

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кононенко Анатолій Петрович

УДК 622.276.5

ТЕОРІЯ І РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ЕРЛІФТІВ

Спеціальність 05.05.17 - Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі енергомеханічних систем Державного вищого навчального закладу (ДВНЗ) “Донецький національний технічний університет” Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бойко Микола Григорович,
ДВНЗ “Донецький національний технічний університет”,
завідувач кафедри енергомеханічних систем, м. Донецьк.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Фінкельштейн Зельман Лазаревич,
Донбаський державний технічний університет, завідувач
кафедри прикладної гідромеханіки, м. Алчевськ;

доктор технічних наук, професор
Сьомін Дмитро Олександрович,
Східноукраїнський національний університет імені
Володимира Даля, професор кафедри гідрогазодинаміки,
м. Луганськ;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Луговський Олександр Федорович,
Національний технічний університет України “Київський
політехнічний інститут”, професор кафедри прикладної
гідроаеромеханіки і механотроніки, м. Київ.

Захист відбудеться 27 грудня 2007 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”.

Автореферат розісланий 23 листопада 2007 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Юдін Ю.О.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Транспортування краплинних рідин і гідросумішей забезпечується об'ємними і гідродинамічними насосами, до останніх з яких відноситься і ерліфт.

Унікальні гідропідйоми на вугледобувних шахтах, багато перекачних і допоміжних шахтних водовідливних установок і установок для чищення підземних ємностей вугільних підприємств, золошлаковидалення теплових електростанцій, вдосконалені земснаряди для видобування піску і гравію, дослідні установки для глибоководного видобування корисних копалин з дна морів і океанів і інші гідропідйомні і водовідливні установки були реалізовані на основі газорідинних підйомників.

Затребуване застосування ерліфтів в гірничодобувній, енергетичній, металургійній та інших галузях промисловості обумовлено, в основному, високою надійністю і простотою, а, отже, дешевизною виготовлення, монтажу, обслуговування і експлуатації, особливо при транспортуванні абразивних гідросумішей.

Так, зокрема, застосування ерліфтів в системах гідрозолошлаковидалення теплових електростанцій, що працюють на твердому паливі, супроводжується зниженням капітальних витрат в 1,5÷2,0 рази, експлуатаційних витрат (включаючи витрати на електроенергію) в 2,0÷2,5 рази, скороченням кількості обслуговуючого і ремонтного персоналу в 1,5÷2,0 рази порівняно з базовим варіантом з ґрунтовими (багерними) насосами.

Основними недоліками, стримуючими більш широке використання газорідинних підйомників, є висока енергоємність робочого процесу і, переважно, емпірична основа його моделювання.

Вищевикладене свідчить про актуальність і важливість наукової проблеми, яка полягає в подальшому розвитку теорії робочого процесу ерліфтів, що дозволить підвищити рівень ефективності газорідинних підйомників.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проведені в рамках наукового напрямку ДВНЗ „Донецький національний технічний університет” (Донецького політехнічного інституту) відповідно до науково-технічної програми 055-09 Міністерства енергетики і електрифікації СРСР на 1986-1990 р.р., затвердженої постановою Ради Міністрів СРСР 31.12.86 р. № 535, “Розробити і упровадити економічні і технологічні рішення атомних і теплових електростанцій уніфікованих типів, ліній електропередач і підстанцій, а також потоково-швидкісні методи їх будівництва” завдання 02.02 “Дослідити, розробити і упровадити економічні системи видалення і складування золошлакових відходів ТЕС” з проблеми “Дослідження режимів роботи і визначення техніко-економічних показників систем золошлаковидалення при підвищеній концентрації пульпи”.

Здобувач, як науковий керівник, очолював виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт: „Исследование и разработка системы пневмогидравлического удаления золошлаков в условиях Новосибирской ТЭЦ-5” (м. Новосибірськ, Росія, ДР №01870006335), „Исследование и освоение систем пневмогидравлического транспорта твердого материала в условиях Экибастузской ГРЭС-1 (а.с. №1423861)” (м. Екібастуз, Казахстан, ДР №01890001355), „Исследование, разработка и освоение системы пневмогидравлического удаления золы и шлака в условиях Экибастузской ГРЭС-2 (а.с. №1257300)” (м. Екібастуз, Казахстан, ДР №01880001412).

Як відповідальний виконавець здобувач брав участь у виконанні госпдоговірних науково-дослідних робіт: „Совершенствование систем гидротранспорта золы и шлака Приморской ГРЭС” (с. Лучегорськ, Приморський край, Росія, ДР №74058912), „Совершенствование эрлифтных систем ГЗУ, авторский надзор за монтажом и эксплуатацией эрлифтов Экибастузской ГРЭС-1” (м. Екібастуз, Казахстан, ДР №81051696), „Разработка и внедрение гидрорпневматической системы сбора очаговых остатков для условий Калининской ТЭЦ-4” (м. Калінін, Росія, ДР №01825013772), „Совершенствование эрлифтных систем ГЗУ, автор-

ский надзор за монтажом и эксплуатацией эрлифтов Нерюнгринской ГРЭС” (м. Нерюнгри, Якутия, Росія, ДР №01830070356), „Исследование и разработка экспериментального образца внутрицеховой автоматизированной эрлифтной системы гидрозолошлакоудаления Приморской ГРЭС” (с. Лучегорськ, Приморський край, Росія, ДР №01840062857).

Мета і завдання досліджень. *Мета дослідження* – зниження енергоємності ерліфта за рахунок раціонально вибраних його параметрів, встановлених на основі закономірностей робочого процесу газорідного підйомника.

Завдання дослідження:

а) розробити кількісні критерії меж структур водоповітряних потоків в піднімальних трубах загальнопромислових ерліфтів з метою визначення областей існування снарядної, емульсійної і кільцевої двофазних сумішей в газорідних підйомниках;

б) розробити математичні моделі барботажного режиму роботи і робочих процесів ерліфтів зі снарядною, емульсійною і кільцевою структурами водоповітряної суміші, що найчастіше мають місце в піднімальних трубах, які дозволять визначати гідродинамічні параметри газорідних потоків;

в) провести експериментальні дослідження роботи ерліфтів з метою підтвердження адекватності математичних моделей робочих процесів газорідних підйомників та розширення області використання емпіричної залежності газовмісту барботажного газорідної суміші по перетину піднімальної труби;

г) розробити програмні комплекси для розрахунку раціональних параметрів і характеристик газорідних підйомників;

д) уточнити методику визначення ККД ерліфтів з трубами подачі з урахуванням зміни тиску в змішувачі при зміні витрати повітря;

е) виконати роботи по впровадженню ерліфтів, як засобів транспортування рідин і гідросумішей.

Об'єкт дослідження – процес транспортування (підйому) води (гідросуміші) стислим повітрям у вертикальній трубі ерліфта.

Предмет дослідження – параметри робочого процесу ерліфта - подача, витрата повітря, швидкість, тиск і потужність водоповітряного потоку і його компонентів.

Методи дослідження. Основні використані методи досліджень: аналіз та наукове узагальнення даних із літературних джерел, що дозволило обґрунтувати актуальність наукової проблеми та сформулювати завдання досліджень; аналітичне узагальнення експериментальних даних, що сприяло визначенню критеріїв меж структур водоповітряних потоків в загальнопромислових ерліфтах; методи аналізу та синтезу гідродинамічних явищ дозволили обґрунтувати фізичні моделі роботи ерліфта; методи і закони механіки рідини та газу, закономірності теорії двофазного потоку і гідравліки покладені в основу математичних моделей барботажного режиму роботи та робочих процесів газорідного підйомника; методи математичного моделювання дозволили встановити розподіл тисків та потужностей водоповітряного потоку по витратним складовим з метою визначення енергетично раціональних областей експлуатації та оптимальних режимів роботи ерліфтів. Експериментальний метод досліджень роботи ерліфтів дозволив підтвердити адекватність математичних моделей робочих процесів газорідного підйомника і розширити область використання емпіричної залежності газовмісту барботажного газорідної суміші по перетину піднімальної труби.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено значення критеріїв меж існування снарядної, емульсійної і кільцевої структур висхідних водоповітряних потоків у вертикальній піднімальній трубі загальнопромислового ерліфта як для оптимального режиму роботи, так і для режиму максимальної подачі газорідного підйомника.

2. Розроблені математичні моделі робочих процесів ерліфтів, які встановлюють зв'язок між їх геометричними параметрами та кінематичними і гідродинамічними параметрами газу і краплинної рідини з урахуванням структур водоповітряних потоків, що вперше дозволило

визначити зміни потужності двофазної суміші і її компонентів як в діапазоні витрати стислого повітря, що подається в газорідний підйомник, так і по висоті піднімальної труби.

3. Встановлено, що барботаажний режим в ерліфті визначається не тільки зменшенням газовмісту водоповітряної суміші від центра до стінок каналу, але і зниженням щільності повітря по висоті піднімальної труби, що дозволило більш цілісно обгрунтувати протікаючі в газорідному підйомнику гідродинамічні процеси від його запуску до виходу на експлуатаційний режим

4. Отримало подальший теоретичний розвиток і експериментальне підтвердження фізичне явище обмеження подачі ерліфта, як результат випереджаючого зменшення пропускної спроможності піднімальної труби при збільшенні витрати повітря і газовмісту водоповітряної суміші порівняно з пропускною спроможністю труби подачі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використання при створенні газорідних підйомників високого технічного рівня: математичного і програмного забезпечення для моделювання процесу їх функціонування; запропонованих нових способів роботи, захисту і управління (а.с. 1153121, 1163048, 1157280, 1186835, 1225929) і конструкцій ерліфтів і їх елементів (а.с. 1257300, 1423861, 1687913, 1724952 та ін.); розроблених методів і методик визначення характеристик, областей раціональної експлуатації та оптимальних режимів роботи ерліфтів.

Рекомендації по вдосконаленню газорідних підйомників реалізовані при розробці і впровадженні ерліфтних установок систем гідрозолошлаковидалення Новосибірської ТЕЦ-5 (м. Новосибірськ, Росія), Екібастузських ДРЕС-1, 2 (м. Екібастуз, Казахстан).

Основні наукові положення, виводи і рекомендації по вибору параметрів ерліфтних установок використані інститутами “Теплоэлектропроект” (м. Новосибірськ, Росія) і “ВНДПенергопром” (м. Київ, Україна) при проектуванні систем гідрозолошлаковидалення теплових електростанцій Росії (Приморська ДРЕС, Нерюнгрінська ДРЕС, Березовська ДРЕС, водогрійна котельня Кузнецької ТЕЦ, Ново-Зімінська ТЕЦ, Ульяновська ТЕЦ-3) та Казахстану (Павлодарська ТЕЦ-3).

Виводи і рекомендації роботи застосовані при розробці ерліфтів аварійного відкачування води з підвальних приміщень машзалу Омської ТЕЦ-4 (м. Омськ, Росія), установок пластового дренажу машинного залу, вузла пересипки конвеєрів паливоподачі з утилізацією просипів Екібастузської ДРЕС-1 (м. Екібастуз, Казахстан), установки видалення випадкових стоків машзалу, двосекційної беззупинкової установки Екібастузської ДРЕС-2 (м. Екібастуз, Казахстан), установок видалення дренажів з кабельних каналів, видалення золошлаків з можливістю розлучення гідросуміші димовими газами Новосибірської ТЕЦ-5 (м. Новосибірськ, Росія), спільно з НДІГМ ім. М.М. Федорова (м. Донецьк, Україна) способу регулювання подачі насосів ЦНС 300-600 впусканням повітря у всмоктуючий трубопровід в умовах водовідливної установки шахти ім. Ф.Е. Дзержинського ДП “Дзержинськвугілля” (м. Дзержинськ, Україна), оптимізації параметрів газорідних підйомників ерліфтно-земснарядних комплексів АТЗТ “НВО “Хаймек” (м. Донецьк, Україна) і ін.

Результати досліджень використані у ДВНЗ „Донецький національний технічний університет” в навчальному процесі в курсах “Спеціальні засоби і схеми шахтних водовідливних, вентиляторних установок і гідропідйому”, “Спеціальні засоби і схеми транспортування рідин”, “Гідромеханізація, гідро- і пневмотранспорт”, при курсовому і дипломному проектуванні, виконанні магістерських робіт, а також у Сумському державному університеті в дисциплінах “Теорія турбомашин”, “Промислові пневмосистеми”, при курсовому і дипломному проектуванні.

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення дисертації, які винесені на захист, отримані здобувачем самостійно. Серед них:

- встановлені критерії меж існування снарядної, емульсійної і кільцевої структур водоповітряних потоків у вертикальних піднімальних трубах загальнопромислових ерліфтів;
- розроблені математичні моделі барботаажного режиму роботи і робочих процесів ер-

ліфтів зі снарядною, емульсійною і кільцевою структурами водоповітряних потоків, що дало змогу дослідити зміну гідродинамічних параметрів газорідинної суміші в піднімальній трубі та встановити раціональні області використання ерліфта;

- розроблені методики і проведені в якості керівника та відповідального виконавця експериментальні дослідження роботи ерліфтів, які підтвердили адекватність математичних моделей їх робочих процесів та дозволили розширити область використання емпіричної залежності газовмісту барботажної газорідинної суміші по перетину піднімальної труби;

- обгрунтовано фізичне явище обмеження подачі ерліфта, що дозволило розробити практичні рекомендації по вибору технологічних та конструктивних параметрів газорідинних підйомників;

- уточнені методики визначення ККД, розрахунку раціональних параметрів і характеристик ерліфтів;

- в якості наукового керівника та відповідального виконавця науково-дослідних господарських робіт виконані заходи по впровадженні ерліфтів в системах гідропідйому та водовідливу теплових електростанцій, а також забезпечено використання результатів досліджень в умовах підприємств по видобутку корисних копалин.

Формулювання проблеми і завдань досліджень здійснювалося спільно з науковим консультантом.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи докладалися і отримали схвалення на науково-технічній конференції із завершених науково-дослідних робіт ДПІ (м. Донецьк, 1991 р.), II-й, IV-й, V-й і VI-й Міжнародних науково-технічних конференціях “Горная энергомеханика и автоматика” (м. Донецьк, 2002, 2004, 2005, 2006 р.р.), X Ювілейній міжнародній науково-практичній конференції “Гидроаэромеханика в инженерной практике” (м. Краматорськ, 2005 р.), VI, VII і VIII науково-технічних конференціях Асоціації фахівців промислової гідравліки і пневматики “Промышленная гидравлика и пневматика” (м. Львів, 2005 р., м. Вінниця, 2006 р., м. Мелітополь, 2007 р.), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції “Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании” (Інтернет-сайт www.sworld.ilhome.net, м. Одеса, 2005 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції “СУЧАСНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ – 2006” (Web-сторінка: www.rusnauka.com, м. Дніпропетровськ, 2006 р.), II Міжнародній науково-практичній конференції “ДНІ НАУКИ - 2006” (Web-сторінка: www.rusnauka.com, м. Дніпропетровськ, 2006 р.), XI і XII Міжнародних науково-практичних конференціях “Гидроаэромеханика в инженерной практике” (м. Київ, 2006 р., м. Луганськ, 2007 р.), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції “Современные направления теоретических и прикладных исследований” (Інтернет-сайт www.sworld.ilhome.net, м. Одеса, 2006 р.), II Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції “Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2006” (Інтернет-сайт www.sworld.ilhome.net, м. Одеса, 2006 р.), Третій Міжнародній науково-практичній конференції “Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности” (м. Санкт-Петербург, 2007 р.), міжфакультетських семінарах ДВНЗ „ДонНТУ” (м. Донецьк, 2007 р.) і НТУ “ХПІ” (м. Харків, 2007 р.).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані в 35 наукових роботах, серед них: 1 монографія, 1 навчальний посібник, 22 наукові праці, які опубліковані у фахових виданнях, що входять до переліку ВАК України, 5 авторських свідоцтв.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 9 розділів і висновків, містить 565 сторінок, зокрема 250 сторінок основного машинописного тексту, 112 рисунків, 30 таблиць (кількість окремих сторінок з рисунками і таблицями - 84), 9 додатків на 172 сторінках і список використаних джерел з 568 найменувань на 59 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульована наукова проблема, відображений зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета і завдання досліджень, показана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, приведений особистий внесок здобувача, подані відомості про апробацію, публікації та структуру дисертації.

Перший розділ “Стан проблеми, мета і завдання досліджень”. Актуальність даної проблеми визначається необхідністю підвищення ефективності газорідинних підйомників, що полягає в зниженні їх енергоємності і можливості аналітичного визначення раціональних конструктивних і технологічних розмірів ерліфтів і гідродинамічних параметрів водоповітряних потоків у вертикальних піднімальних трубах, що вимагає розробки достовірних фізичних і математичних моделей робочого процесу транспортування рідин стислими газами.

Аналіз стану проблеми виконаний по наступних напрямках: а) існуючі фізичні і математичні моделі ерліфтів; б) методики кількісного опису висхідних вертикальних газорідинних потоків в газліфтах нафтогазовидобування, парогенеруючих трубопроводах котлів теплових і атомних електростанцій, устаткуванні хімічних виробництв; в) моделі двофазних потоків і критерії меж існування структур газорідинних сумішей.

Значний внесок до розробки проблеми моделювання ерліфтів внесли вчені Крилов А.П., Козлов Б.К., Пірвердян А.М., Г. Грабов, Гейер В.Г., Логвинов М.Г., Давидсон В.Є., Кириченко Є.О., Малєєв В.Б., Костанда В.С., Малигін С.С., Усков Є.В., Козиряцький Л.М., Пашенко В.С. і багато інших.

Найбільшого поширення набула методика кількісного опису ерліфтів школи професора Гейєра В.Г., в основу якої покладений баланс потужностей потоків в підйомнику. Проте, забезпечуючи прийнятну точність у визначенні конструктивних і технологічних параметрів ерліфтів, розроблені моделі, в зв'язку з їх емпіричною основою, не дозволяють аналізувати внутрішні гідродинамічні явища в піднімальних трубах і мають обмежену область застосування. Емпіричний опис барботажного режиму роботи ерліфта також не відображає суті виникаючих гідродинамічних процесів, що утруднює обґрунтування фізичних моделей експлуатаційних режимів підйомника.

Вимагає уточнення спосіб визначення ККД, а, отже, призначення енергетично оптимального режиму роботи ерліфта з урахуванням дійсного тиску в змішувачі. Затребувана також аналітична методика побудови витратних характеристик ерліфта, які в даний час отримують або емпіричними методами, або шляхом експериментальних досліджень на моделях. Область застосування емпіричних характеристик обмежена, а експериментальні дослідження вимагають додаткових матеріальних витрат.

Схожість методик опису ерліфтів з моделями газліфтів, парогенеруючих трубопроводів та ін. пояснюється загальною основою гідродинамічних процесів, що мають місце у вертикальних висхідних газорідинних потоках. Проте, по багатьом фізичним параметрам перераховані підйомники мають принципові відмінності від ерліфтів (істотно нижчі подачі, значні довжини при менших діаметрах піднімальних трубопроводів, виділення розчинених газів в процесі підйому газорідинної суміші, інтенсивний масообмін в парорідинних потоках та ін.), що обмежує можливість використання розроблених для них кількісних залежностей.

Основною особливістю двофазного потоку є те, що межі фаз визначаються не тільки геометрією стінок каналу, що характерно для однофазного потоку, але і розподілом цих фаз в об'ємі, обмеженому даним каналом. Структурна безліч варіантів взаємних розподілів фаз утворює сукупність режимів течії (структур потоків).

Створення єдиної для всіх структур теорії і універсальної математичної моделі двофазного потоку із-за складності процесів бачиться у віддаленій перспективі. В даний час найбільш продуктивним рішенням задачі визначення достовірних кількісних характеристик рухомих двофазних сумішей є розробка математичних моделей для кожної, що мають місце, структур двофазних потоків.

В загальнопромисловому ерліфті переважно реалізуються снарядна, емульсійна і кільцева структури водоповітряних потоків, межі існування яких на теперішній час найоб'єктивніше обґрунтовуються теорією кризових станів двофазних сумішей. Проте критеріїв меж реалізації вказаних структур в піднімальних трубах загальнопромислових ерліфтів не розроблено.

Сукупність перерахованих питань складає наукові основи підвищення ефективності газорідних підйомників.

Другий розділ “Структури і моделі двофазних водоповітряних потоків в піднімальних трубах ерліфтів”. Теорія кризових станів двофазного потоку, в основі якої лежать пов'язані з напрямом руху пристінної рідинної плівки поняття “захлинання” і “поворот потоку”, на теперішній час найповніше відповідає вирішуваному для ерліфтів завданню – отриманню кількісних критеріїв меж існування снарядного, емульсійного і кільцевого висхідних водоповітряних потоків у вертикальній піднімальній трубі.

Перехід барботажного режиму роботи ерліфта в експлуатаційний з бульбашково-снарядною структурою газорідної суміші супроводжується перетворенням низхідного циркуляційного потоку в пристінну низхідну рідинну плівку. Кільцевий режим характеризується висхідним рухом рідини, а емульсійна структура – коливальним рухом пристінної плівки води.

Подання 85 експериментальних характеристик ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 25 \div 624$ мм і довжинами $H+h = 2,1 \div 316,0$ м (H – висота підйому ерліфта, h – геометричне занурення змішувача) при відносних зануреннях змішувача $\alpha = 0,070 \div 0,995$ в координатах $k - N$ (k – критерій Кутателадзе, N – параметр, залежний від критеріїв Фруда Fr , Вебера We і Галілея Ga) дозволило виявити кількісні закономірності формування структур в піднімальній трубі для оптимального режиму і режиму максимальної подачі ерліфта. Параметрами, що дозволяють класифікувати снарядно, емульсійну і кільцеву структури висхідної газорідної суміші у вертикальній піднімальній трубі, є відносне занурення змішувача α і критерій Фруда водоповітряної суміші $Fr_{см}$ (рис. 1).

Математичне моделювання робочих процесів ерліфта вимагає застосування правомірних базових початкових рівнянь для двофазної суміші, в якості яких прийняті спрощені, усереднені по часу-простору рівняння збереження маси та імпульсу.

Використовуючи існуючі залежності для визначення гідравлічних втрат, дійсного газозмісту і інтенсивності масообміну в експлуатаційних режимах при відповідних досліджуваних структурах потоків і барботажному режимі роботи підйомника, рівняння нерозривності руху і кількості руху двофазної рідини для кожної моделі отримані виходячи з одних і тих же початкових диференціальних рівнянь.

При моделюванні барботажного режиму роботи ерліфта і робочих процесів зі снарядною, емульсійною і кільцевою структурами водоповітряних потоків прийняті наступні допущення: течія квазіодновимірною осесиметричною стаціонарною; швидкості компонентів суміші в будь-якій точці перетину піднімальної труби паралельні вертикальній осі, а поперечні складові швидкостей і прискорень нехтувано малі в порівнянні з їх поздовжніми значеннями; у кожній точці будь-якого перетину піднімальної труби тиск однаковий, у тому числі і у фазах, і змінюється по висоті по лінійному закону; для емульсійної структури водоповітряної суміші ковзання фаз відсутнє; для кільцевої структури ядро потоку є монодисперсною газосуспензією, що складається з несучої газової фази і каплеподібних включень води, а плівка рідини складається тільки з води; зміна стану повітря в піднімальній трубі відбувається по ізотермічному процесу.

Третій розділ “Барботаж в піднімальній трубі ерліфта”. Згідно прийнятої фізичної моделі барботажного режиму роботи ерліфта при висхідному русі газових утворень в піднімальній трубі мають місце висхідний (центральний) і низхідний (пристінний) циркуляційні потоки, обумовлені різницею їх щільності. Більше 90% довжини піднімальної труби при $H+h \geq 10$ м займає зона стабілізації з плавномінімним (близьким до постійного) значенням газозмісту.

Математична модель барботажного режиму ерліфта представлена системою рівнянь (1) і (2), отриманих з рівнянь нерозривності руху (виходячи з рівності нулю сумарної витрати рідини в будь-якому перетині піднімальної труби) і кількості руху:

$$c'w' = G' = 0 ; \quad (1)$$

$$g \cdot \int_0^{H+h} [\rho_{cp,n}(z) - \rho_{cp,e}(z)] dz = \{ \rho_{cp,e}(z) \cdot [w_{cp,e}(z)]^2 \} |_0^{H+h} - \\ - \{ \rho_{cp,n}(z) \cdot [w_{cp,n}(z)]^2 \} |_0^{H+h} + 1/\omega_B \cdot \int_0^{H+h} F_{\delta v}(z) dz + \\ + 1/\omega_H \cdot \int_0^{H+h} [F_{\delta v}(z) + F_{\delta w}(z)] dz, \quad (2)$$

де ρ' – щільність води; w' – дійсна швидкість води; G' – масова швидкість води; g – прискорення вільного падіння; $c_{cp,e}(z)$, $c_{cp,n}(z)$ – середня по перетинах щільність відповідно висхідного і низхідного циркуляційних потоків; $w_{cp,e}(z)$, $w_{cp,n}(z)$ – середні по перетинах швидкості відповідно висхідного і низхідного потоків; $F_{\delta v}$, $F_{\delta w}$ – питомі (на одиницю довжини труби) сили тертя відповідно між висхідним і низхідним потоками і між низхідним потоком і стінкою труби; ω_e , ω_n – площі поперечних перетинів відповідно висхідного і низхідного потоків.

Вирішення системи рівнянь (1) і (2) дозволило уточнити значення коефіцієнта ε , що входить у відому залежність газомісту по перетину барботажного потоку від його значення в центрі каналу, стосовно піднімальної труби ерліфта. Використовуючи експериментальні дані для ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами 140, 150, 250, 353 і 624 мм, отримано емпіричні залежності $e = f(w_0'', D)$ в діапазоні приведених швидкостей повітря $w_0'' = 0,68 \div 5,56$ і/с при середньому тиску в піднімальній трубі (рис. 2). Підтвердженням адекватності розробленої моделі служить задовільна точність отриманих залежностей $\varepsilon = f(w_0'')$ при $D = idem$ (середньоквадратичні погрішності рівнянь регресії не перевищують 0,3%).

Розроблена для ПЕВМ програма чисельного вирішення системи рівнянь (1), (2) з використанням залежності $e = f(w_0'', D)$ дозволяє визначати, з прийнятною точністю, витрату повітря ерліфтом в барботажному режимі, а також значення газомісту, щільностей і швидкостей водоповітряної суміші і її компонентів в піднімальній трубі з графічною ілюстрацією отриманих результатів.

Аналітичні дослідження барботажних процесів в ерліфтах з піднімальними трубами діаметрами $D = 140 \div 624$ ім і довжинами $H+h = 5 \div 30$ і при геометричних зануреннях змішувачів $h = 0,5 \div 13$ м дозволили встановити, що середній повітровміст барботажної суміші для умов виходу з піднімальної труби знаходиться в межах $\varphi_{cp} = 0,605 \div 0,912$, аля умов середнього тиску в піднімальній трубі – $\varphi_{cp} = 0,530 \div 0,872$, що задовільно узгоджується з відомими літературними даними для барботажних апаратів.

Адекватність розробленої математичної моделі барботажного режиму роботи газорідинного підйомника дає засади стверджувати про правомірність прийнятої фізичної моделі та наявність в піднімальній трубі циркуляційних потоків, з яких низхідний, при збільшенні витрати повітря та виходу ерліфта на експлуатаційний режим з бульбашково-снарядною структурою, перетворюється в низхідну пристінну рідинну плівку.

Четвертий розділ “Модель робочого процесу ерліфта зі снарядною структурою водоповітряного потоку”. Для снарядної структури характерний розмір включень (поперемінних газових пузирів або рідинних пробок) порівнянний з масштабом потоку (діаметром труби).

Рівняння стаціонарного висхідного руху снарядної водоповітряної суміші у вертикальній піднімальній трубі ерліфта, виходячи з рівнянь нерозривності руху і кількості руху для двокомпонентної моделі газорідинного потоку, можливо представити у вигляді

$$p_{cm} \cdot z_i / (H+h) = 4/D \cdot \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz + G \cdot [x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z)] |_0^{z_i} + \\ + g \cdot \int_0^{z_i} \{ \varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho' \} dz, \quad (3)$$

або

$$P_{y_i} = P_{mpi} + P_{yuki} + P_{gi}, \quad (4)$$

де p_{cm} – надлишковий тиск в змішувачі; z_i – відстань від змішувача до даного перетину піднімальної труби; $\tau_w(z)$ – дотична напруга на стінці піднімальної труби; x – масовий витратний газовміст водоповітряної суміші; $w''(z)$ – дійсна швидкість повітря; $\varphi(z)$ – дійсний газовміст водоповітряної суміші; $\rho''(z)$ – щільність повітря; p_{y_i} – сумарний перепад тиску на ділянці піднімальної труби довжиною z_i ; P_{mpi} , P_{yuki} , P_{gi} – перепади тиску на ділянці піднімальної труби довжиною z_i , обумовлені відповідно тертям, прискоренням і силою тяжіння.

Середня об'ємна витрата водоповітряної суміші на ділянці піднімальної труби довжиною z_i

$$Q_{cpi} = G \cdot \omega / z_i \cdot \int_0^{z_i} dz \{ \varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho' \}, \quad (5)$$

де ω – площа перетину піднімальної труби.

Добуток Q_{cpi} на відповідний тиск p_{y_i} , P_{mpi} , P_{yuki} и P_{gi} дозволяє визначити значення потужностей – сумарної $N_{\Sigma i}$, компенсуючих втрати на тертя N_{mpi} та прискорення N_{yuki} , а також необхідної для подолання сили тяжіння N_{gi} при рухові водоповітряного потоку на ділянці піднімальної труби довжиною z_i ($N_{y_i} = N_{mpi} + N_{yuki} + N_{gi}$). Підведена до піднімальної труби потужність N_{nodi} при прийнятій математичній моделі робочого процесу ерліфта формується сумою потужностей повітряного потоку N_i'' і потоку води N' , а потужність, компенсуюча втрати на ковзання, визначається залежністю $N_{cki} = N_{nodi} - N_{y_i}$.

Вирішення математичної моделі робочого процесу ерліфта зі снарядною структурою двофазної суміші виконане чисельним методом на ПЕВМ за допомогою розробленої програми. Адекватність моделі підтверджена задовільною збіжністю розрахункових і експериментально отриманих подач ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 25 \div 353$ ім, довжинами $H+h = 11,45 \div 90,5$ і відносними зануреннями змішувачів $\alpha = 0,310 \div 0,931$, ó яких в оптимальному, або оптимальному і режимі максимальної подачі (34 режими роботи, приклад – рис. 3) має місце снарядна структура водоповітряного потоку (відхилення в більшості випадків не перевищують 20%).

Розроблена математична модель і програма для її вирішення на ПЕВМ дозволяє визначати наступні кількісні значення і залежності (з графічною побудовою):

а) значення поточних гідродинамічних параметрів снарядної водоповітряної суміші в заданих перетинах піднімальної труби і при заданій витраті повітря Q_e (рис. 4);

б) залежність подачі ерліфта Q_e від витрати повітря Q_e (побудова витратної характеристики);

в) зміну тисків p_{y_i} , P_{mpi} , P_{yuki} і P_{gi} (рис. 5) і потужностей $N_{\Sigma i}$, N_{mpi} , N_{yuki} , N_{gi} , N_{cki} , N' , N_i'' і N_{nodi} (рис. 6) в залежності від витрати повітря Q_e та по висоті піднімальної труби.

Як випливає з результатів розрахунків, для піднімальних труб діаметрами $D = 25 \div 250$ ім в режимі максимальної подачі ерліфта при снарядній структурі водоповітряного потоку відносний тиск, обумовлений силою тяжіння, складає $\bar{\delta}_g = 59 \div 80\%$ від сумарного перепаду тиску на піднімальній трубі p_y . Відносний тиск, обумовлений тертям, знаходиться в межах $\bar{\delta}_{\delta} = 25 \div 40\%$, а відносний тиск, обумовлений прискоренням, – $\bar{\delta}_{\delta \dot{w}} < 4\%$. Відповідно відносна потужність, що витрачається на подолання сили тяжіння, складає $\bar{N}_g = 15 \div 57\%$, на компенсацію втрат на тертя – $\bar{N}_{\delta} = 6 \div 26\%$, на компенсацію втрат на прискорення – $\bar{N}_{\delta \dot{w}} < 3\%$ і на компенсацію втрат на ковзання – $\bar{N}_{\dot{w}} = 17 \div 75\%$. За інших рівних умов відносні втрати

на ковзання $\bar{N}_{\bar{n}\bar{\epsilon}}$ збільшуються при зменшенні тиску в змішувачі p_{cm} і збільшенні діаметру D піднімальної труби.

П'ятий розділ “Модель робочого процесу ерліфта з емульсійною структурою водоповітряного потоку”. Збільшення газомісту снарядного потоку приводить до зростання дотичної напруги на поверхні розділу фаз (поверхні плівки) і утворення значних нестійких хвиль, які захоплюються вгору потоком повітря. Руйнування великомасштабних газових пухирів і рідинних пробок приводить до інтенсивного перемішування компонентів двофазного потоку і формування емульсійної структури з геометричною характеристикою, що не піддається кількісній оцінці.

Емульсійна течія характеризується великою частотою і малою амплітудою пульсацій і по своїх властивостях наближається до гомогенної структури.

Для одновимірної стаціонарної висхідної течії емульсійної водоповітряної суміші у вертикальній піднімальній трубі ерліфта спрощені рівняння нерозривності руху і кількості руху на основі гомогенної (однокомпонентної) теорії дозволяють отримати співвідношення, що описує залежність повного градієнту тиску від щільності фаз і газомісту

$$\begin{aligned} -dp(z)/dz = & \{ \lambda_{cm}(z) \cdot G / (2D) \cdot \{ \beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho' \} - \\ & - G^2 \cdot [\rho''(z) - \rho'] \cdot [d\beta(z)/dz] / \{ \beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho' \}^2 + \\ & + g \cdot \{ \beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho' \} \times \\ & \times \langle 1 - G^2 \cdot \beta(z) \cdot [\rho_0'' / \rho_0] / \{ \beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho' \} \rangle^{-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $p(z)$ – тиск; $\lambda_{cm}(z)$ - коефіцієнт опору; $\beta(z)$ - об'ємний витратний газоміст водоповітряного потоку.

Інтегрування рівняння (6) для ділянки піднімальної труби ерліфта довжиною z_i (де $0 \leq z_i \leq H+h$) приводить до виразу, подібному (4).

Середня об'ємна витрата емульсійної водоповітряної суміші на ділянці труби довжиною z_i визначається залежністю (5), в якій замість дійсного газомісту $\varphi(z)$ використовується вираз для об'ємного витратного газомісту $\beta(z)$.

По аналогії з математичною моделлю робочого процесу ерліфта зі снарядною структурою водоповітряної суміші, для моделі з емульсійною структурою добуток Q_{cpi} на відповідний тиск p_{vi} , p_{mpi} , $p_{уски}$ і p_{gi} також дозволяє визначати значення потужностей $N_{\Sigma i}$, N_{mpi} , $N_{уски}$ і N_{gi} при русі водоповітряного потоку на ділянці піднімальної труби довжиною z_i . Підведена до піднімальної труби потужність дорівнює сумі $N_{nodi} = N' + N_i''$, причому $N_{nodi} = N_{\Sigma i}$ із-за прийнятої моделі гомогенної течії, що припускає відсутність втрат потужності на ковзання фаз $N_{уски} = 0$.

Не виявлено в літературних джерелах рекомендацій і кількісних залежностей для обчислення коефіцієнтів опору двофазних потоків з емульсійною структурою. Варіанти рішення задачі про кількісне значення коефіцієнта опору, що рекомендуються для гомогенних потоків, зокрема використання постійного значення коефіцієнта опору $\lambda_{cm} = \text{const}$, часто не приводять при аналізі емульсійних сумішей до задовільних результатів.

Для можливості використання при розрахунках відомого критеріального рівняння $\lambda_{cm} = \lambda(Re_{cm}, \epsilon) \cdot \psi(\beta, Fr_{cm})$, [де $\lambda = f(Re_{cm}, \epsilon)$ - коефіцієнт опору однофазного потоку для критерію Рейнольдса водоповітряної суміші Re_{cm} і відносній шорсткості труби ϵ ; ψ - поправочний коефіцієнт] виконана чисельна обробка експериментальних даних з використанням рівняння (6) і обчисленням величини $\lambda = f(Re_{cm}, \epsilon)$ за формулою Альтшуля, яка дозволила отримати емпіричний вираз для значення поправочного коефіцієнта ψ водоповітряного потоку з емульсійною структурою

$$\ln \psi = 6,67 - 0,891 \cdot \ln Fr_{cm} + 21,9 \cdot \beta^2 \cdot \ln \beta \quad (7)$$

у діапазоні значущих чинників $\beta = 0,738 \div 0,995$, $Fr_{cm} = 12,7 \div 171,0$. Відносна середньоквадратична помилка рівняння регресії складає 3,12%.

Порівняння розрахункових і експериментально визначених подач з використанням математичної моделі робочого процесу газорідного підйомника з емульсійною структурою водоповітряного потоку виконані чисельним методом за розробленою програмою на ПЕВМ для ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 50 \div 624$ ім, довжинами $H+h = 2,1 \div 192,0$ і відносними зануреннями змішувачів $\alpha = 0,100 \div 0,664$.

При виконанні кількісних розрахунків коефіцієнт опору λ_{cm} визначався як виходячи з рекомендацій (для гомогенних сумішей) постійності його значення по довжині піднімальної труби в діапазоні $\lambda_{cm} = 0,02 \div 0,14$, дак і обчислювався по критеріальному рівнянню з використанням виразу (7). Причому, при обчисленні коефіцієнта опору λ_{cm} з використанням виразу (7) найбільш задовільні результати отримані в діапазоні відносних занурень змішувача $\alpha = 0,100 \div 0,290$. Використання моделі “ $\lambda_{cm} - \text{const}$ ” виявилось прийнятно в діапазоні відносних занурень змішувача $\alpha = 0,318 \div 0,664$.

Відхилення розрахункових подач ерліфтів в оптимальних режимах і режимах максимальних подач (24 режими роботи) від експериментально отриманих даних при емульсійній структурі водоповітряної суміші не перевищують 25%, що є задовільним результатом для даних умов і підтверджує адекватність розробленої моделі.

Розроблена математична модель робочого процесу ерліфта з емульсійною структурою водоповітряної суміші і програма для її вирішення на ПЕВМ дозволяють визначати ті ж гідродинамічні параметри і залежності, що і у разі моделі для снарядної структури, проте з урахуванням гомогенності (однокомпонентності) газорідного потоку.

При відносних зануреннях змішувачів $\alpha > 0,3$ ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 50 \div 624$ ім в режимі максимальної подачі як відносний тиск, так і відносні потужності, знаходяться в межах: обумовлені силою тяжіння $\bar{p}_g \approx \bar{N}_g \approx 50 \div 54\%$, дертям $\bar{p}_{mp} \approx \bar{N}_{\delta\delta} \approx 39 \div 47\%$, ірискоренням $\bar{\delta}_{\delta\delta} \approx \bar{N}_{\delta\delta} < 8\%$.

Шостий розділ “Модель робочого процесу ерліфта з кільцевою структурою водоповітряного потоку”. Фізична модель кільцевої структури водоповітряного потоку у вертикальній піднімальній трубці ерліфта прийнята такою, при якій плівка рідини завтовшки $\delta(z)$ рухається по внутрішній стінці, а газ з краплинними і близькими до них включеннями рідини утворює гомогенне ядро потоку. Між газорідним ядром потоку і плівкою, що складається тільки з рідини, має місце масообмін за рахунок винесення і осадження крапель.

Рівняння нерозривності руху і кількості руху роздільного водоповітряного потоку з кільцевою структурою у вертикальній піднімальній трубці ерліфта представлені системою залежностей:

$$W_g = \rho''(z) \cdot \beta_c(z) \cdot w''(z) \cdot \omega_c(z) = \text{const}; \quad (8)$$

$$W_{\omega_c}(z) \Big|_0^{z_i} = W_g \cdot \varepsilon(z) \Big|_0^{z_i} = \int_0^{z_i} J_{fc}(z) \cdot dz - \int_0^{z_i} J_{cf}(z) \cdot dz; \quad (9)$$

$$W_{\omega_f}(z) \Big|_0^{z_i} = W_g \cdot [1 - \varepsilon(z)] \Big|_0^{z_i} = \int_0^{z_i} J_{cf}(z) \cdot dz - \int_0^{z_i} J_{fc}(z) \cdot dz; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} p_{cm} \cdot z_i / (H+h) = & 2\pi \cdot \int_0^{z_i} [R - \delta(z)] \cdot \tau_v(z) / \omega_c(z) \cdot dz + \int_0^{z_i} \{ [J_{cf}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] w_c(z) - \\ & - [J_{fc}(z) - J_{cf}^{(s)}(z)] \cdot w'_v(z) \} / \omega_c(z) \cdot dz + \{ \rho''(z) \cdot \beta_c(z) + \rho' \cdot [1 - \beta_c(z)] \} \times \\ & \times \{ [Q_g(z) + Q_s(z) \cdot \varepsilon(z)] / \omega_c(z) \}^2 \Big|_0^{z_i} + g \cdot \int_0^{z_i} \{ \rho''(z) \cdot \beta_c(z) + \rho' \cdot [1 - \beta_c(z)] \} \cdot dz; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
p_{cm} \cdot z_i / (H+h) = & - 2\pi \cdot \int_0^{z_i} [R - \delta(z)] \cdot \tau_v(z) / \omega_f(z) \cdot dz - \int_0^{z_i} \{ [J_{cf}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] w_c(z) - \\
& - [J_{fc}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] \cdot w'_v(z) \} / \omega_f(z) \cdot dz + \pi \cdot R \cdot \rho' \cdot \int_0^{z_i} C_w(z) \cdot [w'_f(z)]^2 / \omega_f(z) \cdot dz + \\
& + \{ \rho' \cdot [w'_f(z)]^2 + \rho' \cdot g \cdot z \} |_0^{z_i},
\end{aligned} \quad (12)$$

де W_θ , $W_{\varepsilon c}(z)$, $W_{\varepsilon f}(z)$ - масові витрати відповідно повітря, води в ядрі газорідинного потоку і води в пристінній плівці; $\beta_c(z)$ - витратний об'ємний повітровміст ядра газорідинного потоку; $\omega_c(z)$, $\omega_f(z)$ - площа перетину відповідно гомогенного ядра і пристінної плівки; $\varepsilon(z)$ - масова частина рідини, що переноситься газом в ядрі кільцевого потоку; $J_{fc}(z)$, $J_{cf}(z)$ - інтенсивність відповідно винесення крапель з поверхні рідинної плівки і осадження крапель на плівку; J_{fc}^* - інтенсивність ударного бризковинесення; R - радіус піднімальної труби; $\tau_v(z)$ - дотична напруга на поверхні розділу фаз; $w_c(z)$, $w'_f(z)$, $w'_v(z)$ - швидкість відповідно гомогенного ядра газорідинного потоку, води в пристінній плівці і води в плівці на міжфазній межі; $C_w(z)$ - коефіцієнт тертя між плівкою і стінкою труби.

Рівняння (11) і (12) можливо перетворити до вигляду

$$\begin{aligned}
p_{cm} \cdot z_i / (H+h) = & \pi \cdot R \cdot \rho' / \omega \cdot \int_0^{z_i} C_w(z) \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot dz + \langle \{ \beta_c(z) \cdot \rho''(z) + \\
& + [1 - \beta_c(z)] \cdot \rho' \} \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z) + \rho' \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot \omega_f(z) \rangle / \omega |_0^{z_i} + \\
& + g / \omega \cdot \int_0^{z_i} \{ \beta_c(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta_c(z)] \cdot \rho' \} \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \cdot \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz,
\end{aligned} \quad (13)$$

який, у свою чергу, відповідає виразу (4) і дозволяє визначати значення тисків p_{yi} , p_{mpi} , $p_{ускi}$ и p_{gi} .

Середня об'ємна витрата водоповітряної суміші на ділянці труби довжиною z_i

$$Q_{cpi} = (W_\theta + W_\varepsilon) / z_i \cdot \int_0^{z_i} dz / \{ \varphi^*(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi^*(z)] \cdot \rho' \}, \quad (14)$$

де $\varphi^*(z)$ - розрахунковий газовміст водоповітряного потоку.

Значення потужностей $N_{\Sigma i}$, N_{mpi} , $N_{ускi}$, N_{gi} , $N_{скi}$, N' , N_i'' і N_{nodi} визначаються по методиці, аналогічній застосованій в математичній моделі робочого процесу ерліфта зі снарядною структурою водоповітряної суміші.

Вирішення системи рівнянь (8) - (12) з урахуванням масообміну між гомогенним ядром і пристінною плівкою кільцевої структури двофазного потоку для ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 20 \div 400$ мм і довжинами $H+h = 5 \div 50$ м при відносних зануреннях змішувачів $\alpha = 0,05 \div 0,20$ знайти не вдалося. Пояснити це можливо обмеженим діапазоном використання існуючих емпіричних залежностей для визначення інтенсивності краплинного масообміну між ядром газорідинного потоку і пристінною плівкою.

Для можливості кількісної оцінки робочого процесу ерліфта з кільцевою структурою водоповітряної суміші розрахунки виконані при допущенні відсутності масообміну між ядром потоку і пристінною плівкою і умові постійності товщини плівки по всій висоті піднімальної труби.

Відхилення розрахункових подач ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 100 \div 250$ ім, довжинами $H+h = 11,7 \div 31,2$ м і відносними зануреннями змішувачів $\alpha = 0,070 \div 0,205$ в оптимальних режимах і режимах максимальних подач (8 режимів роботи) від експериментально отриманих даних при кільцевій структурі не перевищують 30%, що підтверджує адекватність розробленої моделі навіть при зневазі масообміном між ядром потоку і пристінною плівкою.

Обчислення гідродинамічних параметрів по висоті кільцевого водоповітряного потоку при заданих витратах повітря і побудова витратної характеристики ерліфта за допомогою розробленої математичної моделі і програми для її вирішення на ПЕВМ виконується також при допущенні відсутності масообміну між ядром потоку і пристінною плівкою рідини.

Для ерліфта з піднімальною трубою діаметром $D = 150$ мм, довжиною $H+h = 11,7$ м і відносним зануренням змішувача $\alpha = 0,205$ відносний тиск, обумовлений силою тяжіння, в режимі максимальної подачі складає $\bar{\delta}_g \approx 96,5\%$ від сумарного перепаду тиску на піднімальній трубі p_y , обумовлений тертям - $\bar{\delta}_{\delta\delta} \approx 2,1\%$, обумовлений прискоренням - $\bar{\delta}_{\delta\delta\delta} \approx 1,4\%$.

У режимі максимальної подачі ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 100 \div 250$ мм при кільцевій структурі водоповітряного потоку відносний тиск, обумовлений прискоренням, складає $\bar{\delta}_{\delta\delta\delta} < 3\%$. Решта значення сумарного перепаду тиску на піднімальній трубі p_y розподіляється між складовими тиску, обумовленими силами тяжіння p_g і тертя p_{mp} в пропорціях, достовірно класифікувати які складно із-за обмеженого числа аналізованих прикладів.

Відповідно відносна потужність, що компенсує втрати на ковзання, для розглянутих випадків знаходиться в межах $\bar{N}_{\delta\delta} = 75 \div 95\%$, а залишок підведеної потужності витрачається на подолання сили тяжіння \bar{N}_g , компенсацію втрат на тертя $\bar{N}_{\delta\delta}$ і компенсацію втрат на прискорення $\bar{N}_{\delta\delta\delta}$.

Сьомий розділ “Кількісна оцінка впливу виду структури водоповітряного потоку на енергетичну ефективність ерліфта”. Кількісний розподіл потужності снарядного, емульсійного і кільцевого водоповітряних потоків по витратних складових визначає енергетичну ефективність транспортування рідини газорідинним підйомником залежно від структури двофазної суміші.

Як відомо, складність в порівнянні енергетичної ефективності ерліфтів з різними структурами потоків полягає в неможливості реалізації в конструктивно одному і тому ж підйомнику (з однаковими діаметрами і довжинами піднімальних труб $D, H+h$ і труб подачі d, l), за одних і тих же технологічних умов (при однакових геометричних h і відносних α зануреннях, тиску в змішувачі p_{cm}) і при одних і тих же витратах повітря Q_e різних структур водоповітряної суміші (снарядної, емульсійної і кільцевої).

Проте, при деякій некоректності в рівноцінності порівнюваних варіантів, очевидно (табл. 1), що в загальному випадку ККД ерліфтів зі снарядною структурою перевищують ККД з емульсійною, і тим більше - з кільцевою структурами. Розрахунки ККД виконані для параметрів експериментальних ерліфтів, прийнятих для підтвердження адекватності математичних моделей робочих процесів газорідинних підйомників з досліджуваними структурами двофазних сумішей.

Таблиця 1 – Енергетична ефективність газорідинних підйомників

Параметр	Значення ККД (%) при структурі водоповітряного потоку:		
	снарядній	емульсійній	кільцевій
Коефіцієнт корисної дії ерліфта:			
- у оптимальному режимі роботи	20÷61	5÷51	7÷15
- у режимі максимальної подачі	10÷58	4÷34	2÷10

Обґрунтовують даний висновок і розподіли відносних тисків $\bar{\delta}_g, \bar{p}_{mp}, \bar{p}_{\delta\delta\delta}$ і потужностей $\bar{N}_g, \bar{N}_{\delta\delta}, \bar{N}_{\delta\delta\delta}$ і $\bar{N}_{\delta\delta}$ водоповітряних потоків по витратних складових, кількісні значення яких для снарядної, емульсійної і кільцевої структур приведені в розділах 4-6.

Для експериментального підтвердження впливу виду структури водоповітряної суміші на енергоємність ерліфта і пріоритетності снарядної і емульсійної структур над кільцевою визначені характеристики ерліфтів з однаковими діаметрами $D = 150$ мм і довжинами $H+h = 11,7$ м піднімальних труб і різними діаметрами труб подачі $d = 30, 49, 80$ і 105 мм з постійною їх довжиною $l = 460$ мм при однаковій і постійній подачі підйомників $Q_0 = 9,0$ м³/Г ($0,0025$ м³/с) (рис. 7).

Для забезпечення вказаної подачі при одному і тому ж тиску в змішувачі $p_{см} = 0,30$ кгс/см² ($29,4$ кПа) при різних діаметрах труб подачі потрібні різні витрати повітря $Q_{в1} = 7,61$ м³/хв ($0,127$ м³/с), $Q_{в2} = 5,55$ м³/хв ($0,093$ м³/с), $Q_{в3} = 5,34$ м³/хв ($0,089$ м³/с), $Q_{в4} = 4,25$ м³/хв ($0,071$ м³/с) (рис. 7), тобто різні енергетичні витрати. Очевидно, що ерліфт з $d = 105$ мм характеризується найвищою енергетичною ефективністю. Поступаються йому в послідовності, що приводиться, ерліфти з діаметрами труб подачі $d = 80, 49$ і 30 мм.

Побудовані графіки кризових станів двофазних потоків показують, що в ерліфтах з $d = 30$ і 49 мм реалізується стійка емульсійна структура, в ерліфті з $d = 80$ мм емульсійна структура близька до переходу в снарядну, а в ерліфті з $d = 105$ мм має місце снарядна структура. Це підтверджує вище викладену енергетичну пріоритетність структур водоповітряних потоків в газорідних підйомниках.

Потреба в прогнозуванні структури водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта, що комплектується трубою подачі, вимагає достовірного аналітичного методу визначення тиску в змішувачі (на вході в піднімальну трубу) $p_{см}$. Одним із варіантів розрахунку тиску $p_{см}$ є визначення гідравлічних втрат в трубі подачі $\Delta h_{n,m}$.

Аналіз експериментальних даних підтвердив, що втрату напору в трубі подачі можна визначати, розглядаючи її як насадок [при $(3 \div 4)d \leq (l = l_n) \leq (6 \div 7)d$, l_n - довжина насадка] при значенні коефіцієнта витрати $\mu_{n,m} = 0,74 \div 0,78$, або як коротку трубу (при $l > l_n$).

Параметрами робочого режиму ерліфта з піднімальною трубою діаметром D і довжиною $H+h$, трубою подачі діаметром d і довжиною l при геометричному зануренні змішувача h є значення подачі Q_0 при витраті повітря $Q_в$. Узагальненим параметром, що визначає робочий режим такого підйомника, є тиск в змішувачі $p_{см}$.

Розроблені фізичні і математичні моделі робочого процесу ерліфта підтверджують, що тиск в змішувачі $p_{см}$ формується гідродинамічними процесами в піднімальній трубі – гравітаційною складовою p_g , а також складовими на прискорення водоповітряного потоку $p_{уск}$ і на гідравлічні втрати $p_{тр}$.

З іншого боку, подача ерліфта при сформованому гідродинамічними процесами в піднімальній трубі тиску в змішувачі $p_{см}$ і перепаді тиску на трубі подачі $\Delta p_{n,m} = \rho'gh - p_{см}$ визначається опором цієї труби.

Таким чином, кількість рідини, що поступає в піднімальну трубу, залежить як від особливостей гідродинамічних процесів в даній трубі у вигляді значення сформованого тиску в змішувачі $p_{см}$, так і від опору труби подачі при заданому геометричному зануренні h (гідростатичному тиску геометричного занурення змішувача $p_{n,c}$).

Гідродинамічні процеси в піднімальній трубі переважно визначаються структурою водоповітряного потоку, на яку один з визначальних впливів чинить газовміст двофазної суміші. Опір труби подачі формується її геометричними характеристиками – діаметром d і довжиною l , вибір яких диктують конкретні умови застосування ерліфта. Тобто, гідродинамічні параметри транспортування рідини ерліфтом з трубою подачі багато в чому визначаються взаємним впливом на процес характеристик піднімальної труби і труби подачі.

Ерліфт, укомплектований піднімальною трубою діаметром D і трубою подачі діаметром d , має обмеження по пропускній спроможності ліфтованої рідини, зване максимальною подачею ерліфта $Q_{э, макс}$. Якщо ерліфт з піднімальною трубою одного і того ж діаметру D укомплектовувати трубами подачі різних діаметрів d , то пропускна спроможність його зменшується із зменшенням діаметру труби подачі за інших рівних умов.

Виконаний аналіз взаємного впливу характеристик піднімальної труби і труби подачі на роботу ерліфта дозволив обґрунтувати фізичне явище обмеження подачі підйомника і представити його у вигляді діаграм для піднімальних труб діаметрами $D = 150$ і 353 мм (приклад – рис. 8) Доведено, що обмеження подачі ерліфта є наслідком випереджаючого зменшення пропускної спроможності піднімальної труби при збільшенні витрати повітря і газовмісту водоповітряної суміші порівняно з пропускною спроможністю труби подачі.

З урахуванням гідравлічних втрат в трубі подачі значення ККД ерліфта в залежності від зміни витрати стислого повітря Q_0 , яке нагнітається в змішувач при постійному його геометричному зануренні $h - const$ (по “довжині” витратної характеристики), слід обчислювати по виразу

$$\eta_{ep}(Q_0) = H/[q(Q_0) \cdot p_0 / (\rho' \cdot g) \cdot \ln\{1 + \rho' \cdot g \cdot [h - \Delta h_{n,m}(Q_0)] / p_0\}], \quad (15)$$

де $q(Q_0)$ – питома витрата повітря ерліфтом; p_0 – атмосферний тиск.

Для одних і тих же експериментальних витратних характеристик $Q_0 = f(Q_0)$ ерліфтів з діаметрами піднімальних труб $D = 80 \div 624$ мм ККД η_{ep} з урахуванням дійсного тиску в змішувачі p_{cm} перевищують ККД η_{zh} , обчислені за умови постійності тиску в змішувачі, рівного гідростатичному тиску геометричного занурення змішувача $p_{cm} = c'gh$. Результати розрахунків показують, що для аналізованих ерліфтів $\eta_{ep}/\eta_{zh} = 1,07 \div 1,50$, що доводить кількісну значимість запропонованого методу оцінки енергетичної ефективності газорідних підйомників.

Енергетично оптимальним слід рахувати режим роботи ерліфта [в межах витратної характеристики $Q_0 = f(Q_0)$ при $h - const$] з максимальним ККД, обчисленим по виразу (15). У багатьох практичних випадках цей чинник може стати вирішальним в енергетичному обґрунтуванні застосованого гідравлічного устаткування для транспортування рідин або гідросумішей, або при призначенні енергетично оптимальних експлуатаційних режимів ерліфтів.

Восьмий розділ “Експериментальні дослідження роботи ерліфтів”. У завдання експериментальних досліджень роботи ерліфтів входило:

а) дослідження роботи ерліфтів з діаметрами піднімальних труб $D > 250$ мм з метою використання їх результатів для аналізу структур водоповітряних потоків, барботажного режиму і режимів транспортування рідини в газорідному підйомнику зі снарядною, емульсійною і кільцевою структурами двофазних сумішей;

б) дослідження взаємного впливу на процес ліфтування рідини характеристик піднімальної труби і труби подачі ерліфта;

в) експериментальне підтвердження кількісної значущості методу оцінки ККД загальнопромислових ерліфтів з урахуванням дійсного тиску в змішувачі.

Відомі результати експериментальних досліджень ерліфтів з піднімальними трубами $D \leq 250$ мм, що в умовах маловивченості і складнощів моделювання гідродинамічних явищ в двофазних потоках обмежує можливість застосування цих дослідних даних для ерліфтів з піднімальними трубами більших діаметрів, що знайшли застосування в промисловості (до $D = 600 \div 800$ мм).

Виходячи з викладеного, а також технічних можливостей, були проведені експериментальні дослідження роботи ерліфтів з піднімальними трубами діаметрами $D = 353$ мм і $D_0 = 624$ мм (D_0 – еквівалентний діаметр піднімальної труби) при довжинах відповідно $H+h = 11,7$ м і $H+h = 36,28$ м.

Була також передбачена можливість експериментальних досліджень роботи ерліфта з піднімальною трубою $D = 150$ мм ($H+h = 11,7$ м), яка часто використовується в промислових газорідних підйомниках, із-за необхідності розширення даних в частині дослідження режимів, близьких до барботажних, і робочих режимів із снарядною, емульсійною і кільцевою структурами водоповітряних потоків.

Для вирішення завдання уточнення взаємного впливу на процес ліфтування рідини характеристик піднімальної труби і труби подачі експериментальний ерліфт з $D = 150$ мм комплектувався трубами подачі діаметрами $d = 30, 49, 80$ і 105 мм, а ерліфт з $D = 353$ мм - трубами подачі діаметрами $d = 80, 105, 140$ і 205 мм.

Експериментальна ерліфтна установка з піднімальними трубами $D = 150$ і 353 мм і $H+h = 11,7$ м була побудована на випробувальному полігоні Донецького політехнічного інституту, а дослідження ерліфта з піднімальною трубою $D_3 = 624$ мм і $H+h = 36,28$ м проведені на натурній промисловій ерліфтній установці системи гідрозолошлаковидалення енергоблоку №8 потужністю 500 МВт Екібастузської ДРЕС-1.

В результаті експериментальних досліджень були отримані витратні характеристики $Q_3 = f(Q_6)$ газорідних підйомників при значеннях геометричних занурень змішувачів $h = 2,4 \div 5,4$ і для ерліфтів з піднімальними трубами $D = 150$ і 353 мм та $h = 3,72 \div 9,58$ і для ерліфта з піднімальною трубою $D_3 = 624$ мм, а також залежності зміни тиску в змішувачі $p_{cm} = f(Q_6)$ від витрати повітря.

Для кожної характеристики ерліфта одержано 10-20 експериментальних крапок при мінімум 5 вимірах контрольованих параметрів на одному їх рівні з метою отримання відносної погрішності результатів 5-10% при довірчій вірогідності 0,90-0,95.

Погрішності вимірювань витрат стислого повітря і технічної води при дослідженні роботи ерліфтів з піднімальними трубами $D = 150$ і 353 мм не перевищували 3,0%, при дослідженні роботи ерліфта з піднімальною трубою $D_3 = 624$ мм - 3,16%.

Експериментальні дані оброблені методом найменших квадратів, отримані рівняння регресії описують дослідні крапки з середньоквадратичною погрішністю, що не перевищує 3,16%.

Дослідження структур вертикальних висхідних водоповітряних потоків, барботажного режиму і режимів транспортування води ерліфтом та забезпечення обґрунтованого застосування їх результатів при проектуванні установок, які найчастіше знаходять використання в промисловості, потребувало використання даних експериментального вивчення роботи газорідних підйомників з діаметрами піднімальних труб $D = 25 \div 250$ мм при відносних зануреннях змішувачів $0 < \alpha < 1$.

Такі дослідження були проведені вченими ДВНЗ "Донецький національний технічний університет" (Донецького політехнічного інституту) в 1960-1990 р.р. Первинні дані з протоколів цих випробувань опрацьовані по розробленій методиці, одержані 80 рівнянь регресії, які описують дослідні крапки з середньоквадратичною погрішністю, що не перевищує 3% (для трьох рівнянь - не перевищує 6%).

Дев'ятий розділ "Оптимізація параметрів ерліфтів і практичне застосування результатів досліджень". Для ерліфта параметрами, що оптимізуються, є подача Q_3 , висота підйому H , геометричне занурення змішувача h , діаметр D піднімальної труби, діаметр d і довжина l труби подачі, витрата повітря Q_6 .

Оптимізація подачі Q_3 і висоти підйому H з метою розробки серійних установок з обґрунтованими зонами використання, по аналогії з серійно вироблюваними насосами, для ерліфтів не є раціональною через дешевизну їх індивідуального проектування і виготовлення.

Діаметр труби подачі d при транспортуванні гідросуміші однозначно визначається величиною транспортної швидкості, при транспортуванні рідин без включень твердого матеріалу - приймається максимально можливим виходячи з умов застосування підйомника. Довжина труби подачі l приймається мінімально можливою і визначається виходячи із запобігання викидів стислого повітря в зумпф.

Діаметр D піднімальної труби і витрата повітря Q_6 переважно, а геометричне занурення змішувача h - однозначно, визначаються відносним зануренням змішувача α , що відносить його до параметрів, які оптимізуються.

Зважаючи на незначну матеріаломісткість і трудомісткість при виготовленні і монтажу підйомника та його високу надійність багатокритеріальне завдання оптимізації зводиться до

однокритеріального - визначенню найбільш енергетично ефективних робочих режимів ерліфтів.

Узагальнюючим критерієм енергетичної ефективності ерліфта є його ККД, тому рішення задачі максимізації функції на множині X полягає у відшуванні такого аргументу $\alpha^{(0)} \in X$ [і відповідного значення $\eta(\alpha^{(0)})$], щоб нерівність $\eta(\alpha^{(0)}) \geq \eta(\alpha)$ мала місце для всіх $\alpha \in X$. Тобто, необхідно знайти оптимальне рішення $\alpha^{(0)}$ і значення оптимуму $\eta(\alpha^{(0)})$.

Для даного завдання одновимірною лінійною множиною X має обмеження, визначене зоною реалізації снарядної структури в підйомнику, як найбільш енергетично ефективної з прийнятних до розгляду.

Використовуючи чисельний метод максимізації функції $\eta(\alpha)$, як приклад, виконані розрахунки для ерліфтів з висотою підйому $H = 10, 20$ і 40 м при подачах $Q_s = 100 \div 600$ і³/г.

Як впливає з результатів розрахунків ерліфтів з вказаними висотами підйому і подачами, енергетично оптимальні відносні занурення змішувача складають $\alpha = 0,80 \div 0,95$. Ірричому, для розглянутих параметрів підйомників менші значення оптимальних відносних занурень відповідають більшим подачам, а більші – відповідно меншим подачам (приклад – рис. 9).

Збільшення подачі ерліфта і, отже, діаметра піднімальної труби, при одній і тій же висоті підйому і відносному зануренні змішувача приводить до збільшення питомої витрати повітря і зниження ККД підйомника. Зменшення ККД відбувається також при збільшенні висоти підйому ерліфта і збереженні подачі і відносного занурення змішувача. Вказані закономірності можуть служити обґрунтуванням розробки батарейних ерліфтів (з декількома піднімальними трубами) і секційних ерліфтів.

Розроблена методика уточненого розрахунку ерліфтів передбачає контроль за реалізацією робочого процесу підйомника зі снарядною структурою водоповітряного потоку в піднімальній трубі, як найбільш енергетично ефективного, і оптимізацію відносного занурення змішувача α та інших параметрів по критерію максимального ККД ерліфта. Якщо оптимальне значення геометричного занурення змішувача не може бути забезпечене через конструктивні (можливість побудови зумпфа необхідної глибини) або технологічні (наявність джерела стислого повітря з необхідним тиском) причини, приймають його досяжне значення і визначають раціональні параметри ерліфта.

Результати досліджень послужили основою розробки, впровадження і успішної експлуатації ерліфтних установок у водовідливних і гідротранспортних системах, зокрема, в технологічних системах теплових електростанцій, а також знайшли застосування в навчальному процесі.

Намічені перспективи використання удосконалених ерліфтних установок у вугільній, енергетичній, гірничорудній та інших галузях промисловості.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна 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 газорідних підйомників і оптимальний режим їх роботи. Це дає можливість понизити витрати на транспортування рідин (гідросумішей) на 10-15% за рахунок зменшення енергоспоживання.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному.

1. Визначені критерії меж структур водоповітряних потоків в загальнопромислових ерліфтах, у піднімальних трубах яких переважно реалізуються снарядна, емульсійна і кільцева двофазні суміші. На підставі обробки і аналізу експериментальних даних встановлено:

а) у оптимальному режимі роботи ерліфта у вертикальній піднімальній трубі має місце: – снарядна структура водоповітряної суміші при відносних зануреннях змішувача

$0,4 \leq \alpha < 1$ і значеннях критерію Фруда суміші $0 < Fr_{cm} \leq 30$;

– емульсійна структура водоповітряної суміші при відносних зануреннях змішувача $0,1 \leq \alpha < 0,4$ і значеннях критерію Фруда суміші $0 < Fr_{cm} \leq 200$, а також при відносних зануреннях змішувача $0,4 \leq \alpha < 1$ і значеннях критерію Фруда суміші $30 < Fr_{cm} \leq 200$;

б) при роботі ерліфта в режимі максимальної подачі у вертикальній піднімальній трубі має місце:

– снарядна структура водоповітряної суміші при відносних зануреннях змішувача $0,4 \leq \alpha < 1$ і значеннях критерію Фруда суміші $0 < Fr_{cm} \leq 20$;

– емульсійна структура водоповітряної суміші при відносних зануреннях змішувача $0,1 \leq \alpha < 0,4$ і значеннях критерію Фруда суміші $0 < Fr_{cm} \leq 430$, а також при відносних зануреннях змішувача $0,4 \leq \alpha < 1$ і значеннях критерію Фруда суміші $20 < Fr_{cm} \leq 430$;

в) кільцева структура водоповітряної суміші має місце у вертикальній піднімальній трубі при відносних зануреннях змішувача $0 < \alpha < 0,1$ і значеннях критерію Фруда суміші $0 < Fr_{cm} \leq 350$ в оптимальному режимі роботи і $0 < Fr_{cm} \leq 670$ в режимі максимальної подачі ерліфта.

2. Розроблені фізична і математична моделі барботажного режиму роботи ерліфта дозволили встановити, що в газорідинному підйомнику мають місце висхідні стрижньові, в центрі піднімальної труби, циркуляційні водоповітряні потоки з середніми швидкостями $1,0 \div 2,4$ м/с і низхідні периферійні кільцеві циркуляційні потоки з середніми швидкостями $0,3 \div 0,8$ м/с. Перехід барботажного режиму роботи ерліфта в експлуатаційний з бульбашково-снарядною структурою водоповітряної суміші супроводжується перетворенням низхідного циркуляційного потоку в низхідну пристінну рідинну плівку.

3. Розроблені математичні моделі робочих процесів ерліфтів із снарядною структурою вертикального двокомпонентного водоповітряного потоку, емульсійною структурою гомогенного (однокомпонентного) водоповітряного потоку і кільцевою структурою роздільного водоповітряного потоку, що дозволяють визначати об'ємний витратний і дійсний газоміст, щільність водоповітряної суміші, приведені і дійсні швидкості компонентів потоку, тиски і потужності, які компенсують сили тяжіння, тертя і інерції, а також втрати на ковзання фаз при заданих витратах повітря та по висоті піднімальної труби газорідинного підйомника.

4. Доведена адекватність розроблених математичних моделей робочих процесів ерліфтів зі снарядною, емульсійною і кільцевою структурами вертикальних водоповітряних потоків результатами експериментальних досліджень роботи газорідинних підйомників в умовах промислової експлуатації і на дослідних установках, що дозволяють максимально достовірно імітувати реальні умови (розбіжність - від 20% до 30% залежно від виду структури водоповітряного потоку).

5. Розроблені програмні комплекси дозволили визначити, що енергетична ефективність газорідинного підйомника визначається видом структури водоповітряного потоку в піднімальній трубі, а також значеннями висот підйому, подачі і відносних занурень змішувачів. Доведено, що найбільш високу енергетичну ефективність мають ерліфти зі снарядною структурою потоку (для піднімальних труб діаметрами $25 \div 250$ мм і довжинами $11,45 \div 90,5$ м значення ККД в оптимальному режимі роботи складає $20 \div 61\%$, в режимі максимальної подачі - $10 \div 58\%$). Декілька нижча енергетична ефективність газорідинних підйомників з емульсійною структурою (для піднімальних труб діаметрами $50 \div 624$ мм і довжинами $2,1 \div 192$ м значення ККД: $5 \div 51\%$ - в оптимальному режимі роботи, $4 \div 34\%$ - в режимі максимальної подачі). Найбільш низький ККД мають ерліфти з кільцевою структурою водоповітряної суміші (для піднімальних труб діаметрами $100 \div 250$ мм і довжинами $11,7 \div 31,2$ м значення ККД: $7 \div 15\%$ - в оптимальному режимі роботи, $2 \div 10\%$ - в режимі максимальної подачі). Доведено, що енергетична ефективність ерліфта підвищується із зменшенням подачі і висоти підйому при збереженні значення відносного занурення змішувача.

6. В межах витратних характеристик ерліфтів з трубами подачі значення ККД необхідно визначати з урахуванням дійсного тиску в змішувачі, оскільки кількісно вони можуть істотно відрізнятись (до 1,5 раз) від значень ККД, обчислених по загальноприйнятих мето-

диках. У багатьох практичних випадках цей чинник може стати вирішальним в енергетичному обґрунтуванні вживаного гідравлічного устаткування для транспортування рідин або гідро-сумішей, або при призначенні енергетично оптимальних експлуатаційних режимів ерліфтів.

7. Обмеження подачі ерліфта із заданими діаметрами піднімальної труби і труби подачі обумовлене випереджаючим зменшенням пропускної спроможності піднімальної труби із-за зростання її опору, переважно визначуваного видом структури двофазного потоку. Зниження максимальної подачі ерліфта із-за зростання опору труби подачі при збереженні діаметра піднімальної труби також обумовлене зміною структури водоповітряної суміші.

8. Виконані дослідження дозволили розробити нові способи роботи, захисту і автоматизації ерліфтів, а також пристрої газорідинних підйомників і систем гідротранспорту з ерліфтами, які захищені авторськими свідоцтвами СРСР.

9. Ерліфтні установки, розроблені за результатами виконаних досліджень, впроваджені в системах гідрозолошлаковидалення Новосибірської ТЕЦ-5 (Росія), Екібастузських ДРЕС-1, 2 (Казахстан). Результати досліджень використані при розробці і впровадженні ерліфтів Приморської ДРЕС, Нерюнгрінської ДРЕС, Калінінської ТЕЦ-4 (Росія), при проектуванні систем гідрозолошлаковидалення Березовських ДРЕС, водогрійної котельної Кузнецької ТЕЦ, Ново-Зімінської ТЕЦ, Ульяновської ТЕЦ-3 (Росія), Павлодарської ТЕЦ-3 (Казахстан) та ін.

Результати досліджень знайшли застосування при розробці і впровадженні шахтних водовідливних установок Донбасу, ерліфтно-землесосних снарядів АТЗТ НВО "Хаймек" (м. Донецьк), в навчальному процесі ДВНЗ "Донецький національний технічний університет" та Сумського державного університету.

Застосування удосконалених здобувачем ерліфтних установок екологічно та технічно перспективне для водовідливу шахт Донбасу, які підлягають ліквідації, в технологічних системах теплових електростанцій, видобутку корисних копалин (пісок, гравій), органічних добрив і лікувальних матеріалів з dna річок та озер.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко - М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.

Здобувачем обґрунтовані фізичні процеси транспортування рідин стиснутим повітрям, принципи математичного моделювання водоповітряних потоків, методики експериментальних досліджень ерліфтів.

2. Бойко М.Г., Козиряцький Л.М., Кононенко А.П. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди: Навчальний посібник. - Донецьк: ДонНТУ, 2007. – 296 с.

Здобувачем обґрунтовано принцип дії ерліфта, структури водоповітряних потоків в піднімальній трубі, основи розрахунку газорідинних підйомників.

3. Кононенко А.П., Мизерный В.И., Глухман Л.Л., Лебедев В.М., Климов С.В., Марасов А.В., Шкляев Ю.И. Устройство аварийного сброса воды при прорыве сетевых трубопроводов горячего водоснабжения // Энергетик. – Москва. - 1991. - №12. - С. 7-8.

Здобувачем обґрунтовано технічне рішення по використанню ерліфта в системі аварійного водовідливу підвального приміщення машинного залу теплоелектроцентралі.

4. Козыряцкий Л.Н., Кононенко А.П., Мизерный В.И. Классификация эрлифтов // Труды Донецкого государственного технического университета. Серия горно-электромеханическая. - Донецк: ДонГТУ. – 1999. – Вып. 7 - С. 130-137.

Здобувачем розроблені теоретичні основи принципів класифікації ерліфтів.

5. Козыряцкий Л.Н., Свитлый Ю.Г., Кононенко А.П. Добыча твердого топлива из шламонакопителей Донбасса // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ. – 2000. – Вип. 16 - С. 155-160.

Здобувачем обґрунтовані технічні рішення по використанню ерліфтів при добуванні твердого палива із шламонакоплювачів вугільних підприємств Донбасу.

6. Козыряцкий Л.Н., Кононенко А.П., Мизерный В.И. Основы моделирования эрлифтов // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ. – 2001. – Вип. 27 - С. 206 -210.

Здобувачем теоретично визначені значущі параметри, що впливають на робочий процес ерліфта.

7. Кононенко А.П. Математическая модель барботажного режима эрлифта // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Гірничо-електромеханічна". - Донецьк: ДонНТУ. - 2004. – Вип. 83. - С. 156-169.

8. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2005. - №12(84). - С. 38-48.

9. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Гірничо-електромеханічна". - Донецьк: ДонНТУ. – 2005. – Вип. 101. - С. 58-67.

10. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць: "Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва". – Макіївка: ДНАБА. – 2005. – Вип. 2005-7(55). - С. 71-81.

11. Кононенко А.П. Уравнения сохранения массы и импульса вертикального восходящего водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця. - 2006. - №3 (13). - С. 44-48.

12. Кононенко А.П. Количественный анализ гидродинамических параметров барботажного режима эрлифта // Збірник наукових праць "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". – Краматорськ: ДДМА. – 2006. - №1(3). - С. 217-223.

13. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока // Промислова гідравліка і пневматика. - Вінниця. - 2006. - №1 (11). - С. 34-37.

14. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Гірничо-електромеханічна". - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – Вип. 104. - С. 17-29.

Здобувачем розроблені теоретичні основи побудови розрахункових характеристик ерліфта зі снарядною структурою водоповітряної суміші.

15. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта // Науковий журнал "Вісник Донецького державного університету економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського". Серія "Технічні науки". - Донецьк: ДонДУЕТ. - 2006. - №1(29). - С. 20-30.

16. Кононенко А.П. Изменение гидродинамических параметров снарядного водовоздушного потока по высоте подъемной трубы эрлифта // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2006. - №12(96). - С. 12-22.

17. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси // Науковий журнал "Вісник Донецького університету". Серія А, "Природничі науки". - Донецьк: ДонНУ. – 2006. - №2. - С. 143-150.

18. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Энергетические параметры эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – Вип. 12 (113) - С. 17-32.

Здобувачем виконане теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження розподілу тисків та потужностей в емульсійному водоповітряному потоці.

19. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. - №27. - С. 113-121.

20. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків. - 2006. - №5/1 (23). - С. 58-61.

21. Кононенко А.П. Энергетическая эффективность эрлифта // Науковий журнал "Вісник Донецького університету". Серія А, "Природничі науки". - Донецьк: ДонНУ. – 2006. - №1, Частина 1. - С. 205-212.

22. Кононенко А.П. Мизерный В.И., Глухман Л.Л. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС // Энергетика та електрифікація. – Київ. - 2006. - №11. - С. 8-12.

23. Кононенко А.П. Давления и мощности кольцевого водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СУНУ. – 2007. - №3(109), Частина 1. – С.141-147.

24. Способ работы эрлифтной установки: А.с. 1153121 СССР, МКИ⁴ F 04 F 1/20 / С.А. Рабчинский, Г.В. Полторацков, А.П. Кононенко, Л.В. Полторацкова (СССР). - №3675065/25-06; Заявлено 16.12.83; Оpubл. 30.04.85, Бюл. №16. – 125 с.

Здобувачем обгрунтована залежність ефективності роботи ерліфта від структури газорідного потоку в піднімальній трубі.

25. Способ автоматического управления группой эрлифтных установок: А.с. 1225929 СССР, МКИ⁴ F 04 F 1/18 / С.А. Рабчинский, Вал.Г. Миргородский, Е.В. Усков, Вл.Г. Миргородский, А.П. Кононенко (СССР). - №3585315/25-06; Заявлено 27.04.83; Оpubл. 23.04.86, Бюл. №15. – С. 88.

Здобувачем обгрунтовано визначальний вплив на ефективність роботи ерліфта тиску робочого тіла в камері змішування.

26. Эрлифт: А.с. 1257300 СССР, МКИ⁴ F 04 F 1/18 / С.А. Рабчинский, Е.В. Усков, А.П. Кононенко (СССР). - №3791875/31-06; Заявлено 21.09.84; Оpubл. 15.09.86, Бюл. №34.– 123 с.

Здобувачем обгрунтована залежність економічності роботи ерліфта від відносної швидкості газової та рідинної складових аерогідросуміші.

27. Эрлифтная установка: А.с. 1687913 СССР, МКИ⁵ F 04 F 1/18 / А.П. Кононенко, Л.Л. Глухман, В.Н. Еньшин, В.И. Мизерный (СССР). - №4771397/29; Заявлено 31.10.89; Оpubл. 30.10.91, Бюл. №40. – 135 с.

Здобувачем обгрунтована залежність терміну служби та умов експлуатації ерліфта від початкових напрямків руху компонентів аерогідросуміші в змішувачі.

28. Эрлифт: А.с. 1724952 СССР, МКИ⁵ F 04 F 1/18 / В.Н. Еньшин, В.И. Мизерный, А.П. Кононенко, Л.Л. Глухман (СССР). - №4738823/29; Заявлено 19.09.89; Оpubл. 07.04.92, Бюл. №13. – 148 с.

Здобувачем обгрунтована доцільність підвищення ККД ерліфта за рахунок підтримання незмінної структури газорідного потоку по висоті піднімальної труби.

29. Кононенко А.П. Опыт эксплуатации и перспективы использования эрлифтов на тепловых электростанциях // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции по завершнным научно-исследовательским работам. - Донецк: ДПИ. - 1991. - С. 57.

30. Кононенко А.П. Математическое моделирование рабочих процессов общепромышленных эрлифтов // Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании". - Том 3. Технические науки. - Одесса: Черноморье. - 2005. - С. 3-6.

31. Кононенко А.П. Границы структур вертикальных водовоздушных потоков в эрлифтах // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції „СУЧАСНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ – 2006”. Том 16. Технічні науки. - Дніпропетровськ: Наука і освіта. - 2006. - С. 67-71.

32. Кононенко А.П. Барботажный режим в эрлифте // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції "ДНІ НАУКИ - 2006". Том 8. Технічні науки. - Дніпропетровськ: Наука і освіта. - 2006. - С. 36-39.

33. Кононенко А.П. Изменение давлений снарядного водовоздушного потока в газо-жидкостном подъемнике // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции "Современные направления теоретических и прикладных исследований". Том 3. Технические науки. - Одесса: Черноморье - 2006. - С. 57-60.

34. Кононенко А.П., Бойко Н.Г. Условия реализации газо-жидкостных структур и потери трения эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2006". Том 2. Технические науки. - Одесса: Черноморье. - 2006. - С. 55-60.

Здобувачем виконане теоретичне обґрунтування умов існування структур водоповітряних потоків та залежності для визначення гідравлічних втрат емульсійної суміші.

35. Кононенко А.П. Модели двухфазных водовоздушных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование. Т.8: Сборник трудов Третьей международной научно-практической конференции "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности". 14-17.03.2007, Санкт-Петербург, Россия. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2007. – 225-226.

АНОТАЦІЯ

Кононенко А.П. - Теорія і робочий процес ерліфтів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2007.

Підвищення енергетичної ефективності газорідних підйомників і розширення області аналітичного визначення параметрів і характеристик ерліфтів передбачає розробку адекватних фізичних і математичних моделей робочого процесу. Отримані критерії існування снарядної, емульсійної і кільцевої структур водоповітряних потоків в піднімальних трубах ерліфтів і розроблені фізичні і математичні моделі робочого процесу з відповідними структурами газорідних сумішей. Моделі дозволяють визначати значення поточних гідродинамічних параметрів газорідної суміші, залежність подачі ерліфта від витрати повітря, зміну тисків і потужностей залежно від витрати повітря і по висоті піднімальної труби. З використанням моделі барботажного режиму роботи ерліфта обчислюється потрібна витрата повітря, а також значення газовмісту і швидкостей циркуляційних потоків. Обґрунтовано фізичне явище обмеження подачі ерліфта з піднімальною трубою і трубою подачі. Доведена енергетична пріоритетність робочого процесу ерліфта зі снарядною структурою над емульсійною і, далі, над кільцевою. Запропоновані методики рішення оптимізаційної задачі по критерію енергетичної ефективності і уточненого розрахунку ерліфтів.

Ключові слова: ерліфт, робочий процес, піднімальна труба, труба подачі, водоповітряний потік, структура двофазної суміші

АННОТАЦИЯ

Кононенко А.П. Теория и рабочий процесс эрлифтов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.17 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2007.

Более широкое применение эрлифтов в горной, энергетической, металлургической и других отраслях промышленности сдерживается, в основном, их высокой энергоемкостью и, преимущественно, эмпирической основой моделирования. Повышение энергетической эффективности газо-жидкостных подъемников и расширение области аналитического определения параметров и характеристик эрлифтов предполагает разработку адекватных физических

и математических моделей рабочего процесса, основой которых является восходящий вертикальный водовоздушный поток.

Современное развитие теории двухфазных смесей позволяет разрабатывать модели для их определенных структур, из которых в эрлифте преимущественно реализуются снарядная, эмульсионная и кольцевая.

На основе теории кризисных состояний двухфазных потоков показано, что критериями границ существования указанных структур водовоздушных потоков в подъемных трубах эрлифтов является критерий Фруда и относительное погружение смесителя.

Разработанные физическая и математическая модели барботажного режима работы эрлифта с учетом переменных параметров водовоздушной смеси как по высоте подъемной трубы, так и по ее сечению, позволяют обосновать гидродинамические процессы в начальный период работы подъемника и определять потребный для обеспечения этого режима расход воздуха, а также значения газосодержаний и скоростей восходящего и нисходящего циркуляционных потоков.

Физические и математические модели рабочего процесса эрлифта со снарядной (двухкомпонентная модель газожидкостного потока), эмульсионной (модель гомогенной двухфазной смеси) и кольцевой (раздельный газожидкостный поток) структурами восходящих водовоздушных потоков позволяют определять значения текущих гидродинамических параметров газожидкостной смеси в заданных сечениях подъемной трубы и при заданном расходе воздуха, зависимость подачи эрлифта от расхода воздуха (построение расходной характеристики), изменение давлений (суммарного, а также обусловленных трением, ускорением и силами тяжести) и мощностей (подведенной и компенсирующих потери на трение, ускорение, скольжение фаз и необходимой для преодоления силы тяжести) в зависимости от расхода воздуха и по высоте подъемной трубы. Адекватность моделей рабочего процесса эрлифта доказана результатами экспериментальных исследований.

Количественный анализ значений КПД эрлифтов и распределения мощностей по затратным составляющим для каждой из имеющих место в подъемных трубах структур водовоздушных потоков позволил установить, по критерию энергетической эффективности, приоритетность снарядной структуры над эмульсионной и, далее, над кольцевой, что подтверждается экспериментальными данными.

Ограничение подачи эрлифта с подъемной и подающей трубами обусловлено опережающим уменьшением пропускной способности подъемной трубы при увеличении расхода воздуха и газосодержания водовоздушной смеси в сравнении с пропускной способностью подающей трубы.

Энергетически оптимальным режимом работы эрлифта следует считать режим с максимальным КПД, определяемым с учетом действительного давления в смесителе. Предложенная аналитическая зависимость подтверждена экспериментально.

Многокритериальная задача оптимизации сведена к однокритериальной – определению наиболее энергетически эффективных рабочих режимов эрлифта при оптимизируемом параметре газожидкостного подъемника – относительном погружении смесителя. Предложены методики решения оптимизационной задачи и уточненного расчета эрлифтов.

Результаты работы использованы в энергетической промышленности при разработке новых и совершенствовании существующих систем гидрозолошлакоудаления и установок удаления технологических дренажей с эрлифтами, а также при разработке и внедрении шахтных водоотливных установок, эрлифтно-землесосных снарядов, в учебном процессе.

Ключевые слова: эрлифт, рабочий процесс, подъемная труба, подающая труба, водовоздушный поток, структура двухфазной смеси

ANNOTATION

A.P. Kononenko. Airlift Theory and Operation. – Manuscript.

Doctoral thesis on the speciality of 05.05.17 – Hydraulic machines and Hydro- Pneumatic Sets – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”. Kharkov, 2007.

Gas-liquid lift power efficiency raise and airlift analytical characterization sphere widening imply the operation adequate physical and mathematical model development. The criteria of existence boundaries of the airflow slug, emulsion and circular-type structures in the airlift lifting pipes are obtained, and the operation physical and mathematical models with the corresponding gas-liquid mixture structures are developed. The models define the value of the gas-liquid mixture current hydro-dynamic parameters; dependence of the airlift feeding on the airflow, pressure and capacity change depending on the airflow and along the lifting pipe height. The required airflow and the rotating flow speed and gas content are calculated with the airlift bubble operation model. The limitation of feeding of the airlift with the lifting and feed pipes being a physical phenomenon is justified. The power priority of the operation of the airlift with the slug structure as compared to the emulsion and further on the circular-type ones is proved. The methods to solve the optimization task on the power efficiency criterion and the airlift more precise calculation are proposed.

Key words: airlift, operation, lifting pipe, feed pipe, airflow, two-phase mixture

Надруковано на ризографі
ТОВ фірма „ДРУК-ІНФО”
Підп. до друку 15.11.2007 р.
Умов. друк. арк. 2,0
Тираж 100 прим. Замовлення № 1792
83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, к. 113
тел. 335-64-55