

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Божко Руслан Игоревич



УДК 621.695.3

**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ЭРЛИФТНОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОДОСБОРНЫХ ЕМКОВСТЕЙ**

Специальность 05.05.06 – Горные машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2022

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки
Донецкой Народной Республики (г. Донецк)

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор
Кононенко Анатолий Петрович
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», заведующий
кафедрой «Энергомеханические системы» (г. Донецк)

Официальные
оппоненты: доктор технических наук, профессор
Паламарчук Николай Владимирович,
ГООВПО «Донецкий институт железнодорожного
транспорта», заведующий кафедрой
«Подвижной состав железных дорог» (г. Донецк)

кандидат технических наук, доцент
Рожков Виталий Сергеевич,
ГОУВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры», доцент кафедры
«Водоснабжение, водоотведение и охрана водных
ресурсов» (г. Макеевка)

Ведущая
организация: ГОУВО ЛНР «Донбасский государственный
технический институт» (г. Алчевск)

Защита состоится « 16 » февраля 2023 г. в 12.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по адресу: 283001,
г. Донецк, ул. Артема, 58, I-й учебный корпус, ауд. 1.203. Тел./факс: +38 (062)
304-30-55, e-mail: uchensovet@donntu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
по адресу: ул. Артема, 58, г. Донецк, 283001, II-й учебный корпус. Адрес сайта
университета: <http://donntu.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01,
доктор технических наук, доцент



И.А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Добыча угля в подземных условиях, а также проведение подготовительных горных работ требует удаления из шахтных водосборных емкостей механически загрязненных вод с примесями твердых частиц (гидросмесей). Особую сложность таких операций, зачастую требующих затрат тяжелого ручного труда, составляет очистка от частиц горной массы шахтных водосборных емкостей – приемных колодцев водоотливных насосов, предварительных отстойников, зумпфов скиповых стволов.

В сравнении с механическими средствами (погрузочными машинами, скреперами) рядом преимуществ обладают гидромеханические средства очистки водосборных емкостей – шламовые насосы, водоструйные насосы (гидроэлеваторы), эрлифты. В этих случаях очистка совмещается с удалением шахтной воды, процессы могут быть автоматизированы, средства откачки более просты в изготовлении и эксплуатации.

Недостатком эрлифтных установок традиционной технологической схемы, как основного из средств гидромеханической очистки, ограничивающим область их применения, является невозможность напорного транспортирования шахтной воды к потребителю после ее выхода из воздухоотделителя, установленного на верхнем торце подъемной трубы. Потребность в этом может возникнуть в случае геометрических (строительных) вертикальных ограничений высоты подъемной трубы с воздухоотделителем до требуемого потребителем уровня, либо при значительной протяженности отводящего от воздухоотделителя трубопровода и невозможности, по выше указанной причине, обеспечить его требуемый гидравлический уклон.

Обеспечить напорное транспортирование шахтной воды от эрлифта к потребителю с энергетической эффективностью работы не ниже эффективности работы установки традиционной технологической схемы возможно нагнетательной эрлифтной установкой за счет обеспечения избыточного давления в воздухоотделителе и утилизации энергии исходящего частично сжатого, на выходе из воздухоотделителя, воздуха, подавая его во всасывающий тракт входящего в состав установки источника пневмоэнергии (воздухоструйного компрессора или радиального нагнетателя).

Поэтому разработка нагнетательных эрлифтных установок на основе обоснования рациональных параметров их рабочего процесса для условий очистки шахтных водосборных емкостей является **актуальной научно-технической задачей.**

Исследования проводились в рамках научно-исследовательских госбюджетных тем: №Н7-16 «Моделирование рабочих процессов гидропневматических установок для транспортирования жидкостей и газов» (2016 – 2019 г.г.) и №Н-19 «Совершенствование гидропневматических аппаратов и устройств для транспортирования жидкостей и гидросмесей» (2019 – 2022 г.г.), исполнителем которых был и соискатель.

Степень разработанности темы. Существует ряд примеров успешного внедрения эрлифтных установок для гидромеханизированной очистки водосборных емкостей в подземных условиях угольных шахт: им. А. А. Скочинского, им. Г. М. Димитрова, им. А. Г. Стаханова, «Кировская», «Коммунист» и других.

Значительный вклад в развитие теории рабочего процесса эрлифта внесли отечественные ученые: Гейер В. Г., Логвинов М. Г., Груба В. И., Костанда В. С., Кириченко Е. А., Малеев В. Б., Кононенко А. П., Козыряцкий Л. Н., Малыгин С. С., Стегниенко А. П., Скорынин Н. И., Игнатов А. В., Шевченко В. Ф., Стифеев Ф. Ф., Адамов Б. И., Данилов Е. И., Усков Е. В., Пащенко В. С., Мизерный В. И. и другие. Среди зарубежных ученых следует отметить вклад таких ученых, как: М. Weber, М. Е. Dedegil, N. N. Clark, R. J. Dabolt, K. Sekoguchi, K. Matsumura, U. Sreedharan, S. B. Koganti.

В работах выше приведенных авторов изложены как основы теории рабочих процессов, так и предлагаемые методики расчета, а также способы повышения энергетической эффективности работы эрлифтов.

Однако, во всех типах рассмотренных эрлифтных установок обеспечивается только безнапорное движение перекачиваемой жидкости (гидросмеси) после воздухоотделителя, что ограничивает возможную высотную отметку потребителя отметкой выходного отверстия воздухоотделителя. При этом обеспечить работу эрлифтной установки по переподъему воды (гидросмеси) на требуемый потребителем уровень возможно с помощью нагнетательной эрлифтной установки, работающей с энергоэффективностью не ниже, чем у традиционной.

Цель и задачи исследований. Целью работы является расширение области применения эрлифтных установок для очистки шахтных водосборных емкостей обеспечением напорного транспортирования шахтной воды (гидросмеси) без снижения энергетической эффективности их работы в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы за счет рациональных параметров рабочего процесса нагнетательных эрлифтных установок.

Указанная цель достигается за счет решения следующих задач:

1. Обосновать актуальность и возможность напорного транспортирования шахтной воды (гидросмеси) нагнетательными эрлифтными установками, обеспечивающими очистку шахтных водосборных емкостей в условиях угольных предприятий.

2. Разработать математическую модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта, отличающуюся от известных учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы, решение которой позволит получить расходные характеристики и гидродинамические параметры водовоздушного потока в сечениях по высоте подъемной трубы эрлифтов.

3. Выполнить аналитическое обоснование степени повышения энергетической эффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с воздушоструйным компрессором и достижимых диапазонов увеличения высоты подъема нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйным и радиальным нагнетателем в качестве источников пневмоэнергии без снижения энергетической эффективности рабочего процесса данных установок в

сравнении с традиционной за счет утилизации энергии исходящего частично сжатого воздуха.

4. Провести экспериментальные исследования работы нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйным компрессором и радиальным нагнетателем в качестве источников пневмоэнергии с целью подтверждения адекватности разработанной математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта и результатов аналитического обоснования уровня эффективности транспортирования жидкости разработанными установками.

5. Разработать инженерную методику расчета нагнетательных эрлифтных установок и обеспечить использование результатов выполненных исследований в угольной промышленности и в образовательном процессе.

Объект и предмет исследования. Объект исследования – рабочий процесс *нагнетательной эрлифтной установки с избыточным давлением в выходном сечении подъемной трубы эрлифта* и утилизацией энергии исходящего частично сжатого воздуха, подаваемого из воздухоотделителя в воздушоструйный компрессор или радиальный нагнетатель, используемые в качестве источников пневмоэнергии гидропневматического подъемника.

Предмет исследования – параметры рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки – подача, давление и расход рабочего воздуха, высота подъема, высота переподъема, КПД.

Научная новизна полученных результатов.

1. Разработана математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта, отличающаяся от известных учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы, что обеспечивает переподъем шахтной воды (гидросмеси) относительно уровня сливного отверстия воздухоотделителя.

2. Впервые установлены рациональные области применения нагнетательных эрлифтных установок, использующих *в качестве источников пневмоэнергии* воздушоструйные компрессоры и радиальные нагнетатели, и обеспечивающих очистку шахтных водосборных емкостей без снижения энергоэффективности работы в сравнении с установками традиционной технологической схемы за счет утилизации энергии исходящего частично сжатого воздуха.

3. Теоретически обоснован физический процесс напорного транспортирования гидросмеси нагнетательными эрлифтными установками за счет избыточного давления в воздухоотделителе без учета аэрации жидкости, что подтверждено результатами экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в углублении научного представления о физических процессах и развитии математического моделирования рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы эрлифта при утилизации энергии исходящего частично сжатого воздуха в источнике пневмоэнергии гидропневматического подъемника (воздушоструйном компрессоре или радиальном нагнетателе).

Практическая значимость полученных результатов:

- обоснованы рациональные области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздуструйными компрессорами и радиальными нагнетателями, обеспечивающих напорное транспортирование шахтной воды (гидросмеси) от установок к потребителям без снижения энергетической эффективности работы в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы;

- разработана и утверждена в ГОУВПО «ДОННТУ» методика инженерного расчета нагнетательных эрлифтных установок для очистки шахтных водосборных емкостей;

- разработана и принята шахтой ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «Донецкая угольная энергетическая компания» к внедрению нагнетательная эрлифтная установка для очистки приемных колодцев водоотливных насосов горизонта 270 м с ожидаемым годовым экономическим эффектом 263,9 тыс. рос. рублей;

- на основе результатов работы созданы лабораторные нагнетательные эрлифтные установки с воздуструйным компрессором и радиальным нагнетателем для научных и учебных целей кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ»;

- результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ» при подготовке специалистов и магистров, обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация «Горные машины и оборудование» и по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», магистерская программа «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», при изучении дисциплин: «Специальные средства и схемы шахтных водоотливных, вентиляторных установок и гидроподъема», «Эксплуатация стационарных установок горных предприятий», «Специальные средства и схемы транспортирования жидкостей и гидросмесей».

Методология и методы исследования.

Основные использованные методы исследований: анализ и научное обобщение данных из литературных источников, анализ и синтез гидродинамических явлений, методы и законы гидромеханики (уравнение неразрывности движения и количества движения жидкости), закономерности теории двухфазных потоков, экспериментальный метод.

Достоверность научных результатов работы обусловлена применением апробированных методов исследований, обоснованным выбором контрольно-измерительной аппаратуры и обработкой экспериментальных данных с применением методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Определено, что применение воздуструйных компрессоров в составе эрлифтных установок традиционной технологической схемы, запитанных от пневмопроводов предприятий общего назначения с давлением рабочего сжатого воздуха $p_p = 0,4 \div 0,8$ МПа, превышающим потребное для эрлифта, позволяет уменьшить расход рабочего воздуха до 2-х раз в диапазоне высоты подъема

$3 \leq H \leq 10$ м и значений относительного погружения смесителя эрлифта $0,2 \leq \alpha \leq 0,5$.

2. Обоснована энергетически рациональная (без снижения энергоэффективности работы в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы) область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздуструйными компрессорами, ограниченная значениями относительного погружения смесителей $0,43 \leq \alpha \leq 0,95$, высоты подъема $1 \leq H \leq 10$ м и высоты переподъема $0,5 \leq \Delta H_n \leq 2,5$ м при давлении рабочего воздуха $p_p = 0,4 \div 0,8$ МПа.

3. Для нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,6; 360-22-1; ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 200/3,0 доказана возможность увеличения высоты подъема до 16,5% и подачи до 23% в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы без снижения энергоэффективности работы нагнетательных установок высотой подъема $14,7 \leq H \leq 60,7$ м и высотой переподъема $\Delta H_n \leq 2,42$ м в диапазоне значений относительного погружения смесителей $0,15 \leq \alpha \leq 0,9$.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов математического моделирования и статистической обработки экспериментальных данных, а также приемлемой сходимостью результатов численного решения и экспериментальных данных. Среднее отклонение расчетного и измеренного значений подач нагнетательного эрлифта составило: в оптимальном режиме работы – 9,9 %, в режиме максимальной подачи – 16,9 %.

Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на: Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк (№ IV – 22-25 мая 2018 г., № VI – 26-28 мая 2020 г., № VII – 22-25 мая 2021 г., № VIII – 24-26 мая 2022 г.); Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», г. Донецк, ДонНТУ (№ XXI – 2021 г.); Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 18-20 апреля 2018 г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 11 работах, из которых 5 – в рецензируемых изданиях ВАК, 6 – по материалам научных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов с выводами по каждому разделу, заключения, приложений и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 277 страниц сквозной нумерации, в том числе 196 страниц основного машинописного текста, 71 рисунок, 9 таблиц, 4 приложения на 81 странице, список литературы из 113 наименований представлен на 14 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована научно-техническая задача, отражена связь работы с научно-исследовательскими государственными темами, определена цель и задачи исследований, содержится научная новизна и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту, дана информация об апробации, публикациях и структуре диссертации.

В первом разделе «Состояние вопроса. Цель и задачи исследований» проведен анализ особенностей эксплуатации шахтных водосборных емкостей, требующих предотвращения заиливания и механизированной очистки, а также основных используемых схем и средств очистки.

Одними из наиболее эффективных средств для дальнейшего совершенствования и внедрения, позволяющими значительно снизить трудоемкость и повысить безопасность ведения работ являются эрлифтные установки.

Обоснована актуальность напорного транспортирования шахтной воды (гидросмеси) от эрлифта к потребителю в условиях вертикальных ограничений возможной высоты подъемной трубы при очистке шахтных водосборных емкостей.

Во втором разделе «Модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта» содержатся разработанные физическая и математическая модели, результаты численного решения математической модели и подтверждения её адекватности экспериментальными исследованиями.

Отличием нагнетательного эрлифта от эрлифта традиционной технологической схемы является наличие избыточного давления на торце подъемной трубы и в воздухоотделителе $p_{вз}$, что дает возможность переподачи жидкости на высоту ΔH_n (Рисунок 1).

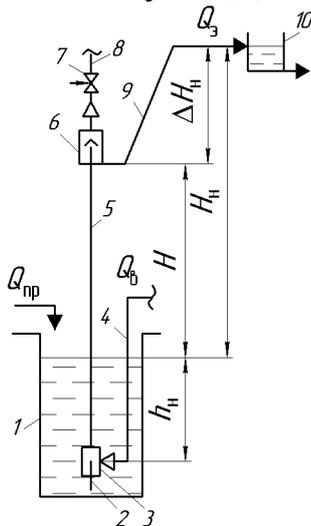


Рисунок 1 – Принципиальная схема нагнетательного эрлифта: 1 – зумпф; 2 – подающая труба; 3 – смеситель; 4 – воздухопровод; 5 – подъемная труба; 6 – воздухоотделитель; 7 – регулирующий клапан; 8 – воздухоотводящая труба; 9 – сливная труба; 10 – потребитель перекачиваемой жидкости (гидросмеси); h_n – глубина погружения смесителя; H – высота подъема; ΔH_n – высота переподачи; H_n – высота подъема нагнетательного эрлифта; Q_v – расход воздуха эрлифтом; $Q_э$ – подача эрлифта; $Q_{пр}$ – величина притока жидкости в водосборную емкость

При разработке математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта приняты следующие допущения:

- давление по высоте подъемной трубы изменяется по линейному закону;
- состояние воздуха в составе водовоздушной смеси соответствует изотермическому процессу;
- структура водовоздушного потока в подъемной трубе снарядная;

- з) водовоздушный поток в подъемной трубе стационарный, осесимметричный, квазиодномерный;
- д) в поперечных сечениях фаз водовоздушного потока в подъемной трубе давления одинаковы;
- е) при определении избыточного давления в воздухоотделителе аэрация транспортируемой жидкости не учитывается.

В соответствии с результатами исследований известных ученых, при плотности гидросмеси $\rho \leq 1200 \text{ кг/м}^3$ трехфазную смесь (воздух – вода – твердые частицы) возможно рассматривать как двухфазную (воздух – вода) с приемлемой точностью получаемых результатов математического моделирования.

В основу математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта, отличающейся от существующих учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы положены фундаментальные законы сохранения, которые для условий газожидкостного подъемника со снарядной структурой водовоздушного потока имеют вид:

- уравнение количества движения

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d}{dz} [(1-\varphi)\rho'(w')^2 + \varphi\rho''(w'')^2] - [(1-\varphi)\rho' + \varphi\rho'']g; \quad (1)$$

- уравнение неразрывности движения

$$(1-\varphi)\rho'w' + \varphi\rho''w'' = G = \text{const}, \quad (2)$$

где p – давление смеси; z – вертикальная координата сечения подъемной трубы; χ – периметр поперечного сечения трубы; ω – площадь поперечного сечения трубы; τ_w – касательное напряжение на стенке; φ – истинное газосодержание потока; ρ' – плотность жидкости; ρ'' – плотность газа; w' – истинная скорость жидкости в газожидкостной смеси; w'' – истинная скорость газа в газожидкостной смеси; g – ускорение свободного падения; G – массовая скорость водовоздушной смеси.

Избыточное давление на выходе из подъемной трубы нагнетательного эрлифта (Рисунок 1)

$$p_{\text{вз}} = \rho' \cdot g \cdot \Delta H_{\text{н}}. \quad (3)$$

Высота переподачи эквивалентного нагнетательного эрлифта (Рисунок 1)

$$\Delta H_{\text{эн}} = \frac{\Delta H_{\text{н}} (H_{\text{н}} - \Delta H_{\text{н}} + h_{\text{н}})}{h_{\text{н}} - \Delta H_{\text{н}}}. \quad (4)$$

Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$\alpha = \alpha_{\text{эн}} = \frac{h_{\text{н}}}{H_{\text{н}} - \Delta H_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}} + h_{\text{н}}}. \quad (5)$$

Абсолютное давление в подъемной трубе на расстоянии z_i от смесителя

$$p(z) = p_0 + p_{\text{см}} \left(1 - \frac{z_i}{H + h_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}}} \right), \quad (6)$$

где $H = H_n - \Delta H_n$ (Рисунок 1); p_0 – давление окружающей среды; $p_{см}$ – избыточное давление в смесителе.

Здесь и далее под эквивалентным нагнетательным и эквивалентным традиционным эрлифтами понимаются эрлифты с одинаковыми геометрическими погружениями h_n и длинами подъемных труб, обеспечивающими транспортирование жидкости на высоту H_n , при соответствующих эпюрах давления в подъемных трубах (Рисунок 8).

Уравнения (1), (2), с учетом выражений (3) – (6), отражающих особенности математического моделирования рабочего процесса нагнетательного эрлифта, позволили получить уравнение стационарного вертикального восходящего движения двухфазного снарядного течения в подъемной трубе нагнетательного эрлифта

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4\tau_w(z)}{D} + \frac{d}{dz} \left\langle \left(\frac{G(z) \cdot (1-x)}{1-\varphi(z)} \right) \times \left[\left(\frac{x \cdot (1-\varphi(z))}{\varphi(z) \cdot (1-x)} \right) w_0''(z) + w_0'(z) \right] \right\rangle + \rho_{см}(z) \cdot g. \quad (7)$$

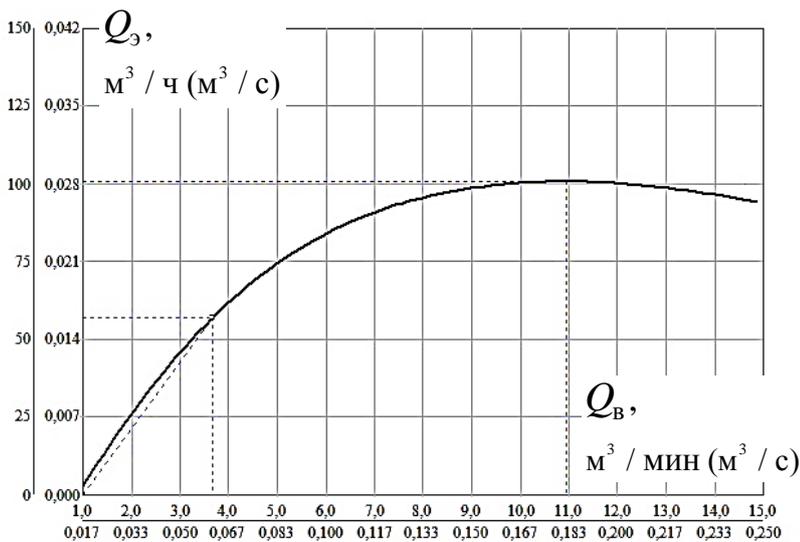


Рисунок 2 – Расчетная расходная характеристика нагнетательного эрлифта с $H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 2$ м, $\alpha_{эн} = 0,533$, $D = 0,15$ м

трубы в зависимости от расхода воздуха Q_B с визуализацией получаемых результатов.

В качестве примера решения математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта приведена расходная характеристика (Рисунок 2), построенная при исходных данных: высота подъема $H_n = 7$ м, высота перепада $\Delta H_n = 2$ м, относительное погружение $\alpha_{эн} = 0,533$, внутренний диаметр подъемной трубы $D = 0,15$ м. Оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта характеризуется расходом сжатого воздуха $Q_{B,опт} = 0,061$ M^3/c (3,66 $M^3/мин$) и подачей эрлифта $Q_{3,опт} = 0,0158$ M^3/c (56,8 $M^3/ч$), что соответствует удельному расходу воздуха $q_{н,опт} = 3,86$. В режиме максимальной подачи: $Q_{B,макс} = 0,182$ M^3/c

Решение уравнения (7) выполнено численным методом при помощи разработанной программы на ЭВМ (язык программирования Delphi), что позволило определить расходные характеристики нагнетательного эрлифта $Q_3 = f(Q_B)$, изменение приведенных и истинных скоростей w и плотностей фаз ρ (воды и воздуха) двухфазного (водовоздушного) потока, а также изменение давлений p и мощностей N аэрогидросмеси по высоте подъемной

(10,9 м³/мин) и $Q_{э.макс} = 0,0280$ м³/с (100,7 м³/ч), что соответствует удельному расходу воздуха $q_{н макс} = 6,51$.

Сравнение экспериментальных и расчетных параметров работы нагнетательных эрлифтов позволили подтвердить адекватность математической модели

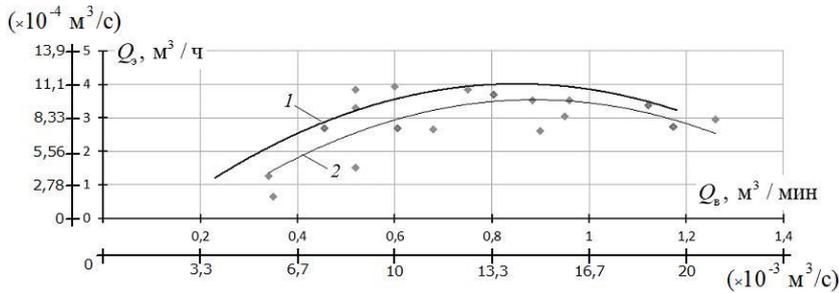


Рисунок 3 – Расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $H = 3$ м, $\Delta H_H = 0,25$ м, $\alpha_{эH} = 0,35$, $D = 0,068$ м: 1 – расчетная характеристика (оптимальный режим работы: $Q_{в.опт} = 8,70 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $Q_{э.опт} = 8,80 \cdot 10^{-4}$ м³/с; максимальный режим – $Q_{в.макс} = 14,5 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $Q_{э.макс} = 11,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с); 2 – экспериментальная характеристика (оптимальный режим $Q_{в.опт} = 8,30 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $Q_{э.опт} = 7,40 \cdot 10^{-4}$ м³/с; максимальный режим – $Q_{в.макс} = 16,0 \cdot 10^{-3}$ м³/с, $Q_{э.макс} = 9,86 \cdot 10^{-4}$ м³/с)

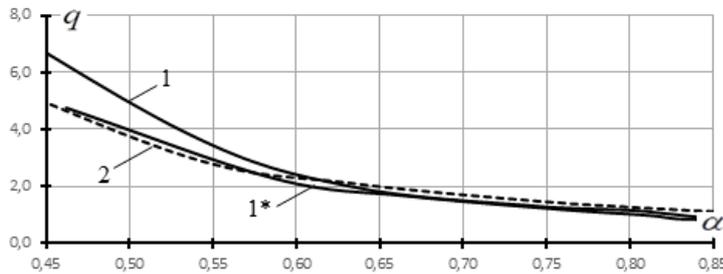


Рисунок 4 – Расчетные зависимости удельных расходов воздуха q эрлифтов от относительного погружения α в оптимальном режиме работы:

1 – нагнетательного эрлифта; 1* – традиционного эрлифта, 2 – эмпирическая кривая $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$

удельных расходов воздуха q в оптимальном режиме работы нагнетательного и традиционного эрлифтов в сравнении с эмпирической зависимостью не превышает 15 % в диапазоне относительного погружения $\alpha = 0,45 \div 0,85$.

В третьем разделе «Особенности рабочего процесса нагнетательных эрлифтных установок» приведено аналитическое обоснование степени повышения энергетической эффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с воздушоструйным компрессором и достижимых диапазонов увеличения высоты подъема нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйным и радиальным нагнетателем без снижения энергетической эффективности рабочего процесса данных установок в сравнении с традиционной за счет утилизации энергии исходящего частично сжатого воздуха.

рабочего процесса. Среднее отклонение расчетной подачи от полученной экспериментально для всех исследуемых значений высоты переподачи ΔH_H не превышает 17% при прочих равных условиях (Рисунок 3).

Также подтверждает адекватность математической модели сравнение расчетных удельных расходов воздуха для нагнетательного ($H_H = 7$ м, $\Delta H_H = 2$ м, $D = 0,15$ м, $\alpha_{эH} = 0,364 \div 0,911$) и традиционного ($H_H = 7$ м, $\Delta H_H = 0$, $D = 0,15$ м, $\alpha_{эT} = 0,462 \div 0,914$) эрлифтов с существующей эмпирической зависимостью $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$ (Рисунок 4), полученной в результате многочисленных экспериментальных исследований учеными кафедры энергомеханических систем ГОУВПО «ДОННТУ». Среднее отклонение в значениях

Известно, что избыточное давление в шахтной пневмосети, как правило, составляет $0,5 \div 0,6$ МПа. При этом для работы эрлифтных установок, используемых для очистки шахтных водосборных емкостей, это давление оказывается завышенным до $10 \div 15$ раз в сравнении с необходимым.

Установлено, что применение воздушоструйных компрессоров в составе эрлифтных установок традиционной технологической схемы, запитанных от шахтных пневмопроводов с давлением рабочего воздуха $p_p = 0,4 \div 0,8$ МПа, позволяет уменьшить расход рабочего воздуха до 2-х раз в диапазоне высоты подъема $H = 3 \div 10$ м и значений относительного погружения смесителя эрлифта $\alpha = 0,20 \div 0,50$, тем самым повысив экономичность работы эрлифтных установок при очистке шахтных водосборных емкостей.

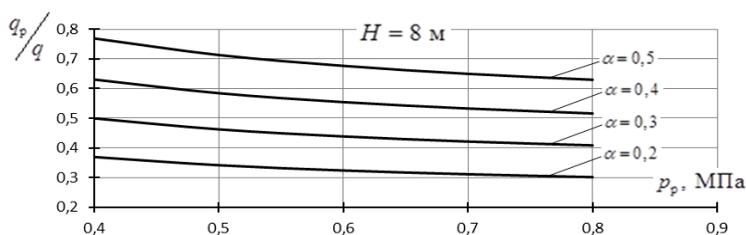


Рисунок 5 – Зависимости относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от давления рабочего воздуха p_p при различных значениях относительного погружения α

Указанные данные получены на основе зависимости удельного расхода воздуха эрлифтом q от относительного погружения смесителя α с применением компьютерной программы для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора u , что позволило получить зависимости: удельного расхода рабочего воздуха от относительного погружения $q_p = f(\alpha)$, а также $q_p/q = f(\alpha)$, $q_p/q = f(H)$ и $q_p/q = f(p_p)$. Как пример – зависимость $q_p/q = f(p_p)$ при $H = 8$ м, приведенная на рисунке 5.

В эрлифтных установках традиционной технологической схемы обеспечивается безнапорное (самотечное) транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю. Если геодезическая отметка уровня перекачиваемой жидкости у потребителя превышает отметку выходного отверстия воздухоотделителя, применение такой установки становится невозможным.

Нагнетательные эрлифтные установки обеспечивают напорное транспортирование жидкостей (гидросмесей) по назначению за счет избыточного давления в воздухоотделителе. При традиционной схеме эрлифтных установок это приводит к снижению энергоэффективности его рабочего процесса так как это эквивалентно увеличению высоты подъема при прочих равных условиях.

Сохранить, а иногда, и повысить (за счет увеличения коэффициента инжекции u воздушоструйного компрессора или особенностей характеристики радиального нагнетателя при давлении во всасывающем патрубке $p_{a\text{ вс}}$, отличного от атмосферного), энергетическую эффективность работы нагнетательной эрлифтной установки в сравнении с традиционной возможно утилизацией энергии частично сжатого воздуха, подавая его из воздухоотделителя во всасывающий патрубок источника пневмоэнергии для эрлифта – воздушоструйного компрессора (Рисунок 6) или радиального нагнетателя (Рисунок 10).

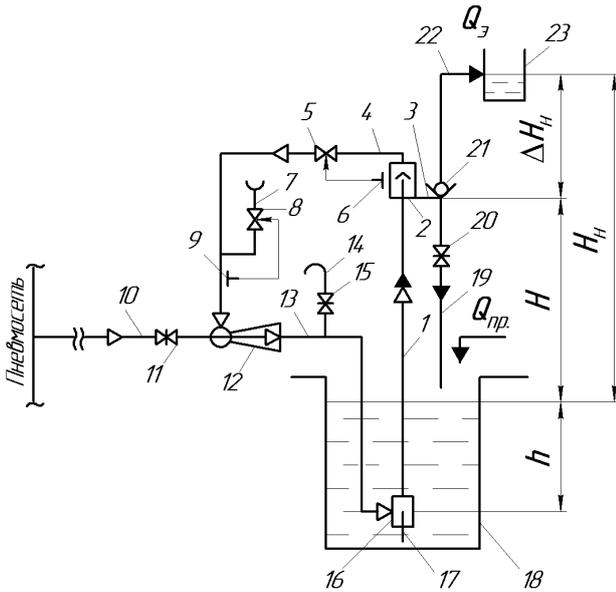


Рисунок 6 – Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором: 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель; 3 – сливная труба; 4 – воздухоотводящая труба; 5, 8 – регулирующие клапаны; 6 – датчик уровня; 7 – патрубок; 9 – датчик давления; 10 – трубопровод рабочего воздушного потока; 11 – задвижка запорно-регулирующая; 12 – компрессор воздушоструйный; 13 – напорный воздухопровод; 14 – пусковой патрубок; 15, 20 – задвижка; 16 – смеситель; 17 – подающая труба; 18 – зумпф; 19 – сбросной трубопровод; 21 – обратный клапан; 22 – отводящий трубопровод; 23 – потребитель перекачиваемой жидкости

Анализ особенностей рабочего процесса и энергоэффективности работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором потребовал представления принципиальной схемы нагнетательного эрлифта в виде принципиальной эквивалентной схемы нагнетательного эрлифта с традиционным способом работы (Рисунок 7 б, в). Эквивалентность (по условиям работы) эрлифтов данных схем обеспечивается одинаковыми геометрическими погружениями смесителей h_n и одинаковыми давлениями $p_{вз}$ в подъемных трубах на высоте H от уровня свободной поверхности жидкости в водосборной емкости.

Эквивалентный традиционный эрлифт (Рисунок 7, з) обеспечивает ту же высоту подъема H_n , что и нагнетательный (Рисунок 7, б), и служит для сравнения параметров рабочего процесса и энергоэффективности работы этой установки (Рисунок 7, з) и эквивалентной нагнетательной установки (Рисунок 7, в).

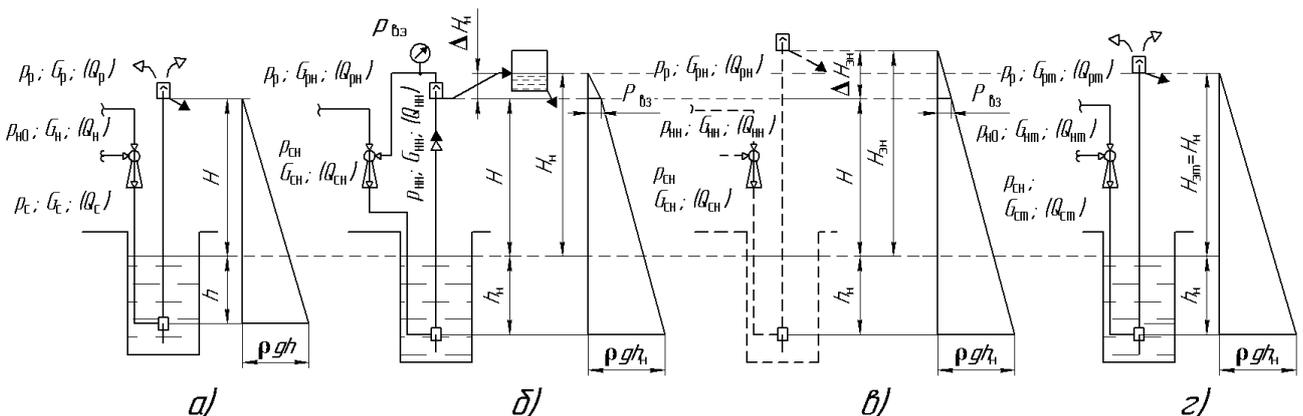


Рисунок 7 – Схемы эрлифтных установок с воздушоструйным компрессором и эпюры давления в подъемных трубах эрлифтов: а – традиционной технологической схемы; б – нагнетательного; в – эквивалентного нагнетательного; з – эквивалентного традиционного

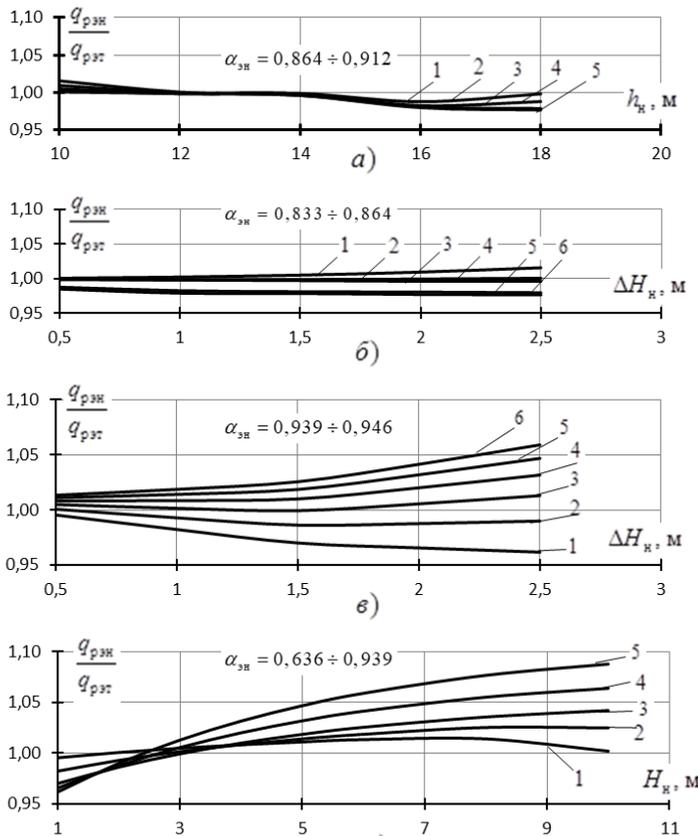


Рисунок 8 – Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{pэн}/q_{pэт}$ нагнетательного эрлифта при $p_p = 0,6$ МПа от: а – геометрического погружения смесителя h_n ; б, в – высоты перепада ΔH_n ; г – высоты подъема H_n ($\alpha_{эн} = 0,636 \div 0,946$) (На рис. а и г ΔH_n : 1 – 0,5 м; 2 – 1 м; 3 – 1,5 м; 4 – 2 м; 5 – 2,5 м. На рис. б h_n : 1 – 10 м; 2 – 12 м; 3 – 14 м; 4 – 15 м; 5 – 16 м; 6 – 18 м. На рис. в H_n : 1 – 1 м; 2 – 2 м; 3 – 3 м; 4 – 4 м; 5 – 5 м; 6 – 6 м)

сителя $\alpha_n = 0,43 \div 0,95$ при одинаковых давлениях сжатого воздуха, подаваемого в смеситель $p = \rho g h_n$ построены зависимости $q_{pэн}/q_{pэт} = f(h_n)$, $q_{pэн}/q_{pэт} = f(H_n)$, $q_{pэн}/q_{pэт} = f(\Delta H_n)$, $q_{pэн}/q_{pэт} = f(p_p)$ (Рисунок 8, 9).

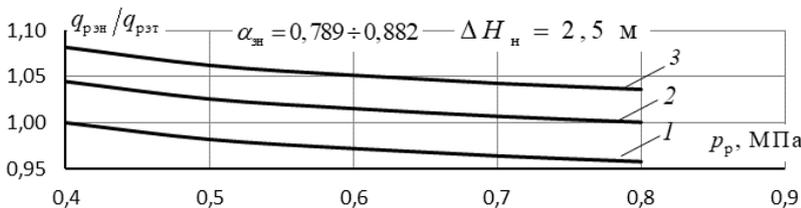


Рисунок 9 – Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{pэн}/q_{pэт}$ нагнетательного эрлифта от абсолютного давления рабочего воздуха p_p при $\Delta H_n = 2,5$ м, H_n : 1 – 1 м; 2 – 1,5 м; 3 – 2 м ($\alpha_{эн} = 0,789 \div 0,882$)

Удельный расход рабочего воздуха q_p для эквивалентной нагнетательной эрлифтной установки

$$q_{pэн} = \frac{q_{эн}}{1 + u_{эн}}. \quad (8)$$

Обоснование энергетически рациональной области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйным компрессором выполнено аналитически на основе зависимостей (3) – (5), (8) и компьютерной программы для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора u .

Для эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного эрлифтов в диапазонах значений давления рабочего воздуха (из пневмосети) $p_p = 0,4 \dots 0,8$ МПа, высоты подъема $H_n = 1 \dots 10$ м, высоты перепада $\Delta H_n = 0,5 \dots 2,5$ м, относительного погружения сме-

Как следует из полученных в результате расчетов и приведенных в качестве примеров зависимостей (Рисунок 8, 9), среднее отклонение удельного расхода рабочего воздуха эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного эрлифтов $q_{pэн}/q_{pэт}$ не превышают

высоты подъема $H_{\text{эт}}$ при постоянном значении h эквивалентного традиционного эрлифта в условиях роста давления в воздухоотделителе.

Для нагнетательных эрлифтных установок с исследуемым рядом радиальных нагнетателей при давлении во всасывающей патрубке $p_{\text{авс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па доказана возможность увеличения высоты подъема до 16,5% и подачи до 23% в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы без снижения энергоэффективности работы установок при их эксплуатации с высотой подъема $14,7 \leq H \leq 60,7$ м и высотой переподъема $\Delta H_{\text{н}} \leq 2,42$ м в диапазоне значений относительного погружения смесителей $0,15 \leq \alpha \leq 0,9$.

Четвертый раздел «Экспериментальное исследование рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки» содержит результаты экспериментальных исследований работы нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйным компрессором и радиальным нагнетателем.

В качестве критериев подобия эрлифтов принято: относительное погружение смесителя α , отношение длины подъемной трубы к ее диаметру $(H+h)/D$ и автомодельность зоны числа Рейнольдса Re для газожидкостного потока в подъемной трубе.

В условиях учебной лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ» были смонтированы установки:

- с воздушоструйным компрессором: $h_{\text{н}} = 2$ м, $H = 3$ м, $\Delta H_{\text{н}} = 0,25 \div 1,0$ м, $D = 0,068$ м, $\alpha_{\text{max}} = 0,4$, $Q_{\text{э, макс}} = 2,22 \cdot 10^{-3}$ м³/с (Рисунок 12, 13);

- с радиальным нагнетателем: $h_{\text{н}} = 0,4$ м, $H = 1,2$ м, $\Delta H_{\text{н}} = 0,2$ м, $D = 0,03$ м, $\alpha_{\text{max}} = 0,4$, $Q_{\text{э, макс}} = 0,972 \cdot 10^{-4}$ м³/с (Рисунок 14).

При проведении экспериментальных исследований было обеспечено значение транспортной скорости гидросмеси в подающих трубах эрлифтов около 1 м/с, что позволяет использовать установки для транспортирования твердых частиц с плотностью до 2800 кг/м³.

Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором проведены в следующем объеме:

- получение поля характеристик воздушоструйного компрессора для доказательства увеличения его коэффициента инжекции при увеличении давления инжектируемого потока (Рисунок 15);

- получение расходных характеристик эрлифта в традиционном режиме работы при различных значениях относительного погружения;

- получение расходных характеристик эрлифта в нагнетательном режиме работы при различных значениях высоты переподъема (Рисунок 16).

На каждом из приведенных этапов исследований были получены экспериментальные точки при, минимум, 5 измерениях контролируемых параметров на одном их уровне, проведена обработка экспериментальных данных с отсеком грубых ошибок, построены регрессионные кривые, проведено сравнение отклонений исследуемых параметров в точках регрессионных кривых от аналогичных параметров расчетных кривых при прочих равных условиях.

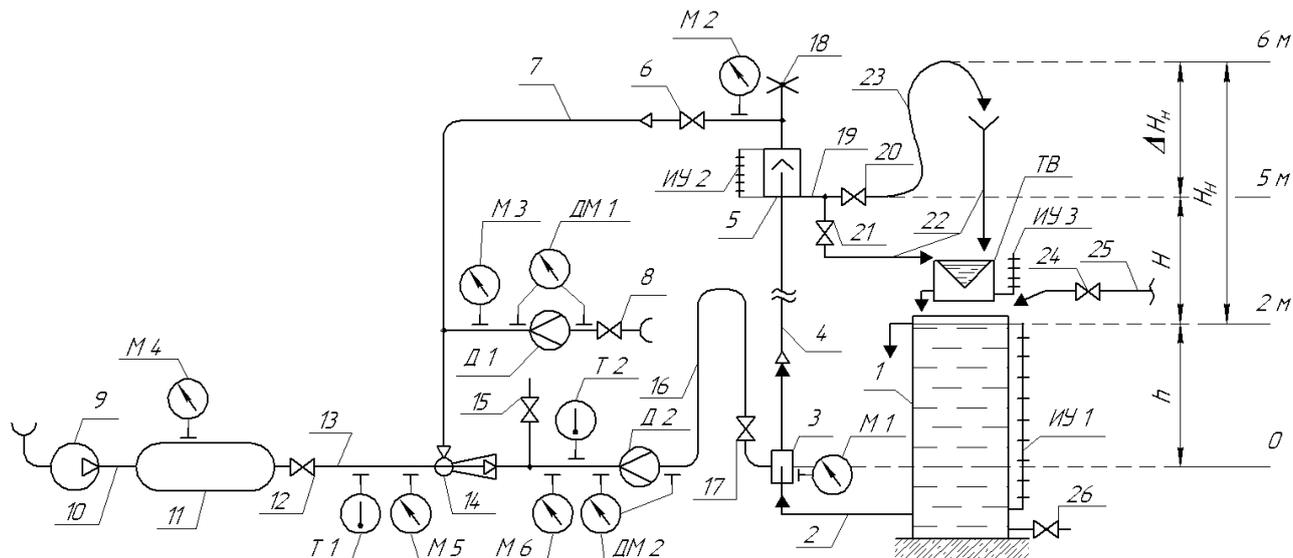


Рисунок 12 – Схема экспериментальной установки нагнетательного эрлифта с воздушнотруйным компрессором: 1 – основная емкость; 2 – подающая труба; 3 – смеситель эрлифта; 4 – подъемная труба; 5 – воздухоотделитель; 6, 8, 12, 17, 20, 21, 24, 26 – запорно-регулирующие клапаны; 7 – воздухоотводящая труба; 9 – винтовой компрессор ВК 30-8; 10 – воздухопровод; 11 – ресивер Р-500; 13 – воздухопровод рабочего воздуха; 14 – воздушнотруйный компрессор; 15 – сбросной клапан; 16 – напорный воздухопровод; 18 – пробка; 19 – сливная труба; 22 – трубопроводы; 23 – гибкий отводящий трубопровод; 25 – трубопровод заполнения основной емкости



Рисунок 13 – Экспериментальная нагнетательная эрлифтная установка с воздушнотруйным компрессором: а) – общий вид установки; б) - воздухоотделитель и измерительная емкость; 1 – основная емкость; 2 – подъемная труба; 3 – воздухоотводящая труба; 4 – воздушнотруйный компрессор; 5, 11 – дифманометры ДТ-50; 6, 14 – измерительные диафрагмы; 7, 9, 12, 13, 15 – образцовые манометры, 8 – напорный трубопровод; 10 – термометр; 16 – регулирующий клапан; 17 – отводящий трубопровод; 18 – уровни установки высоты перепада; 19 – измерительная емкость

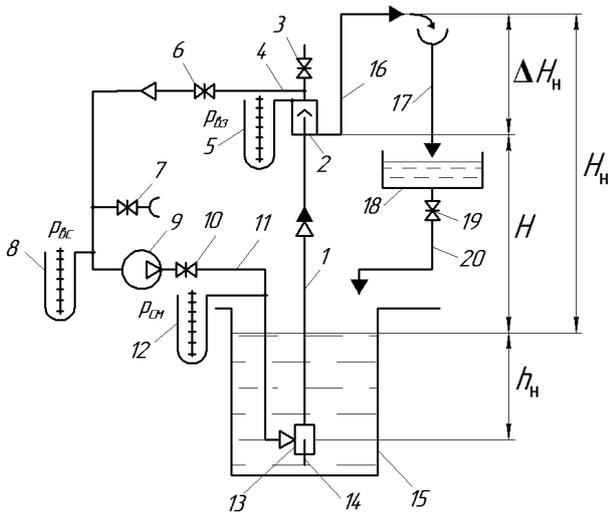


Рисунок 14 – Схема экспериментальной установки нагнетательного эрлифта с радиальным нагнетателем: 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель; 3, 6, 7, 10, 19 – запорно-регулирующие клапаны; 4 – воздухопровод; 5, 8, 12 – U-образные манометры; 9 – радиальный нагнетатель; 11 – напорный воздухопровод; 13 – смеситель; 14 – подающая труба; 15 – основная емкость; 16 – отводящий трубопровод; 17, 20 – сливные трубки; 18 – измерительный бак

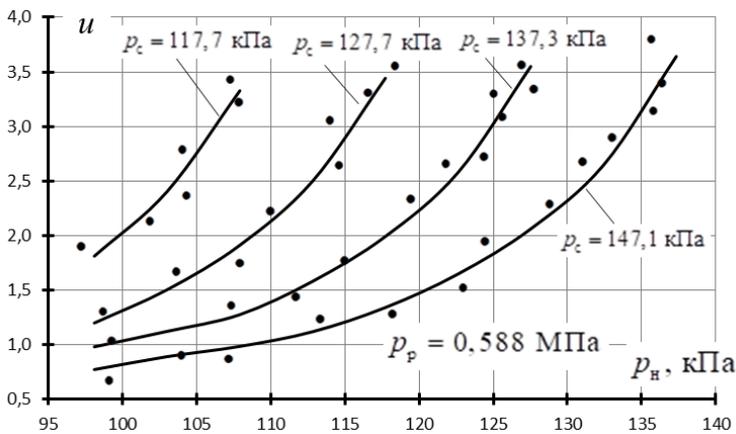


Рисунок 15 – Экспериментальные зависимости коэффициента инжекции от давления инжектируемого потока и давления сжатия $u = f(p_n, p_c)$ воздушоструйного компрессора

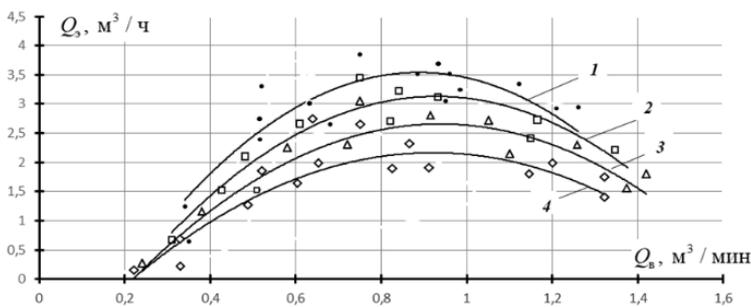


Рисунок 16 – Экспериментальные расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $h = 2$ м, $h+H = 5$ м, $\alpha = 0,4$, $D = 0,068$ м:
1 – при $\Delta H_n = 0,25$ м; 2 – при $\Delta H_n = 0,5$ м;
3 – при $\Delta H_n = 0,75$ м; 4 – при $\Delta H_n = 1,0$ м

режима максимальной подачи – $\Delta Q_{э, макс} = 16,9$ % для всех значений высоты перепада $(\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м), что подтверждает адекватность разработанной математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта эксперименту.

Доказано (Рисунок 15), что при увеличении абсолютного давления инжектируемого потока p_n от 98,1 до 137,3 кПа коэффициент инжекции u увеличивается в 1,8÷4,8 раз при абсолютном давлении сжатия $p_c = 117,7 \div 147,1$ кПа.

Экспериментальные исследования работы эрлифтной установки в нагнетательном режиме работы (Рисунок 16) проводилось при максимально возможном геометрическом погружении смесителя $h_n = 2$ м в диапазоне высот перепада $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м, что соответствует диапазону относительных погружений $\alpha_{эн} = 0,20 \div 0,35$. Расходные характеристики в этом случае получены при расходе воздуха $Q_v = 0,2 \div 1,4$ м³/мин.

Среднее отклонение расчетной подачи нагнетательного эрлифта от полученной экспериментально (Рисунок 3) для оптимального режима работы составляет $\Delta Q_{э, опт} = 9,9$ %, для

В пятом разделе «Методика проектирования и рекомендации по разработке нагнетательных эрлифтных установок» приведена разработанная и утвержденная ГОУВПО «ДОННТУ» инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок, а также рекомендации по их дальнейшему практическому использованию.

Разработана и принята ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК» к внедрению нагнетательная эрлифтная установка для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м ($D = 205$ мм, $H_n = 3$ м, $h_n = 6$ м, $\Delta H_n = 3$ м, $\alpha_{эп} = 0,333$) с ожидаемым годовым экономическим эффектом 263,9 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача расширения области применения нагнетательных эрлифтных установок для очистки шахтных водосборных емкостей угольных предприятий за счет рациональных параметров их рабочих процессов при обеспечении напорного транспортирования шахтной воды (гидросмеси) и утилизации энергии исходящего из воздухоотделителя частично сжатого воздуха, что обеспечивает работу нагнетательных эрлифтных установок без снижения энергетической эффективности в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа литературных данных обоснована актуальность и возможность напорного транспортирования шахтной воды (гидросмеси) от эрлифта к потребителю в условиях вертикальных ограничений высоты подъемной трубы при очистке шахтных водосборных емкостей в условиях угольных предприятий. Реализация напорного режима работы нагнетательных эрлифтных установок возможна при избыточном давлении в воздухоотделителе.

2. На основе уравнений количества движения и неразрывности движения с учетом принятых допущений разработана математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта, отличающаяся от существующих учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы и позволяющая определять параметры восходящего газожидкостного потока по ее высоте. Разработана компьютерная программа для численного решения данной математической модели (язык программирования Delphi), обеспечивающая, в том числе, визуализацию получаемых результатов.

3. На основе выполненного теоретического анализа энергетической эффективности работы нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйным компрессором и радиальным нагнетателем, а также аналитического обоснования степени повышения энергетической эффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с воздухоструйным компрессором и достижимых диапазонов увеличения высоты подъема нагнетательных эрлифтных установок установлено, что:

- повышается до 2-х раз энергоэффективность работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с воздушоструйными компрессорами, запитанными от пневмопровода предприятия общего назначения с давлением рабочего сжатого воздуха $p_p = 0,4 \div 0,8$ МПа, превышающим потребное для эрлифтов, в диапазоне высоты подъема $3 \leq H \leq 10$ м и относительного погружения смесителей $0,2 \leq \alpha \leq 0,5$;

- обеспечивается работа нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами без снижения ее энергоэффективности в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы при высоте подъема $1 \leq H \leq 10$ м, высоте перепада $0,5 \leq \Delta H_n \leq 2,5$ м, относительном погружении смесителей $0,43 \leq \alpha \leq 0,95$ и давлении рабочего сжатого воздуха $p_p = 0,4 \div 0,8$ МПа;

- обеспечивается увеличение высоты подъема до 16,5% и подачи до 23% в сравнении с эрлифтными установками традиционной технологической схемы без снижения энергоэффективности работы нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями: ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,6; 360-22-1; ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 200/3,0 при высоте подъема $14,7 \leq H \leq 60,7$ м, высоте перепада $0 < \Delta H_n \leq 2,42$ м, относительном погружении смесителей $0,15 \leq \alpha \leq 0,90$.

4. Проведены экспериментальные исследования работы нагнетательных эрлифтных установок, смонтированных в учебной лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ»:

- нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором (глубина погружения смесителя $h_n = 2$ м, высоты подъема $H = 3$ м, высота перепада $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м, диаметр подъемной трубы $D = 0,068$ м;

- нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем (глубина погружения смесителя $h_n = 0,4$ м, высоты подъема $H = 1,2$ м, высота перепада $\Delta H_n = 0,2$ м, диаметр подъемной трубы $D = 0,03$ м.

Сравнение экспериментальных и расчетных параметров работы нагнетательных эрлифтных установок в оптимальном и максимальном режимах работы позволили подтвердить адекватность математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта и результатов аналитического обоснования достижимых диапазонов увеличения высоты подъема нагнетательных эрлифтных установок. Отклонения экспериментально определенных и расчетных подач в оптимальном и максимальном режимах работы нагнетательных эрлифтных установок составляют $9,9 \div 16,9$ % при прочих равных условиях.

5. Разработана инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок, включающая определение основных конструктивных и технологических параметров.

Разработана и принята шахтой ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК» к внедрению нагнетательная эрлифтная установка для чистки приемных колодцев водоотливных насосов горизонта 270 м с ожидаемым экономическим эффектом 263,9 тыс. рос. рублей.

Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОННТУ» при подготовке специалистов, обучаю-

щихся по специальности 21.05.04 «Горное дело», специализация «Горные машины и оборудование» и по направлению подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», магистерская программа «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», при изучении дисциплин: «Специальные средства и схемы шахтных водоотливных, вентиляторных установок и гидроподъема», «Эксплуатация стационарных установок горных предприятий», «Специальные средства и схемы транспортирования жидкостей и гидросмесей».

Намечены перспективы применения нагнетательных эрлифтных установок в энергетической отрасли, строительстве и при добыче полезных ископаемых.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Кононенко, А. П. Области применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А. П. Кононенко, **Р. И. Божко** // Научный журнал «Современное промышленное и гражданское строительство», том 14, 2018 год, выпуск №1, С. 29–37. — URL: http://donnasa.ru/publish_house/journals/spgs/2018-1/03_Kononenko_Bozhko.pdf

2. Кононенко, А. П. Особенности применения радиальных нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных установок / А. П. Кононенко, **Р. И. Божко** // Международный научно-технический журнал "Вестник Донецкого национального технического университета". - 2018. - № 4(14), – С. 24–33. — URL: <http://vestnik.donntu.org/dl/2018/04/kononenko.pdf>

3. Кононенко, А. П. Рациональная область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами / А. П. Кононенко, **Р. И. Божко** // Международный научно-технический журнал "Вестник Донецкого национального технического университета". - 2019. - № 3(17)'2019, – С. 17–25. — URL: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/03/kononenko.pdf>

4. Кононенко, А. П. Модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А. П. Кононенко, **Р. И. Божко**, В. А. Панов // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля № 11 (29) 2019, – С. 75–80. — URL: https://izdat.dahluniver.ru/images/archive/1129_2019_.pdf

5. **Божко, Р. И.** Перемещение вертикального трубопровода при различных режимах движения плавсредства, предназначенного для добычи полезных ископаемых со дна Мирового океана / **Р. И. Божко**, Л. Н. Козыряцкий, **Ф. Л. Шевченко**. Международный научно-технический журнал "Вестник Донецкого национального технического университета". - 2020. - № 3(21)'2020, – С. 10–16.

Публикации по материалам конференций

6. Кононенко, А. П. Обоснование применения нагнетательных эрлифтных установок с центробежными нагнетателями // **Р. И. Божко**, А. П. Кононенко // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть I / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2018. – С. 153 – 156.

7. **Божко, Р. И.** Обоснование рациональных параметров нагнетательной эрлифтной установки с центробежными нагнетателями / А. П. Кононенко, **Р. И. Божко** // Материалы 4-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: ДОННТУ, 2018. – С. 102 – 107.

8. **Божко, Р. И.** Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта / **Р. И. Божко**, А. П. Кононенко, Н. С. Гаврилов // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: ДОННТУ, 2020. – С. 164– 170.

9. Кононенко, А. П. Экспериментальное подтверждение адекватности математической модели рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки / А. П. Кононенко, **Р. И. Божко** // Горная энергомеханика и автоматика: материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию ДонНТУ. Донецк: ДонНТУ, 2021. – С. 29 – 36.

10. **Божко, Р. И.** Нагнетательная эрлифтная установка для чистки подземных технологических емкостей / **Р. И. Божко**, А. П. Кононенко // Материалы 7-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: ДОННТУ, 2021. – С. 129– 133.

11. **Божко, Р. И.** Нагнетательная эрлифтная установка для очистки шахтных водосборных емкостей/ **Р. И. Божко** // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». – Донецк: ДОННТУ, 2022. – С. 98– 102.