

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ

Красноармійський індустріальний інститут
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»

Калиниченко Валерій Вікторович

УДК 622.276.5:556

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕРЛФТА ДИСКРЕТНОЮ ПОДАЧЕЮ
СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ

Спеціальність 05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоапарати

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Красноармійському індустріальному інституті Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
КОНОНЕНКО Анатолій Петрович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
завідувач кафедри енергомеханічних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
АНДРЕНКО Павло Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри гідропневмоавтоматики і
гідроприводу;

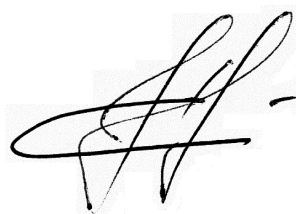
кандидат технічних наук, доцент
ГУСАК Олександр Григорович,
Сумський державний університет,
декан факультету технічних систем та енергоефективних
технологій.

Захист відбудеться «01» липня 2015р. о 13.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2 , корп. А, ауд. 215.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий «___» травня 2015р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради К55.051.03
кандидат технічних наук, доцент



Є.М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергозбереження за рахунок підвищення ККД, вибору раціональних схемних рішень і компоновань є одним із стратегічних напрямків розвитку ерліфтних установок, що забезпечує створення нових енергоефективних машин із застосування енергозберігаючих технологій. Ерліфтні установки знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості: шахтному водовідливі, видобутку з дна морів і водоєм будівельних матеріалів та кошових порід, металургії, поглибленні судноплавних каналів й ін. Таке поширення ерліфтних установок обумовлено рядом суттєвих переваг: значним терміном служби, можливістю перекачування змінних припливів рідин (гідросумішей) без застосування засобів автоматичного регулювання, простоті конструктивного виконання, що не вимагає лиття і механічної обробки при виготовленні та іншими позитивними якостями, що виявляються в конкретних технологічних умовах їх застосування. Однак, розширення області застосування ерліфтів найчастіше стримується порівняно низькою енергетичною ефективністю при транспортуванні рідин і гідросумішей.

Відомо, що найбільше енергоефективно працює ерліфт зі снарядною структурою водоповітряного потоку в піднімальній трубі, що характеризується періодичністю руху рідинних пробок і повітряних снарядів. Розрізняють розвинену і ту, що розвивається, снарядні структури газорідинних сумішей, у першій з яких газові снаряди мають відносно строгу циліндричну форму і розділяються рідинними пробками, які практично цілком займають поперечний перетин піднімальної труби. Підвищення енергетичної ефективності ерліфта зі снарядною структурою водоповітряного потоку в піднімальній трубі відчутно знижується при переході з розвиненої снарядної структури в ту, що розвивається, що обумовлено втратою періодичності руху газових снарядів і рідинних пробок, які до того ж руйнуються. Отже, забезпечення усталеної роботи ерліфта з високо енергоефективною розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку в піднімальній трубі є актуальною науково-практичною задачею, вирішення якої можливо шляхом розробки та дослідження повної математичної моделі робочого процесу ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряної суміші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилися в рамках науково-дослідної держбюджетної теми №Н-16-12 «Обґрунтування конструктивних рішень і високоефективних режимів експлуатації засобів водовідливу вугільних шахт» кафедри електромеханіки й автоматики Красноармійського індустріального інституту ДВНЗ «ДонНТУ», робота зв'язана з науковим напрямком кафедри енергомеханічних систем ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» по розробці схем і засобів транспортування рідин й гідросумішей та відповідає Державній цільовій економічній програмі енергоефективності на 2010-2015 роки (Постанова Кабінету Міністрів України №243 від 01.03.2010р.).

Мета і задачі дослідження. *Мета досліджень* – підвищення енергетичної ефективності робочого процесу ерліфта за рахунок отримання бажаної (раціональної) довжини рідинних пробок снарядного водоповітряного потоку в його піднімальній трубі дискретною подачею стисненого повітря.

Задачі дослідження:

- встановити шляхи підвищення енергетичної ефективності роботи ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку;
- розробити математичну модель робочого процесу ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряної суміші, на основі якої установити раціональні значення і вплив довжин газових снарядів та рідинних пробок на подачу газорідного підйомника;
- установити раціональні значення довжин рідинних пробок снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта;
- провести експериментальні дослідження роботи ерліфта, підтвердити адекватність математичної моделі та можливість керування снарядною структурою газорідного потоку шляхом дискретної подачі стисненого повітря;
- розробити методику проектування та рекомендації з конструктивної розробки загальнопромислових ерліфтів з дискретною подачею стисненого повітря, а також способи і пристрої для їх реалізації.

Об'єкт дослідження – робочий процес ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку в піднімальній трубі.

Предмет дослідження – взаємозв'язок параметрів робочого процесу ерліфта з розвиненою снарядною структурою і дискретною подачею стисненого повітря з його статичними та динамічними характеристиками (енергоефективністю).

Методи дослідження. Аналіз і наукове узагальнення даних літературних джерел дозволили виявити актуальність наукової праці та сформулювати задачі досліджень; на основі аналізу й синтезу гідродинамічних процесів у піднімальній трубі обґрунтована фізична модель роботи ерліфта; методи і закони механіки рідини та газу, наявні закономірності теорії двохфазного потоку й гідравліки покладені в основу математичної моделі робочого процесу газорідного підйомника; виконаний аналітичний аналіз енергетично раціональних значень довжин рідинних пробок снарядного водоповітряного потоку в ерліфті; порівняння результатів математичної моделі робочого процесу ерліфта й експериментальних досліджень підтвердили адекватність розробленої математичної моделі. Вірогідність наукових результатів роботи обумовлена застосуванням апробованих методів досліджень, відповідністю прийнятих припущень характеру розв'язування задач, обґрунтованим вибором контрольної-вимірювальної апаратури і методів обробки експериментальних даних з застосуванням методів математичної статистики і теорії малих вибірок.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено математичну модель робочого процесу ерліфта, яка відрізняється встановленням зв'язку між кінематичними і гідродинамічними параметрами розвиненої снарядної структури водоповітряного потоку та довжинами рідинних пробок й газових снарядів у піднімальній трубі, що дозволило визначити напрямок підвищення енергетичних характеристик ерліфта шляхом дискретної подачі стисненого повітря;
- вперше аналітично встановлені граничні енергетично раціональні відносні довжини рідинних пробок снарядного потоку в піднімальній трубі ерліфта для визначеної області застосування, які становлять $\bar{L}_s = 5 \dots 6$;

- вперше експериментально встановлено можливість керування снарядною структурою потоку, що розвивається, у трубі ерліфта шляхом дискретної подачі стисненого повітря та визначено раціональне співвідношення часу впливу на запірно-регулюючий клапан $t_{відкр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$;

- отримано подальше теоретичне обґрунтування й експериментальне підтвердження підвищення енергетичної ефективності роботи ерліфта зі снарядною структурою водоповітряного потоку, що забезпечує розрахункове збільшення ККД газорідних підйомників на 21 ... 22% для визначеної області застосування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці методики розрахунку, проектування і рекомендацій з конструювання елементів енергоефективних ерліфтів з дискретною подачею стисненого повітря та пристроїв, що забезпечують даний спосіб роботи газорідних підйомників [7, 8], а також їх математичне і програмне забезпечення.

Розроблено і передано шахті «Стаханова» ДП «Красноармійськвугілля» рекомендації з реконструкції шламового ерліфта, що працює традиційно, переведенням на дискретну подачу стисненого повітря. Розробка включена в план впровадження на 2014-2015р., очікуваний річний економічний ефект складає 17,5 тис. грн.

Розроблено і передано центральній збагачувальній фабриці Державного підприємства «Вугільна компанія «Краснолиманська» документацію ерліфтною установки з дискретною подачею стисненого повітря для перемішування мінеральної суспензії на стадії збагачення вугілля у важких середовищах. Очікуваний економічний ефект складає 443,4 тис. грн./рік.

Результати досліджень використані в Красноармійському індустріальному інституті, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» у навчальному процесі в курсах «Спеціальні засоби і схеми транспортування рідин», «Спеціальні засоби і схеми шахтних водовідливних, вентиляторних установок та гідропідйому», «Гідромеханізація, гідро- і пневмотранспорт», а також при курсовому і дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Основні положення, що були отримані в процесі виконання дисертаційної роботи, приведені в дисертації й опубліковані статтях у співавторстві, належать здобувачеві: [1] – визначена графічна залежність числа Re і кінематичної в'язкості ν від відносної витрати повітря q_0 ; [2] – обґрунтовані закономірності зміни коефіцієнта ковзання фаз водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта; [3] – розроблена математична модель робочого процесу ерліфта з урахуванням впливу довжин рідинних пробок на газовміст суміші і дотичних напружень; [4] – розроблена математична модель робочого процесу ерліфта, що враховує довжини газових снарядів і рідинних пробок розвиненої снарядної структури водоповітряного потоку; [5] – експериментальне дослідження роботи ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря в змішувач, що обґрунтовує підвищення ефективності газорідного підйомника з розвиненою снарядною структурою водоповітряної суміші в піднімальній трубі в порівнянні зі снарядною структурою, що розвивається; [6] – аналітичне рішення математичної моделі робочого процесу ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку, що дозволяє теоретично встановити вплив довжини рідинних пробок і

газових снарядів на режими й енергетичну ефективність роботи газорідного підйомника.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й одержали схвалення на: Науково-практичній конференції «Наука-життя-виробництво», Красноармійськ, 2001р.; Регіональній науково-технічній конференції «Наука та техносфера» 2006р.; IV Науково-практичній конференції, Красноармійськ, 26 травня 2010р.; I Міжрегіональній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку вугільної галузі», Селідово, 2010р.; Міжнародній конференції «Вітчизняна та зарубіжна наука на початку другої декади XXI століття», Київ, 2 березня 2013р.; XVIII, XIX Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», Київ, 21-24 травня 2013р. та Кіровоград, 21-24 травня 2014р.; XIV, XV Міжнародних науково-технічних конференціях АС ПП «Промислова гідравліка і пневматика», Одеса, 18-20 вересня 2013р. та Мелітополь, 17-19 вересня 2014р.; II Регіональній науково-практичній конференції КП ДВНЗ ДонНТУ «Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв», Красноармійськ, 2013р.; VI Науково-практичній конференції «Геотехнологія й охорона праці в гірничій промисловості», Красноармійськ, 14 листопаду 2013р.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 19 наукових праць, з них 5 статей у виданнях, внесених до переліку фахових наукових видань України, 1 стаття у фаховому виданні Польщі, 11 тез доповідей у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій, отримано 2 патенти на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновку і додатків. Загальний обсяг роботи складає 242 сторінки, у тому числі 151 сторінка основного машинописного тексту, 36 рисунків, 9 таблиць, 5 додатків на 79 сторінках і списку літератури з 113 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано наукову задачу, відображено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету і завдання досліджень, показано наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, наведені дані про особистий внесок здобувача, апробацію, публікації та структуру дисертації.

Перший розділ «Стан та перспективи розвитку ерліфтних установок, мета і задачі досліджень». Розширення області застосування ерліфтів найчастіше стримується порівняно низькою енергетичною ефективністю. Відомі способи підвищення енергетичної ефективності роботи ерліфтів – наближення робочого процесу зміни стану газоподібного тіла до ізохорного, застосування поверхнево-активних речовин і механічних засобів для підтримки раціональної структури водоповітряного потоку в піднімальній трубі, підтримка раціональної форми поперечного перетину піднімальної труби, мінімізація гідравлічних втрат в умовах змінних витрат рідин та інші не менш важливі положення можуть бути реалізовані в конкретних технологічних умовах і не є універсальними.

Значний внесок в розробку й удосконалювання теоретичних основ робочих процесів ерліфтів внесли вітчизняні вчені: доктори технічних наук Багдасаров В.Г., Герман А.П., Гейер В.Г., Герсєванов Н.М., Груба В.І.,

Давидсон В.Е., Кириченко Е.А., Козлов Б.К., Кононенко А.П., Костерін С.І., Крилов А.П., Логвинов М.Г., Малєєв В.Б., Пірвердян А.М., Пороло Л.В., кандидати технічних наук Козиряцький Л.М., Костанда В.С. та інші. З вчених далекого зарубіжжя істотний внесок у дослідження розглянутих питань внесли Баттерворс Д., Безе Х., Берингер Г., Вебер М., Верслуїс С., Грабів Г., Клаус Г., Локарт Р., Мартинеллі Р., Мойссіс Р., Мердок Дж., Полярський М., Роуз Р., Уекі-Сіро, Хаббард І., Хазітеодороу, Чен К., Фіндлей Д. та інші.

Встановлено, що снарядна структура водоповітряного потоку в піднімальній трубі, у порівнянні з іншими можливими структурами (емульсійною, кільцевою, дисперговою), забезпечує найбільш енергоефективну роботу. Снарядний режим плинну висхідної газорідинної суміші підрозділяють на розвинений і той, що розвивається. Розвинений снарядний режим характеризується довжиною рідинних пробок і газових снарядів, що розподіляються між ними. При відстані між снарядами менше деякого критичного, стабільний характер плинну порушується. Передня частина газового снаряда руйнується і стає попеременно ексцентричною зі зсувом від центра. Зменшення довжини рідинних пробок і збільшення довжини газових снарядів приводить до зниження як подачі ерліфта, так і його енергоефективності. Тому забезпечення в більш широкому діапазоні усталеної роботи ерліфта з розвинутою снарядною структурою водоповітряної суміші є актуальною науковою задачею.

Другий розділ «Математична модель робочого процесу ерліфта з роздільною розвинутою снарядною структурою водоповітряного потоку». Існуючі відомі математичні моделі робочих процесів загальпромислових ерліфтів зі снарядною структурою газорідинної суміші ґрунтуються на врахуванні газомісту через його істинне значення $\varphi(z)$ і оцінці гідравлічних втрат у водоповітряному потоці з використанням значень дотичних напружень $\tau_w(z)$ гомогенної суміші. Такі двохкомпонентні моделі не дозволяють повною мірою виявити вплив абсолютних довжин газових снарядів та рідинних пробок, а також їхніх співвідношень на ефективність роботи газорідинних підйомників, що можливо при використанні роздільної моделі.

При розробці математичної моделі робочого процесу ерліфта з роздільною розвинутою снарядною структурою водоповітряного потоку прийняті наступні допущення: водяні пробки не містять газових включень, а повітряні снаряди – відповідно рідинних; рідинна спадна пристінна плівка води у вертикальній піднімальній трубі відсутня (дане допущення прийняте виходячи з відсутності на даний час достовірних аналітичних методів визначення товщин таких плівок); силою тертя повітряних снарядів об внутрішні стінки піднімальної труби нехтуємо через її малість у порівнянні з іншими зовнішніми силами; процес зміни стану стисненого повітря по довжині піднімальної труби ізотермічний; режим руху водяних пробок у вертикальній піднімальній трубі турбулентний; довжини всіх рідинних пробок у піднімальній трубі рівні між собою, а площі їх поперечного перетину дорівнюють площі поперечного перетину піднімальної труби; зміною тиску по висоті газового снаряда нехтуємо, а його значення в i -ом снаряді приймається рівним тиску на верхньому торці i -ої рідинної пробки.

Рівняння руху i -ої пробки води, починаючи відлік від входу у вертикальну піднімальну трубу ерліфта:

$$m' \cdot dw'(z) / dt = F_p(z) - F'_g - F'_\tau(z) - F'_{g(n-i)}(z), \quad (1)$$

де m' – маса i -ої пробки води; $w'(z)$ – швидкість i -ої пробки води; t – час; $F_p(z)$ – піднімальна сила, обумовлена різницею тисків на нижньому $p(z)$ торці i -ої пробки води і на виході з піднімальної труби p_0 ; F'_g – сила ваги пробки води; $F'_\tau(z)$ – сума сил тертя i -ої пробки і пробок води, що знаходяться вище, об стінки піднімальної труби; $F'_{g(n-i)}(z)$ – сила ваги верхніх $(n - i)$ пробок води; n – загальна кількість пробок води в піднімальній трубі.

Маса кожної з i -их пробок води рівні між собою:

$$m' = \rho' \cdot \omega \cdot L_s, \quad (2)$$

де ρ' – густина води; ω – площа поперечного перетину піднімальної труби; L_s – довжина пробки води.

Піднімальна сила, обумовлена різницею тисків на нижньому $p(z)$ торці i -ої пробки води і на виході з піднімальної труби:

$$F_p(z) = [p(z) - p_0] \cdot \omega = p_{cm} \cdot [1 - z/(H + h)] \cdot \omega, \quad (3)$$

де p_{cm} – надлишковий тиск у змішувачі, $p_{cm} = \rho' \cdot g \cdot h$.

Сила ваги пробки води:

$$F'_g = m' \cdot g, \quad (4)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Сума сил тертя i -ої пробки і пробок води, що знаходяться вище, об стінки піднімальної труби:

$$F'_\tau(z) = \tau'_w(z) \cdot \pi \cdot D \cdot \sum L_s(z), \quad (5)$$

де $\tau'_w(z)$ – дотичне напруження; D – діаметр піднімальної труби; $\sum L_s(z)$ – частина довжини піднімальної труби вище перетину z , зайнята рідинними пробками, сили тертя яких необхідно враховувати:

$$\sum L_s(z) = (H + h - z) \cdot [1 - \phi_{cp}(z)], \quad (6)$$

де $\phi_{cp}(z)$ – середній об'ємний дійсний газовміст водоповітряного потоку на ділянці піднімальної труби довжиною $(H + h - z)$.

Сила ваги верхніх $(n - i)$ рідинних пробок визначається виходячи з пропорції:

$$F'_{g(n-i)}(z) = m' \cdot g \cdot n / (H + h) \cdot (H + h - z) = m' \cdot g \cdot n \cdot (1 - z / (H + h)). \quad (7)$$

Період руху рідинних пробок у перетині, що знаходяться на відстані z_k від нижнього торця піднімальної труби:

$$t_{sm} = (L_s + L_{bm}) / w'_m, \quad (8)$$

де L_{bm} – довжина m -го ($i=m$) газового снаряда при тиску, рівному тиску в перетині z_k піднімальної труби; w'_m – швидкість рідинної пробки в перетині z_k піднімальної труби; m – кількість рідинних пробок ($i=m$) на ділянці піднімальної труби довжиною від її нижнього торця до перетину z_k .

Об'єм рідинної пробки:

$$V_s = 1/4 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L_s. \quad (9)$$

Подача ерліфта:

$$Q_3 = V_s / t_{sm}. \quad (10)$$

Витрата повітря:

$$Q_6 = V_m'' / t_{sm}, \quad (11)$$

де V_m'' – об'єм газового снаряда при $i=m$.

Рішення математичної моделі робочого процесу ерліфта з роздільною розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку виконано аналітично (з допущенням, що середній об'ємний дійсний газовміст водоповітряного потоку на ділянці піднімальної труби довжиною $(H+h-z)$ не залежить від координати z , тобто $\varphi_{cp}(z) = \bar{\varphi}$). Зазначимо, що дане твердження підтверджується чисельним рішенням з використанням ПК.

Аналітичне рішення математичної моделі з урахуванням прийнятого припущення $\varphi_{cp}(z) = \bar{\varphi}$ приводить до результатів, що відрізняються на 12 ... 15% від чисельного рішення за допомогою ПК при обчисленні середнього об'ємного дійсного газовмісту, як $\varphi_{cp}(z)$. Тому для аналізу робочого процесу ерліфта з роздільною розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку прийняті результати, отримані при чисельному рішенні математичної моделі, що виконується методом послідовного наближення.

Рішення математичної моделі робочого процесу ерліфта виконано для газорідних підйомників з діапазонами діаметрів піднімальних труб D до 250 мм, довжин піднімальних труб $H+h$ до 115 м, відносних занурень змішувача $\alpha = 0,393 \dots 0,931$, експериментальні дослідження яких були виконані раніше співробітниками Донецького національного технічного університету (Донецького політехнічного інституту), а також для ерліфта $D=57$ мм, $H+h=2,57$ м, $h=0,93$ м, $\alpha=0,362$, експериментальні дослідження якого виконані в обсязі даної дисертаційної роботи. У результаті рішення математичної моделі робочого процесу ерліфта, як кінцеві, отримані значення подач Q_3 і витрат повітря Q_6 зазначених газорідних підйомників при заданих значеннях й співвідношеннях довжин рідинних пробок L_s та газових снарядів L_b .

Значення обчислених подач Q_3 ерліфта і витрат повітря Q_6 у вигляді залежності $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$, при незмінній величині довжини першого газового снаряда ($i=1$) $L_{b1} = \text{idem}$, нанесені на експериментально отримані витратні характеристики ерліфтів $Q_3 = f(Q_6)$ (приклад – рис. 1; тут і далі $\bar{L}_s = L_s/D$ – відносна довжина рідинної пробки, $\bar{L}_{b1} = L_{b1}/D$ – відносна довжина першого газового снаряда). Тут же наведені графічні залежності $\bar{L}_s = f(Q_6)$ і $q = f(Q_6)$ при $\bar{L}_{b1} = \text{const}$ ($q = Q_6/Q_3$ – питома витрата повітря).

Порівняння розрахункових $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ і експериментально отриманих $Q_3 = f(Q_6)$ залежностей дає підставу стверджувати, що точка перетинання цих кривих визначає відносну довжину рідинної пробки \bar{L}_s в піднімальній трубі даного ерліфта, а також значення питомої витрати повітря q у цьому режимі.

Виконаний аналіз дозволив установити, що для ерліфтів з діапазонами діаметрів піднімальних труб $D=25 \dots 250$ мм, довжин піднімальних труб $H+h=14 \dots 115$ м, відносних занурень змішувача $\alpha = 0,393 \dots 0,931$ значення відносних довжин рідинних пробок становлять: $\bar{L}_s=0,8 \dots 0,9$ при $\alpha=0,393$, $H+h=14$ м, $D=25$ мм; $\bar{L}_s=0,8 \dots 1,0$ при $\alpha=0,393$, $H+h=14$ м, $D=50$ мм; $\bar{L}_s=1,1 \dots 1,3$ при $\alpha=0,500$, $H+h=16$ м, $D=60$ мм; $\bar{L}_s=1,6 \dots 1,7$ при $\alpha=0,500$, $H+h=17,5$ м, $D=100$ мм; $\bar{L}_s=14,0 \dots 15,0$ при $\alpha=0,625$, $H+h=115$ м, $D=150$ мм; $\bar{L}_s=34,0 \dots 35,0$ при $\alpha=0,931$, $H+h=63,7$ м, $D=150$ мм; $\bar{L}_s=5,7 \dots 5,8$ при $\alpha=0,500$, $H+h=16$ м, $D=250$ мм.

Для традиційно працюючого ерліфта $D=57\text{мм}$, $H+h=2,57\text{м}$, $h=0,93\text{м}$, $\alpha=0,362$ осереднене значення відносної довжини рідинних пробок становить $\bar{L}_s = 0,65 \dots 0,75$. Для цього ж ерліфта при дискретній подачі стисненого повітря в діапазоні періодів $t_{\text{відкр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5 \dots 1/2,5$ ($t_{\text{відкр}}$ – час, протягом якого регулювальний клапан на повітропроводі ерліфта відкритий; $t_{\text{закр}}$ – час, протягом якого регулювальний клапан на повітропроводі ерліфтної установки закритий, (розділ 4)) осереднене значення відносної довжини рідинних пробок становить $\bar{L}_s = 0,85 \dots 0,95$.

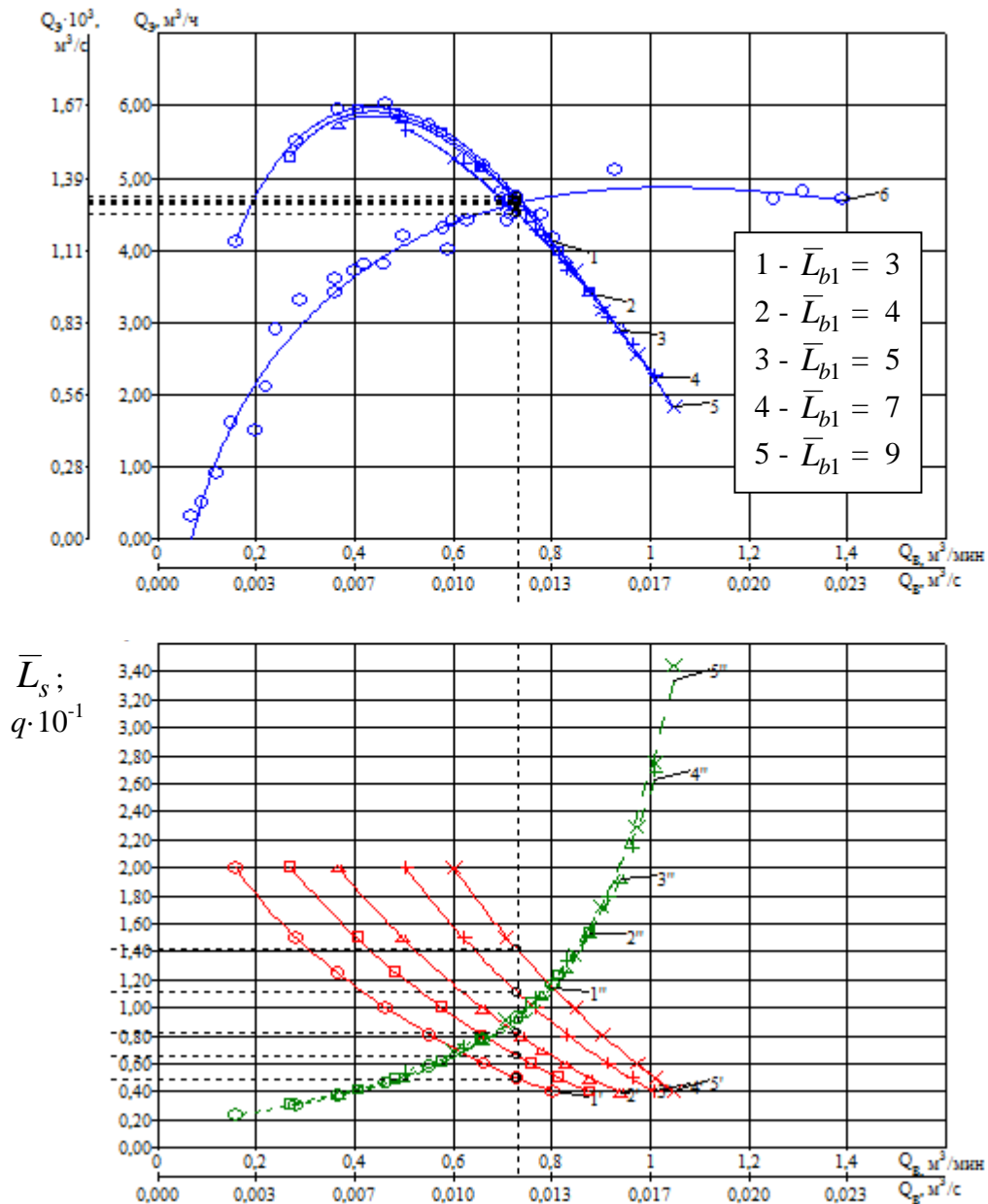


Рисунок 1 – Аналітично-експериментальне визначення значень і співвідношень \bar{L}_s та \bar{L}_{b1} для ерліфта $D=50\text{мм}$, $H+h=14,0\text{м}$, $h=5,5\text{м}$, $\alpha=0,393$: 1 ... 5 – $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$; 6 – $Q_3 = f(Q_6)$; 1' ... 5' – $\bar{L}_s = f(Q_6)$; 1'' ... 5'' – $q = f(Q_6)$.

Адекватність розробленої математичної моделі робочого процесу ерліфта підтверджується результатами експериментальних досліджень (розділ 4) з точністю 30 ... 35%, що за даними літературних джерел є прийнятним результатом для розглянутих процесів.

Третій розділ «Особливості робочого процесу ерліфта з роздільною снарядною структурою водоповітряного потоку». Аналітичне дослідження функціональних зв'язків гідродинамічних параметрів, які у тому числі кількісно характеризують енергетичну досконалість робочого процесу ерліфта зі снарядним водоповітряним потоком, вимагає створення математичної моделі, що дозволяє врахувати вплив, у першу чергу, довжини рідинних пробок у піднімальній трубі на ефективність роботи газорідинного підйомника. Для цього використана модель, що базується на фундаментальних рівняннях збереження маси і кількості руху висхідного двохфазного газорідинного потоку у вертикальній трубі.

Перетворення цих рівнянь стосовно до ерліфту дозволяє одержати диференціальне рівняння стаціонарного висхідного руху водоповітряної суміші у вертикальній піднімальній трубі у виді:

$$p_{cm} \frac{z_i}{H+h} = \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz + G \cdot [x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z)]_0^{z_i} + \\ + g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1-\varphi(z)] \cdot \rho'\} dz, \quad (12)$$

де G – приведена масова швидкість водоповітряної суміші (масова витрата через одиницю площі); $w'(z)$, $w''(z)$ – дійсні швидкості води і повітря у z -ому перетині піднімальної труби відповідно; x – масовий витратний газовміст; $\varphi(z)$ – дійсний газовміст; $\rho''(z)$ – густина повітря.

Відмінністю даного рівняння від раніше використаного для аналізу робочого процесу ерліфта зі снарядною структурою водоповітряного потоку є застосування емпіричних залежностей для визначення дійсного газовмісту $\varphi(z)$ і дотичних напружень $\tau_w(z)$, що містять як незалежний аргумент параметр L_s/D – відносну довжину рідинної пробки:

$$\varphi(z) = Q_g(z) / [C_1 \cdot [Q_g(z) + Q_g] + C_2 \cdot \omega \cdot w''_\infty(z)], \quad (13)$$

$$\tau_w(z) = 1/8 \cdot [1 - \varphi(z)] \cdot \lambda(z) \cdot \rho' \cdot [w_{cm}(z)]^2, \quad (14)$$

де C_1 і C_2 – коефіцієнти; $C_1 = 1,2$; $C_2 = 1 + 8e^{-1,06 \cdot L_s/D}$ при $Re_{cm} > 8000$ (Re_{cm} – число Рейнольдса двохфазної суміші).

Розв'язання даної математичної моделі робочого процесу ерліфта чисельним методом на ПК дозволяє визначати, у тому числі, подачу ерліфта Q_g і потужності, необхідні (на ділянці труби довжиною z_i) для: компенсації втрат на тертя N_{mpi} , компенсації втрат на прискорення $N_{уски}$, подолання сили ваги N_{gi} , компенсації втрат на ковзання фаз $N_{ски}$; потужності, підведені до піднімальної труби: потоком води N' , потоком стисненого повітря N_i'' і водоповітряним потоком $N_{ноди}$, а також ККД ерліфта η_g залежно від витрати повітря Q_g і відносної довжини рідинної пробки $\bar{L}_s = L_s/D$ в піднімальній трубі, тобто встановити вплив структури газорідинних утворень снарядного водоповітряного потоку на ефективність роботи газорідинного підйомника.

Коефіцієнт корисної дії ерліфта визначений по відомій залежності

$$\eta_g = (N_g - N') / N''. \quad (15)$$

Обчислено подачі Q_g , перераховані вище потужності N і ККД η_g ерліфтів, для яких аналітично-експериментальним методом визначені значення і

співвідношення відносних довжин рідинних пробок \bar{L}_s та газових снарядів \bar{L}_{b1} у піднімальних трубах газорідинних підйомників, визначених у розділі 2. Розрахунки виконані для витрат повітря, що визначаються точкою перетинання розрахункових $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ і експериментально отриманих $Q_3 = f(Q_6)$ кривих (наприклад – рис. 1).

Побудовані по отриманим розрахунковим даним графічні залежності відносної подачі $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ і відносних потужностей $\bar{N}_i = f(\bar{L}_s)$ від \bar{L}_s (наприклад – рис. 2) дозволили установити три характерних режими роботи ерліфта: режим I – при середньому значенні \bar{L}_s , визначеному аналітично-експериментальним способом для даного ерліфта; режим II – при значенні \bar{L}_s , що відповідає точці перетинання прямої $\bar{Q}_3 = 1$ і розрахункової кривої $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$; режим III – при значенні \bar{L}_s , після досягнення якого збільшення подачі не спостерігається. Прийняте базисне значення потужності $N_{баз}$ відповідає значенню підведеної потужності $N_{под}$ при подачі ерліфта $Q_3 = Q_{3 баз}$ (пряма 1 – $\bar{Q}_3 = 1$, рис. 2), що також визначається точкою перетинання розрахункових $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ і експериментально отриманих $Q_3 = f(Q_6)$ кривих при визначенні значень \bar{L}_s і \bar{L}_{b1} , визначених у розділі 2.

Порівняння значень відносних подач \bar{Q}_3 ерліфта в режимах роботи I і II дозволяє установити розбіжність у результатах рішення математичних моделей робочого процесу газорідинного підйомника, в основі першої з яких покладене рівняння руху пробки води, наведеного у розділі 2, а в основі другої – рівняння руху водоповітряної суміші отриманого у розділі 3. Ці розбіжності для аналізованих ерліфтів з діаметрами піднімальних труб D до 250 мм при відносних зануреннях змішувачів $\alpha = 0,362 \dots 0,931$ знаходяться в межах 0,5 ... 33,4%, що є прийнятним результатом для розглянутої задачі.

Аналіз роботи ерліфта в режимі III (рис. 2) дозволив встановити гранично максимальне значення \bar{L}_s , що є границею асимптотичного зростання показників енергетичної ефективності роботи газорідинного підйомника (рис. 3). Пояснюється це зменшенням витрат потужності, необхідних для компенсації втрат на ковзання фаз $N_{ск}$, при збільшенні відносної довжини рідинних пробок від мінімально можливої до, наприклад для ерліфта $D=50$ мм, $H+h=14,0$ м, $h=5,5$ м, $\alpha=0,393$, значення $\bar{L}_s = 5$ (рис. 2). Перерозподіл підведеної потужності $N_{под}$ при зменшенні значення $N_{ск}$ забезпечує зростання потужності N_g , затрачуваної на подолання сили ваги, а, отже, збільшення подачі ерліфта Q_3 і його ККД, при порівняно незначному зростанні втрат на тертя $N_{тр}$ і прискорення $N_{уск}$ (рис. 2). Подальше збільшення відносної довжини рідинних пробок \bar{L}_s понад значення \bar{L}_s в режимі III не приводить до росту ККД ерліфта.

Аналогічні обчислення подач Q_3 (\bar{Q}_3), потужностей N_i (\bar{N}_i) і ККД ерліфта η_3 залежно від \bar{L}_s за інших рівних умов із графічними побудовами (приклад – рис. 2, рис. 3), виконані для піднімальних труб з діаметрами D до 250 мм, довжинами $H+h$ до 115 м, при відносних зануреннях змішувачів $\alpha = 0,362 \dots 0,931$. Це дозволило установити для цих ерліфтів гранично максимальні енергетично доцільні значення відносних довжин рідинних пробок, що становлять $\bar{L}_s = 5 \dots 6$. Ступінь збільшення ККД аналізованих ерліфтів

становить: у режимі III порівняно з режимом I – 1,0 ... 1,6 рази, у режимі III порівняно з режимом II – 1,01 ... 1,48 рази, тобто забезпечить в цілому підвищення ККД газорідинних підйомників на величину в 1,6 рази більшу в порівнянні з традиційно працюючими.

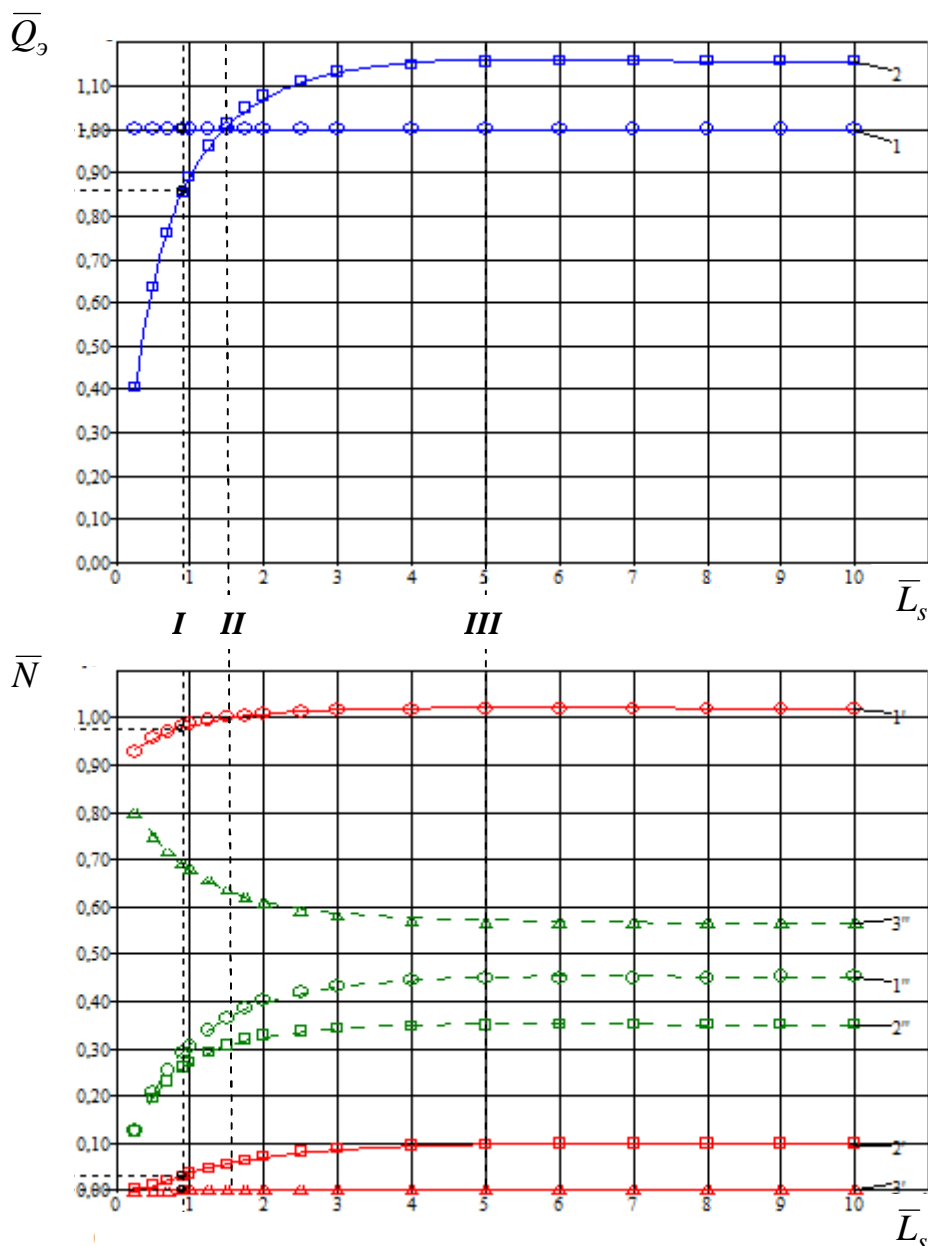


Рисунок 2 – Залежності відносної подачі \bar{Q}_3 і потужностей водоповітряного потоку \bar{N} від відносної довжини рідинних пробок \bar{L}_s у піднімальній трубі ерліфта $D=50\text{мм}$, $H+h=14,0\text{м}$, $h=5,5\text{м}$, $\alpha=0,393$ при витраті повітря $Q_6=0,730\text{ м}^3/\text{хв}$ ($1,22 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3/\text{с}$) (базисні значення $Q_3=4,650\text{ м}^3/\text{год}$, $N=0,593\text{ кВт}$): 1 – $\bar{Q}_3 = 1$; 2 – $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$; 1' – $\bar{N}_{\text{под}} = f(\bar{L}_s)$; 1'' – $\bar{N}_{\Sigma} = f(\bar{L}_s)$; 2' – $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$; 2'' – $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$; 3' – $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$; 3'' – $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$; [де $\bar{N}_{\Sigma} = \bar{N}_{\text{мп}} + \bar{N}_g + \bar{N}_{\text{уск}}$]; I, II, III – режими.

Згідно експериментальних даних, отриманих автором при дослідженні газорідинного підйомника $D=57\text{мм}$, $H+h=2,57\text{м}$, $h=0,93\text{м}$, $\alpha=0,362$, ступінь збільшення подачі ерліфта k_Q при збільшенні відносної довжини рідинних пробок від $\bar{L}_s=0,7$ [при традиційній роботі підйомника і витраті повітря

$Q_8=0,950 \text{ м}^3/\text{хв}$ ($1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$) до $\bar{L}_s=0,9$ [при дискретній подачі стисненого повітря в діапазоні періодів $t_{відкр}/t_{закр}=1/1,5 \dots 1/2,5$ при витраті повітря $Q_8=0,840 \text{ м}^3/\text{хв}$ ($1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$)] знаходиться в межах $k_Q=1,21 \dots 1,22$ (відношення подачі ерліфта Q_8 при $\bar{L}_s = 0,9$ до подачі ерліфта Q_9 при $\bar{L}_s = 0,7$). Похибка у визначенні ступеня збільшення подачі k_Q на основі розробленої математичної моделі робочого процесу даного ерліфта знаходиться в межах $3,28 \dots 7,38\%$, що є прийнятним результатом.

Таким чином, енергоефективність роботи ерліфта $D=57\text{мм}$, $H+h=2,57\text{м}$, $h=0,93\text{м}$, $\alpha=0,362$ при збільшенні відносної довжини рідинних пробок від $\bar{L}_s = 0,7$ до $\bar{L}_s = 0,9$ збільшується на $21 \dots 22\%$.

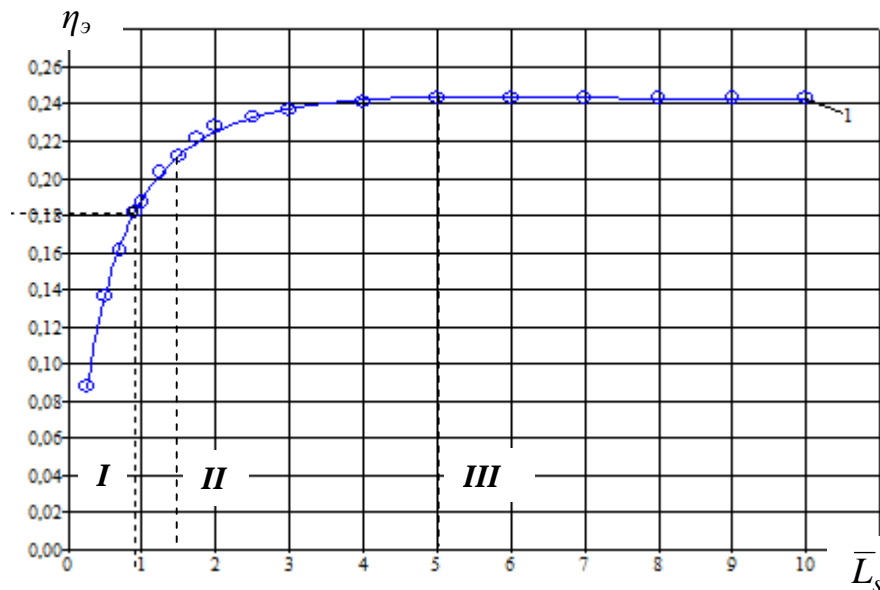


Рисунок 3 – Залежність ККД ерліфта η_9 від відносної довжини рідинних пробок \bar{L}_s у піднімальній трубі $D=50 \text{ мм}$, $H+h=14,0 \text{ м}$, $h=5,5 \text{ м}$, $\alpha=0,393$ при витраті повітря $Q_8=0,730 \text{ м}^3/\text{хв}$ ($1,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$): $1 - \eta_9 = f(\bar{L}_s)$; I, II, III – режими.

Четвертий розділ «Експериментальні дослідження робочих процесів традиційно працюючого ерліфта і ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря». Задачі експериментальних досліджень роботи ерліфтів:

- дослідження роботи ерліфта з піднімальною трубою діаметром $D=57 \text{ мм}$ і довжиною $H+h=2,57 \text{ м}$, геометричним зануренням змішувача $h=0,93 \text{ м}$ і відносним зануренням змішувача $\alpha=0,362$ з безперервною (традиційно працюючий ерліфт) і дискретною подачею стисненого повітря, метою яких було підтвердження адекватності математичної моделі робочого процесу ерліфта з роздільною розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку;

- доведення можливості зміни довжини рідинних пробок снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта дискретною подачею стисненого повітря і підвищення при цьому енергоефективності його робочого процесу.

Експериментальна ерліфтна установка, (рис. 4) була побудована в лабораторії кафедри електромеханіки й автоматики Красноармійського індустріального інституту ДВНЗ «ДонНТУ». Прилади, датчики та апаратуру, що реєструє, вибирали таким чином, щоб вони задовольняли вимогам точності. Для

виміру статичного тиску, витрати, температури використовувались стандартні прилади і методи. Розрахунок похибок вимірювання здійснювався з використанням статистичних методів. Виключали грубі виміри використовуючи критерій Стюдента. Випадкові похибки визначали з теорії малих вибірок. Розраховували довірчий інтервал всіх вимірюваних величин. За результатами розрахунку встановлено, що вимірювання проводили з відносною середньою квадратичною похибкою, яка при вимірюванні тиску складає – 3,2 %, витрати – 1,9 %, об'єму повітря – 3,8 %, газівмісту – 4 %. Причому, з імовірністю, яка дорівнює 0,95, можна стверджувати, що значення вимірюваних величин знаходились у довірчому інтервалі, при якому максимальне відхилення від їх середнього вимірюваного значення не більше для: тиску – 6 %; витрати – 4,5 %, об'єму повітря – 5,4 %, газівмісту – 5,5 %.

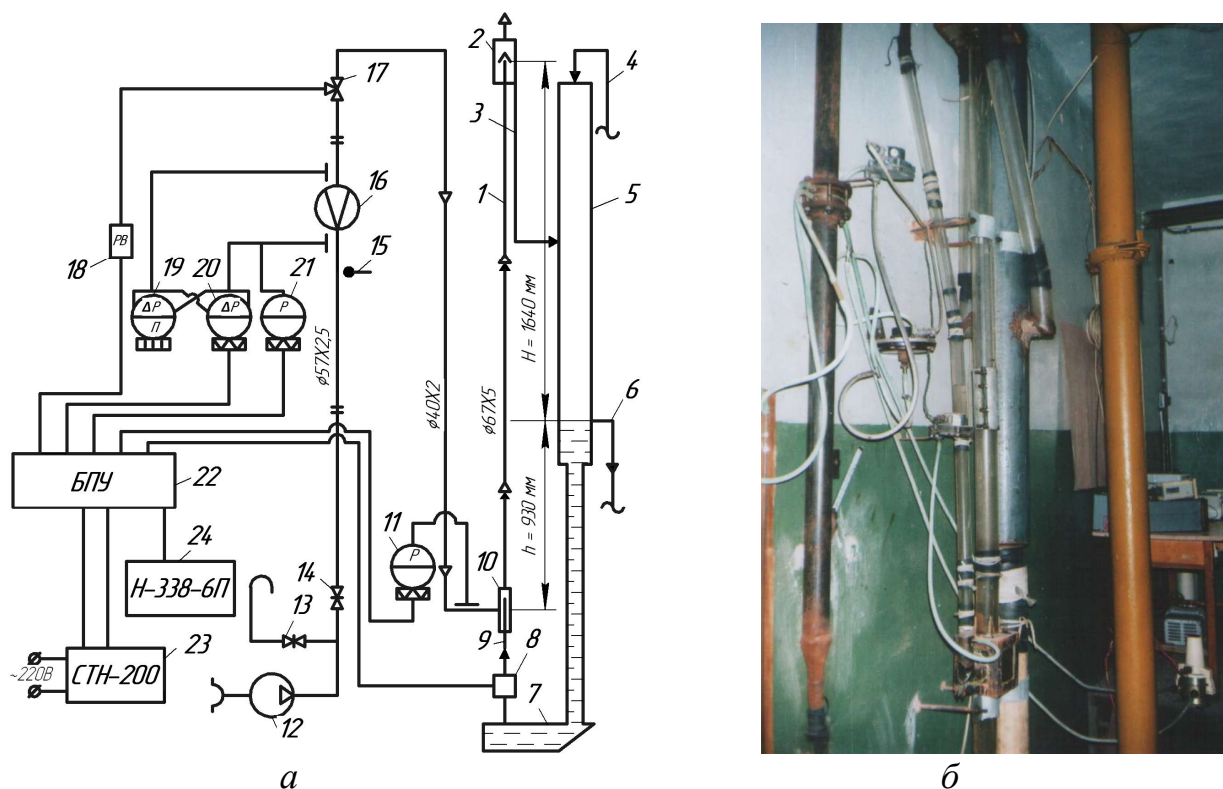


Рисунок 4 – Експериментальна ерліфтна установка, *а* – схема, *б* – фото:

1 – піднімальна труба; 2 – повітровідділювач; 3, 4, 6 – трубопроводи, відповідно, що відводить, підживлення і переливний; 5 – вертикальна ємність; 7 – буферна ємність; 8 – витратомір; 9 – труба, що подає; 10 – змішувач; 11, 21 – датчик тиску; 12 – повітряний нагнітач; 13, 14 – вентилі; 15 – ртутний термометр; 16 – вимірювальна діафрагма; 17 – запірно-регулюючий клапан з електромагнітним приводом; 18 – реле часу; 19 – водяний диференціальний манометр; 20 – датчик перепаду тисків; 22 – блок живлення і керування; 23 – стабілізатор напруги; 24 – самописець.

Виконання вимог подібності було забезпечено відповідністю відносного занурення змішувача α , відносної довжини піднімальної труби $(H+h)/D$, автомодельністю зони досліджень згідно Re , встановленням діапазону застосовності результатів експерименту роботи ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря згідно числа Струхаля Sh .

У процесі експерименту були отримані витратні характеристики ерліфта $Q_3 = f(Q_6)$ (рис. 5), залежності зміни тиску в змішувачі $p_{cm} = f(Q_6)$ і гідростатичного тиску геометричного занурення змішувача $p_{n.c} = f(Q_6)$ при

безперервній (традиційно працюючий ерліфт) і дискретній подачі стисненого повітря. Похибка вимірів витрат стисненого повітря і подачі ерліфта не перевищували 2%. Експериментальні дані оброблені на ПК методом найменших квадратів, отримані рівняння регресії описують дослідні точки зі середньоквадратичною похибкою, що не перевищує 1%.

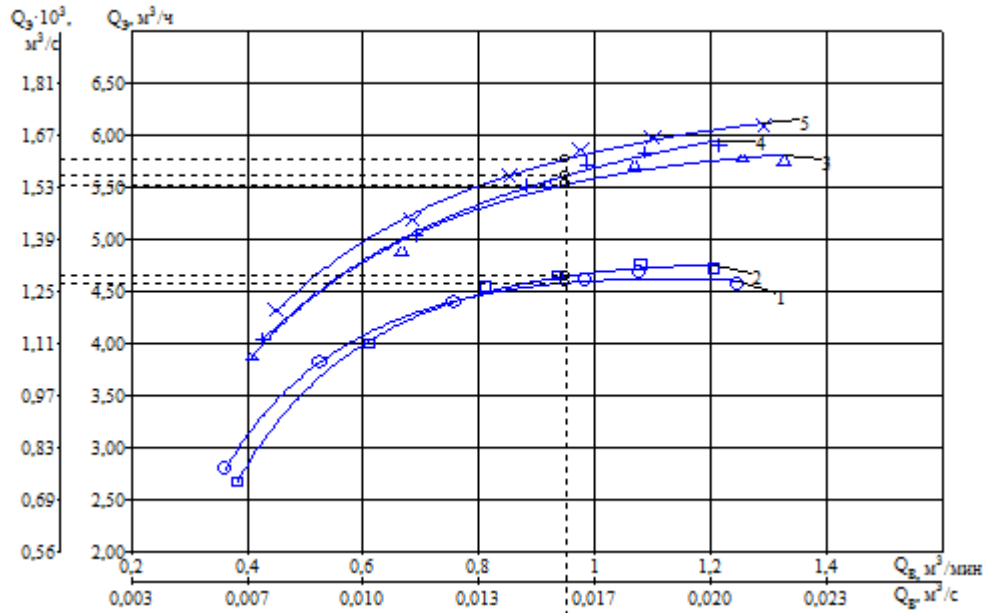


Рисунок 5 – Експериментальні витратні характеристики $Q_0 = f(Q_0)$ ерліфта $D=57$ мм, $H+h=2,57$ м, $h=0,93$ м, $\alpha=0,362$ при: 1 – традиційній роботі ерліфта; 2 ... 5 – дискретній подачі стисненого повітря з періодичністю $t_{\text{відкр}}/t_{\text{закр}}$: 2 – 1/1; 3 – 1/1,5; 4 – 1/2; 5 – 1/2,5 (у приведених позначеннях, наприклад, 1/2 – протягом $t_{\text{відкр}}=1$ с запірно-регулюючий клапан відкритий і протягом $t_{\text{закр}}=2$ с повітропровід перекривається запірно-регулюючим клапаном)

Візуальне спостереження за водоповітряним потоком у прозорій піднімальній трубі ерліфта $D=57$ мм, $H+h=2,57$ м, $h=0,93$ м і $\alpha=0,362$ дає підставу стверджувати, що на всіх експериментально дослідних режимах при традиційній роботі підйомника структура водоповітряної суміші відноситься до снарядної, що розвивається; при дискретній подачі стисненого повітря газорідинний потік стає більш упорядкованим із зовнішніми ознаками розвиненої снарядної структури. При цьому, згідно візуальних спостережень з вимірами, дискретна подача стисненого повітря з періодами часу $t_{\text{відкр}}/t_{\text{закр}}=1/1,5 \dots 1/2,5$ забезпечує збільшення довжини рідинних пробок у піднімальній трубі на 30 ... 40% у порівнянні з традиційною роботою ерліфта.

Отримані експериментальні дані роботи ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря відповідно до положень теорії подібності і моделювання правомірно відносити до газорідинних підйомників з відносними зануреннями змішувачів $\alpha \geq 0,362$, відносними довжинами піднімальних труб $(H+h)/D \leq 45$, значеннями $Sh=0,123 \dots 0,992$ при відповідності Re водоповітряної суміші автомобельній зоні.

П'ятий розділ «Методика проектування та рекомендації з розробки загальнопромислового ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря і практичне застосування результатів досліджень». Загальнопромисловим

прийнято вважати ерліфт, як правило, з піднімальною трубою довжиною $H+h \leq 15 \dots 20$ м і діаметром $D \leq 300 \dots 400$ мм. Для таких ерліфтів при відносних зануреннях змішувача $\alpha \geq 0,4$ у діапазоні $Sh = 0,123 \dots 0,992$ дискретна подача стисненого повітря дозволить підвищити енергетичну ефективність роботи гідроапаратів.

При розробці ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря, як і для традиційно працюючого ерліфта, необхідними вихідними даними для розрахунку основних геометричних та технологічних параметрів є необхідна подача Q_s , висота підйому рідини (гідросуміші) щодо її вихідного рівня H , густина рідини або гідросуміші, що перекачується, ρ' (або її консистенція), щільність твердого матеріалу, що транспортується, ρ_m , середньозважена і максимальна крупність твердих часток d_k , можливе джерело пневмоенергії. Величини, що знаходяться: діаметр труби, що подає, d та піднімальної труби D , тиск p_s й витрата Q_s стисненого повітря як при традиційній роботі ерліфта, так і при дискретній подачі.

Раціональне співвідношення періодів часу $t_{відкр}/t_{закр}$, що характеризують положення запірно-регулюючого елемента повітряного клапана на повітропроводі, при дискретній подачі стисненого повітря в змішувач ерліфта визначається дослідним шляхом у процесі виконання пусконаладжувальних робіт впроваджуваної ерліфтної установки, виходячи з мінімально можливого значення цього співвідношення, межею чого є втрата стійкості транспортування (ліфтування) рідини (гідросуміші). Аналітичне визначення значення співвідношення $t_{відкр}/t_{закр}$ для кожного з проєктованих ерліфтів із заданими геометричними і технологічними параметрами в даний час не є можливим.

Розрахунок конструктивних і технологічних параметрів ерліфтної установки з дискретною подачею стисненого повітря в змішувач газорідинного підйомника виконується в два етапи: попередній – для традиційної роботи підйомника й уточнений – з урахуванням дискретної подачі стисненого повітря.

Після визначення, в обсязі попереднього розрахунку, основних геометричних і технологічних параметрів традиційно працюючої ерліфтної установки ($H+h$, h , α , Q_s , $Q_s^{тради}$, D , d) з використанням розробленої комп'ютерної програми будуються витратні характеристики ерліфта $Q_s = f(Q_s)$ для кожного зі значень відносних довжин рідинних пробок снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі в діапазоні $\bar{L}_s = 0,25 \dots 10$. За даними побудованих витратних характеристик визначається залежність витрати повітря від відносної довжини рідинних пробок $Q_s = f(\bar{L}_s)$ при заданій необхідній подачі ерліфта Q_s . З залежності $Q_s = f(\bar{L}_s)$ приймається, що відносна довжина рідинних пробок \bar{L}_s при витраті повітря $Q_s^{тради}$ відповідає відносній довжині $\bar{L}_s^{тради}$ для традиційної роботи ерліфта.

Відповідно до результатів досліджень, виконаних у даній роботі, дискретна подача в змішувач ерліфта стисненого повітря зі співвідношеннями періодів часу, що характеризують положення запірно-регулюючого елемента повітряного клапана, у діапазоні $t_{відкр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$ забезпечує на 30 ... 40% збільшення довжини рідинних пробок L_s у порівнянні з традиційною роботою

ерліфта. Тоді відносна довжина рідинних пробок снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря:

$$\bar{L}_s^{\text{дискр}} = (1,3 \dots 1,4) \cdot \bar{L}_s^{\text{традиц}}. \quad (16)$$

За значенням $\bar{L}_s^{\text{дискр}}$ з побудованої для даного ерліфта залежності $Q_6 = f(\bar{L}_s)$ визначається витрата повітря ерліфтом при його дискретній подачі $Q_6^{\text{дискр}}$, що менше витрати повітря $Q_6^{\text{традиц}}$ при традиційній роботі газорідинного підйомника. Послідовність розрахунку основних геометричних і технологічних параметрів визначається алгоритмом інженерного розрахунку ерліфтною установки з дискретною подачею стисненого повітря в змішувач ерліфта.

Розроблені способи і пристрої дискретної подачі стисненого повітря в змішувач ерліфта захищені патентами на корисні моделі.

Розроблено рекомендації з реконструкції шламового ерліфта шахти «Стаханова» ДП «Красноармійськвугілля» переведенням на дискретну подачу стисненого повітря. Дискретна подача стисненого повітря в змішувач шламового ерліфта шахти «Стаханова» ($D=307$ мм, $H+h=5,5$ м, $\alpha=0,55 \dots 0,64$) у порівнянні з традиційною роботою підйомника дозволить скоротити витрата повітря на 10 ... 12%, що забезпечить річний економічний ефект у розмірі 17,5 тис. грн.

Розроблена ерліфтна установка для перемішування мінеральної суспензії центральної збагачувальної фабрики ДПВК «Краснолиманська». Впровадження замість використовуваного в даний час шламового насоса ШН250-34 розробленої ерліфтною установки з подачею $Q_3=250$ м³/год при дискретній подачі стисненого повітря в кількості $Q_6=7,29 \dots 7,56$ м³/хв у змішувач ерліфта ($D=203$ мм, $H+h=3,85$ м, $h=2,5$ м, $\alpha=0,6$) забезпечить річний економічний ефект у розмірі 443,4 тис. грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна 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% у порівнянні з традиційно працюючими.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають у наступному:

- на основі аналізу літературних джерел встановлено, що висхідний вертикальний газорідинний потік з розвиненою снарядною структурою в порівнянні з тим, що розвивається, характеризується зменшенням відносної швидкості газової фази зі збільшенням дійсного газовмісту та довжин рідинних пробок, що, стосовно до ерліфту, забезпечує зниження втрат на ковзання фаз, підвищення подачі і, отже, більш високу енергетичну ефективність роботи газорідинного підйомника;

- розроблено математичну модель робочого процесу ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку, що дозволяє визначати вплив довжин газових снарядів та рідинних пробок на гідродинамічні параметри процесу ліфтування рідини, а також, на основі аналітико-експериментального методу, визначати довжини снарядів і пробок у

піднімальній трубі гідроапарата. Середні відхилення значень відносних довжин рідинних пробок, обчислених аналітично, від експериментальних даних становлять 30 ... 35%, що підтверджує адекватність математичної моделі;

- аналітично встановлено, на основі рішення уточненого рівняння висхідного руху снарядної газорідинної суміші, що для ерліфтів з піднімальними трубами довжиною $H+h \leq 115$ м, діаметрами D до 250 мм, у діапазоні відносних занурень змішувачів $\alpha = 0,362 \dots 0,931$ граничні енергетично доцільні значення відносних довжин рідинних пробок снарядного водовоздушного потоку становлять $\bar{L}_s = 5 \dots 6$, при яких забезпечується підвищення ККД газорідинних підйомників до величини в 1,6 рази більшої в порівнянні з традиційним;

- проведеними експериментальними дослідженнями ерліфта $D=57$ мм, $H+h=2,57$ м, $h=0,93$ м, $\alpha=0,362$ доведена можливість упорядкування снарядної структури, що розвивається, традиційно працюючого ерліфта в близьку до розвиненої зі збільшенням довжин рідинних пробок на 30 ... 40% і підвищенням ККД на 21 ... 22% при дискретній подачі стисненого повітря з періодами часу впливу на запірно-регулюючий клапан $t_{відкр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$;

- розроблено методику проектування, рекомендації та інженерний метод розрахунку ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря, правомірність яких обмежується значеннями відносних занурень змішувачів $\alpha \geq 0,4$, відносних довжин піднімальних труб $(H+h)/D \leq 45$, чисел Струхалія $Sh = 0,123 \dots 0,992$ при відповідності числа Рейнольдса Re водовоздушно суміші автотельній зоні. Розроблені способи і пристрої дискретної подачі стисненого повітря в змішувач ерліфта захищені патентами на корисні моделі. Розроблені рекомендації дозволяють у подальшому визначати раціональні конструктивні і робочі параметри ерліфтних установок різного технологічного призначення, що дозволяє скоротити час їх проектування.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на шахті «Стаханова» ДП «Красноармійськвугілля», ЦЗФ ДПВК «Краснолиманська» з очікуваним загальним річним економічним ефектом 460,9 тис. грн. та у навчальний процес ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» і Красноармійський індустріальний інститут ДВНЗ «ДонНТУ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Определение числа Рейнольда и кинематической вязкости смеси в подъемной трубе эрлифта / Логвинов Н.Г., Надеев Е.И., Калиниченко В.В. [та ін.] // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – Вип. 42. – С. 144 - 148.

2. Определение плотности смеси в эрлифте / В.В. Вознесенский, А.И. Ганза, В.В. Калиниченко [та ін.] // Вісник інженерної академії України. – 2005. – № 2-3, С. 74 - 78.

3. Калиниченко В.В. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – №5 (979). – С. 110 - 118.

4. Калиниченко В.В. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Наукові праці Донецького національного технічного

університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 2(26). – С. 151 - 164.

5. Калиниченко В.В. Экспериментальное обоснование влияния дискретной подачи сжатого воздуха на энергоемкость рабочего процесса эрлифта / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2014. – № 1 (43). – С. 45 - 50.

6. Калиниченко В.В. Аналитическое решение математической модели рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, Г.В. Улитин, В.В. Калиниченко MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – 2014. – Vol. 16 №5. – С. 137 - 140.

7. Пат. на корисну модель 14378 Україна, МПК F04F 1/18. Ерліфт / Малєєв В.Б., Надєєв Є.І., Калиниченко В.В., Ганза А.І., Немцев Е.М.; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет; заявл. 14.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.

8. Пат. на корисну модель 41406 Україна, МПК F04F 1/18. Газліфт / Триллер С.А., Надєєв Є.І., Калиниченко В.В., Ганза А.І., Немцев Е.М.; заявник і патентовласник ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»; заявл. 19.11.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 5.

9. Калиниченко В.В. Синхронизатор автоколебаний эрлифтных установок / Н.Г. Логвинов, Е.И. Надеев, В.В. Калиниченко // Рег. науч.-практ. конф. «Наука-жизнь-производство». – Красноармейск, 2001. – С. 44 - 47.

10. Калиниченко В.В. Визначення параметрів газорідинної суміші в підйомній трубі ерліфта / В.В. Вознесенский, А.И. Ганза, В.В. Калиниченко [та ін.] // Рег. наук.-техніч. конф. «Наука та техносфера». – Красноармейск, 2006. – С. 72 - 78.

11. Калиниченко В.В. Анализ некоторых уравнений движения газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта / Е.И. Надеев, Е.А. Триллер, В.В. Калиниченко // IV науч.-практ. конф. «Геотехнологія і охорона праці у гірничій промисловості». – Красноармейск, 2010. – С. 153 - 158.

12. Калиниченко В.В. Регулятор стабилизации режимов работы эрлифта / Е.И. Надеев, А.И. Ганза, В.В. Калиниченко [та ін.] // I Міжрег. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку вугільної галузі». – Селідово, 2010. – С. 50 - 52.

13. Калиниченко В.В. Влияние структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока на энергоэффективность эрлифта / В.В. Калиниченко // Міжнар. конф. «Вітчизняна та зарубіжна наука на початку другої декади ХХІ століття». – Київ, 2013. – С. 91 - 94;

14. Калиниченко В.В. Особенности работы эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // XVIII Міжнар. наук.-техніч. конф. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – Київ, 2013. – С. 112 - 115;

15. Калиниченко В.В. Математическая модель рабочего процесса эрлифта со снарядным раздельным водовоздушным потоком / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // XIV Міжнар. наук.-техніч. конф. АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». – Одеса, 2013. – С. 129 - 130.

16. Калиниченко В.В. Деякі аспекти експлуатації ерліфтних установок / В.В. Калиниченко // II рег. наук.-практич. конф. «Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв». – Красноармійськ, 2013. – С. 35 - 38;

17. Калиниченко В.В. Расчет газосодержания потока смеси в подъемной трубе эрлифта / Е.И. Надеев, В.В. Калиниченко // VI наук.-прак. конф. «Геотехнологія і охорона праці у гірничій промисловості». – Красноармійськ, 2013. – С. 142 - 145;

18. Калиниченко В.В. Экспериментальное подтверждение влияния дискретной подачи сжатого воздуха на энергоэффективность работы эрлифта / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // XIX Міжнар. наук.-техніч. конф. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – Кіровоград, 2014. – С. 127 - 129;

19. Калиниченко В.В. Повышение эффективности работы эрлифта дискретной подачей сжатого воздуха / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // XV Міжнар. наук.-техніч. конф. АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». – Мелітополь, 2014. – С. 33.

АНОТАЦІЯ

Калиниченко В.В. Підвищення ефективності роботи ерліфта дискретною подачею стисненого повітря. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 - Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. - Сумський державний університет, Суми, 2014.

Вирішена актуальна науково-технічна задача підвищення енергетичної ефективності роботи ерліфтів за рахунок перетворення снарядного водоповітряного потоку, що розвивається, в близький до розвиненого із збільшенням довжин рідинних пробок в підйомних трубах дискретною подачею стисненого повітря, що забезпечує зниження енергоємності газорідинних підйомників на 21 ... 22% у порівнянні з традиційно працюючими.

На основі чисельного вирішення математичної моделі робочого процесу ерліфта з розвиненою снарядною структурою водоповітряного потоку і уточненого рівняння висхідного руху снарядної газорідинної суміші, а також порівняння отриманих результатів з дослідними даними, визначені відносні довжини рідинних пробок в підйомних трубах традиційно працюючих ерліфтів та їх граничні енергетично доцільні значення, які становлять $\bar{L}_s = 5 \dots 6$.

Проведеними експериментальними дослідженнями ерліфта доведена можливість упорядкування снарядної структури традиційно працюючого ерліфта в близьку до розвиненої із збільшенням довжин рідинних пробок на 30 ... 40% і підвищенням ККД на 21 ... 22%.

Ключові слова: ерліфт, математична модель, робочий процес, енергоефективність, снарядний водоповітряний потік, дискретна подача стисненого повітря, довжина рідинних пробок.

АННОТАЦИЯ

Калиниченко В.В. Повышение эффективности работы эрлифта дискретной подачей сжатого воздуха. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Сумской государственной университет, Сумы, 2014.

Решена актуальная научно-техническая задача повышения энергетической эффективности работы эрлифтов за счет преобразования развивающегося

снарядного водовоздушного потока в близкий к развитому с увеличением длин жидкостных пробок в подъемных трубах дискретной подачей сжатого воздуха, что обеспечивает снижение энергоемкости газожидкостных подъемников на 21 ... 22% в сравнении с традиционно работающими.

Развитые снарядные восходящие водовоздушные потоки в вертикальных трубах характеризуются меньшими относительными скоростями фаз и большими длинами жидкостных пробок в сравнении развивающимися. В эрлифтах это обеспечивает снижение потерь на скольжение, увеличение подачи и, следовательно, повышение энергетической эффективности работы газожидкостного подъемника. Одним из способов преобразования развивающейся снарядной структуры водовоздушного потока в развитую является дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта.

Разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока на основе уравнения движения жидкостной пробки в подъемной трубе, что позволило обосновать влияние длин структурных образований снарядного потока на подачу и расход воздуха подъемника. В результате сравнения результатов численного решения математической модели и данных экспериментальных исследований эрлифтов с подъемными трубами диаметрами $D=25 \dots 250$ мм, длинами $H+h=2,57 \dots 115$ м и относительными погружениями смесителей $\alpha=0,362 \dots 0,931$ установлены длины жидкостных пробок снарядной структуры при традиционной работе подъемника. Численное решение уточненного уравнения восходящего движения снарядной газожидкостной смеси для условий вышеприведенных эрлифтов позволило обосновать энергетически целесообразные значения относительных длин жидкостных пробок, составляющие $\bar{L}_s=5 \dots 6$, при которых обеспечивается повышение КПД до величины в 1,6 раза большей в сравнении с традиционно работающими газожидкостными подъемниками.

Проведенными экспериментальными исследованиями эрлифта доказана возможность упорядочения развивающейся снарядной структуры традиционно работающего эрлифта в близкую к развитой с увеличением длин жидкостных пробок на 30 ... 40% и повышением КПД на 21 ... 22% при дискретной подаче сжатого воздуха, с периодами времени воздействия на запорно-регулирующий клапан $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$. Правомерность экспериментальных данных ограничивается значениями относительных погружений смесителей $\alpha \geq 0,4$, относительных длин подъемных труб $(H+h)/D \leq 45$, чисел Струхала $Sh = 0,123 \dots 0,992$ при соответствии числа Рейнольдса Re водовоздушной смеси автомоделльной зоне.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также разработанные на их основе рекомендации и инженерный метод расчета эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха позволили разработать рекомендации по реконструкции шламового эрлифта шахты «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь», а также рабочую документацию на эрлифтную установку для перемешивания минеральной суспензии центральной обогатительной фабрики ГПУК «Краснолиманская» с суммарным, по обеим установкам, ожидаемым годовым экономическим эффектом 460,9 тыс. грн.

Ключевые слова: эрлифт, математическая модель, рабочий процесс, энергоеффективность, снарядный водовоздушный поток, дискретная подача сжатого воздуха, длина жидкостных пробок.

ANNOTATION

Kalinichenko V.V. Increase of overall performance of an air lift discrete supply of compressed air. – Manuscript.

The thesis on competition of an academic degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.05.17 – Hydraulic machines and hydropneumatic units. – Sumy state university, Sumy, 2014.

The actual scientific and technical problem of increase of power overall performance of air lifts due to transformation of the developing projectile air-and-water stream in close to developed with increase in lengths of liquid traffic jams in lifting pipes discrete supply of compressed air is decided that provides decrease in power consumption of gas-liquid elevators to 21 ... 22 of % in comparison with traditionally working.

The mathematical model of working process of an air lift with the developed projectile structure of an air-and-water stream on the basis of the equation of the movement of a liquid stopper in a lifting pipe that allowed to prove influence of lengths of structural formations of a projectile stream on giving and a consumption of air of the elevator is developed. The numerical solution of the specified equation of the ascending movement of projectile gas-liquid mix for conditions of air lifts with the above-stated geometrical parameters allowed to prove limit energetically expedient values of relative lengths of liquid traffic jams of a projectile air-and-water stream, components $\bar{L}_s = 5 \dots 6$.

Possibility of streamlining of the developing projectile structure of traditionally working air lift in close to developed with increase in lengths of liquid traffic jams on 30 ... 40% and increase of efficiency on 21 ... 22%.

Keywords: the airlift, mathematical model, working process, which promises more effective energy, projectile air-and-water stream, discrete supply of compressed air, the length of liquid slugs.

Підписано до друку 20.05.2015 р. Формат 60×84 1/16. Ум. друк. арк. 0,9.

Друк лазерний. Замовлення № 7.18. Тираж 100 прим.

Надруковано в Видавничому центрі КП ДВНЗ «ДонНТУ»