 7,58...7,82  |
| 0,6  | 8,2; 8,2;<br>8,3; 8,2;<br>8,2               | 8,22  | 0,045   | 0,002                                      | 8,15...8,29  |
| 0,7  | 8,8; 8,9;<br>8,9; 8,9;<br>8,8               | 8,86  | 0,055   | 0,003                                      | 8,77...8,95  |

Розрахунковий критерій Фішера

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_{\text{min}}^2}$$

$$F_{\text{розр}} = \frac{0,008}{0,002} = 4,0.$$

Табличне значення критерію Фішера [183] за ступенями свободи

$$f_{\text{max}} = n_{\text{max}} - 1 = 5 - 1 = 4, \quad f_{\text{min}} = n_{\text{min}} - 1 = 4 - 1 = 3 \quad \text{склало} \quad F_{\text{табл}} = 9,12.$$

За умовою  $F_{\text{табл}} > F_{\text{розр}}$ , яка виконується ( $9,12 > 4,0$ ), порівнювані дисперсії однорідні.

Середньозважена дисперсія

$$S_{\text{сз}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{сз}}^2 = \frac{0,007 \cdot 4 + 0,008 \cdot 4 + 0,007 \cdot 4 + 0,005 \cdot 4 + 0,002 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4}$$

$$= 0,005 \text{ м}^6/\text{год}^2.$$

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики, отримане за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,94%

$$Q_e = -187,5Q_{\text{п}}^4 + 431,02Q_{\text{п}}^3 - 374,38Q_{\text{п}}^2 + 152,23Q - 17,088.$$

Розрахункові значення подачі ерліфта  $Q_e$  при відповідній витраті стисненого повітря  $Q_{\text{п}}$  наведені в таблиці В2.

Таблиця В.2 – Розрахункові значення подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{\text{ш}} = 50$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{\text{п}}$ , м <sup>3</sup> /хв | Подача ерліфту $Q_e$ , м <sup>3</sup> /год | Відхилення розрахункових даних від експериментальних $\Delta$ , % |
|--|--|---|
| 0,2  | 1,8  | 18,4  |
| 0,3  | 5,2  | 2,8   |
| 0,4  | 6,8  | 3,3   |
| 0,5  | 8,0  | 3,9   |
| 0,6  | 8,6  | 4,6   |
| 0,7  | 9,2  | 3,8   |

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{18,4 + 2,8 + 3,3 + 3,9 + 4,6 + 3,8}{6} = 6,1\%.$$

Таблиця В.3 – Результати обробки експериментальних даних подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{ш} = 100$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}, \text{м}^3/\text{хв}$ | Подача ерліфта $Q_e, \text{м}^3/\text{год}$ | Математичне очікування $\bar{x}_i, \text{м}^3/\text{год}$ | Середньоквадратичне відхилення $S_x, \text{м}^3/\text{год}$ | Дисперсія $S_x^2, \text{м}^6/\text{год}^2$ | Значення на кордоні довірливого інтервалу $x_{min} \dots x_{max}, \text{м}^3/\text{год}$ |
|--|---|---|---|--|--|
| 0,2  | 1,7; 1,7;<br>1,6; 1,7;<br>1,6               | 1,66  | 0,055   | 0,003                                      | 1,57...1,75  |
| 0,3  | 5,6; 5,5;<br>5,7; 5,6;<br>5,7               | 5,62  | 0,084   | 0,007                                      | 5,48...5,76  |
| 0,4  | 7,4; 7,5;<br>7,5; 7,3;<br>7,5               | 7,44  | 0,089   | 0,008                                      | 7,29...7,59  |
| 0,5  | 8,5; 8,5;<br>8,4; 8,6;<br>8,6               | 8,52  | 0,084   | 0,007                                      | 8,38...8,66  |
| 0,6  | 9,0; 9,1;<br>9,1; 9,0;<br>9,1               | 9,06  | 0,055   | 0,003                                      | 8,97...9,15  |
| 0,7  | 9,7; 9,8;<br>9,7; 9,7;<br>9,8               | 9,74  | 0,055   | 0,003                                      | 9,65...9,83  |

Розрахунковий критерій Фішера

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_{\text{min}}^2}$$

$$F_{\text{розр}} = \frac{0,008}{0,003} = 2,7.$$

Табличне значення критерію Фішера [183] за ступенями свободи

$$f_{\text{max}} = n_{\text{max}} - 1 = 5 - 1 = 4, \quad f_{\text{min}} = n_{\text{min}} - 1 = 4 - 1 = 3 \quad \text{склало } F_{\text{табл}} = 9,12.$$

За умовою  $F_{\text{табл}} > F_{\text{розр}}$ , яка виконується ( $9,12 > 2,7$ ), порівнювані дисперсії однорідні.

Середньозважена дисперсія

$$S_{сз}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{сз}^2 = \frac{0,003 \cdot 4 + 0,007 \cdot 4 + 0,008 \cdot 4 + 0,007 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4}$$

$$= 0,005 \text{ м}^6/\text{год}^2.$$

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики, отримане за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,64%

$$Q_e = -150x^4 + 381,11x^3 - 360,5x^2 + 156,79x - 18,08.$$

Розрахункові значення подачі ерліфта  $Q_e$  при відповідній витраті стисненого повітря  $Q_{п}$  наведені в таблиці В4.

Таблиця В.4 – Розрахункові значення подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{ш} = 100$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}$ , м <sup>3</sup> /хв | Подача ерліфта $Q_e$ , м <sup>3</sup> /год | Відхилення розрахункових даних від експериментальних $\Delta$ , % |
|---|--|---|
| 0,2   | 1,8  | 8,4   |
| 0,3   | 5,9  | 5,0   |
| 0,4   | 7,7  | 4,1   |
| 0,5   | 8,7  | 2,1   |
| 0,6   | 9,2  | 1,5   |
| 0,7   | 9,9  | 1,6   |

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,4 + 5,0 + 4,1 + 2,1 + 1,5 + 1,6}{6} = 3,8\%.$$

Таблиця В.5 – Результати обробки експериментальних даних подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{ш} = 150$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}$ , м <sup>3</sup> /хв | Подача ерліфта $Q_{е}$ , м <sup>3</sup> /ГОД | Математичне очікування $\bar{x}_i$ , м <sup>3</sup> /ГОД | Середньоквадратичне відхилення $S_x$ , м <sup>3</sup> /ГОД | Дисперсія $S_x^2$ , м <sup>6</sup> /ГОД <sup>2</sup> | Значення на кордоні довірливого інтервалу $x_{min} \dots x_{max}$ , м <sup>3</sup> /ГОД |
|---|--|--|--|--|---|
| 0,2   | 1,8;<br>1,9;<br>1,8;<br>1,8;<br>1,8          | 1,82   | 0,045  | 0,002  | 1,75...1,89   |
| 0,3   | 6,3;<br>6,2;<br>6,2;<br>6,3;<br>6,3          | 6,26   | 0,055  | 0,003  | 6,17...6,35   |
| 0,4   | 8,2;<br>8,2;<br>8,3;<br>8,3;<br>8,4          | 8,28   | 0,084  | 0,007  | 8,14...8,42   |
| 0,5   | 9,4;<br>9,5;<br>9,4;<br>9,5;<br>9,4          | 9,44   | 0,055  | 0,003  | 9,35...9,53   |
| 0,6   | 10,0;<br>10,1;<br>10,1;<br>10,2;<br>10,1     | 10,10  | 0,071  | 0,005  | 9,98...10,22  |
| 0,7   | 10,7;<br>10,7;<br>10,8;<br>10,9;<br>10,8     | 10,78  | 0,084  | 0,007  | 10,64...10,92   |

Розрахунковий критерій Фішера

$$F_{розр} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2} = \frac{0,007}{0,002} = 3,5.$$

Табличне значення критерію Фішера [183] за ступенями свободи

$f_{max} = n_{max} - 1 = 5 - 1 = 4$ ,  $f_{min} = n_{min} - 1 = 4 - 1 = 3$  склало  $F_{табл} = 9,12$ .

За умовою  $F_{табл} > F_{розр}$ , яка виконується ( $9,12 > 3,5$ ), порівнювані дисперсії однорідні.

Середньозважена дисперсія

$$S_{сз}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{сз}^2 = \frac{0,002 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4 + 0,007 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4 + 0,007 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4}$$

$$= 0,004 \text{ м}^6/\text{год}^2.$$

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики, отримане за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,38%

$$Q_e = -216,67Q_{п}^4 + 512,96Q_{п}^3 - 457,83Q_{п}^2 + 189,61Q_{п} - 21,541.$$

Розрахункові значення подачі ерліфта  $Q_e$  при відповідній витраті стисненого повітря  $Q_{п}$  наведені в таблиці В6.

Таблиця В.6 – Розрахункові значення подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{ш} = 150$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}$ , м <sup>3</sup> /хв | Подача ерліфта $Q_e$ , м <sup>3</sup> /год | Відхилення розрахункових даних від експериментальних $\Delta$ , % |
|---|--|---|
| 0,2   | 2,0  | 9,9   |
| 0,3   | 6,5  | 3,8   |
| 0,4   | 8,6  | 3,9   |
| 0,5   | 9,7  | 2,8   |
| 0,6   | 10,5                                       | 4,0   |
| 0,7   | 11,2                                       | 3,9   |

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{9,9 + 3,8 + 3,9 + 2,8 + 4,0 + 3,9}{6} = 4,7\%.$$

Таблиця В.7 – Результати обробки експериментальних даних подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{\text{шт}} = 200$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{\text{п}}, \text{м}^3/\text{хв}$ | Подача ерліфта $Q_{\text{е}}, \text{м}^3/\text{год}$ | Математичне очікування $\bar{x}_i, \text{м}^3/\text{год}$ | Середньоквадратичне відхилення $S_x, \text{м}^3/\text{год}$ | Дисперсія $S_x^2, \text{м}^6/\text{год}^2$ | Значення на кордоні довірливого інтервалу $x_{\text{min}} \dots x_{\text{max}}, \text{м}^3/\text{год}$ |
|---|--|---|---|--|--|
| 0,2   | 2,1; 2,2;<br>2,2; 2,1;<br>2,3                        | 2,18  | 0,084   | 0,007                                      | 2,04...2,32  |
| 0,3   | 7,0; 7,0;<br>7,1; 7,1;<br>7,1                        | 7,06  | 0,055   | 0,003                                      | 6,97...7,15  |
| 0,4   | 9,1; 9,2;<br>9,3; 9,3;<br>9,1                        | 9,20  | 0,100   | 0,010                                      | 9,03...9,37  |
| 0,5   | 10,4; 10,4;<br>10,4; 10,5;<br>10,5                   | 10,44   | 0,055   | 0,003                                      | 10,35...10,53  |
| 0,6   | 11,1; 11,0;<br>11,1; 11,1;<br>11,1                   | 11,08   | 0,045   | 0,002                                      | 11,01...11,15  |
| 0,7   | 11,9; 11,9;<br>11,8; 12,0;<br>11,9                   | 11,90   | 0,071   | 0,005                                      | 11,78...12,02  |

Розрахунковий критерій Фішера

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{S_{\text{min}}^2} = \frac{0,010}{0,002} = 5,0.$$

Табличне значення критерію Фішера [183] за ступенями свободи

$$f_{\text{max}} = n_{\text{max}} - 1 = 5 - 1 = 4, \quad f_{\text{min}} = n_{\text{min}} - 1 = 4 - 1 = 3 \quad \text{склало } F_{\text{табл}} = 9,12.$$

За умовою  $F_{\text{табл}} > F_{\text{розр}}$ , яка виконується ( $9,12 > 5,0$ ), порівнювані дисперсії однорідні.

Середньозважена дисперсія

$$S_{сз}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{сз}^2 = \frac{0,007 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4 + 0,010 \cdot 4 + 0,003 \cdot 4 + 0,002 \cdot 4 + 0,005 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4}$$

$$= 0,005 \text{ м}^6/\text{год}^2.$$

Рівняння регресії експериментальної витратної характеристики, отримане за допомогою ПЕОМ методом найменших квадратів зі середньою похибкою 0,5%

$$Q_e = -220,83Q_{п}^4 + 541,02Q_{п}^3 - 494,04Q_{п}^2 + 206,9Q_{п} - 23,405.$$

Розрахункові значення подачі ерліфта  $Q_e$  при відповідній витраті стисненого повітря  $Q_{п}$  наведені в таблиці В8.

Таблиця В.8 – Розрахункові значення подачі ерліфта з шнековим інтенсифікатором ( $n_{ш} = 200$  об/хв)

| Витрата стисненого повітря $Q_{п}$ , м <sup>3</sup> /хв | Подача ерліфта $Q_e$ , м <sup>3</sup> /год | Відхилення розрахункових даних від експериментальних $\Delta$ , % |
|---|--|---|
| 0,2   | 2,4  | 10,1  |
| 0,3   | 7,3  | 3,4   |
| 0,4   | 9,5  | 3,3   |
| 0,5   | 10,7                                       | 2,5   |
| 0,6   | 11,5                                       | 3,8   |
| 0,7   | 12,4                                       | 4,2   |

Середнє відхилення значень в точках характеристики, отриманої аналітично, від значень в точках регресійної характеристики

$$\Delta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{10,1 + 3,4 + 3,3 + 2,5 + 3,8 + 4,2}{6} = 4,6\%.$$

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Проректор  
 з науково-педагогічної роботи ДУІТ,  
 Л.Н. Ю.П. Дудник  
 20 18 року



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Чередника Володимира Миколайовича  
 на тему «Підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту  
 в особливих умовах шляхом використання ерліфтної установки  
 з шнековим інтенсифікатором»  
 у навчальний процес Київського інституту водного транспорту  
 імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету  
 інфраструктури та технологій

Члени комісії у складі завідувача кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації, д.т.н., с.н.с. Ф. О. Кривошей, виконуючого обов'язки начальника навчально-методичного відділу О. А. Комар та доцента кафедри суднових енергетичних установок допоміжних механізмів суден та їх експлуатації к.т.н., доц. С. Л. Панова, склали акт про те, що результати, які отримані у дисертаційній роботі Чередника Володимира на тему «Підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту в особливих умовах шляхом використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором» використовуються в навчальному курсі «Суднові допоміжні установки, системи та технологічне обладнання» у розділі «Днопоглиблювальна техніка» для бакалаврів в галузі знань 27 «Транспорт» за спеціальністю 271 «Річковий та морський транспорт».

Використані наступні методи та елементи, які розроблені В.М. Чередником в процесі виконання дисертації:

- визначення продуктивності роботи ерліфта з шнековим інтенсифікатором;
- визначення коефіцієнту корисної дії ерліфта з шнековим інтенсифікатором;
- алгоритм знаходження основних конструкційних параметрів ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором;
- визначення області доцільного використання ерліфту з шнековим інтенсифікатором.

Акт розглянуто та схвалено на засіданні кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації. Протокол №12 від «28» червня 2018р.

Зав. каф. СЕУ ДМС та Е,  
 д.т.н, с.н.с.

Ф. О. Кривошей

В.о. нач. навчально-  
 методичного відділу

О. А. Комар

Доцент каф. СЕУ ДМС та Е,  
 к.т.н, доц.

С. Л. Панов

# ТОВ «Стерлінг Пауер»

04070, м. Київ, вул. Волосська, 29 кв. 5

Код ЄДРПОУ: 41186374

Р/рахунок: 2600331583 МФО 334851 у ПАТ «Перший Український Міжнародний Банк», м. Київ

e-mail: vlvm1414@gmail.com

№ 29/18

“ 19 “ 11 2018 г.

До спеціалізованої вченої ради

К 26.110.01

м. Київ, вул. Кирилівська 9.

## АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи**

**Чередника Володимира Миколайовича на тему:**

**«Підвищення ефективності експлуатації днопоглиблювального флоту в особливих умовах шляхом використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором»**

Даним актом засвідчується, що результати теоретичних та експериментальних досліджень ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором виконані Чередником В.М. були передані в суднобудівну проектно-конструкторську компанію ТОВ «СТЕРЛИНГ ПАУЕР» для вивчення та використання під час розроблення проектів суден призначених для виконання днопоглиблювальних робіт. Після вивчення рекомендацій Чередника В.М. щодо розрахунку розмірів конструктивних елементів установки, було вирішено впровадити це технічне рішення у ескізний та технічний проект модифікації малого днопоглиблювального судна проекту ВМ17.1150.

Судно даного проекту призначено для використання на невеликих глибинах для очищення дна відкритих та закритих водоймищ, фарватерів рік, каналів, загальних днопоглиблювальних робіт, видобутку нерудних матеріалів. Особливістю модифікації судна є те, що воно легко змінює насосну установку на ерліфтну, рекомендовану Чередником В.М.

Слід відмітити позитивні якості впроваджених дисертаційних досліджень:

- розширюється область використання вказаного судна для днопоглиблення, що надає можливість використовувати його не тільки в морських прибережних водах, а й у річках та озерах, які мають досить високу рослинність та засміченість;
- збільшується глибина розробки комплексу – з 15 метрів до 20 метрів;
- простота конструкції та легкість переобладнання звичайного ерліфту.

Наша компанія висловлює подяку Череднику В.М. за надану можливість практичного конструкторського впровадження результатів його дисертаційного дослідження та сподівається на подальшу співпрацю в області днопоглиблення та конструювання суден.

/Директор



**В.В.Майберов**



МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ  
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
 «АДМІНІСТРАЦІЯ МОРСЬКИХ ПОРТІВ УКРАЇНИ»

**ФІЛІЯ «ДНОПОГЛИБЛЮВАЛЬНИЙ ФЛОТ» ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА  
 «АДМІНІСТРАЦІЯ МОРСЬКИХ ПОРТІВ УКРАЇНИ»**

📍 просп. Перемоги, 14, м.Київ, 01135    📍 Контрактова площа, 10а, м. Київ, 04070 (адр. лист.)  
 ☎ +38 (044) 324-00-72    📍 вул. Ланжеронівська, 1, м. Одеса, 65026  
 ✉ info.fdf@uspa.gov.ua    🌐 www.uspa.gov.ua    Код ЄДРПОУ 41933856

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

В.о. начальник філії  
 «Днопоглиблювальний флот»  
 ДП «АМПУ»  
 В.О. Шиндерук  
 « 08 » 04 2019 року

**АКТ ВИКОРИСТАННЯ  
 ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором  
 при виконанні днопоглиблювальних робіт**

Україна має великий потенціал розвитку внутрішніх водних шляхів. Дніпро, Південний Буг, Десна - це абсолютно судноплавні річки, які можуть забезпечувати екологічне та економічне транспортування вантажів в межах України, розвантажити автомобільні дороги, а також збільшити транзитний потенціал нашої держави. Для забезпечення зростаючих потреб бізнесу в річкових перевезеннях необхідно підтримувати гарантовані габарити на внутрішніх водних шляхах.

На початку 2019 року у філії «Днопоглиблювальний флот» ДП «АМПУ» в порядку експерименту була реалізована пропозиція Чередника Володимира Миколайовича щодо використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором для виконання днопоглиблювальних робіт. В якості експерименту, земснаряд «Скіф», який задіяно у забезпеченні гарантованих габаритів та відновлення глибини до рівня 3,65 м на Кам'янському водосховищі був дообладнаний ерліфтною установкою запропонованої Чередником В.М.

В процесі днопоглиблення установка підтвердила теоретичні та технічні рішення дисертаційної роботи та довела доцільність її використання у подальшій виробничій діяльності з днопоглиблення. Продуктивність днопоглиблювального судна з запропонованою установкою зросла на 25-40% в залежності від типу ґрунту, а питома витрата палива зменшилась на 4,5-7%.

2

За результатами даних випробувань прийнято рішення про подальшу доцільність використання ерліфтної установки з шнековим інтенсифікатором на днопоглиблювальних суднах компанії.

В.о. начальник служби флоту  
філії «Днопоглиблювальний флот»  
ДП «АМПУ»



М.С. Герасименко





МІНІСТЕРСТВО  
ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ  
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **130913** (13) **U**

(51) МПК

**F04F 1/18** (2006.01)

**(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ**

|  |  |
|--|--|
| <p>(21) Номер заявки: <b>u 2018 08054</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>20.07.2018</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>26.12.2018</b></p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: <b>26.12.2018, Бюл.№ 24</b></p> | <p>(72) Винахідник(и):</p> <p>(73) Власник(и):<br/><b>Чередник Володимир Миколайович,</b><br/>вул. Дубровицька, 3, кв. 76, м. Київ, 04114 (UA)</p> |
|--|--|

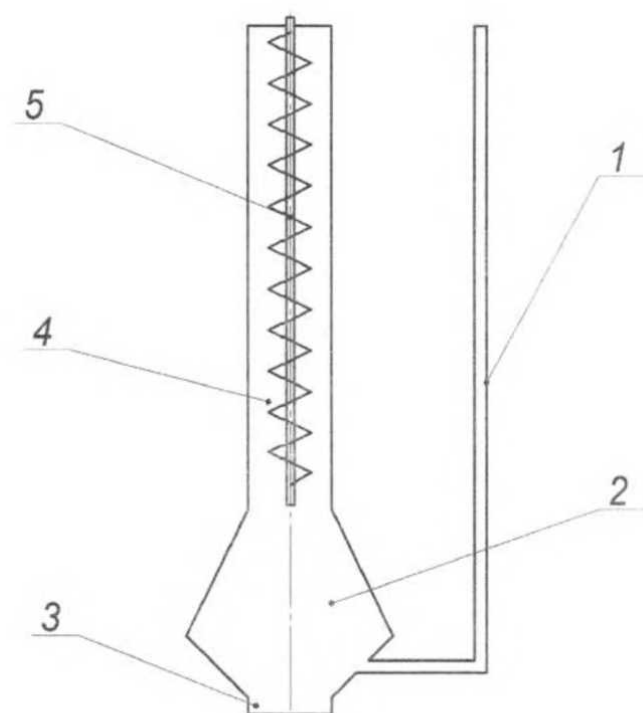
**(54) ЕРЛІФТ**

**(57) Реферат:**

Ерліфт містить повітряну трубу, змішувач, всмоктуючий патрубок, підйомну трубу. Підйомну трубу виконано у вигляді гладкої труби, в яку встановлено шнек, діаметром меншим, ніж внутрішній діаметр підйомної труби, та з можливістю його обертання за допомогою двигуна.

**UA 130913 U**

UA 130913 U



## UA 130913 U

Корисна модель належить до машинобудування і може бути використана безпосередньо в розробці підводних ґрунтів.

Відомий ерліфт для транспортування рідини, який включає водопідйомну трубу, складену з ряду ступенів, котрі виконані у вигляді спряжених конфу-зорів та дифузорів [А.с. СССР № 1504375 А1, МПК F 04 F 1/18, опубл. 30.08.89 р., бюл. № 32]. Недоліком цього підйомника є те, що зі збільшенням густини суміші, або додаванням твердих включень, збільшується сила опору підйому (сили тертя), що в свою чергу призводить до зменшення продуктивності.

В основу корисної моделі поставлена задача створити такий ерліфт, в якому сили тертя не перешкоджали руху трикомпонентної (повітря-вода-тверді часточки) суміші догори, а допомагали її підйому.

Поставлена задача вирішується тим, що ерліфт містить повітряну трубу, змішувач, всмоктуючий патрубок, підйомну трубу. Підйомну трубу виконано у вигляді гладкої труби, в яку встановлено шнек, діаметром меншим, ніж внутрішній діаметр підйомної труби та з можливістю його обертання за допомогою двигуна.

Наявність у корисній моделі суттєвих відмінностей забезпечує технічний результат, який виражається у покращенні змішуванні трикомпонентної суміші по всій висоті в підйомній трубі, що приводить до повнішої віддачі енергії від повітря до твердого компонента, а це в свою чергу збільшує коефіцієнт корисної дії і підвищує продуктивність.

Суть корисної моделі пояснює креслення, де схематично показано ерліфтний підйомник.

Ерліфт складається з повітряної труби 1, змішувача 2, всмоктуючого патрубку 3, підйомної труби 4 круглого перерізу, в яку встановлений шнек 5, що обертається.

Ерліфтний підйомник працює наступним чином.

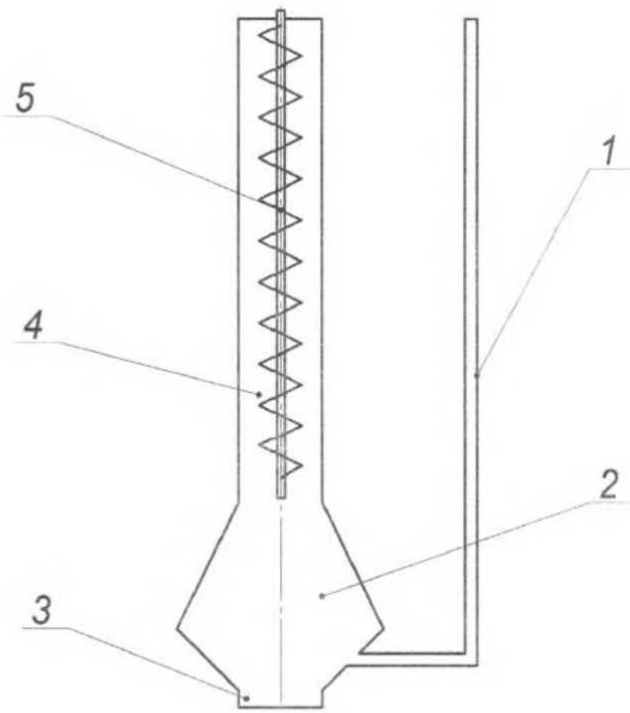
Стисне повітря по повітряній трубі 1 надходить до змішувача 2, де змішується з рідиною. У всмоктуючому патрубку виникає розрідження, що в свою чергу призводить до засмоктування твердих часточок. В змішувачі утворюється трикомпонентна суміш, що рухається по підйомній трубі 4. Шнек 5, що обертається, постійно збурює суміш в підйомній трубі, не дозволяючи проковзувати твердим часточкам, а це в свою чергу збільшує віддачу енергії від повітря до твердого матеріалу, що забезпечить збільшення коефіцієнта корисної дії.

Таким чином, застосування корисної моделі забезпечить підвищення ефективності розробки підводних ґрунтів.

## ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

35 Ерліфт, що містить повітряну трубу, змішувач, всмоктуючий патрубок, підйомну трубу, який **відрізняється** тим, що підйомну трубу виконано у вигляді гладкої труби, в яку встановлено шнек, діаметром меншим, ніж внутрішній діаметр підйомної труби та з можливістю його обертання за допомогою двигуна.

UA 130913 U



---

Комп'ютерна верстка І. Мироненко

---

Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

---

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601