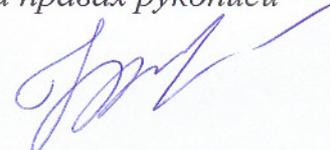


Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Божко Руслан Игоревич

УДК 621.695.3

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

Специальность 05.05.06 – Горные машины

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д-р техн. наук, профессор Кононенко А. П.

Идентичность всех экземпляров ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь диссертационного совета Д 01.008.01

д-р техн. наук, доц.

И. А. Бершадский



Донецк – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	15
1.1 Водосборные емкости угольных шахт, требующие предотвращения заиливания и механизированной очистки.....	15
1.2 Существующие схемы и средства гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей	19
1.2.1 Основные используемые схемы очистки шахтных водосборных емкостей	19
1.2.2 Внедренные эрлифтные установки для очистки шахтных водосборных емкостей	25
1.3 Анализ работ, направленных на усовершенствование эрлифтных установок.....	32
1.4 Актуальность применения нагнетательной эрлифтной установки для очистки шахтных водосборных емкостей	36
1.5 Цель и задачи исследований.....	40
1.6 Выводы.....	42
РАЗДЕЛ 2 МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ЭРЛИФТА	43
2.1 Физическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта.....	43
2.2 Математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта.....	47
2.3 Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта.....	55
2.4 Адекватность математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта.....	65
2.5 Выводы.....	68

РАЗДЕЛ 3 ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК.....	69
3.1 Физическая модель и аналитический анализ рабочего процесса эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором.....	69
3.1.1 Работа эрлифтной установки традиционной технологической схемы с воздушоструйным компрессором.....	69
3.1.2 Физическая модель рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором.....	75
3.1.3 Аналитическое обоснование энергетической эффективности работы и рациональные области применения нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором	80
3.2 Физическая модель и аналитический анализ рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями.....	88
3.2.1 Физическая модель рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями.....	88
3.2.2 Аналитическое обоснование энергетической эффективности работы и рациональные области применения нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями.....	97
3.3 Выводы.....	115
РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ЭРЛИФТНОЙ УСТАНОВКИ.....	117
4.1 Задачи и обоснование выбора объекта экспериментальных исследований.....	117
4.2 Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором	119
4.2.1 Экспериментальная нагнетательная эрлифтная установка с воздушоструйным компрессором.....	119
4.2.2 Объем, методика и результаты экспериментальных исследований.....	125

4.2.3 Экспериментальные исследования работы воздушоструйного компрессора.....	126
4.2.4 Экспериментальные исследования работы эрлифтной установки традиционной технологической схемы.....	133
4.2.5 Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором.....	139
4.3 Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем.....	146
4.4 Выводы.....	149
РАЗДЕЛ 5 МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ И ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК.....	151
5.1 Инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок.....	151
5.2 Нагнетательная эрлифтная установка для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК».....	156
5.2.1 Существующая схема очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м.....	156
5.2.2 Расчет нагнетательной эрлифтной установки для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м.....	158
5.2.3 Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от применения нагнетательных эрлифтных установок.....	163
5.3 Требования к конструктивным и технологическим параметрам нагнетательных эрлифтных установок.....	170
5.4 Использование результатов исследований в учебном процессе.....	177
5.5 Перспективы практического использования нагнетательных эрлифтных установок.....	178
5.6 Выводы.....	179

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	180
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	183
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ А. К разделу «Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта».....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. К разделу «Физическая модель и аналитический анализ рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями».....	208
ПРИЛОЖЕНИЕ В. К разделу «Экспериментальные исследования рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки».....	215
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. К разделу «Методика проектирования, рекомендации по разработке и практическому использованию нагнетательных эрлифтных установок».....	274

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. 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.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования проводились в рамках основных многолетних научных направлений кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по моделированию рабочих процессов гидравлических машин и аппаратов, а также совершенствованию их конструктивного исполнения, что, в частности, получило дальнейшее развитие в научно-исследовательских госбюджетных работах №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.

Цель и задачи исследования. 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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

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 учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы с визуализацией получаемых зависимостей, в том числе расходных характеристик, и получением гидродинамических параметров 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 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 и переподъема, КПД.

Идея работы – работа нагнетательной эрлифтной установки с избыточным давлением в воздухоотделителе для напорного транспортирования шахтной воды при утилизации энергии исходящего частично сжатого воздуха подачей его во всасывающий патрубок источника пневмоэнергии гидropневматического подъемника.

Научная новизна результатов исследования

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

2. Впервые установлены рациональные области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами и радиальными нагнетателями *в качестве источников пневмоэнергии*, 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. Получило дальнейшее теоретическое развитие и экспериментальное обоснование физическое явление транспортирования гидросмеси нагнетательными эрлифтными установками с избыточным давлением в воздухоотделителе без учета аэрации жидкости.

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 (воздухоструйном компрессоре или радиальном нагнетателе).

Практическая значимость полученных результатов:

- обоснованы рациональные области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухоструйными 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 ГОУ ВПО «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 воздухоструйным компрессором подачей $Q_3 = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$, высотой подъема $H = 3 \text{ м}$ и высотой перепада $\Delta H_n = 1 \text{ м}$, а также радиальным нагнетателем подачей $Q_3 = 0,35 \text{ м}^3/\text{ч}$, высотой подъема $H = 1,2 \text{ м}$ и высотой перепада $\Delta H_n = 0,2 \text{ м}$ для научных и учебных целей кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОННТУ»;
- результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «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».

Методы исследования

Основные использованные методы исследований: анализ и научное обобщение данных из литературных источников, что позволило обосновать актуальность научной задачи и сформулировать задачи исследований; анализ и синтез гидродинамических явлений, позволивший обосновать физическую модель рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки; методы и законы гидромеханики (уравнение неразрывности движения и количества движения жидкости), закономерности теории двухфазных потоков, положенные в основу математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта и нагнетательной эрлифтной установки, а также аналитического обоснования достижимых диапазонов увеличения высоты подъема нагнетательных эрлифтных установок; экспериментальный метод исследования работы нагнетательной эрлифтной установки, позволивший подтвердить адекватность математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта и результатов аналитического обоснования уровня эффективности транспортирования жидкости нагнетательной гидропневматической установкой.

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

Научные положения, выносимые на защиту

1. Определено, что применение воздухоструйных 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 воздушоструйными компрессорами, ограниченная значениями относительного погружения смесителей $0,43 \leq \alpha \leq 0,95$, высоты подъема $1 \leq H \leq 10$ м и высоты перепада $0,5 \leq \Delta H_n \leq 2,5$ 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 перепада $\Delta H_n \leq 2,42$ 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, обсуждались и получили одобрение на:

- III Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 24-25 мая 2017 г.;
- XVI международной конференции «Ресурсопроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр», гг. Москва – Донецк, 18-23 сентября 2017 г.;

- XVII Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», г. Донецк, ДонНТУ, 21-23 ноября 2017 г.;
- Международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербургский горный университет, СПб, 18-20 апреля 2018 г.;
- IV международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 22-25 мая 2018 г.;
- XVIII международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», г. Донецк, ДонНТУ 20 - 22 ноября 2018 года;
- XIX международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», г. Донецк, ДонНТУ 22 - 24 октября 2019 года;
- VI международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 26-28 мая 2020 г.;
- VII международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 22-25 мая 2021 г.
- VIII международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса», г. Донецк, 24-26 мая 2022 г.

Личный вклад соискателя. Основные положения, которые были получены в процессе выполнения диссертационной работы, приведенные в диссертации и опубликованные в статьях в соавторстве, принадлежат соискателю:

- на основе выполненной оценки работы нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем ЦНВ 200/3,0 доказана технико-экономическая целесообразность ее применения в промышленных условиях;
- обоснованы рациональные области применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями и факторы, ограничивающие применение эрлифтов традиционной конструкции;
- уточнены особенности рабочего процесса и энергоэффективность работы нагнетательных эрлифтных установок при использовании в качестве источников пневмоэнергии ряда серийно производимых радиальных нагнетателей;

- установлена рациональная область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздухомструйными компрессорами в качестве источников пневмоэнергии;
- разработана математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе и программа для ее численного решения на языке программирования Delphi.

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 24 работах, из которых 5 – в рецензируемых изданиях ВАК, 13 – по материалам научных конференций, 6 – тезисов докладов.

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.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОННТУ»: заведующему лабораторией Березинскому Г. М., ведущему инженеру Филиппенко В. Л. и инженеру I категории Панову В. А., принимавшим участие в монтаже и подготовке экспериментальной установки, а также в проведении экспериментальных исследований.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Водосборные емкости угольных шахт, требующие предотвращения
заиливания и механизированной очистки

Эксплуатация водоотливного хозяйства шахт связана с большим количеством вспомогательных операций, значительная часть которых приходится на чистку технологических водосборных емкостей (предварительных отстойников, зумпфов, приемных колодцев водоотливных насосов) от скопившегося твердого материала.

На современных шахтах и рудниках высока доля механизации и автоматизации основных производственных процессов, однако при эксплуатации водоотливного хозяйства остается значительный объем ручного неквалифицированного труда. При этом работы по очистке, погрузке горной массы и др., как правило, выполняются с использованием ручного инструмента в антисанитарных и опасных условиях [1, 2, 3].

Технологические емкости участковых и главных водоотливов выполняют важную функцию по накоплению и осветлению шахтной воды и от их состояния зависит непрерывность технологических процессов на предприятии. Исходя из этого операции по удалению горной массы и шлама из емкостей (приемных колодцев водоотливных насосов, предварительных отстойников, зумпфов скиповых стволов) необходимо производить регулярно. Технологические водосборные емкости обычно заполнены водой на глубину до 3 ÷ 5 м и в процессе их работы твердые примеси, приносимые шахтной водой (уголь, порода и др.) различной крупности, собираются в нижней части емкостей, в результате чего уменьшается их полезный объем, который может оказаться меньше необходимого по технологии. Максимальный размер твердых частиц в водосборных емкостях

достигает $50 \div 100$ мм, а содержание угля в просыпающейся в водосборники зумпфов горной массе достигает $60 \div 70\%$ [3, с. 33-48, 4, 5, 6, 7].

Откачка воды из технологических водосборных емкостей осуществляется, как правило, с помощью центробежных насосов. Заводы-производители гарантируют нормальную работу насосов при содержании механических примесей в воде не более $0,1\%$ по весу при размере твердых частиц не более $0,1$ мм. Однако шахтная вода содержит, как правило, значительно больше количество твердого и более крупные частицы. Исследованиями [3, с. 130-136, 6, с. 138-142, 8, 9, 10, 11, 12, 13] установлено, что содержание твердого достигает $1 \div 3$ кг/м³, а на участковых водоотливах – до 54 кг/м³, причем $60 \div 70\%$ примесей являются абразивными, основная масса твердой фракции составляет $0,1 \div 0,2$ мм. Известно, что ввиду особенностей эксплуатации в настоящее время, осветление воды в технологических емкостях осуществляется неудовлетворительно. Твердые частицы, попадая в проточную часть насосов значительно сокращают срок их службы, что нередко приводило к аварийным ситуациям и наносило ощутимый материальный ущерб предприятию.

Основной проблемой при обслуживании зумпфов является просыпание угля и породы во время движения скипов, а также во время их загрузки из-за особенностей конструкции и эксплуатации. Некоторое количество твердого также приносится в нижнюю часть зумпфов шахтной водой. Для удаления зумпфовых притоков воды чаще всего используются центробежные насосные агрегаты, а очистка зумпфов осуществляется либо с помощью наклонных или вертикальных скипов небольшой емкости, или с применением вагонеток. При этом для выполнения операций по очистке и откачке зумпфов от твердого материала заняты до 6 человек, в зависимости от величины притока и диаметра ствола [1, с. 145-152, 10, с. 28-29, 14].

Из практики эксплуатации известно [15, 16, 17], что электродвигатели водоотливных насосов часто выходят из строя вследствие капежа по стволу и повышенной влажности воздуха. Необходимость постоянного обслуживания

насосных агрегатов в тяжелых условиях приводит к значительным эксплуатационным расходам.

Глубина зумпфов скиповых стволов зависит от многих факторов: тип подъема, количество подъемных сосудов, конструкция загрузочного устройства и др. и на большинстве шахт Донбасса (около 85% предприятий) не превышает 50 м. По паспортным данным 52 зумпфов клетевых стволов шахт Донбасса [18] установлено, что 63,5% имеет глубину $3 \div 5$ м, на остальных глубина составляет $15 \div 23$ м. Затопленная часть зумпфов скиповых стволов, перекрываемая полком и служащая водосборником, обычно имеет глубину не более 3 м. В зумпфах скиповых стволов размещаются подъемные сосуды, устанавливаются улавливающие бункеры с секторным затвором, размещается различное оборудование для удаления просыпавшегося твердого материала. Известно, что даже при исправном состоянии загрузочных и разгрузочных устройств просыпание в зумпф твердого материала достигает $0,2 \div 1,5$, а в некоторых случаях – до 2% от общего объема транспортируемой подъемной установкой горной массы. При этом просыпание горной массы в зумпф может достигать значительной величины – 15 т/сут. [19].

Приток воды в зумпфы составляет $5 \div 25$ м³/ч [18, с. 10, 19, с. 13]. Гранулометрический состав твердого разнообразен. В случаях, когда ствол используется в том числе для выдачи породы, наряду с мелкой фракцией присутствуют куски крупностью до 150 мм.

Приемные колодцы насосов главного водоотлива служат для организации забора жидкости приемными устройствами всасывающих трубопроводов насосов. С этой целью водозаборные колодцы соединены с ветвями главного водосборника. Глубина колодцев изменяется в пределах от 4 до 6,5 м, а расстояние от приемного устройства всасывающего трубопровода до дна водосборной емкости составляет около 0,7 м. Твердый материал имеет различный гранулометрический состав, крупность отдельных частиц достигает $3 \div 5$ мм, однако на участках водоотлива встречаются частицы гораздо большей крупности. При этом в шламе находится в среднем 50% класса $0,25 \div 1,0$ мм [19, с. 13-14, 20, с. 18-19].

Очистка от осевшего твердого материала приемных колодцев водоотливных насосов также является необходимой операцией для бесперебойной и безаварийной эксплуатации насосов главного водоотлива и осуществляется на большинстве предприятий немеханизированным способом с привлечением не менее 2 рабочих. Процесс очистки осложняется наличием в колодцах воды вследствие негерметичности перекрывающих задвижек или бетонных перемычек, отделяющих колодцы от водосборников [21]. При интенсивном заиливании приемных колодцев, их очистка осуществляется практически еженедельно, что влечет за собой довольно высокие эксплуатационные расходы.

В предварительных отстойниках, длина которых обычно от 10 до 12 м, а глубина не более 3 м, оседает значительная часть твердых частиц, приносимых шахтной водой. Из общего количества шлама 20 ÷ 25 % составляют частицы крупностью 6 ÷ 20 мм. При отсутствии на шахте предварительных отстойников или их ненадлежащей работе по осветлению воды механические примеси быстро заполняют водосборники и приемные колодцы. При этом негабаритные куски, попадая в сетки приемных устройств и увеличивая их сопротивление, способствуют росту вакуума во всасывающем трубопроводе насоса, что может вызвать крайне нежелательное явление – кавитацию [18, с. 11, 20, с. 21].

Накопленный многолетний опыт откачки шахтных вод и чистки технологических емкостей свидетельствует о том, что условия выполнения данных операций остаются крайне тяжелыми и небезопасными, а средства откачки не отвечают современным требованиям надежности.

1.2 Существующие схемы и средства гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей

1.2.1 Основные используемые схемы очистки шахтных водосборных емкостей

В настоящее время в горнодобывающей промышленности применяется около 30 различных схем и способов очистки шахтных водосборных емкостей. Данные способы и их особенности подробно описаны в работах [1, с. 95-152, 2, с. 20-30, 20, с. 22-36, 21, с. 54-63].

Большое количество применяемых и предлагаемых способов явилось следствием различных горных условий и отсутствием универсального эффективного способа очистки. Различают три основных способа очистки водосборных емкостей: механический, гидравлический (гидромеханизированный) и комбинированный.

Следует отметить, однако, что большинство способов очистки характеризуется высокими капитальными затратами, ненадежностью работы оборудования и электроаппаратуры [22], что неоднократно служило причиной затопления зумпфов и простоев шахт, также способы зачастую не могут в полной мере удовлетворить все требования производительности и экономичности.

На большинстве горных предприятий применяется механический способ очистки водосборных емкостей, при котором горная масса транспортируется на горизонт околоствольного двора или на поверхность средствами механизированной откатки наклонного ходка или подъемными сосудами по стволу. Для этого способа характерно активное применение неквалифицированного ручного труда. Откачка воды при этом осуществляется, как правило, центробежными насосами или углесосами.

Механический способ очистки зумпфов основан на применении улавливающего бункера, смонтированного в нижней части зумпфа, и одноконцевого подъема наклонного ходка [22, с. 180]. Данный способ не имеет средств механизированного удаления твердого материала из водосборных

емкостей. При механическом способе очистки зумпфов также применяют схемы со скреперами, питателями, грейферами.

Механизации очистки предварительных отстойников посвящено много работ [17, с. 19-20, 23, 24, 25]. Механический способ их очистки предполагает использование скребковых конвейеров, классификаторов, скреперных устройств или багер-зумпфов. При этом способе горная масса различной крупности, извлекаемая из технологических емкостей, направляется на транспортные средства без предварительного сгущения. Однако применяемые при этом механизмы громоздки (размещаются в основном только в горизонтальных отстойниках) и весьма дорогостоящие.

К основным недостаткам механического способа очистки технологических емкостей относят: необходимость в отдельной подаче просыпающейся горной массы из улавливающих бункеров и уплотненных шламов из водосборной части зумпфов; большое количество применяемого оборудования и многооперационность; малый ресурс применяемого оборудования ввиду агрессивных условий эксплуатации.

Принципиально другими способами очистки является гидромеханизированные (с использованием шламовых насосов, углесосов, винтовых насосов, гидроэлеваторов и эрлифтов), которые во многих случаях демонстрируют более высокую производительность и безопасность ведения работ, позволяют совместить операцию очистки с водоотливом, что позволяет размещать в выработке минимальное количество оборудования [2, с. 6-14, 4, с. 5, 24, с. 530-535, 25, с. 15-20]. Процесс удаления твердого материала из водосборных емкостей в этом случае отличается высоким уровнем механизации.

При использовании гидромеханизированных способов очистки предварительных отстойников часть твердого, крупностью более 0,1 мм, оседающая в отстойнике, может отводиться специальными средствами для дальнейшего обезвоживания с помощью гидроциклонов или багер-зумпфа (механического транспортера).

Гидравлический способ применяется в основном при очистке вертикальных емкостей (зумпфов, колодцев), в которых горная масса собирается в одном месте. В отдельных схемах при гидравлическом способе очистки пульпа может перекачиваться в водосборник главного водоотлива или непосредственно на поверхность. Данный способ очистки является универсальным, так как может быть применен на большинстве шахт. Однако и это способ также имеют свои недостатки.

Главным недостатком насосного способа очистки [25, с. 34] – невысокий ресурс рабочего времени (из-за значительного абразивного износа проточной части и частых включений агрегата), низкая объемная концентрация твердого материала в пульпе (не более 25%), необходимость заливки насосов перед пуском.

Схемы очистки зумпфов углесосами и последующим обезвоживанием пульпы в дуговых грохотах или классификаторах отстойного типа не находят применения ввиду громоздкости оборудования и трудностей в эксплуатации.

Существуют схемы очистки зумпфов с помощью гидроэлеватора. При этом пульпа, транспортируемая гидроэлеватором, выдается на горизонт околоствольного двора и сливается в шламонакопитель, из которого обезвоженная пульпа с помощью погрузочной машины перемещается в вагонетки, которые затем направляются к опрокиду скипового ствола или клетьевым подъемом выдается на поверхность. Однако, как показывает опыт очистки зумпфов на шахте им. Калинина ПО «Донецкуголь», от использования гидроэлеваторов отказались из-за интенсивного заиливания водосборников главного водоотлива, куда направлялась пульпа.

Известны отдельные случаи применения гидроэлеваторов для очистки водозаборных колодцев. При этом питание гидроэлеватора напорной водой может осуществляться от противопожарного трубопровода, от которого подается также вода для размыва слежавшегося шлама. Диффузор гидроэлеватора присоединен ко всасу насоса, выдающего пульпу непосредственно на поверхность. Недостаток такой схемы – необходимость в наличии специального насоса для выдачи пульпы на поверхность, что снижает надежность схемы очистки.

Недостатком гидроэлеваторного способа является сильное разжижение пульпы, которое при больших глубинах скиповых стволов еще увеличивается за счет повышенного расхода напорной воды. Концентрация твердого в пульпе составляет до 17%, а в отдельных случаях – до 3%. Поэтому гидроэлеваторы целесообразно применять при глубине зумпфов до 40 м при наличии специальных выработок для обезвоживания или шламонакопителей [26, 27]. Недостатком считается также интенсивный износ проточной части насадка для напорной воды.

В горнодобывающей отрасли эрлифты могут использоваться на главной и вспомогательной водоотливных установках, а также при проходке, для водоотлива и очистки технологических емкостей и, как показывает многолетняя практика, являются наиболее простыми и надежными по сравнению с другими средствами. Питание эрлифтных установок сжатым воздухом может осуществляться от общешахтной пневмосети или от передвижных компрессорных установок, монтируемых на поверхности или в подземных выработках.

При откачке пульпы эрлифтами, она в значительно меньшей, чем при использовании других гидравлических средств, степени разжижается, ввиду отсутствия подмешивания напорной воды, что позволяет подавать ее непосредственно в специальные сосуды (вагонетки, обеспечивающие обезвоживание шлама) или на дуговые сита с последующей подачей на конвейер [26, с. 31-47].

Недостатками применения эрлифтов традиционной конструкции являются: относительно низкий КПД (не более 0,4), отсутствие напора на выходе из подъемной трубы, что делает невозможным транспортирование жидкости по горизонтальным участкам или ее переподъем на требуемую высоту, резкое снижение КПД при изменении удельного расхода воздуха или относительного погружения смесителя эрлифта, потребность в значительной глубине технологической емкости.

Отмеченные недостатки не позволяют применить эрлифтные установки обычного конструктивного исполнения для водоотлива и гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей, имеющих ограниченную глубину

затопленной части (обычно не более 3 м), когда значение относительного погружения эрлифта α составляет менее 0,15. При таком значении относительного погружения эрлифт традиционной конструкции применять не рекомендуется ввиду малой энергоэффективности и неустойчивости работы. Это существенно ограничивает область применения эрлифтных установок традиционной технологической схемы.

В настоящее время наиболее исследованным вопросом практического применения эрлифтных установок для очистки от угольного шлама и откачки воды из водосборных емкостей является создание установок, работающих с малыми абсолютными ($h = 0,3 \div 4,0$ м) и относительными ($\alpha \leq 0,15$) погружениями. В тех случаях, когда глубина зумпфов больше 40 м, для удаления воды и твердого материала могут быть применены шламовые насосы, соединенные последовательно с эрлифтами (насосно-эрлифтные установки) [27, с. 90]. Последовательная работа шламового насоса с эрлифтом может осуществляться по гидравлически замкнутой и разомкнутой схемам.

Практика эксплуатации на многих шахтах показывает, что из всех средств очистки наиболее эффективными являются багер-зумпф и эрлифт. Однако при одинаковом назначении и равноценных условиях эксплуатации эрлифты конструктивно значительно проще, чем багер-зумпфы. Изготовление и ремонт деталей эрлифта, в отличие от багер-зумпфа, не представляет трудностей даже в условиях шахты.

Способ, при котором используются как механические, так и гидравлические средства получил название комбинированного. При этом используются преимущества обоих способов очистки. По данным источников, такой способ демонстрирует наибольшую эффективность при практически неограниченной высоте подъема твердого материала.

Учитывая проведенный анализ [24, 27, 28, 29, 30, 31, 32] можно сделать вывод, что одними из наиболее эффективных и перспективных средств для дальнейшего совершенствования и внедрения, позволяющими значительно снизить трудоемкость, повысить безопасность ведения работ и дать ощутимый

экономический эффект являются эрлифтные установки. Известно, к тому же, что на данный момент уровень внедрения эрлифтных установок в системе водоотливного хозяйства горных предприятиях Донбасса остается весьма низким.

Исходя из возможности транспортирования угля и породы эрлифт должен:

- эффективно совершать работу по удалению твердого и откачке притока воды;

- обеспечивать полное разделение пульпы и отработанного воздуха в воздухоотделителе и подачу обезвоженной пульпы на транспортные средства;

- подающая труба должна быть снабжена устройством для автоматического дозирования твердого материала, а также обеспечивать прохождение в подъемную трубу всей горной массы, с кусками твердого материала наибольшей крупности (до 50 мм, а в отдельных случаях – до 150 мм);

- иметь подачу, обеспечивающую в подводящей трубе транспортную скорость для гидросмеси;

- иметь как можно меньшие размеры для удобства размещения его в стесненных условиях горных выработок;

- быть простым в монтаже, сборке, транспортировке и обслуживании;

- обеспечивать (при необходимости) возможность напорного транспортирования гидросмеси потребителю.

Применяемые схемы очистки шахтных водосборных емкостей в целом можно охарактеризовать как имеющие низкую надежность оборудования, большую трудоемкостью работ, повышенный риск возникновения опасных ситуаций, что сдерживает рост основных показателей предприятия.

Важнейшими требованиями к новым схемам и средствам очистки и водоотлива следует отнести:

- необходимость направлять уголь, содержащийся в поступающей горной массе, (60 – 70% от общего объема) на погрузочные пункты шахты;

- увеличение производительности труда, полная механизация и автоматизация процесса удаления твердого материала и освобождение человека от выполнения тяжелых работ;

- получение средствами пульп высокой концентрации, дальнейшее транспортирование которых возможно в шахтных вагонетках (специальной конструкции), в скипах или на конвейерах;

- высокая надежность и долговечность работы оборудования, а также его компактные габариты.

1.2.2 Внедренные эрлифтные установки для очистки шахтных водосборных емкостей

Существует ряд примеров успешного внедрения эрлифтных установок для гидромеханизированной очистки водосборных емкостей в подземных условиях угольных шахт. Особенности конструкций и принципы работы данных установок описаны в источниках [13, с. 19-20, 14, с. 9-11, 15, с. 75-86, 28, с. 32-33, 29, с. 123-130].

Очистка водозаборных колодцев главного водоотлива от шлама с помощью эрлифтных установок осуществлялась на шахте имени академика А.А Скочинского описана в работе [20, с. 44] (Рисунок 1.1). В групповом водозаборном колодце 1 размещались всасывающие трубопроводы 4 с приемными устройствами 3 насосов главного водоотлива 5, смонтированных в камере 2. Эрлифтная установка для гидромеханизированной очистки водозаборных колодцев содержала смеситель 7, подъемную трубу 8, основная часть которой выполнена из гофрированного шланга, и воздухоотделитель 9 со сливной трубой 10. Подвод сжатого воздуха от магистрального трубопровода 12 к смесителю эрлифта осуществлялся посредством гибкого шланга 13. Разрыхление уплотненного шлама в зоне захвата эрлифта осуществлялось подачей сжатого воздуха к приемному устройству эрлифта. Воздухоотделитель эрлифта прикреплен на тали 1, установленной на монтажной балке 15.

Подача сжатого воздуха к входному сечению подъемной трубы обеспечивала высокую концентрацию транспортируемой пульпы (25÷50%).

Данная схема очистки водозаборных колодцев не требовала полного удаления жидкости из колодцев (глубина затопленной их части, считая от дна, может составлять примерно 1 м).

Для обслуживания эрлифтной установки необходимо 2 человека. Они переносят приемное устройство эрлифта в процессе работы в различные точки колодца, обеспечивают слив осветленной воды из вагонеток.

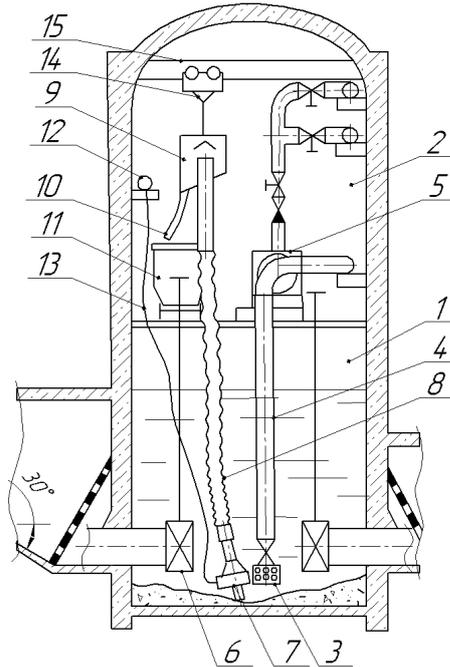


Рисунок 1.1 – Схема эрлифтной установки для гидромеханизированной очистки водозаборных колодцев шахты имени академика А.А. Скочинского

Практика эксплуатации показала, что установка проста в изготовлении, монтаже и обслуживании, надежна в эксплуатации и способствует резкому снижению затрат тяжелого ручного труда.

Высокая концентрация твердых примесей различной крупности в шахтной воде приводила к интенсивному заиливанию приемного колодца главного водоотлива шахты им. Г.М. Димитрова [19, с. 125] (Рисунок 1.2), что вело к преждевременному выходу из строя водоотливных насосов. Ввиду стесненности пространства и трудоемкости процесса очистки, эта операция осуществлялась эпизодически, с применением неквалифицированного ручного труда.

В работе приведена технологическая схема очистки приемного колодца 1 водоотливных насосов 2 с применением шламового эрлифта, включающего подъемную трубу 3 со всасывающим устройством 4, смесителем 5, воздухоотделителем (дуговым ситом) 6 и воздухоподающей трубой 7. При работе схемы необходимое относительное погружение эрлифта создавалось открытием задвижки 8, пропускающей шахтную воду из водосборника 9 в приемный колодец. Транспортируемая эрлифтом и частично обезвоженная пульпа загружалась в транспортные средства (шахтные вагонетки) 10, в которых происходило дополнительное обезвоживание пульпы. Шахтная, вода, отводимая от воздухоотделителя и вагонеток, сливалась обратно в приемный колодец.

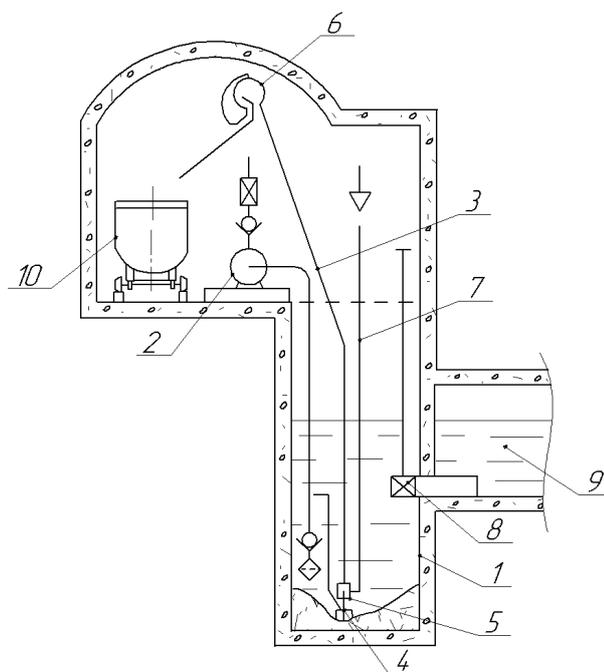


Рисунок 1.2 – Схема чистки приемного колодца главного водоотлива шахты имени Г.М. Димитрова шламовым эрлифтом

Внедрение данной эрлифтной установки привело к значительному увеличению межремонтного периода водоотливных насосов, снижению концентрации загрязняющих примесей в откачиваемой на поверхность воде и дало значительный экономический эффект, однако эксплуатация специального дугового сепаратора предполагала его регулярную очистку от твердого материала, что в комплексе с необходимостью применения дополнительного насоса для напорного

транспортирования жидкости из емкости, ограничивало область применения установки и приводило к усложнению схемы очистки.

Для очистки предварительного отстойника главной водоотливной установки шахты «Кировская» [18, с. 159] (Рисунок 1.3) разработана и внедрена схема с применением вакуумного эрлифта.

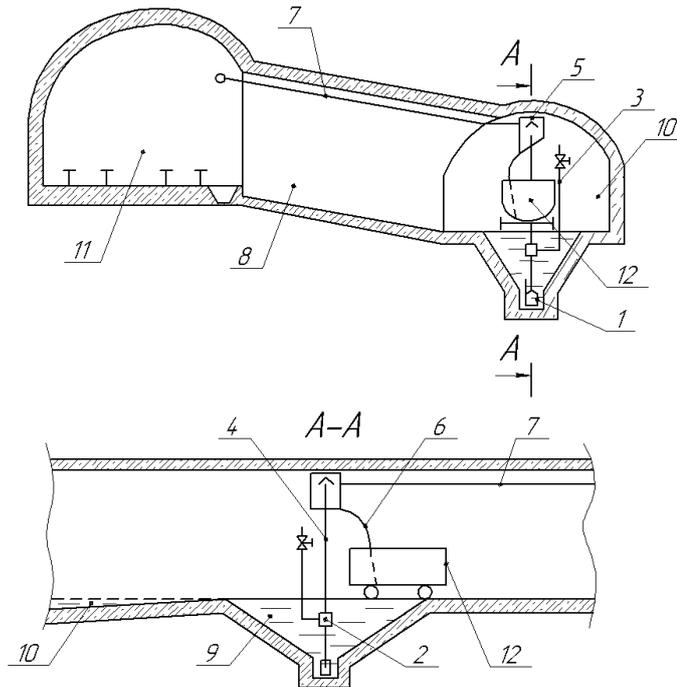


Рисунок 1.3 – Схема гидромеханизированной очистки предварительного отстойника главной водоотливной установки шахты «Кировская» вакуумным эрлифтом: 1 – подающая труба эрлифта со всасывающим устройством, 2 – смеситель, 3 – воздухоподающий трубопровод с задвижкой, 4 – подъемная труба, 5 – воздухоотделитель, 6 – барометрическая труба, 7 – отсасывающий трубопровод, 8 – наклонный ходок, 9 – предварительный отстойник, 10 – водосборник, 11 – главная откаточная выработка, 12 – вагонетка специальной конструкции

Длина предварительного отстойника составляет 5 м, ширина – 1,4 м, объем – 4,78 м³. Шламоборник имеет форму усеченной пирамиды при размерах нижнего основания 0,7 х 0,7 м, его глубина от низа водосточной канавки составляла 2,0 м. В процессе работы емкость заполнялась твердым материалом в течение 16 – 18 ч. Чистка с помощью эрлифта производилась раз в сутки, этот процесс контролировали 2 человека. Учитывая концентрацию твердого материала в транспортируемой пульпе примерно 30% часовая производительность эрлифта

составляла около 20 м³/ч. В составе данной установки использовался серийно выпускаемый вакуум-насос ВВН-12 и всасывающее устройство УВО-50.

Недостатком данной схемы являлась необходимость применения вагонеток специальной конструкции и возможность только самотечного транспортирования жидкости (гидросмеси) вдоль выработки.

При очистке скипового ствола шахты [18, с. 156] «Коммунист» (Рисунок 1.4) с помощью сифонно-вакуумной эрлифтной установки погружение эрлифта составляло 0,25 м при необходимой высоте подъема 11,5 м; для разрыхления твердого использовалась напорная вода из пожарного трубопровода.

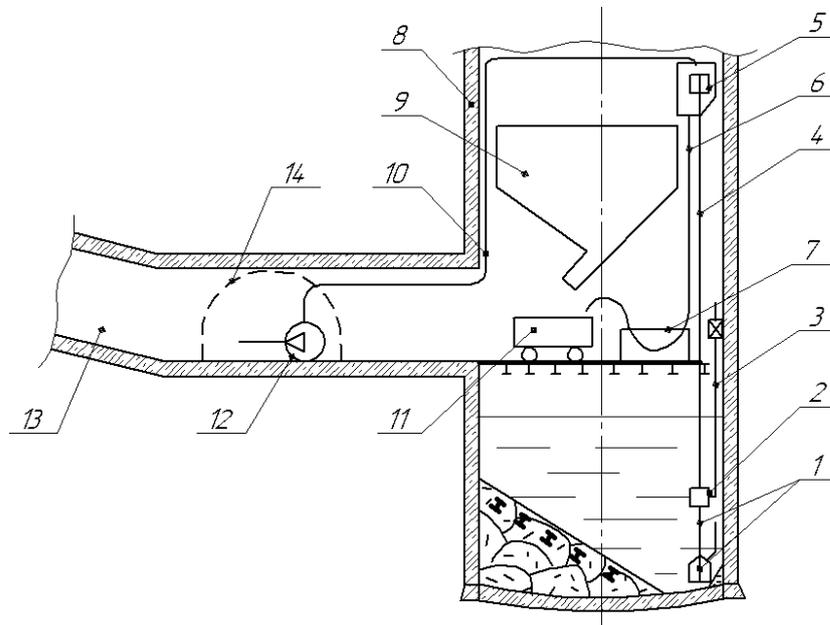


Рисунок 1.4 – Схема расположения сифонно-вакуумной эрлифтной установки для очистки зумпфа скипового ствола шахты «Коммунист»: 1 – подающая труба эрлифта со всасывающим устройством, 2 – смеситель, 3 – воздухоподающая труба, 4 – подъемная труба, 5 – воздухоотделитель, 6 – барометрическая труба, 7 – приемная емкость, 8 – крепь, 9 – улавливающий бункер, 10 – отсасывающая труба, 11 – вагонетка специальной конструкции, 12 – вакуум-насос ВВН-12, 13 – ходок для чистки зумпфа, 14 – насосная камера

Избыток шламовой воды откачивался центробежным насосом в предварительный отстойник главной водоотливной установки.

Высокая концентрация транспортируемой эрлифтом пульпы (25–35%) позволяла подавать ее непосредственно в шахтные вагонетки, обеспечивающие слив осветленной воды в зумпф.

Максимальный размер твердых частиц $d_{\text{ТВ}} = 20$ мм, диаметр подающей и барометрической труб составляет $d = 60$ мм, подъемной трубы – $D = 150$ мм, воздухоподающей – $d_{\text{ВП}} = 105$ мм. Для создания вакуума в воздухоотделителе использовался серийно выпускаемый вакуум-насос ВВН-12.

Теоретически и экспериментально доказано, что при одинаковой степени изменения давления, равных относительных погружениях и при высотах подъема пульпы до 10 м, удельный расход воздуха в сифонно-вакуумном эрлифте меньше, а КПД больше, чем в коротких эрлифтах с обычным смесителем и со смесителем с элементами струйного аппарата.

Сифонно-вакуумный эрлифт обеспечивает высоту подъема пульпы до $50 \div 60$ м при разрежении в воздухоотделителе около 30 кПа. Однако, при применении сифонно-вакуумных эрлифтов в горных выработках, имеющих высоту 3 – 4 м не представляется возможным создание гидравлического затвора более 3 м и необходимого напора для дальнейшего транспортирования пульпы. Это ограничивает величину вакуума в воздухоотделителе. К тому же, потребляемая мощность вакуум-насоса оказывается при относительном вакууме во всасывающем патрубке насоса, равном 25 – 35 %. Практическое использование такого эрлифта ограничивается глубиной погружения подающей трубы $l_{\text{п.кр}}$, значение которой не может быть более 1,5...1,8 м, что может привести к нежелательному подсосу воздуха из атмосферы и уменьшению подачи эрлифта. Широкое применение сифонно-вакуумных эрлифтных установок ограничивается также необходимостью использования специальных вакуум-насосов.

Шламный эрлифт для чистки зумпфа скипового ствола шахты им. А.Г. Стаханова [19, с. 120] (Рисунок 1.5) состоит из подъемной трубы 1, смесителя 2, подводящего устройства 3, трубы подпитки 4, воздухопровода 5, воздухоотделителя 6.

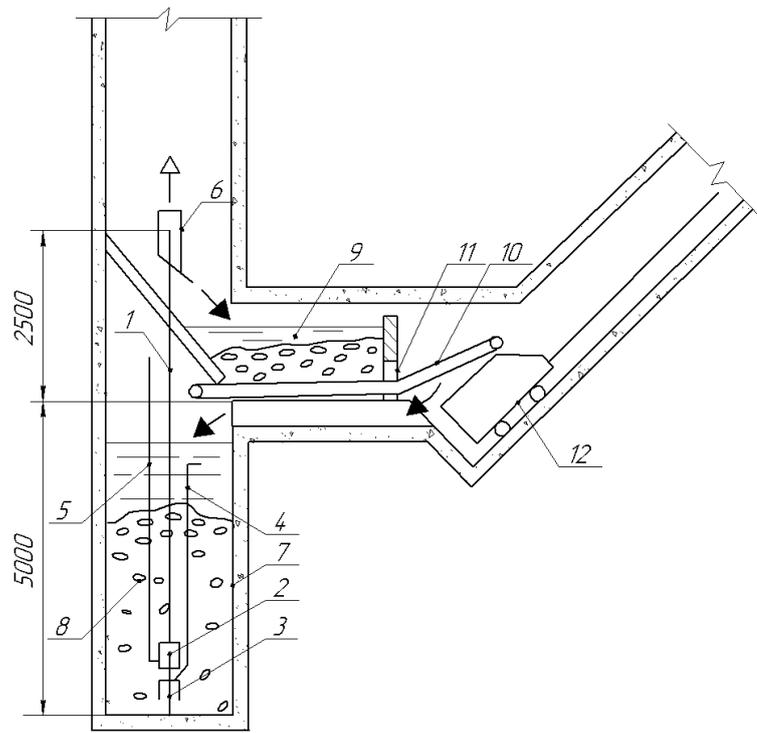


Рисунок 1.5 – Схема очистки зумпфа скипового ствола шахты им. А.Г. Стаханова шламовым эрлифтом

Для запуска эрлифта сжатый воздух из пневматической сети подавался через воздухопровод 5 к смесителю 2. Так как входное отверстие трубы подпитки 4 располагалось ниже уровня воды в зумпфе 7 скипового ствола и выше возможного уровня удаляемого твердого материала 8, то вода по ней беспрепятственно и непрерывно поступала в подводящее устройство 3 и размывала уплотненный твердый материал. Образовавшаяся гидросмесь (вода, твердый материала, воздух) поднималась из водоотливной емкости (зумпфа) по подъемной трубе 1 эрлифта в воздухоотделитель 6, из которого воздух выходил в атмосферу, а гидросмесь отводилась в улавливающий бункер 9. В улавливающем бункере, сооруженном в горизонтальной выработке, примыкающей к стволу, скапливался шлам, а вода через систему отверстий возвращалась в зумпф. Сечение бункера имеет форму трапеции с уклоном вниз, а на его дне был установлен скребковый конвейер 10. Емкость бункера рассчитана на суточный объем поступления твердого материала и шлама. Процессом очистки бункера управляли 2 человека. Они открывали разгрузочное отверстие 11 бункера, включали конвейер 10 для загрузки скипа 12

наклонного ходка, смывали оставшийся материал на дне бункера и закрывали отверстие 11 по завершению очистки.

Шламовая эрлифтная установка, обеспечивала гидромеханизированное удаление горной массы из вертикальных емкостей, ее обезвоживание и подачу в механические транспортные средства. Разработан и внедрен на ряде шахт комбинированный способ удаления твердого материала из зумпфовых водосборников скиповых стволов и технологическая схема механизированного участка водоотлива с притоками воды до 50 м³/ч. Автором [19, с. 101-117] также создана научная основа расчета и конструктивного исполнения подводящего узла и воздухоотделителя, обеспечивающего сгущение транспортируемой в эрлифтной установке пульпы.

К недостаткам данной схемы относится необходимость привлечения нескольких работников для работы в опасных условиях, наличие сложного электромеханического оборудования.

Все выше приведенные эрлифтные установки обладают общим недостатком – невозможностью напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) после ее выхода из воздухоотделителя и необходимостью применения для этого специального оборудования, что в ряде случаев ограничивает область применения установок в подземных условиях горных предприятий.

1.3 Анализ работ, направленных на усовершенствование эрлифтных установок

Значительный вклад в разработку и совершенствование теоретических основ рабочих процессов эрлифтов и конструкций эрлифтных установок внесли отечественные ученые доктора технических наук Аргунов П.П., Арманд А.А., Архангельский В.А., Багдасаров В.Г., Герман А.П., Гейер В.Г., Герсеванов Н.М., Груба В.И., Давидсон В.Е., Кириченко Е.А., Козлов Б.К., Кононенко А.П., Костерин С.И., Крылов А.П., Логвинов Н.Г., Малеев В.Б., Пирвердян А.М., Пороло Л.В., кандидаты технических наук Адамов Б.И., Антонов Я.К., Винда Е.В.,

Данилов Е.И., Игнатов А.В., Каплюхин А.А., Козыряцкий Л.Н., Костанда В.С., Малыгин С.С., Пащенко В.С., Скорынин Н.И., Стегниенко А.П., Стифеев Ф.Ф., Триллер Е.А., Усков Е.В., Шевченко В.Ф. и другие [26, с. 81-125, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]. В работах авторов изложены как основы теории рабочих процессов, так и предлагаемые методики расчета, а также способы повышения энергетической эффективности работы эрлифтов, основными из которых являются:

а) приближение вида процесса изменения состояния газообразного рабочего тела по длине подъемной трубы к изохорному;

б) применение поверхностно-активных веществ для поддержания структуры водовоздушного потока в подъемной трубе близкой к снарядной;

в) обоснование рациональной формы поперечного сечения подъемной трубы;

г) получение желаемой структуры потока (дробление крупных газовых пузырей в подъемной трубе механическими средствами);

д) обеспечение условий для работы эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока.

Для большинства общепромышленных эрлифтов рациональным видом процесса изменения состояния газа по длине подъемной трубы является изохорный, как обеспечивающий минимизацию гидравлических потерь на трение. Однако традиционно применяемый в качестве рабочего агента сжатый воздух из-за увеличения объемного расхода по длине подъемной трубы может привести к значительному и недопустимому росту скорости водовоздушного потока в подъемной трубе и, как следствие, значительным энергетическим потерям по длине трубы.

Основными способами приближения вида процесса изменения состояния газа по длине подъемной трубы к изохорному являются: эксплуатация эрлифтов с несколькими диаметрами подъемных труб (увеличивающимися по ходу движения водовоздушной смеси) и использование высокотемпературных газообразных и паровоздушных смесей [39, с. 55-60]. Однако эксплуатация эрлифтов с увеличивающимся диаметром подъемной трубы не в состоянии в полной мере решить поставленную задачу, а применение высокотемпературных газообразных

рабочих тел и паровоздушных смесей в эрлифтах имеет ряд ограничений в области практического применения.

Повысить энергетическую эффективность работы эрлифта в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) возможно подводом дополнительного притока воздуха и жидкости в промежуточные сечения подъемной трубы [41]. Такое техническое решение позволяет минимизировать гидравлические потери в подающей трубе в условиях увеличивающихся притоков, не допустить значительного снижения давления в смесителе и сохранить значение динамического относительного погружения на допустимом уровне. Однако использование такого устройства целесообразно лишь при временных увеличениях притоков, составляющих, как правило, около 20 ... 25 % от базового. В случае относительно стабильных притоков жидкостей (гидросмесей) применять такую схему эрлифтной установки может оказаться нецелесообразно.

Повысить энергетическую эффективность работы эрлифтов в сравнении с работающими возможно [42] за счет преобразования развивающегося снарядного водовоздушного потока в близкий к развитому с увеличением длин жидкостных пробок в подъемных трубах дискретной подачей сжатого воздуха. Однако данная конструкция эрлифтной установки имеет ограниченную область применения ввиду усложнения конструкции и увеличения стоимости изготовления.

Разработана эрлифтная установка со смесителем с элементами струйного аппарата, предназначенная для гидромеханизированной очистки шахтных водоотливных емкостей [20, с. 60-63]. С помощью теоретических и экспериментальных исследований доказано, что данная установка в сравнении с установкой со смесителем обычной конструкции обеспечивает увеличение подачи в 1,6...2,1 раза, снижение удельного расхода воздуха на 28...48% и размаха колебаний давления в камере смешения в 2...3 раза. Главной конструктивной особенностью является то, что подающая труба эрлифта располагается внутри кольцевого насадка соосно с цилиндрической камерой смешения, образуя кольцевой зазор. Такая конструкция смесителя способствует упорядочению структуры потока сжатого воздуха перед входом в камеру смешения и позволяет

рационально использовать кинетическую энергию воздуха в кольцевом зазоре, благодаря чему устраняются недостатки, присущие обычным эрлифтным установкам при работе с малыми абсолютными и относительными погружениями. В исследованиях данной конструкции эрлифтной установки относительное погружение смесителя ограничивалось диапазоном $\alpha = 0,05 \div 0,15$, а абсолютное геометрическое погружение – $h \leq 3$ м [23, 31]. Указанное увеличение энергоэффективности по сравнению с эрлифтом традиционной конструкции будет иметь место лишь в данном узком диапазоне относительного и абсолютного погружений смесителя, что ограничивает область практического применения эрлифтов такой конструкции. К тому же в ходе многочисленных практических исследований доказано, что применение эрлифтов при величине относительного погружения смесителя $\alpha \leq 0,15$ не рационально с экономической точки зрения ввиду резкого увеличения требуемого расхода воздуха, что делает применение эрлифтов с элементами струйного аппарата рациональным только на шахтах с развитой пневматической сетью.

Уникальные гидроподъемы, разнообразные конструкции перекачных и вспомогательных водоотливных установок и установок для очистки подземных технологических емкостей угольных предприятий, установки для золошлакоудаления на тепловых электростанциях, усовершенствованные земснаряды для добычи песка и гравия, а также глубоководной добычи полезных ископаемых со дна морей и океанов были реализованы на основе эрлифтных установок [43, 44, 45, 46, 47].

Однако во всех выше приведенных внедренных эрлифтных установках имеется общий недостаток – невозможность напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) после ее выхода из воздухоотделителя, что ограничивает область применения известных конструкций эрлифтных установок.

Эрлифты относятся к гидравлическим аппаратам с достаточно сложными, не до конца изученными гидродинамическими процессами в подъемной трубе, особенно в случае учета твердых включений в водовоздушном потоке. Поэтому в основе научного совершенствования этих аппаратов с целью повышения их

энергетической эффективности лежит создание адекватных математических моделей их рабочих процессов.

1.4 Актуальность применения нагнетательной эрлифтной установки для очистки шахтных водосборных емкостей

Эрлифты находят применение в горной, энергетической, строительной и других отраслях промышленности, применяются при подъеме полезных ископаемых (конкреций) со дна водоемов [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] благодаря ряду основных известных преимуществ:

а) значительный срок службы даже при транспортировании высокоабразивных гидросмесей благодаря отсутствию в составе водовоздушного подъемника подвижных элементов;

б) простота конструкции, что обуславливает высокую надежность, а также небольшие материальные затраты на монтаж и ремонтные работы, малые трудозатраты при эксплуатации;

в) высокая безопасность в обслуживании благодаря значительно меньшему давлению в подъемной трубе по сравнению с напорным трубопроводом насоса;

г) саморегулируемость, в определенном диапазоне, подачи эрлифта при изменении геометрического погружения смесителя, что позволяет работать установке без применения средств автоматического регулирования.

Известны и другие положительные качества в устройстве и работе общепромышленных эрлифтных установок, которые проявляются в конкретных технологических условиях применения – подземной добыче угля (расположение энергомеханического оборудования на поверхности) [23, с. 85], добыче полезных ископаемых (песок, гравий) со дна водоемов (минимизация разрабатываемых площадей и экологического ущерба) [48, с. 63-75, 49, с. 31], удалении золы и шлака на тепловых электростанциях (высокая надежность работы в течение

межремонтного срока эксплуатации основного оборудования) [43, с. 25-27, 44, с. 42-45, 45, с. 37-43].

Основными недостатками эрлифтных установок являются [4, с. 10]: сравнительно невысокое значение коэффициента полезного действия, снижение подачи с уменьшением глубины погружения и с отклонением подъемной трубы от вертикального положения, невозможность напорного транспортирования жидкости после воздухоотделителя. Приведенные недостатки сдерживают широкое применения эрлифтных установок в промышленности, однако несколько не уменьшают их ценности и эффективности как средств транспортировки жидкости и гидроподъема твердого материала.

Следует отметить, что для ряда технологических условий применения, например, при очистке водосборных емкостей горных предприятий, глубоководной разработке месторождений полезных ископаемых и др. принимается, что КПД гидротранспортных систем не является абсолютным показателем эффективности их работы, и она должна оцениваться комплексом критериев [42, с. 25]:

- величиной коэффициента готовности $KГ$;
- эффективностью алгоритмов управления установками и локальными системами регулирования;
- степенью функциональной совместимости со смежными технологическими операциями и адаптацией к новым условиям эксплуатации;
- изменением гранулометрического состава твердого материала в процессе транспортирования и др.

Проведенный в источнике анализ подтверждают значительно более высокую надежность работы эрлифтных гидроподъемных установок в сравнении с насосными, что особенно важно при применении эрлифтов в условиях непрерывных технологических процессов. Так для эрлифтной системы гидроподъема $KГ \approx 1$, а для насосной $KГ \approx 0,4$.

Известно применение эрлифтных установок ряда технологических схем [48, с. 131] – с расположением воздухопроводов вне и внутри подъемной трубы,

групповых, секционных и др., в которых предусматривается нагнетание сжатого воздуха под избыточным давлением в погруженный под уровень жидкости смеситель и безнапорное движение транспортируемой жидкости (гидросмеси) после воздухоотделителя В этом случае давление в воздухоотделителе равно давлению окружающей среды (атмосферному давлению), и транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю обеспечивается уклоном отводящего трубопровода в сторону последнего.

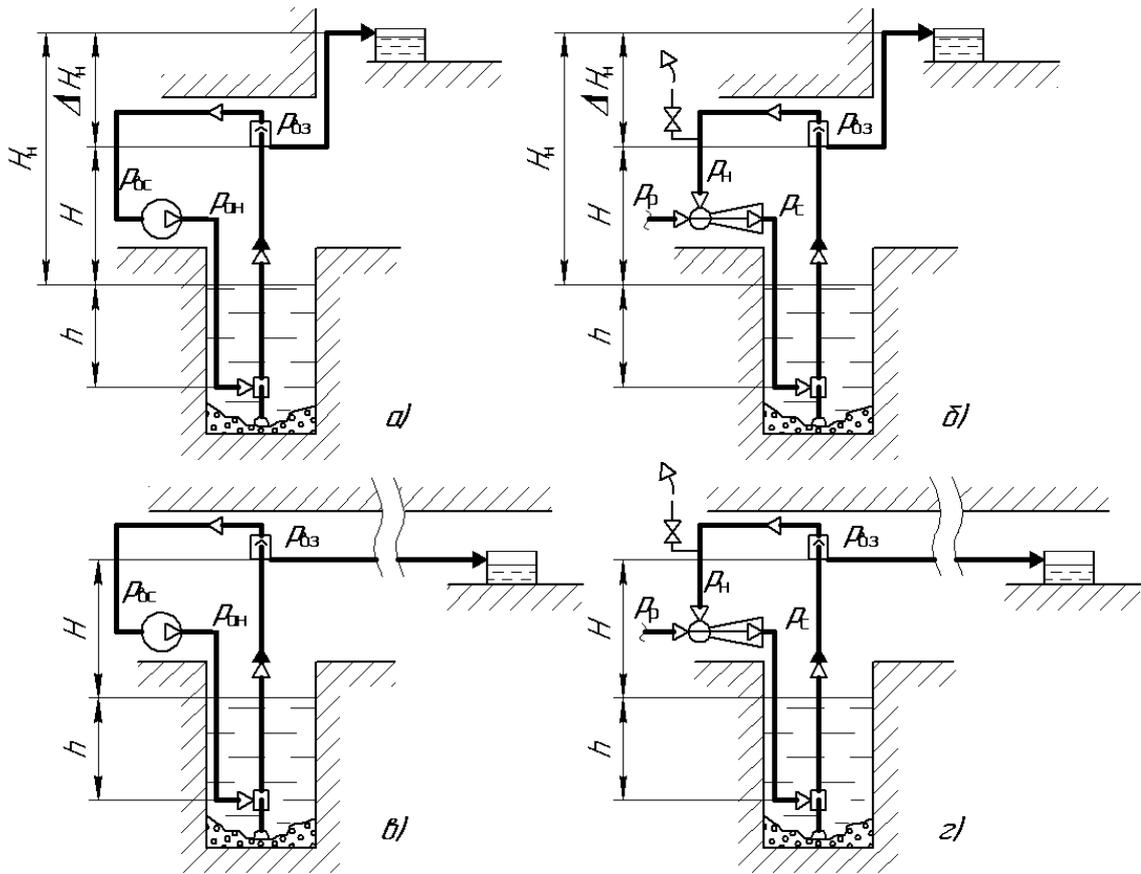


Рисунок 1.6 – Принципиальные схемы нагнетательных эрлифтных установок:
а), б) – с радиальным нагнетателем и воздушоструйным компрессором при ограничении высоты подъема; *в), г)* – с радиальным нагнетателем и воздушоструйным компрессором при необходимости напорного транспортирования жидкости соответственно (абсолютные давления: $p_{вз}$ – в воздухоотделителе; $p_{вс}$, $p_{ан}$ – во всасывающей патрубке и развиваемое нагнетателем соответственно; $p_{р}$, $p_{н}$ и $p_{с}$ – рабочего потока, инжектируемого потока и сжатого потока соответственно)

Во всех рассмотренных типах эрлифтных установок обеспечивается только безнапорное движение перекачиваемой жидкости (гидросмеси) после

воздухоотделителя, что ограничивает возможную высотную отметку потребителя жидкости отметкой выходного сечения отводящего трубопровода. Принципиально иным свойством обладают нагнетательные эрлифтные установки (Рисунок 1.6), способные за счет избыточного давления в воздухоотделителе $p_{вз}$ совершать работу по увеличению высоты подъема жидкости на величину ΔH_n в сравнении с традиционным, либо по напорному транспортированию жидкости потребителю.

Расширить энергоэффективную область применения эрлифтных установок увеличением высоты подъема транспортируемой жидкости (гидросмеси), превышающей уровень входного сечения безнапорного отводящего трубопровода, возможно обеспечением работы этого трубопровода в напорном режиме за счет избыточного давления в воздухоотделителе нагнетательного эрлифта.

Однако работа эрлифта традиционной технологической схемы с избыточным давлением в воздухоотделителе повлечет снижение его энергетической эффективности, так как это эквивалентно увеличению высоты подъема при прочих равных условиях.

Увеличить энергоэффективность работы эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором или радиальным нагнетателем в качестве источника сжатого воздуха возможно при подаче во всасывающий патрубок последнего воздуха с избыточным давлением, имеющим место в воздухоотделителе, т.е. при утилизации энергии частично сжатого воздуха.

При наличии на предприятии (шахте, заводе и т.п.) пневмосети общего назначения в ряде случаев целесообразно в качестве источника пневмоэнергии нагнетательного эрлифта применение воздушоструйного компрессора [36, с. 2, 55], преобразовывающего излишне высокое, для этих условий, давление воздуха в пневмосети в расход инжектируемой среды. Это позволяет уменьшить потребный расход воздуха из пневмосети и повысить энергетическую эффективность работы установки.

Воздушоструйные компрессоры проектируются и изготавливаются под конкретные условия применения с заданными потребными давлением и расходом сжатого воздуха, что также минимизирует приведенные расходы на

транспортирование жидкости (гидросмеси). Струйные аппараты конструктивно не являются сложными в изготовлении, не содержат, как и эрлифты, подвижных элементов в проточной части, что приоритетно в случае периодической эксплуатации данных установок.

Проведенный анализ особенностей работы эрлифтных установок, применяемых схем и средств очистки шахтных водосборных емкостей показывает востребованность нагнетательных эрлифтных установок, обладающих возможностью переподачи жидкости на необходимую высоту.

Установление рациональной области применения нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами либо радиальными нагнетателями на основе анализа целесообразных параметров их рабочих процессов является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит расширить область применения эрлифтных установок увеличением высоты подъема перекачиваемой жидкости (гидросмеси).

1.5 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.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

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 учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы с визуализацией получаемых зависимостей, в том числе расходных характеристик, и получением гидродинамических параметров водовоздушного потока в сечениях по высоте подъемной трубы эрлифтов.

3. Выполнить теоретический анализ энергетической эффективности работы нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйным компрессором и радиальным нагнетателем в качестве источников пневмоэнергии, а также аналитическое обоснование степени повышения энергетической эффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с воздушоструйным компрессором и достижимых диапазонов увеличения высоты подъема нагнетательных эрлифтных установок 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.

1.6 Выводы

1. На основе анализа литературных данных обоснована актуальность напорного транспортирования шахтной воды (гидросмеси) от эрлифта к потребителю в условиях вертикальных ограничений высоты подъемной трубы с воздухоотделителем при очистке шахтных водосборных емкостей.

2. Проведен анализ особенностей эксплуатации основных типов водосборных емкостей угольных шахт, требующих предотвращения заиливания и механизированной очистки, а также существующих схем и средств гидромеханизированной очистки.

3. Сформулирована цель работы – 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, а также задачи для реализации данной цели.

4. Особенности работы общепромышленных нагнетательных эрлифтов с пневмоснабжением воздушоструйными компрессорами и радиальными нагнетателями не нашли потребной глубины исследований в известных работах и требуют дальнейшего уточнения. Поэтому разработка нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами либо радиальными нагнетателями на основе обоснования рациональных параметров их рабочего процесса для условий очистки шахтных водосборных емкостей является актуальной научно-технической задачей, имеющей существенное практическое приложение.

МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНОГО ЭРЛИФТА

2.1 Физическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта

Одним из недостатков эрлифтов традиционной технологической схемы является невозможность напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) от воздухоотделителя к потребителю. В случае конструктивных ограничений высоты подъема эрлифта с безнапорным транспортированием отводимой жидкости (гидросмеси) по технологическим условиям (недостаточная высота горной выработки, ограничение особенностями окружающих строительных конструкций и др.) область применения традиционных газожидкостных подъемников существенно снижается [55, с. 76].

Причиной этого является недостаточный напор (в данном случае – геометрический) в выходном сечении воздухоотделителя, что, либо не обеспечивает подъем жидкости (гидросмеси) на требуемую высоту, либо не обеспечивает преодоление гидравлических сопротивлений при значительных длинах отводящих трубопроводов, либо первое и второе, вместе взятое.

Указанный недостаток эрлифтов традиционной технологической схемы устраняется в нагнетательных эрлифтах за счет поддержания требуемого избыточного давления в воздухоотделителе (Рисунок 2.1). В данном случае приток жидкости (гидросмеси) $Q_{пр}$ из зумпфа 1 по подающей трубе 2 поступает в смеситель 3, где смешивается со сжатым воздухом, подводимым по воздухопроводу 4 от источника пневмоэнергии (компрессора, нагнетателя). По подъемной трубе 5 газожидкостная смесь поднимается в воздухоотделитель 6, в котором поддерживается требуемое избыточное давление $p_{вз}$, регулируемое степенью открытия регулирующего клапана 7 на воздухоотводящей трубе 8. Транспортируемая жидкость (гидросмесь) с расходом Q_3 по сливной трубе 9 отводится потребителю 10.

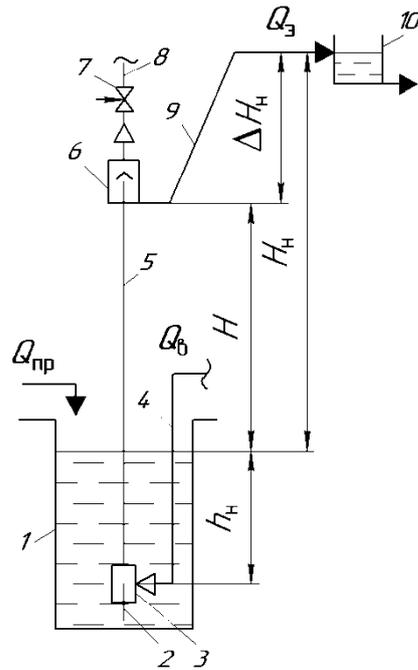


Рисунок 2.1 – Схема нагнетательного эрлифта: 1 – зумпф; 2 – подающая труба; 3 – смеситель; 4 – воздухопровод; 5 – подъемная труба; 6 – воздухоотделитель; 7 – регулирующий клапан; 8 – воздухоотводящая труба; 9 – сливная труба; 10 – потребитель перекачиваемой жидкости (гидросмеси); h_n – глубина погружения смесителя; ΔH_n – высота переподъема; H – высота подъема жидкости (гидросмеси); H_n – высота подъема нагнетательного эрлифта; Q_v – расход воздуха эрлифтом; $Q_э$ – подача эрлифта; $Q_{пр}$ – величина притока жидкости в водосборную емкость

Поддержание на выходе из подъемной трубы 5 избыточного давления $p_{вз}$, равного давлению в воздухоотделителе 6, эквивалентно увеличению высоты подъема эрлифта, что в общем случае при прочих равных условиях приводит к снижению энергетической эффективности работы газожидкостного подъемника. Компенсировать энергетические потери в работе эрлифта возможно утилизацией энергии отводимого по трубе 8 сжатого до давления $p_{вз}$ воздуха, подавая его, например, во всасывающий патрубок струйного аппарата либо радиального нагнетателя.

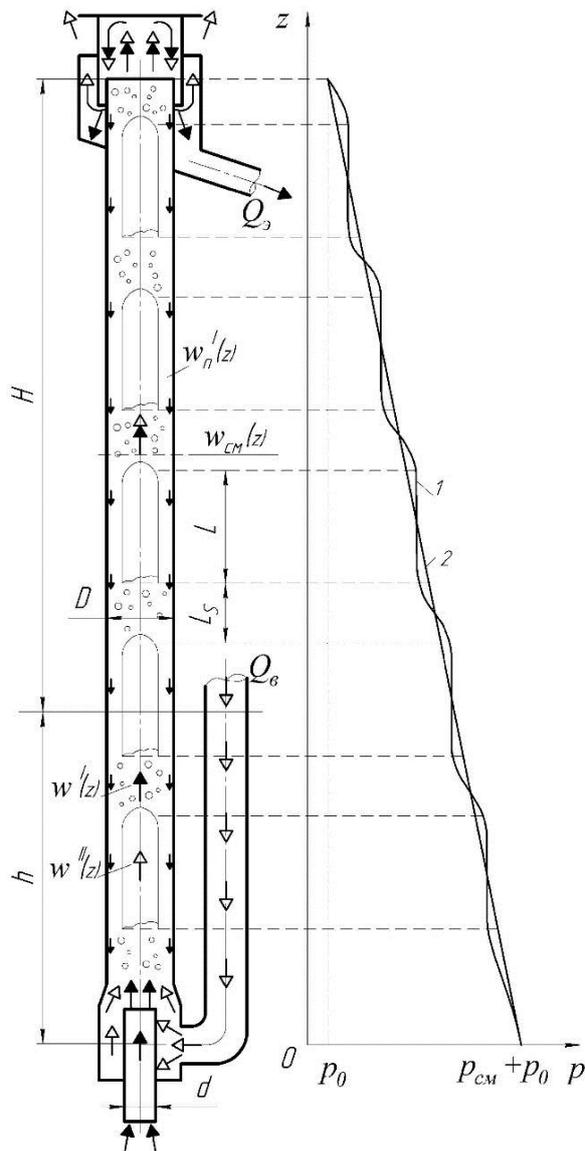


Рисунок 2.2 – Схема эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока: истинная 1 и усредненная 2 эпюры давления в подъемной трубе (D и d – диаметры подъемной и подающей труб, H – высота подъема, h – геометрическое погружение смесителя, L_s – длина жидкостной пробки, L_b – длина газового пузыря)

Доказано [56, 57], что работа газожидкостного подъемника наиболее энергоэффективна при обеспечении снарядной структуры газожидкостного потока в подъемной трубе, что должно обеспечиваться соответствующими значениями относительного погружения смесителя α , конструктивными размерами подъемника и гидродинамическими параметрами газожидкостного потока. Поэтому при моделировании рабочего процесса нагнетательного эрлифта исходим из необходимости и возможности его работы со снарядной структурой водовоздушного потока.

Многочисленные работы известных ученых, посвященные изучению теории двухфазного течения, а также экспериментальные данные [58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65], позволяют разрабатывать математические модели снарядного водовоздушного потока в подъемных трубах эрлифтов, который, по заключению таких ученых, как Кутателадзе С. С., Нигматулина Р. И., Уоллиса Г., Хьюитт Д., Кириченко Е. А. и др., является наиболее изученным и

поддающимся количественному описанию.

Характерной особенностью снарядного режима движения водовоздушной смеси (Рисунок 2.2) является скопление воздуха в большие пузыри (снаряды) длиной L , движущиеся с истинной скоростью $w''(z)$. Снаряды разделяют слои жидкости (жидкостные пробки) длиной L_s , включающие мелкие воздушные пузыри, поднимающиеся по подъемной трубе диаметром D и длиной $H+h$ с истинной скоростью $w'(z)$. В пристенной области происходит нисходящее течение жидкостной пленки с истинной скоростью $w'_n(z)$. Приведенная скорость водовоздушной смеси $w_{cm}(z)$.

При снарядном течении в эрлифте характерный размер включений (газовых пузырей или жидкостных пробок) близок по размеру к диаметрам подъемной трубы [42, с. 27, 61, с. 34].

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

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

Выполненные исследования позволят определить рациональную область эксплуатации нагнетательных эрлифтных установок и оптимальный, по критерию энергоэффективности, режим их работы, что даст возможность снизить затраты на транспортирование жидкостей (гидросмесей) за счет уменьшения энергопотребления.

Исходя из изложенного, нагнетательная эрлифтная установка должна соответствовать следующим основным требованиям:

- а) обеспечивать устойчивую работу по переполюма жидкости (гидросмеси) на технологически требуемую высоту;
- б) обеспечивать возможность работы с наиболее энергоэффективной снарядной структурой водовоздушного потока;
- в) обладать энергоэффективностью не ниже традиционных при равных конструктивных и технологических параметрах за счет утилизации энергии частично сжатого воздуха, подаваемого во всасывающий тракт воздухомструйного компрессора или радиального нагнетателя.

Сформулированным требованиям соответствует нагнетательная эрлифтная установка с воздухомструйным компрессором либо радиальным нагнетателем в качестве источника сжатого воздуха.

2.2 Математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта

Разработаны адекватные физические и математические модели рабочего процесса эрлифта традиционной технологической схемы для основных существующих структур газожидкостного потока [56, с. 147-220, 57, с. 63, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73], что позволяет определять рациональные области эксплуатации эрлифтов и оптимальные режимы их работы для снижения материальных затрат на транспортирование жидкостей (гидросмесей).

В [13, с. 19-20, 33, с. 69-75, 38, с. 111-115] обосновывается, как приемлемый на тот момент, метод расчета эрлифтов на основе теории подобия, к авторам которого отнесены профессор Аргунов И.И., академик Герман Л.И. и профессор Гейер В.Г. В качестве основных критериев подобия этими учеными обоснованно приняты: относительное погружение смесителя эрлифта $\alpha = h / (H + h)$ и отношение длины подъемной трубы к ее диаметру l / d . Наибольшее распространение получила методика профессора Гейера В.Г., правомерность

которой подтверждена многочисленными эффективно работающими эрлифтными установками.

В [66, с. 88] показано, что относительное погружение эрлифта правомерно рассматривать как произведение критериев Фруда и Эйлера $\alpha = Fr \cdot Eu$.

Однако, к недостаткам данной математической модели эрлифта следует отнести принятую гомогенную физическую модель и постоянство значений коэффициентов гидравлического трения λ в оптимальном режиме работы эрлифта (как короткого, так и длинного) для всех реализуемых в подъемнике структур двухфазных потоков. В то же время известно, что гидравлические потери в двухфазных потоках являются функцией многих параметров и в первую очередь определяются структурой газожидкостной смеси, которая может принимать в подъемной трубе эрлифта ряд форм [57, с. 252].

Как известно, при работе газожидкостного подъемника движущаяся в вертикальной подъемной трубе водовоздушная смесь может принимать различные структуры – пузырьковую, снарядную, эмульсионную, кольцевую и др. Однако из-за сложности гидродинамических процессов в водовоздушных потоках разработать универсальную математическую модель, адекватно описывающую рабочий процесс эрлифта при каждой из указанных структур, на сегодняшний день, не представляется возможным, и методика аналитических описаний создается для каждой структуры в отдельности.

В рассматриваемом случае целесообразно разработать математическую модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси в подъемной трубе, обеспечение которой достигается созданием соответствующих гидродинамических условий работы подъемника, которые в первую очередь характеризуются значениями относительных погружений смесителя $\alpha \geq 0,4$ и критерия Фруда $0 < Fr_{см} \leq 30$ [74, 75, 76].

Допустимость рассматривать при математическом моделировании рабочего процесса нагнетательного эрлифта транспортируемую смесь в подъемной трубе как водовоздушную (2-х фазную) и в случае транспортирования гидросмесей обосновывается результатами выполненных ранее исследований [56, с. 236, 62,

с. 111]. В соответствии с этими данными при плотностях 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.

Для наиболее приемлемой в нагнетательном эрлифте снарядной структуры водовоздушного потока рационально использование двухкомпонентной модели сплошной среды, в которой газосодержание водовоздушной смеси определяется его истинным значением φ , а вязкостные гидравлические потери – осредненным значением касательных напряжений на твердой стенке канала τ_w .

Таким образом, при разработке математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта транспортируемая в подъемной трубе многофазная смесь принимается как водовоздушная двухфазная, структура которой соответствует снарядной.

В основу математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта положены фундаментальные законы сохранения [68, с. 250-252, 69, с. 175-179] в виде дифференциальных уравнений количества движения и неразрывности движения сплошной среды, которые для условий газожидкостного подъемника имеют вид:

- уравнение количества движения

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d}{dz} [(1-\varphi)\rho'(w')^2 + \varphi\rho''(w'')^2] - [(1-\varphi)\rho' + \varphi\rho'']g; \quad (2.1)$$

- уравнение неразрывности движения

$$(1-\varphi)\rho'w' + \varphi\rho''w'' = G = \text{const}, \quad (2.2)$$

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.

Касательные напряжения на стенке трубы τ_w и истинные газосодержания φ вычислялись в соответствии с рекомендациями [59, с. 165].

Согласно [57, с. 125]:

– приведенные скорости газообразной и жидкой фаз

$$w_0''(z) = w''(z) \cdot \varphi(z); \quad (2.3)$$

$$w_0'(z) = w'(z) \cdot [1 - \varphi(z)]; \quad (2.4)$$

– массовые скорости газообразной и жидкостной фаз

$$G''(z) = \frac{Q_g(z) \cdot \rho_0''}{\omega \cdot \varphi(z)} = \frac{G(z) \cdot x}{\varphi(z)}; \quad (2.5)$$

$$G'(z) = \frac{Q_g(z) \cdot \rho'}{\omega \cdot [1 - \varphi(z)]} = \frac{G(z) \cdot (1 - x)}{1 - \varphi(z)}; \quad (2.6)$$

– массовая скорость водовоздушной смеси

$$G(z) = w_{cm}(z) \cdot \rho_{cm\beta}(z); \quad (2.7)$$

– объемное расходное газосодержание

$$\beta = \frac{Q_g^0(z)}{Q_g(z) + Q_g^0(z)}; \quad (2.8)$$

– массовое расходное воздухосодержание

$$x = \frac{Q_b^0(z) \cdot \rho_0''}{Q_3(z) \cdot \rho' + Q_b^0(z) \cdot \rho_0''}, \quad (2.9)$$

где – ρ_0'' – плотность воздуха при нормальных (технических) условиях; $Q_b(z)$ – объемный расход воздуха в z -м сечении подъемной трубы эрлифта; $Q_3(z)$ – расход жидкости в z -м сечении подъемной трубы; $w_{см}(z)$ – приведенная скорость водовоздушной смеси; $\rho_{см\beta}(z)$ – плотность водовоздушной смеси, вычисленная по объемному расходу газосодержанию β ; $Q_b^0(z)$ – расход воздуха при нормальных (технических) условиях.

Избыточное давление на выходе из подъемной трубы нагнетательного эрлифта [55, с. 77]:

$$p_{вз} = \rho' \cdot g \cdot \Delta H_n. \quad (2.10)$$

Высота перепада эквивалентного нагнетательного эрлифта (Приложение А4)

$$\Delta H_{эн} = \frac{\Delta H_n (H_n - \Delta H_n + h_n)}{h_n - \Delta H_n}. \quad (2.11)$$

Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$\alpha = \alpha_{эн} = \frac{h_n}{H_n - \Delta H_n + \Delta H_{эн} + h_n}. \quad (2.12)$$

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 2.3).

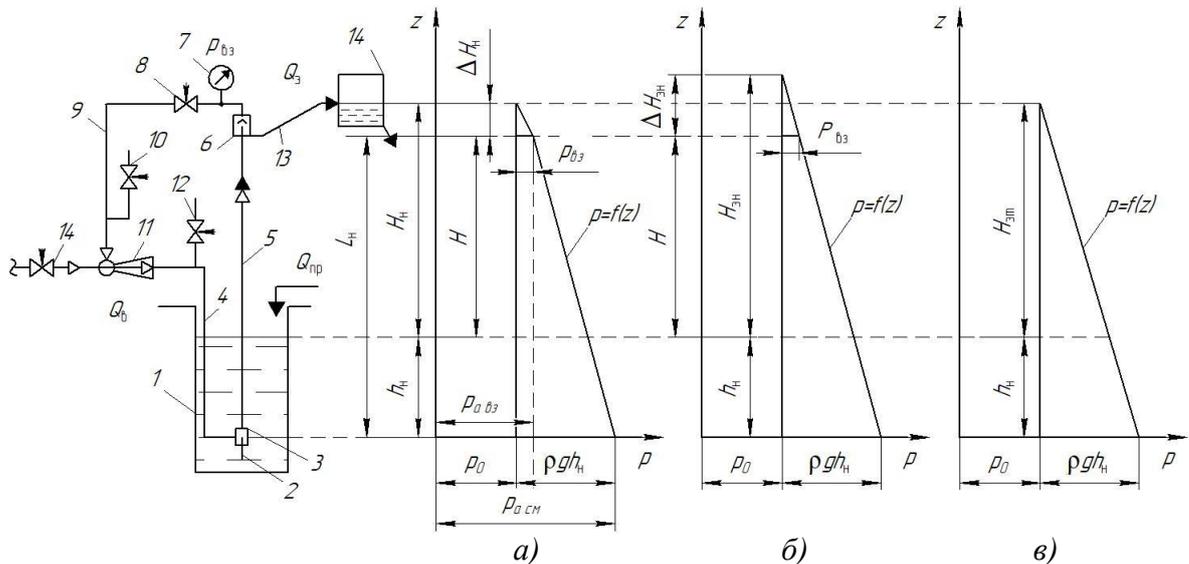


Рисунок 2.3 – Гидравлическая схема нагнетательного эрлифта и эпюры давления в подъемных трубах эрлифтов: *а* – нагнетательного эрлифта; *б* – эквивалентного нагнетательного эрлифта; *в* – эквивалентного традиционного эрлифта; 1 – зумпф; 2 – подающая труба; 3 – смеситель; 4 – воздухопровод; 5 – подъемная труба; 6 – воздухоотделитель; 7 – манометр 8, 10, 12, 14 – регулирующие клапаны; 11 – источник сжатого воздуха; 13 – отводящий трубопровод; h_n – глубина погружения смесителя; ΔH_n – высота перепада нагнетательного эрлифта; $\Delta H_{\text{эН}}$ – высота перепада эквивалентного нагнетательного эрлифта; H – высота подъема жидкости (гидросмеси); H_n – высота подъема нагнетательного эрлифта; $H_{\text{эН}}$ – высота подъема эквивалентного нагнетательного эрлифта; $H_{\text{эт}}$ – высота подъема эквивалентного традиционного эрлифта; p – абсолютное давление в подъемной трубе эрлифта; z – вертикальная координата подъемной трубы эрлифта

Абсолютное давление в подъемной трубе на расстоянии z_i от смесителя

$$p(z) = p_0 + p_{\text{см}} \left(1 - \frac{z_i}{H + h_n + \Delta H_{\text{эН}}} \right); \quad (2.13)$$

где $H = H_n - \Delta H_n$ (Рисунок 2.1);

p_0 – давление окружающей среды;

$p_{\text{см}}$ – избыточное давление в смесителе.

Суммарный перепад давлений на участке подъемной трубы длиной z_i от смесителя

$$p_{\Sigma i} = p_{\text{см}} \frac{z_i}{H + h_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}}}. \quad (2.14)$$

Мощность потока сжатого воздуха

$$N_i'' = p_0 Q_{\text{в}} \ln \frac{p_0 + p_{\text{см}}}{p(z)} = p_0 Q_{\text{в}} \ln \frac{p_0 + p_{\text{см}}}{p_0 + p_{\text{см}} \left(1 - \frac{z_i}{H + h_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}}} \right)}. \quad (2.15)$$

Объемный расход воздуха при среднем давлении на участке подъемной трубы длиной z_i

$$Q_{\text{в ср}i} = Q_{\text{в}} \frac{p_0}{p_0 + p_{\text{см}} \frac{z_i}{2(H + h_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}})}}. \quad (2.16)$$

Длина подъемной трубы

$$L = H + h_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}}. \quad (2.17)$$

Объемный расход воздуха в подъемной трубе эрлифта

$$Q_{\text{в}}(z) = Q_{\text{в}}^0(z) \frac{p_0}{p_{\text{а}}(z)}. \quad (2.18)$$

Плотность водовоздушной смеси $\rho_{\text{см}}(z)$

$$\rho_{\text{см}}(z) = \varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'. \quad (2.19)$$

Уравнений количества движения (2.1) и неразрывности движения (2.2) с учетом выражений (2.3) – (2.19), отражающих особенности математического моделирования рабочего процесса нагнетательного эрлифта, позволяют получить уравнение стационарного вертикального восходящего движения двухфазного снарядного течения в подъемной трубе нагнетательного эрлифта

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4\tau_w(z)}{D} + \frac{d}{dz} \left\langle \left[\left(\frac{G(z) \cdot (1-x)}{1-\varphi(z)} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[\left(\frac{x \cdot (1-\varphi(z))}{\varphi(z) \cdot (1-x)} \right) w_0''(z) + w_0'(z) \right] \right] \right\rangle + \rho_{см}(z) \cdot g, \quad (2.20)$$

проинтегрировав которое, получаем

$$-\int_{p_{асм}}^{p_a(z_i)} dp(z) = \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz + \int_0^{z_i} \left[\left(\frac{G(z) \cdot (1-x)}{1-\varphi(z)} \right) \times \right. \\ \left. \times \left[\left(\frac{x(1-\varphi(z))}{\varphi(z)(1-x)} \right) w_0''(z) + w_0'(z) \right] \right] dz + g \int_0^{z_i} \rho_{см} dz. \quad (2.21)$$

Решение интегрального уравнения (2.21) выполнено численным методом при помощи разработанной программы (язык программирования Delphi) с визуализацией получаемых зависимостей, в том числе расходных характеристик, (Рисунок 2.4, 2.5, 2.9, 2.12) и получением гидродинамических параметров водовоздушного потока (Рисунок 2.6–2.8) в сечениях по высоте подъемной трубы эрлифтов (Приложение А1 – Фрагмент текста разработанной программы).

Решение уравнений (2.13) – (2.21) численным методом при помощи разработанной компьютерной программы позволяет определять следующие количественные значения и зависимости (с визуализацией получаемых результатов): а) зависимости подачи эрлифта Q_3 от расхода воздуха Q_B (построение расходных характеристик $Q_3 = f(Q_B)$); б) изменение приведенных и истинных скоростей w и плотностей фаз ρ (воды и воздуха) двухфазного (водовоздушного)

потока; в) изменение давлений p и мощностей N аэрогидросмеси по высоте подъемной трубы в зависимости от расхода воздуха Q_B (суммарный перепад давления в подъемной трубе $p_{\Sigma i}$; перепады давлений, обусловленные трением p_{mpi} , ускорением $p_{уски}$, силой тяжести p_{gi} ; суммарная мощность водовоздушного потока $N_{\Sigma i}$; мощность, компенсирующая потери на трение N_{mpi} , ускорение $N_{уски}$, преодоление силы тяжести N_{gi} , скольжение фаз $N_{ски}$; мощность потока жидкости N' ; мощность потока газа N_i'' ; подведенная мощность $N_{подi}$).

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

2.3 Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта

Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта позволяет получить расходные, энергетические и другие характеристики газожидкостного подъемника, а также установить гидродинамические параметры водовоздушного потока в сечениях подъемной трубы по ее высоте.

В соответствии с методикой сравнения параметров, подробно изложенной в Разделе 3, (Рисунок 2.3, 3.3) на основе разработанной математической модели выполнены расчеты на ЭВМ с построением расходных характеристик (Рисунок 2.9) и получены количественные значения конструктивных размеров и гидродинамических параметров эквивалентного нагнетательного и эквивалентного

традиционного эрлифтов в диапазоне глубин погружения смесителей $h_n = 6 \div 74$ м (шаг $\Delta h_n = 4$ м) с высотой подъема $H_n = H_{\text{эт}} = 7$ м, диаметром подъемной трубы $D = 0,15$ м; высота переподъема, принятое значение которой $\Delta H_n = 2$ м, в случаях расчетов параметров для эквивалентной традиционной схемы не учитывалась ($\Delta H_n = 0$). Диапазон расходов воздуха в эрлифте для обеих схем составлял $Q_v = 0 \div 15$ м³/мин с шагом $\Delta Q_v = 1$ м³/мин. Исследуемый диапазон изменения относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта составляет $\alpha_{\text{эН}} = 0,364 \div 0,911$, эквивалентного традиционного эрлифта – $\alpha_{\text{эт}} = 0,462 \div 0,914$. Принятый для анализа работы эрлифтов диапазон относительных погружений обосновывается наличием снарядной структуры водовоздушной смеси в подъемной трубе.

Расчеты проведены с использованием модели « $H_n = H_{\text{эт}} = \text{const}$ » (при неизменной высоте подъема транспортируемой жидкости во всем принятом диапазоне изменения расходов воздуха).

В качестве примера решения математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта приведены расходные характеристики (Рисунок 2.4) и относительные расходные характеристики (Рисунок 2.5), построенные при ниже приведенных исходных данных. Глубина погружения смесителя $h_n = 10$ м, высота подъема $H_n = 7$ м, высота переподъема $\Delta H_n = 2$ м (относительное погружение $\alpha_{\text{эН}} = 0,533$). Внутренний диаметр подъемной трубы $D = 150$ мм был принят одинаковыми по всей длине трубы. Приведены также энергетические характеристики эрлифтов (Рисунок 2.6 – 2.8), семейство расходных характеристик нагнетательного и традиционного эрлифтов (Рисунок 2.9) при переменном значении геометрического погружения смесителя $h = h_n$ (переменном значении относительного погружения $\alpha_{\text{эН}}, \alpha_{\text{эт}}$).

Примеры результатов численного решения математической модели рабочего процесса нагнетательного и традиционного эрлифтов приведены в Приложениях А2 и А3.

Для численного сравнительного анализа параметров рабочего процесса эрлифтов использованы модели « $H_H = H_{ЭТ} - \text{const}$ » и « $p - \text{const}$ » (при неизменной высоте подъема и давлении в смесителе во всем исследуемом диапазоне изменения расхода воздуха Q_B).

Полные количественные данные численного решения во всем диапазоне исследуемых параметров эрлифтов изложены в Приложении А2.

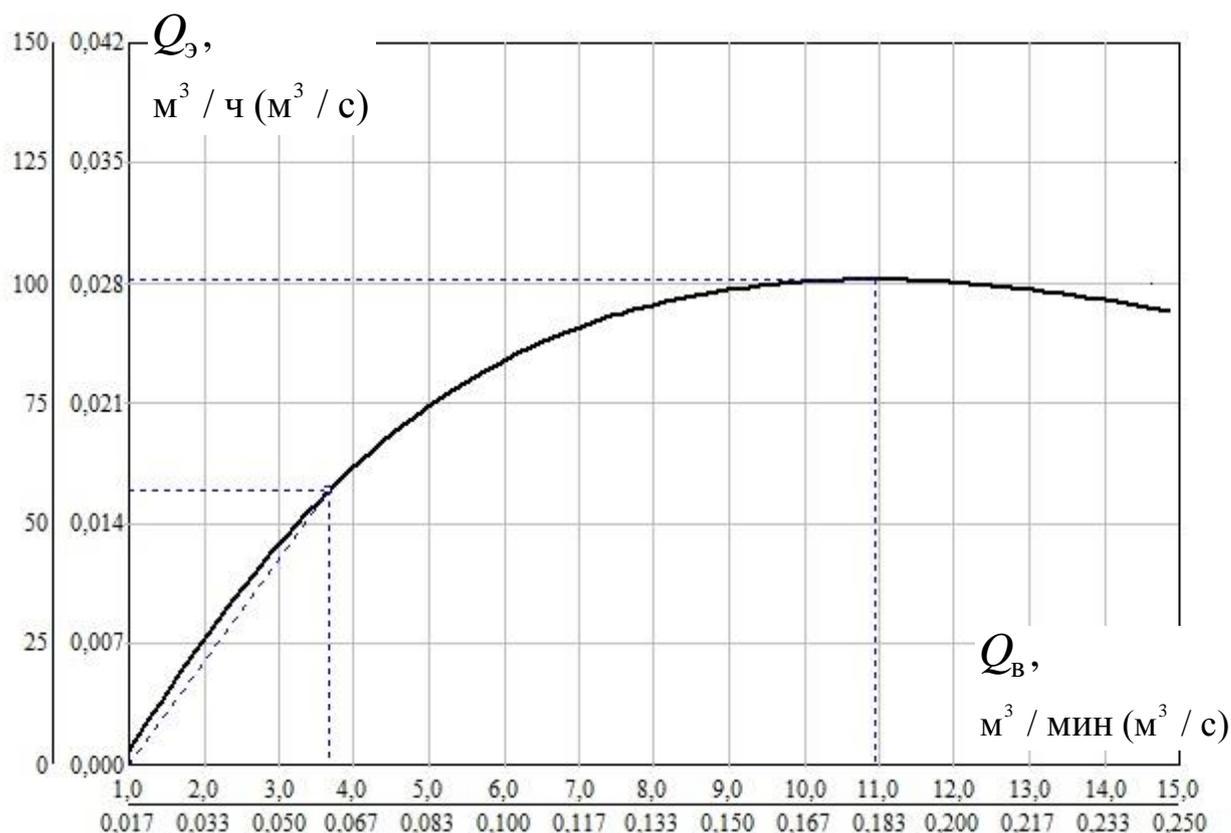


Рисунок 2.4 – Расчетная расходная характеристика нагнетательного эрлифта с $H_H = 7$ м, $\Delta H_H = 2$ м, $\alpha_{ЭН} = 0,533$, $D = 0,15$ м

Оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта (Рисунок 2.4) характеризуется расходом сжатого воздуха $Q_{B, \text{опт}} = 0,061$ м³/с (3,66 м³/мин) и подачей эрлифта $Q_{Э, \text{опт}} = 0,0158$ м³/с (56,8 м³/ч), что соответствует удельному расходу воздуха $q_{H \text{ опт}} = 3,86$. В режиме максимальной подачи: $Q_{B, \text{макс}} = 0,182$ м³/с (10,9 м³/мин) и $Q_{Э, \text{макс}} = 0,0280$ м³/с (100,7 м³/ч), что соответствует удельному расходу воздуха $q_{H \text{ макс}} = 6,51$.

При построении безразмерной расходной характеристики нагнетательного эрлифта $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_6)$ (Рисунок 2.5) в качестве базисных было принято значение расхода воздуха и подачи в оптимальном режиме работы.

Безразмерная расходная характеристика нагнетательного эрлифта представлены в диапазоне относительной подачи от $\bar{Q}_3 = 0$ до $\bar{Q}_3 = 1,8$, что соответствует относительным расходам воздуха от барботажного $\bar{Q}_6 = \bar{Q}_{6.б.}$ до предельного $\bar{Q}_6 = \bar{Q}_{6.пр.}$.

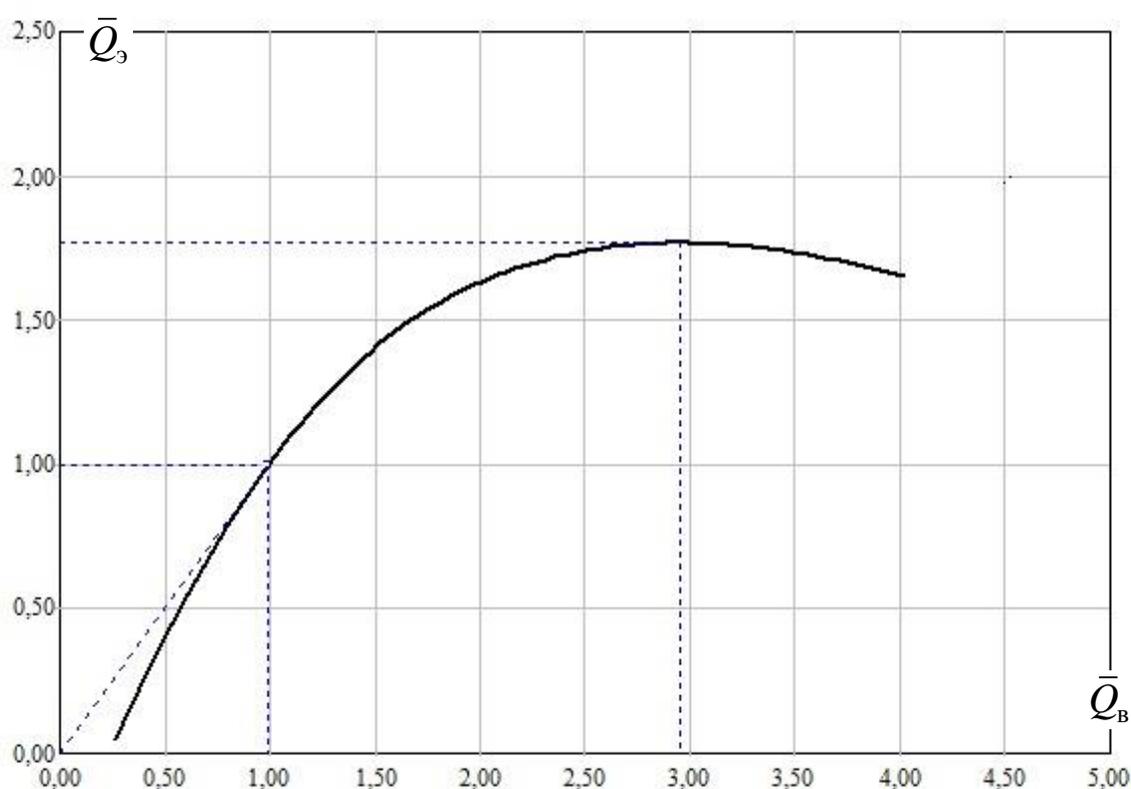


Рисунок 2.5 – Расчетная безразмерная расходная характеристика нагнетательного эрлифта: \bar{Q}_6 – относительный расход воздуха, \bar{Q}_3 – относительная подачи (базисные значения – $Q_{6.опт} = 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_{3.опт} = 0,0153 \text{ м}^3/\text{с}$)

В оптимальном режиме работы нагнетательного эрлифта перепад давления в подъемной трубе (избыточное давление в смесителе) составляет $P_\Sigma = P_{см} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$ (98,1 кПа), величина которого была принята в качестве базисной при построении кривых изменения относительных давлений водовоздушной смеси в подъемной трубе $\bar{p}_{см} = f(\bar{Q}_6)$. Относительное давление, обусловленное силой тяжести,

составляет, в оптимальном режиме работы, $P_g \approx 0,875 \cdot P_\Sigma$, относительное давление, обусловленное трением $P_{тр} \approx 0,05 \cdot P_\Sigma$, относительное давление, обусловленное ускорением $P_{уск} = 0,001 \cdot P_\Sigma$ в оптимальном режиме работы (Рисунок 2.6).

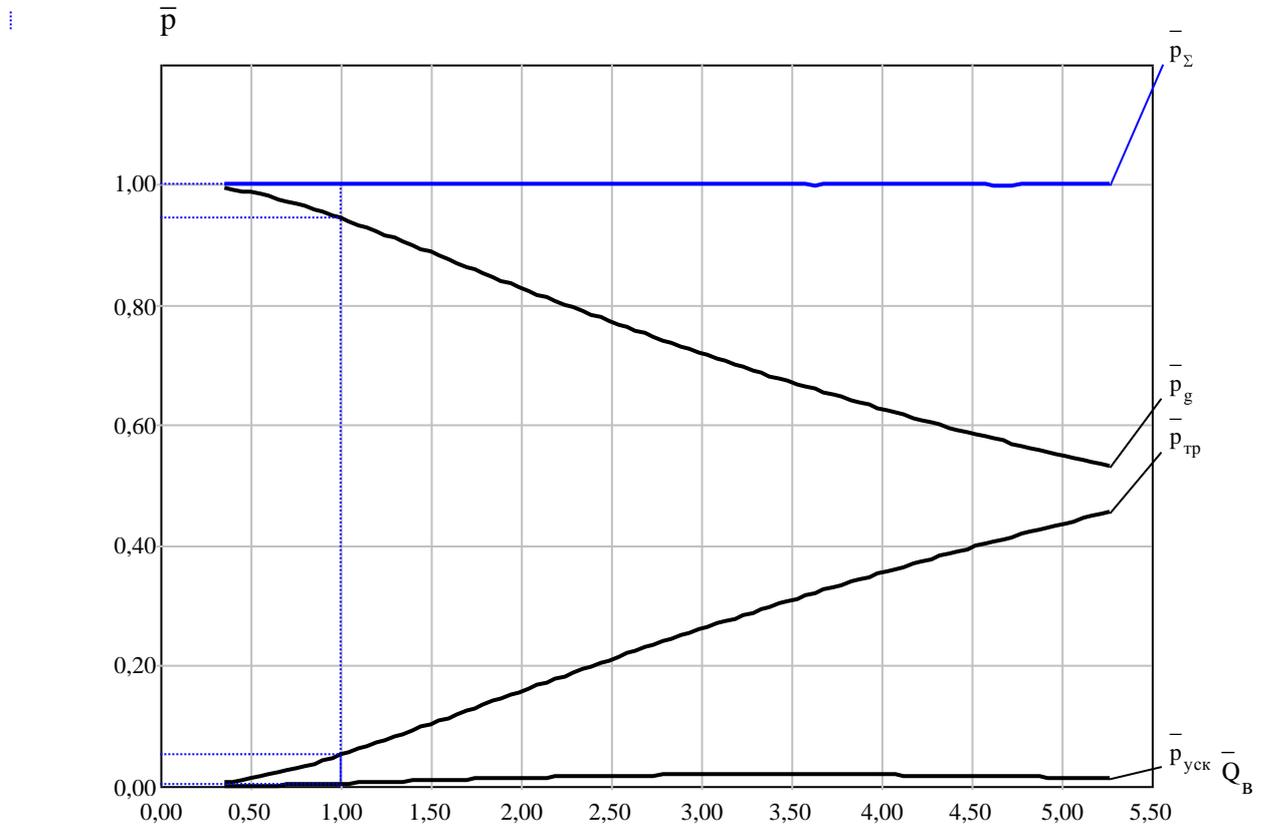


Рисунок 2.6 – Изменение относительных давлений в подъемной трубе нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы (базисные значения – $P_\Sigma = 98,1$ кПа, $Q_{в.опт} = 0,047$ м³/с)

Мощность, подведенная к подъемной трубе, нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы составляет $N_{под} = 4,69$ кВт. Эта мощность была принята в качестве базисной при построении кривых изменения относительных мощностей (Рисунок 2.7, 2.8). Подведенная мощность складывается из мощности воздушного потока N'' и потока жидкости N' [75, с. 208, 76, с. 158]. Мощность воздушного потока $N'' = 0,68 \cdot N_{под}$ (3,19 кВт), мощность потока жидкости $N' = 0,32 \cdot N_{под}$ (1,50 кВт).

Подведенная мощность $N_{под}$ расходуется на (Рисунок 2.7):

– преодоление силы тяжести $N_g = 2,847$ кВт ($N_g \approx 0,61 \cdot N_{под}$);

- компенсацию потерь на трение $N_{тр} = 0,156$ кВт ($N_{тр} \approx 0,03 \cdot N_{под}$);
- компенсацию потерь на ускорение $N_{уск} = 0,013$ кВт ($N_{уск} \approx 0,0028 \cdot N_{под}$);
- компенсацию потерь на скольжение $N_{ск} = 1,683$ кВт ($N_{ск} \approx 0,36 \cdot N_{под}$).

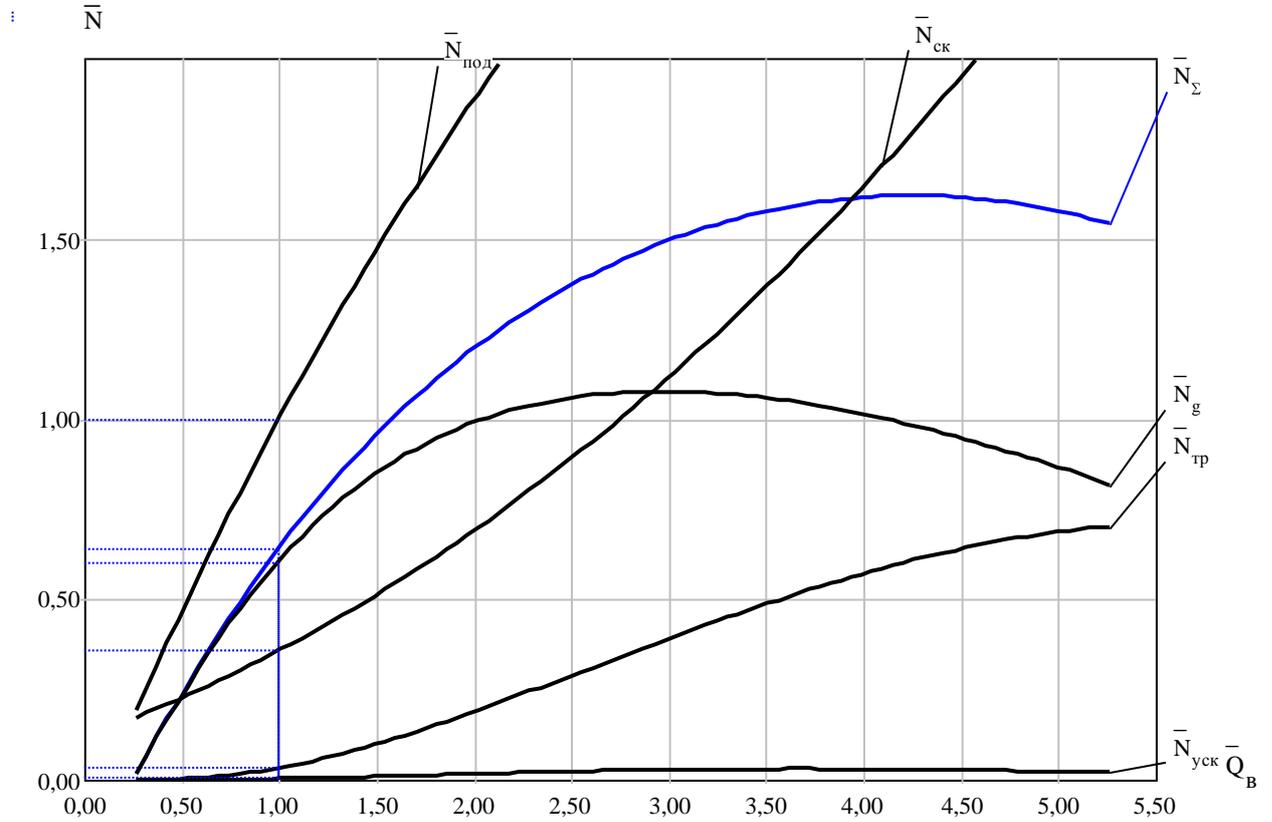


Рисунок 2.7 – Изменение относительных мощностей в подъемной трубе нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы (базисные значения – $N_{под} = 4,69$ кВт, $Q_{в.опт} = 0,047$ м³/с)

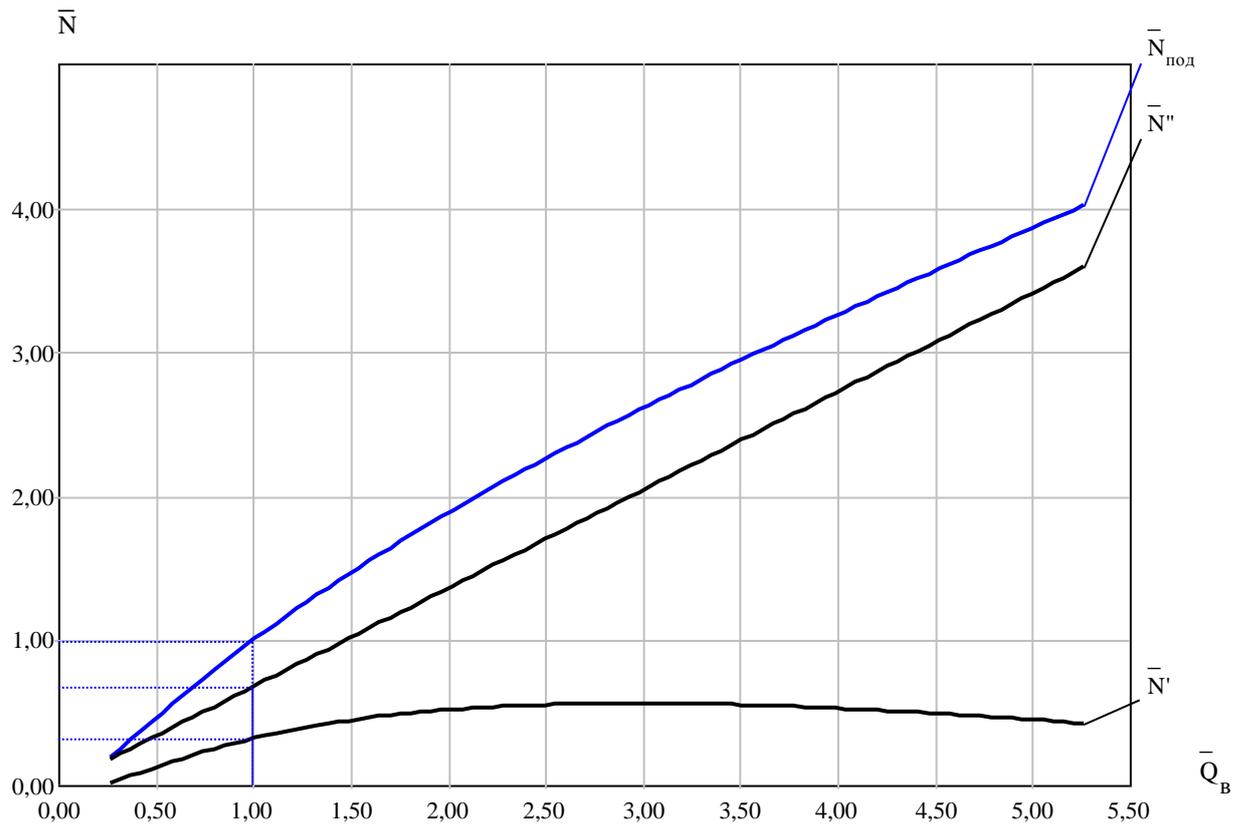


Рисунок 2.8 – Изменение относительных подводенных мощностей в подъемной трубе нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы (базисные значения – $N_{\text{под}} = 4,69$ кВт, $Q_{\text{в.опт}} = 0,047$ м³/с)

Зависимости изменения статических и гидродинамических параметров водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта: $w' = f(z)$, $w'' = f(z)$, $p_{\text{см}} = f(z)$, $w_{\text{см}} = f(z)$, $Q_{\text{в}} = f(z)$ ($z = 0 \div 18,75$ м) в оптимальном и максимальном режимах работы представлены на рисунках 2.9 – 2.13. Истинная скорости воды w' принимает значения в диапазоне $2,17 \div 2,88$ м/с в оптимальном режиме и $3,81 \div 5,02$ м/с в максимальном режиме; истинная скорость воздуха w'' принимает значения в диапазоне $4,08 \div 6,35$ м/с в оптимальном режиме и $8,39 \div 14,6$ м/с в максимальном режиме (Рисунок 2.9, 2.10). Приведенная скорость водовоздушной смеси $w_{\text{см}}$ принимает значения в диапазоне $3,06 \div 4,94$ м/с в оптимальном режиме и $6,64 \div 11,8$ м/с в максимальном режиме (Рисунок 2.11). Абсолютное давление водовоздушной смеси $p_{\text{см}}$ изменяется от 2,00 до 1,00 кгс/см² по линейному закону (Рисунок 2.12). Объемный расход воздуха $Q_{\text{в}}$ принимает

значения в диапазоне $2,0 \div 2,67$ м/с в оптимальном режиме и $5,50 \div 7,33$ м/с в максимальном режиме (Рисунок 2.13).

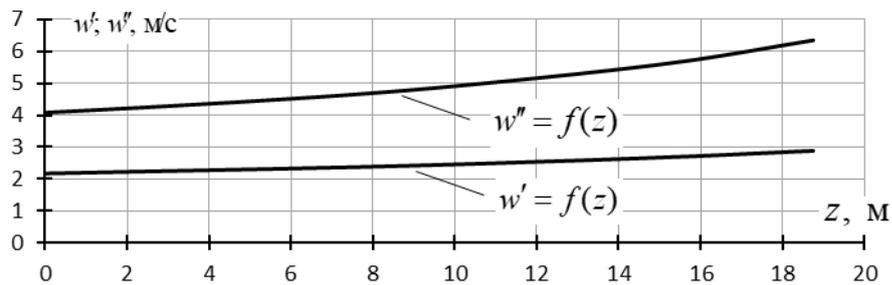


Рисунок 2.9 – Зависимости изменения истинной скорости воды $w' = f(z)$ и воздуха $w'' = f(z)$ по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы

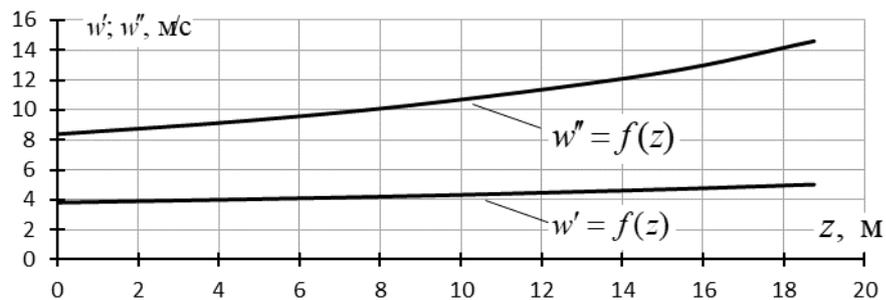


Рисунок 2.10 – Зависимости изменения истинной скорости воды $w' = f(z)$ и воздуха $w'' = f(z)$ по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта в максимальном режиме работы

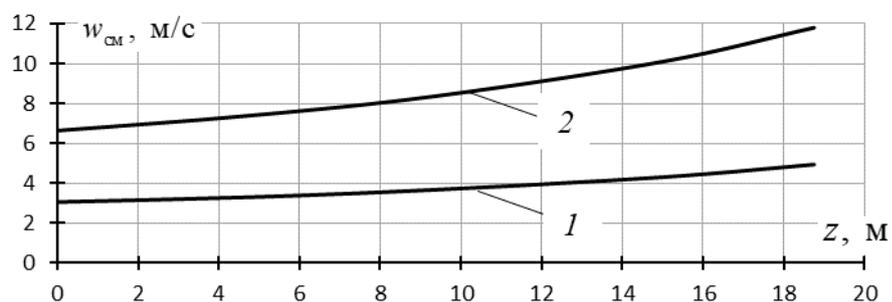


Рисунок 2.11 – Зависимости изменения приведенной скорости водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта $w_{см} = f(z)$: 1 – в оптимальном режиме работы, 2 – в максимальном режиме работы

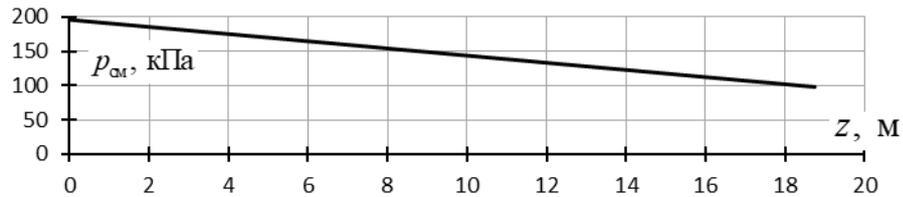


Рисунок 2.12 – Зависимость изменения абсолютного давления в подъемной трубе нагнетательного эрлифта от вертикальной координаты $p_{см} = f(z)$

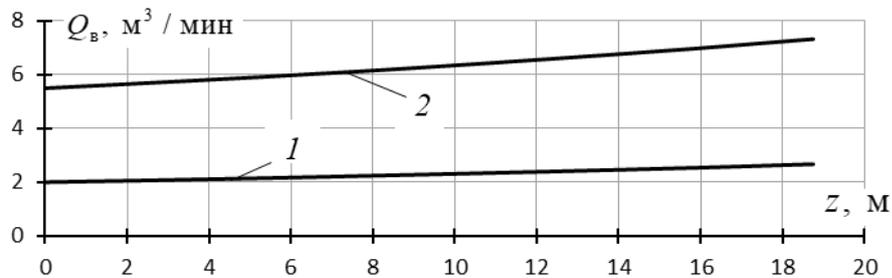


Рисунок 2.13 – Зависимости изменения объемного расхода водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы нагнетательного эрлифта $Q_{в} = f(z)$:
1 – в оптимальном режиме работы, 2 – в максимальном режиме работы

Вычислены расходные и энергетические параметры работы нагнетательного и традиционного эрлифтов в оптимальном и максимальном режимах работы с высотой подъема $H_{н} = 7$ м, высотой переподъема $\Delta H_{н} = 2$ м, диаметром подъемной трубы $D = 0,15$ м при различной глубине погружения смесителей $h = h_{н} = 6, 14, 22, 30, 42, 58, 74$ м. Относительное погружение нагнетательного эрлифта изменялось в диапазоне $\alpha_{эн} = 0,364 \div 0,911$; эрлифта традиционной технологической схемы – в диапазоне $\alpha_{эт} = 0,462 \div 0,914$. (Приложение А2, Таблица А1).

Получено семейство расходных характеристик [77, 78] нагнетательных эрлифтов (Рисунок 2.14). Исследованы эрлифты с глубиной погружения смесителей $h_{н} = 10$ м, высотой подъема $H_{н} = 5$ м, диаметром подъемной трубы $D = 0,15$ м при переменном значении высоты переподъема $\Delta H_{н} = 0 \div 5$ м с шагом $\delta = 1$ м. Получены значения расходов воздуха $Q_{в}$ и подач $Q_{э}$, вычислены значения удельных расходов воздуха q в оптимальном режиме и режиме максимальной подачи эрлифтов (Приложение А3). Параметры эрлифта с высотой переподъема $\Delta H_{н} = 0$ соответствуют традиционному эрлифту. Величина относительного погружения эрлифтов изменялась в диапазоне $\alpha_{эн} = 0,502 \div 0,667$.

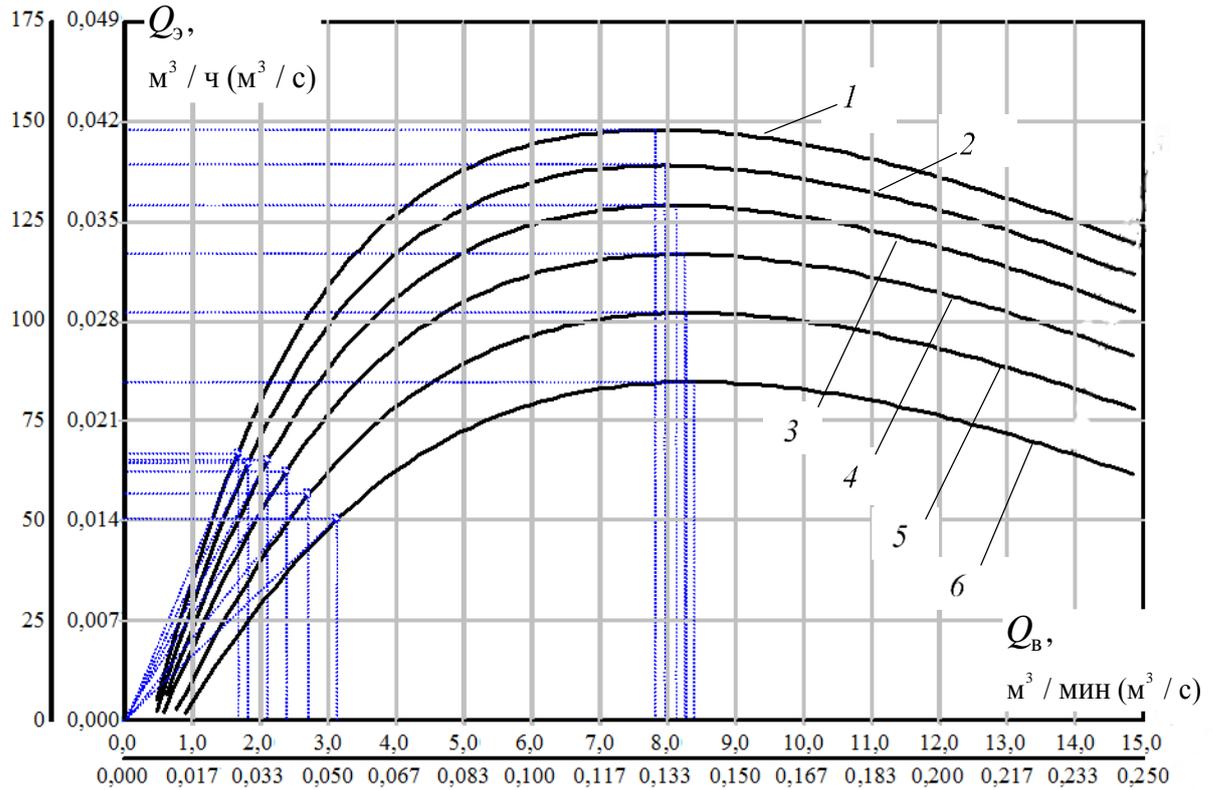


Рисунок 2.14 – Расходные характеристики нагнетательных эрлифтов с $h_n = 10$ м, $H_n = 5$ м, $D = 0,15$ м: 1 – $\Delta H_n = 0$, $\alpha_{эН} = 0,667$; 2 – $\Delta H_n = 1,0$ м, $\alpha_{эН} = 0,643$; 3 – $\Delta H_n = 2,0$ м, $\alpha_{эН} = 0,615$; 4 – $\Delta H_n = 3,0$ м, $\alpha_{эН} = 0,583$; 5 – $\Delta H_n = 4,0$ м, $\alpha_{эН} = 0,545$; 6 – $\Delta H_n = 5,0$ м, $\alpha_{эН} = 0,502$

Величина расхода воздуха эрлифтом в оптимальном режиме работы лежит в диапазоне $Q_{в.опт} = 1,65 \div 3,15$ м³/мин, в максимальном режиме работы – $Q_{в.макс} = 7,8 \div 8,4$ м³/мин. Величина подачи эрлифта в оптимальном режиме работы лежит в диапазоне $Q_{э.опт} = 50,4 \div 67,4$ м³/ч, в максимальном режиме работы – $Q_{э.макс} = 84,9 \div 148$ м³/ч (Рисунок 2.14). Отклонения в значениях подач нагнетательного (при максимальном принятом $\Delta H_n = 5$ м) и традиционного (при $\Delta H_n = 0$) эрлифтов составляют: в оптимальном режиме работы $\delta Q_{э.опт} = 25,2$ %, в режиме максимальной подачи $\delta Q_{э.макс} = 42,6$ %.

Величина удельного расхода воздуха эрлифтом принимает значения $q_{опт} = 1,47 \div 3,25$ в оптимальном режиме работы и $q_{макс} = 3,16 \div 5,35$ в максимальном режиме работы в диапазоне относительного погружения $\alpha_{эН} = 0,502 \div 0,667$ ($\Delta H_n = 0 \div 5,0$ м) (Рисунок 2.15).

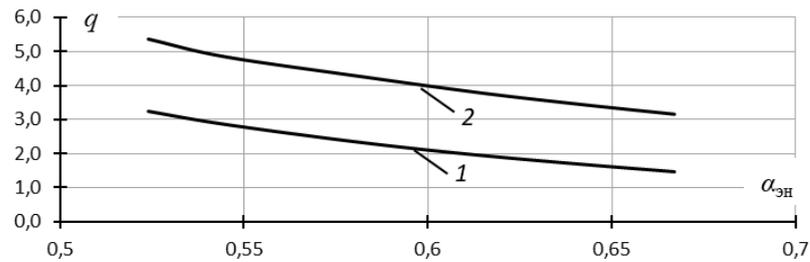


Рисунок 2.15 – Зависимости удельного расхода воздуха нагнетательным эрлифтом от относительного погружения при $h_n = 10$ м, $H_n = 5$ м, $\Delta H_n = 0 \div 5,0$ м, ($\alpha_{эН} = 0,502 \div 0,667$), $D = 0,15$ м: 1 – в оптимальном режиме, 2 – в максимальном режиме работы

2.4 Адекватность математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта

Сравнение экспериментальных (раздел 4) и расчетных параметров работы нагнетательных эрлифтов в оптимальном и максимальном режимах работы позволили подтвердить адекватность математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта.

Среднее отклонение расчетной подачи от полученной экспериментально для оптимального и максимального режимов работы нагнетательного эрлифта для всех исследуемых значений высоты перепада ΔH_n не превышает 17% при прочих равных условиях (Приложение В7, Таблица В7.2, Рисунок 2.16, Рисунок 4.15–4.18).

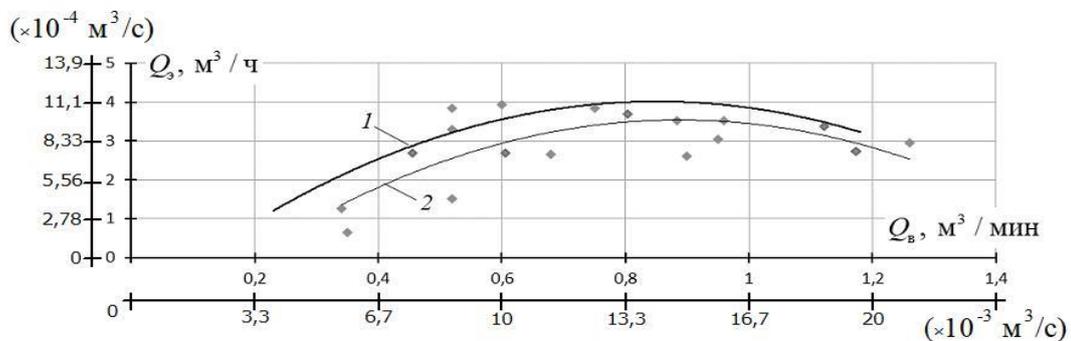


Рисунок 2.16 – Расходные характеристики эрлифтов с $H = 3$ м, $\Delta H_n = 0,25$ м, $\alpha_{эН} = 0,35$, $D = 0,068$ м: 1 – расчетная характеристика нагнетательного эрлифта; 2 – экспериментальная характеристика нагнетательного эрлифта

Также подтверждает адекватность математической модели сравнение расчетных удельных расходов воздуха для нагнетательного и традиционного эрлифтов с существующей эмпирической зависимостью $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$, справедливой для коротких эрлифтов, полученной в результате многочисленных экспериментальных исследований учеными кафедры энергомеханических систем ДОННТУ [5, с. 48, 8, с. 25] (Рисунок 2.17).

Расчетные зависимости удельных расходов воздуха q нагнетательного и традиционного эрлифтов в оптимальном режиме работы от относительного погружения приведены на рисунке 2.17.

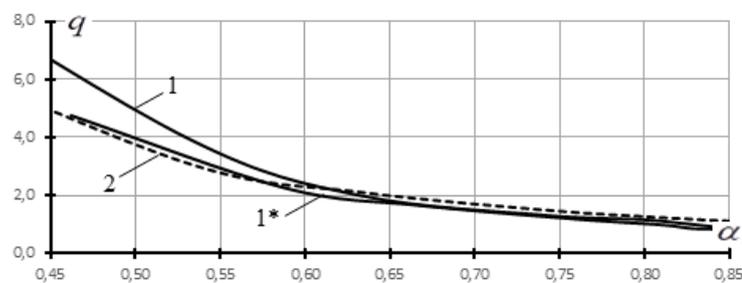


Рисунок 2.17 – Расчетные зависимости удельных расходов воздуха q эрлифтов в оптимальном режиме работы ($H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 2$ м, $D = 0,15$ м, $\alpha_{эн} = 0,364 \div 0,911$, $\alpha_{эт} = 0,462 \div 0,914$) от относительного погружения α в оптимальном режиме работы: 1 – нагнетательного эрлифта; 1* – традиционного эрлифта, 2 – существующая эмпирическая кривая $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$, полученная научными сотрудниками кафедры энергомеханических систем ДОННТУ

Зависимости получены для эрлифтов с геометрическими параметрами: высотой подъема $H_n = 7$ м, высотой переподъема $\Delta H_n = 2$ м в диапазоне относительного погружения нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,364 \div 0,911$ и традиционного эрлифта $\alpha_{эт} = 0,462 \div 0,914$ при диаметре подъемных труб эрлифтов $D = 0,15$ м.

Среднее отклонение в значениях удельных расходов воздуха q в оптимальном режиме работы нагнетательного и традиционного эрлифтов в сравнении с существующей эмпирической зависимостью $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$ не превышает 15 % в диапазоне относительного погружения $\alpha = 0,45 \div 0,85$.

На рисунке 2.18 графические зависимости, приведенные на рисунке 2.18, дополнены расчетными зависимостями удельных расходов воздуха нагнетательного и традиционного эрлифтов в режиме максимальной подачи (кривые 2, 2* на рисунке 2.18).

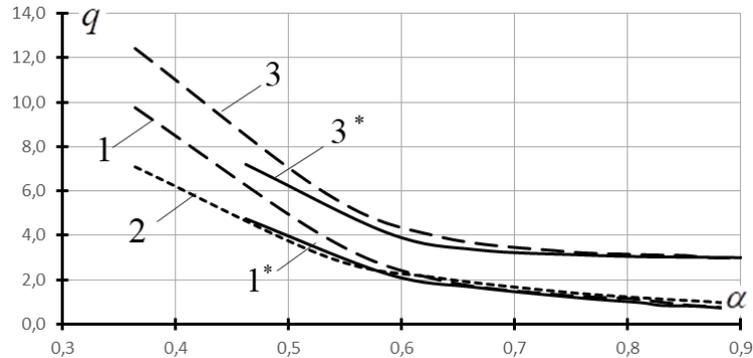


Рисунок 2.18 – Расчетные зависимости удельных расходов воздуха q эрлифтов ($H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 2$ м, $D = 0,15$ м, $\alpha_{эн} = 0,364 \div 0,911$, $\alpha_{эТ} = 0,462 \div 0,914$) от относительного погружения α : 1, 1* – нагнетательного и традиционного в оптимальном режиме соответственно, 2 – существующая эмпирическая кривая $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$, полученная научными сотрудниками кафедры энергомеханических систем ДОННТУ, 3, 3* – нагнетательного и традиционного в максимальном режиме соответственно

В указанном режиме работы эрлифтов удельные расходы воздуха превышают аналогичные значения оптимального режима работы нагнетательного и традиционного эрлифтов в $1,5 \div 1,8$ раз.

2.5 Выводы

1. Разработаны физическая и математическая модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта. В основу математической модели, отличающейся от существующих учетом избыточного давления в выходном сечении подъемной трубы эрлифта, положены уравнения неразрывности движения и количества движения вертикального снарядного потока аэрогидросмеси, с учетом принятых допущений.

2. Разработана компьютерная программа (язык программирования Delphi) для численного решения данной математической модели, позволяющая определять параметры восходящего газожидкостного потока в подъемной трубы и обеспечивающая, в том числе, визуализацию получаемых зависимостей. Проведено численное решение математической модели рабочего процесса эрлифтов традиционной технологической схемы и нагнетательных эрлифтов со значениям: $H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 0 \div 5$ м ($\alpha_{эн} = 0,364 \div 0,911$; $\alpha_{эт} = 0,462 \div 0,914$), $D = 0,15$ м с построением расходных и энергетических характеристик, в том числе по высоте подъемной трубы.

3. Адекватность разработанной математической модели подтверждена результатами лабораторных экспериментальных исследований; отклонения расчетных и экспериментально полученных значений подач нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме работы и в режиме максимальной подачи, при прочих равных условиях, составляют $9,9 \div 16,9\%$. (Раздел 4, Приложение В).

Сравнение расчетных удельных расходов воздуха для нагнетательного и традиционного эрлифтов с существующей эмпирической зависимостью $q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}$, полученной в результате многочисленных экспериментальных исследований учеными кафедры энергомеханических систем ДОННТУ также подтверждает адекватность математической модели. Среднее отклонение в значениях удельных расходов воздуха q в оптимальном режиме работы нагнетательного и традиционного эрлифтов не превышает 15 % в диапазоне относительного погружения $\alpha = 0,45 \div 0,85$.

РАЗДЕЛ 3

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК3.1 Физическая модель и аналитический анализ рабочего процесса эрлифтной
установки с воздушоструйным компрессором3.1.1 Работа эрлифтной установки традиционной технологической схемы с
воздушоструйным компрессором

Для повышения экономичности эрлифтных установок, которые используются для гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей, при питании их сжатым воздухом от общешахтной пневмосети, когда глубина погружения смесителя эрлифта не превышает 4...5 м, целесообразно применять воздушоструйные компрессоры на подводящих трубопроводах. Избыточное давление в шахтной пневмосети, как правило, составляет 0,5...0,6 МПа. При работе эрлифтных установок для водоотлива и гидроочистки шахтных технологических емкостей давление сжатого воздуха в шахтной пневмосети оказывается завышенным приблизительно в 10 раз, в сравнении с необходимым давлением для работы эрлифта [79]. Дросселирование потока сжатого воздуха регулировочной задвижкой, устанавливаемой на воздухопроводе эрлифта, приводит к непроизводительным потерям энергии, вследствие чего снижается КПД установки. В связи с этим в ДОННТУ разработана [7, с. 132, 15, с. 35, 33, с. 129, 80] эрлифтная установка с воздушоструйным компрессором в пневмопроводе (Рисунок 3.1).

Практика использования эрлифтов с воздушоструйным компрессором в воздухопроводе доказывает возможность использования излишка давления в общешахтной пневмосети для инжектирования струйным аппаратом атмосферного

воздуха при питании эрлифта сжатым воздухом, что позволяет повысить экономичность эрлифтных установок.

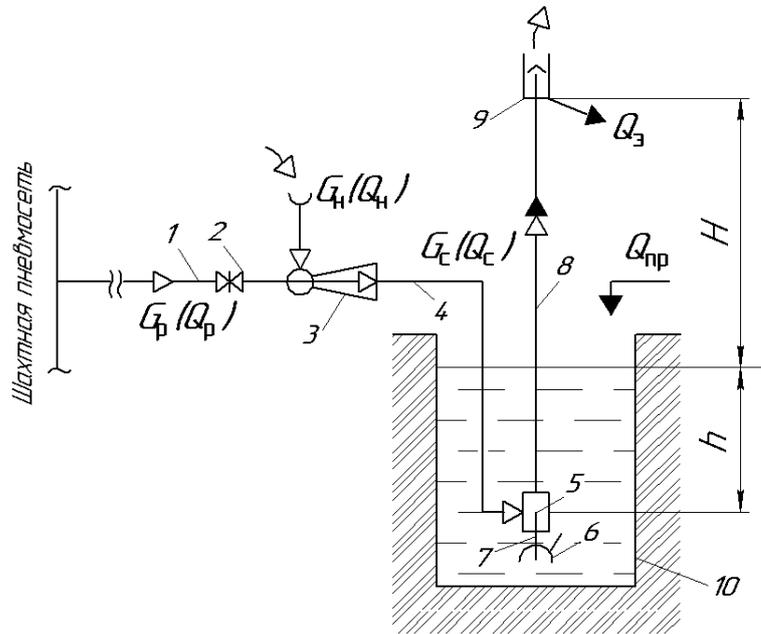


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором в воздухопроводе: 1 – трубопровод рабочего потока; 2 – запорно-регулирующий элемент; 3 – воздушоструйный компрессор; 4 – напорный воздухопровод; 5 – смеситель; 6 – всасывающее устройство; 7 – подающая труба; 8 – подъемная труба; 9 – воздухоотделитель; 10 – водосборная емкость; h – геометрическое погружение смесителя; H – высота подъема эрлифта; $Q_{пр}$ – приток жидкости; $Q_э$ – подача эрлифта; G_p, G_n, G_c – массовые расходы рабочего, инжестируемого и сжатого воздушных потоков соответственно; Q_p, Q_n, Q_c – объемные расходы рабочего, инжестируемого и сжатого воздушных потоков соответственно

При работе эрлифтной установки по приведенной схеме сжатый воздух от шахтной пневмосети поступает по трубопроводу рабочего потока 1 с установленным на нем запорно-регулирующим элементом 2 в воздушоструйный компрессор 3, в котором происходит смешение рабочего и инжестируемого из атмосферы воздуха. Сжатый до давления, соответствующего геометрическому погружению смесителя, поток воздуха направляется по напорному трубопроводу 4 в смеситель 5. Подача жидкости (с возможными включениями твердых частиц) из водосборной емкости 10 в смеситель осуществляется с помощью всасывающего устройства 6 и подающей трубы 7. Образовавшаяся в смесителе водовоздушная

смесь транспортируется по подъемной трубе 8 к воздухоотделителю 9, где происходит разделение фаз, а жидкость с расходом Q_3 направляется по назначению.

В общем случае при заданных высоте подъема эрлифта H и относительном погружении смесителя α геометрическое погружение смесителя определяется зависимостью:

$$h = H \frac{\alpha}{1 - \alpha}, \quad (3.1)$$

а абсолютное давление в смесителе – выражением:

$$p_{\text{см}} = p_0 + \rho gh, \quad (3.2)$$

где p_0 – абсолютное давление окружающей среды (атмосферное давление);

ρ – плотность перекачиваемой жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Удельный [при нормальных технических условиях на 1 м^3 транспортируемой воды (жидкости)] расход воздуха эрлифтом:

– при $(H + h)/D < 200$, $\rho gh/p_0 < 2$, $4 \leq h \leq 10$ м (D – эквивалентный диаметр подъемной трубы) [7, с. 532]:

$$q = 0,767\alpha^{-2,2}; \quad (3.3)$$

– при $\alpha > 0,5$:

$$q = \frac{q_c}{\frac{p_0}{\rho gh} \ln\left(1 + \frac{\rho gh}{p_0}\right)}, \quad (3.4)$$

где q_c – среднее газосодержание в подъемной трубе,

$$q_c = (22,7 + 10,1\alpha)0,0063^{0,97\alpha}. \quad (3.5)$$

Достижимый коэффициент инжекции газоструйного компрессора u и обеспечивающие его максимально возможное значение основные относительные геометрические характеристики аппарата f_{p1}/f_{p*} и f_3/f_{p*} (f_{p*}, f_{p1} – площади соответственно критического и выходного сечений рабочего сопла Лавалья, f_3 – площадь сечения камеры смешения цилиндрической формы) однозначно определяются давлениями потоков (абсолютными): p_p – рабочего, p_n – инжектируемого, p_c – сжатого [81].

Для рассматриваемой эрлифтной установки правомерно:

- удельный расход воздуха

$$q = \frac{Q_c}{Q_3}; \quad (3.6)$$

- массовый расход сжатого воздуха

$$G_c = G_p + G_n; \quad (3.7)$$

- коэффициент инжекции газоструйного компрессора

$$u = \frac{G_n}{G_p}, \quad (3.8)$$

где Q_c – объемный расход воздуха на выходе из воздухометрического компрессора (на входе в смеситель эрлифта) при нормальных технических условиях; Q_3 – объемная подача эрлифта ($Q_3 = Q_c$); G_c, G_p, G_n – массовые расходы соответственно сжатого, рабочего и инжектируемого потоков воздуха в струйном компрессоре.

Удельный (при нормальных технических условиях на 1 м³ транспортируемой жидкости) расход рабочего воздуха (из пневмосети) [79, с. 20]:

$$q_p = \frac{Q_p}{Q_3} = \frac{q}{1+u}, \quad (3.9)$$

поскольку $\frac{Q_p}{Q_s} = \frac{Q_p \cdot q}{Q_c} = \frac{Q_p \cdot q}{Q_p + Q_n} = \frac{q}{1+u}$, где Q_p – объемный расход рабочего воздуха

(из пневмосети) при нормальных технических условиях, $Q_p = G_p / \rho_{в0}$.

Для эрлифтной установки с эрлифтом традиционной технологической схемы и струйным аппаратом с использованием выражений (3.1)...(3.8), теоретических положений, высказанных в [80, с. 15–81, с. 222–223], с применением разработанной компьютерной программы [Приложение Б] для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора u [82, 83, 84, 85, 86] в диапазонах значений $H = 3 \dots 10$ м, $\alpha = 0,20 \dots 0,50$, $p_p = 0,4 \dots 0,8$ МПа и принятых соотношений $p_n = p_{н0} = p_0$, $p_c = p_{см}$ определены зависимости: $q_p/q = f(\alpha)$, $q_p/q = f(H)$, $q_p/q = f(p_p)$ (Рисунок 3.2 – 3.4).

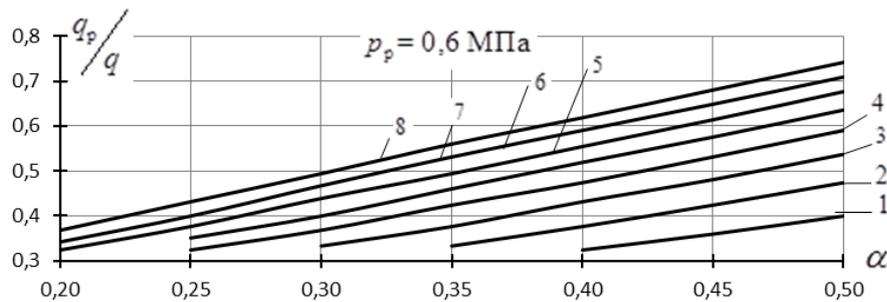


Рисунок 3.2 – Зависимости относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от относительного погружения смесителя α при H : 1 – 3 м; 2 – 4 м; 3 – 5 м; 4 – 6 м; 5 – 7 м; 6 – 8 м; 7 – 9 м; 8 – 10 м (значение давления рабочего потока $p_p = 0,6$ МПа)

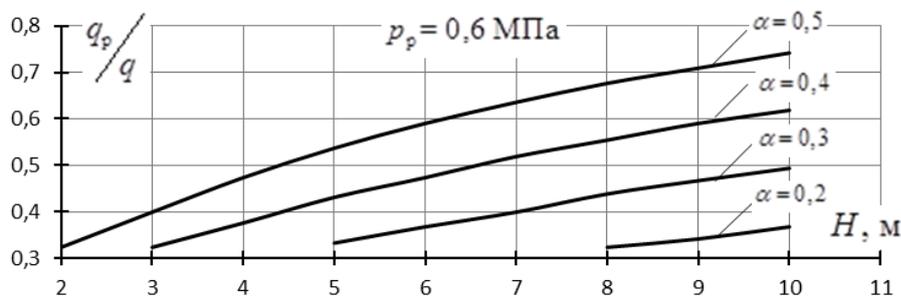


Рисунок 3.3 – Зависимости относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от высоты подъема эрлифта H при различных значениях относительного погружения α (значение давления рабочего потока $p_p = 0,6$ МПа)

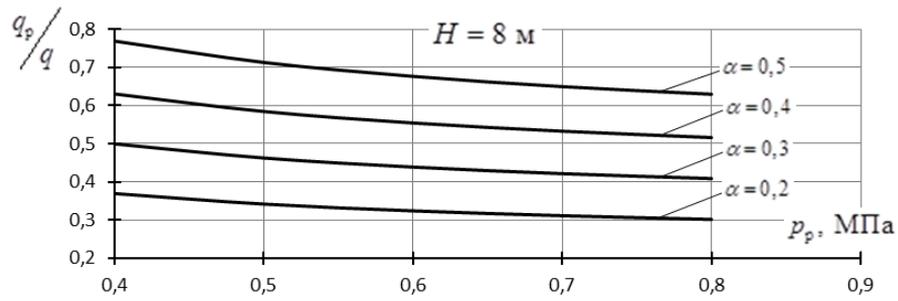


Рисунок 3.4 – Зависимости относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от давления рабочего воздуха p_p при различных значениях относительного погружения α

При $p_p = 0,6$ МПа в диапазоне $H = 3...10$ м уменьшение относительного погружения смесителя от $\alpha = 0,5$ до $\alpha = 0,2$ обеспечивает уменьшение относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от $\sim 0,40...0,75$ до $\sim 0,32...0,38$ за счет более интенсивного увеличения коэффициента инжекции струйного аппарата u в сравнении с ростом удельного расхода воздуха q при имеющем место уменьшении геометрического погружения смесителя h (и, соответственно, уменьшении потребного давления сжатия струйного аппарата p_c) (Рисунок 3.2).

В рассматриваемых условиях увеличение высоты подъема H от 3 до 10 м приводит к увеличению относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от 0,31 до 0,75 при $\alpha = 0,2...0,5$ (Рисунок 3.3).

Увеличение давления рабочего воздуха p_p от 0,4 до 0,8 МПа обеспечивает снижение относительного удельного расхода рабочего воздуха q_p/q от 0,38...0,78 до 0,30...0,62 при принятой в качестве примера высоте подъема эрлифта $H = 8$ м (Рисунок 3.4).

Абсолютное значение удельного расхода рабочего воздуха q_p , как и удельного расхода воздуха эрлифтом q , уменьшается с увеличением относительного погружения смесителя α (Рисунок 3.5).

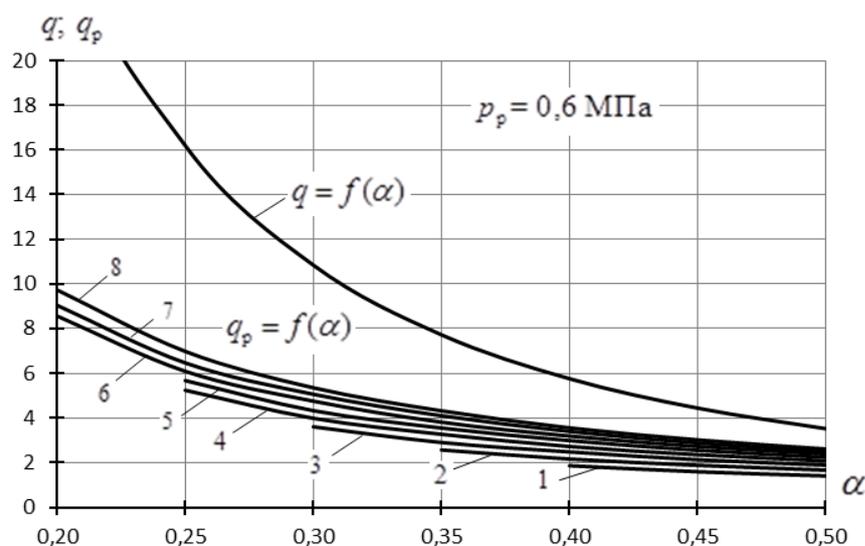


Рисунок 3.5 – Зависимости удельных расходов рабочего воздуха q_p и удельного расхода воздуха эрлифтом q от относительного погружения смесителя α при H : 1 – 3 м; 2 – 4 м; 3 – 5 м; 4 – 6 м; 5 – 7 м; 6 – 8 м; 7 – 9 м; 8 – 10 м

Таким образом, использование воздушоструйного компрессора для преобразования излишне высокого давления рабочего воздуха в диапазонах $p_p = 0,4 \dots 0,8$ МПа, $H = 3 \dots 10$ м, $\alpha = 0,20 \dots 0,50$ обеспечивает снижение расхода воздуха из пневмосети до 2-х раз для эрлифтной установки с эрлифтом традиционной технологической схемы.

3.1.2 Физическая модель рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором

Применение воздушоструйных компрессоров позволяет уменьшить потребный расход рабочего агента (воздуха из пневмосети) в струйном аппарате и повысить энергетическую эффективность работы эрлифтной установки путем преобразования излишне высокого для этих условий давление воздуха в пневмосети в расход инжектируемой среды [79, с. 22-23, 83 с. 50, 87].

В эрлифтах традиционной технологической схемы предусматривается безнапорное (самотечное) транспортирование жидкости (гидросмеси) от данного

средства подъема к потребителю. В случае если геодезическая отметка потребителя перекачиваемой жидкости превышает отметку выходного отверстия воздухоотделителя традиционного эрлифта, применение последнего становится невозможным [79, с. 21].

Нагнетательные эрлифтные установки, обеспечивающие напорное транспортирование жидкостей (гидросмесей) от воздухоотделителя по назначению, расширяют рациональную область применения газожидкостных подъемников.

Для реализации такого способа работы эрлифта необходимо обеспечивать требуемое избыточное давление в воздухоотделителе, что, однако, при традиционной схеме установки приводит к нежелательному снижению энергоэффективности его рабочего процесса. Сохранить, а зачастую и повысить, 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 (воздухоструйного компрессора или радиального нагнетателя).

Нагнетательная эрлифтная установка с воздухоструйным компрессором (Рисунок 3.6) содержит подъемную трубу 1 (длина $h + H$), погруженную под уровень жидкости в водосборной емкости 18 на глубину h со смесителем 16 и подающей трубой 17. куда поступает перекачиваемая жидкость (гидросмесь) с расходом $Q_{пр}$. В верхней части подъемной трубы находится воздухоотделитель 2 со сливной 3 и воздухоотводящей 4 трубами. Воздух, питающий эрлифт, поступает из пневмосети предприятия по трубопроводу рабочего потока 10 через запорно-регулирующую задвижку 11 к воздухоструйному компрессору 12, который инжектирует воздух, движущийся по трубопроводу 4 из воздухоотделителя 2. Воздушная смесь направляется по напорному трубопроводу 13 к смесителю 16. Жидкость, находящаяся в водосборной емкости поступает через подающую трубу в смеситель, где создается аэрогидросмесь, которая движется по подъемной трубе 1 к воздухоотделителю 2. После разделения жидкой и газообразной фаз

выделившаяся жидкость с расходом Q_3 направляется через обратный клапан 21 по отводящему трубопроводу 22, который доставляет ее потребителю 23, расположенному на требуемой геометрической отметке (ΔH_H).

Предотвращение затопления выходного сечения подъемной трубы 1 и возможного уноса жидкости воздушным потоком, обеспечивается регулировкой давления в воздухоотделителе 2 регулирующим клапаном 5 по сигналу датчика уровня 6 (Рисунок 3.6).

При превышении уровня жидкости в воздухоотделителе выше заданного, проходное сечение клапана 5 по сигналу датчика уровня 6 уменьшается, давление в воздухоотделителе повышается. При этом увеличивается расход жидкости транспортируемой потребителю и уменьшается подача эрлифта. И первое и второе препятствует затоплению выходного торца подъемной трубы 1 и попаданию жидкости в трубопровод 4. Обратный клапан 21, расположенный в нижней части отводящего трубопровода 22 предотвращает попадание жидкости в трубопровод 4 после прекращения работы эрлифтной установки.

Согласованная работа датчика уровня жидкости 6 и регулирующего клапана 5 обеспечивает стабильную работу эрлифтной установки, при которой в воздухоотделителе поддерживается избыточное давление воздуха, энергия которого используется для поднятия жидкости выше уровня выходного торца подъемной трубы на высоту ΔH_H и утилизируется в приемную камеру воздушоструйного компрессора.

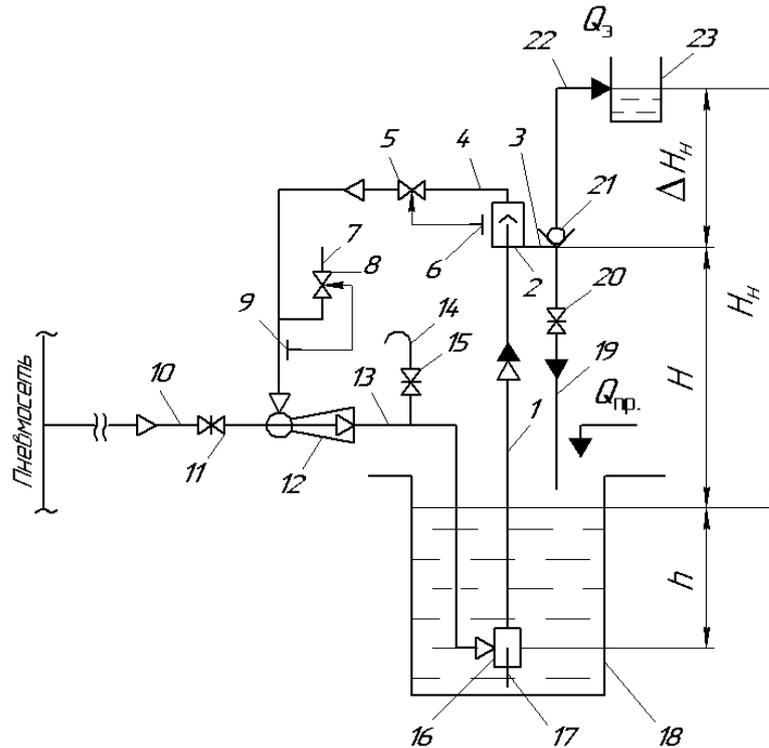


Рисунок 3.6 – Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором: 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель; 3 – сливная труба; 4 – воздухоотводящая труба; 5, 8 – регулирующие клапаны; 6 – датчик уровня; 7 – патрубок; 9 – датчик давления; 10 – трубопровод рабочего 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

Утилизация энергии частично сжатого воздуха, поступающего из воздухоотделителя к приемной камере воздушоструйного компрессора позволяет ему работать с увеличенным значением коэффициента инжекции u , что в свою очередь позволяет уменьшить потребный объемный расход воздуха из трубопровода рабочего потока 10 при неизменном объемном расходе воздуха в напорном трубопроводе 13.

К воздухоотводящей трубе 4 подсоединен патрубок 7 с клапаном 8. При открытом клапане 8 патрубок 7 обеспечивает соединение воздухоотводящей трубы 4 с атмосферой. В процессе штатной работы установки обеспечивается отвод через патрубок 7 в окружающую среду объема воздуха в единицу времени, равного

расходу рабочего воздуха из пневмосети через трубопровод 10. При этом положение запорно-регулирующего элемента в клапане 8 задается управляющим датчиком давления 9.

Сбросной трубопровод 19 с задвижкой 20 подключен к сливной трубе 3 и используется в пусковом режиме работы установки.

Запуск нагнетательной эрлифтной установки начинается с вывода на рабочий режим воздушоструйного компрессора 12 подачей рабочего воздуха по трубопроводу 10 через запорно-регулирующую задвижку 11 при открытых клапанах 5, 8 и задвижках 15, 20. При плавном закрытии задвижки 15 сжатый воздух по воздухопроводу 13 начинает нагнетаться в смеситель 16 и эрлифт начинает работу по подъему аэрогидросмеси. Выделившаяся из состава газожидкостной смеси жидкость (гидросмесь) из воздухоотделителя по сливной трубе 3 и сбросному трубопроводу 19 возвращается в зумпф 18, а воздух из воздухоотделителя удаляется по воздухоотводящей трубе. При открытом клапане 8 соотношения расходов воздуха по трубопроводам 4 и 7 определяются условиями параллельной работы этих трубопроводов.

Для перевода эрлифтной установки в нагнетательный режим работы плавно закрывается задвижка 20 и производится дросселирование клапанов 5 и 8. За счет частичного закрытия регулирующего клапана 5 и увеличения при этом его сопротивления обеспечивается избыточное давление в воздухоотделителе 2, соответствующее требуемому напору ΔH_n . В таком положении запорно-регулирующей арматуры достигается устойчивая работа эрлифтной установки. Жидкость (гидросмесь) с расходом Q_3 по отводящему трубопроводу 22 направляется потребителю 23.

3.1.3 Аналитическое обоснование энергетической эффективности работы и рациональные области применения нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором

Анализ особенностей рабочего процесса и энергоэффективности работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором требует представления принципиальной схемы нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.7 б) в виде принципиальной эквивалентной схемы нагнетательного эрлифта с традиционным способом работы (Рисунок 3.7, в). Эквивалентность (по условиям работы) эрлифтов схем (Рисунок 3.7, б; 3.7, в) обеспечивается одинаковыми геометрическими погружениями смесителей h_n и одинаковыми давлениями $p_{вз}$ в подъемных трубах на высоте H от уровня свободной поверхности перекачиваемой жидкости в зумпфе.

Эквивалентный традиционный эрлифт (Рисунок 3.7, г) обеспечивает ту же высоту подъема H_n , что и нагнетательный (Рисунок 3.7, б), и служит для сравнения параметров рабочего процесса и энергоэффективности работы этой установки (Рисунок. 3.7, г) и эквивалентной нагнетательной установки (Рисунок 3.7, в). Эрлифт традиционной технологической схемы (Рисунок 3.7, а) при этом является базой для выполнения выше перечисленных анализов.

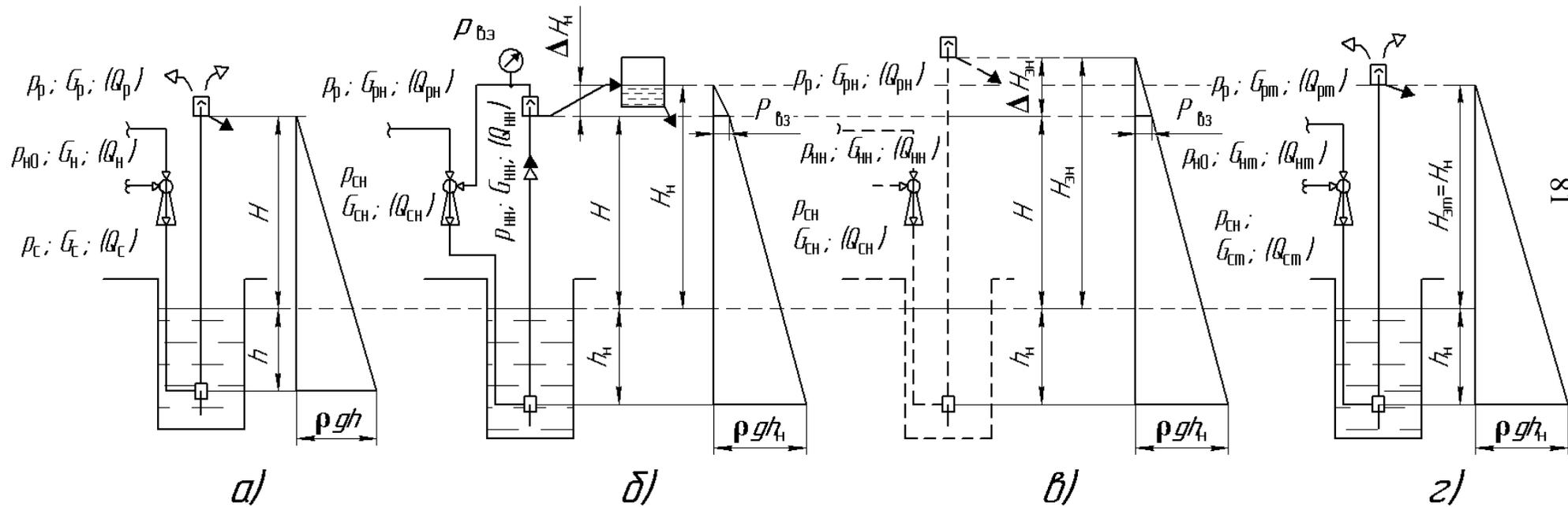


Рисунок 3.7 – Схемы эрлифтных установок с воздушоструйным компрессором и эпюры давления в подъемных трубах эрлифтов: а – традиционной технологической схемы; б – нагнетательного; в – эквивалентного нагнетательного; г – эквивалентного традиционного

Для нагнетательного эрлифта избыточное давление в воздухоотделителе составляет (Рисунок 3.7, б):

$$p_{вз} = \rho g \Delta H_{н}, \quad (3.10)$$

где $\Delta H_{н}$ – высота перепада нагнетательного эрлифта.

Высота перепада $\Delta H_{эН}$ эквивалентного нагнетательного эрлифта определяется из соотношения (Рисунок 3.7, в, Приложение А4).

$$\frac{p_{вз}}{\rho g h_{н}} = \frac{\Delta H_{эН}}{H + h_{н} + \Delta H_{эН}}, \quad (3.11)$$

откуда, с учетом (3.10):

$$\Delta H_{эН} = \frac{\Delta H_{н} (H_{н} - \Delta H_{н} + h_{н})}{h_{н} - \Delta H_{н}}. \quad (3.12)$$

Относительные погружения смесителей:

- эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$\alpha_{эН} = \frac{h_{н}}{H_{н} - \Delta H_{н} + \Delta H_{эН} + h_{н}}, \quad (3.13)$$

- эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.7 з)

$$\alpha_{эТ} = \frac{h_{н}}{H_{эТ} + h_{н}} = \frac{h_{н}}{H_{н} + h_{н}}. \quad (3.14)$$

Пренебрегая потерями давления сжатого воздуха между выходным сечением струйного аппарата и входным сечением смесителя эрлифта принимаем равными значения абсолютных давлений

$$p_c = p_{cm} = p_0 + \rho g h_n, \quad (3.15)$$

где p_c – абсолютное давление сжатого воздуха на выходе из воздухоструйного компрессора нагнетательной эрлифтной установки;

p_{cm} – абсолютное давление в смесителе нагнетательного эрлифта.

Удельный расход воздуха $q_{эн}$ эквивалентного нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.7, в) определяется по зависимостям (3.3)...(3.5) при $\alpha = \alpha_{эн}$, а удельный расход воздуха $q_{эт}$ эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.7, г) – по зависимостям (3.3)...(3.5) при $\alpha = \alpha_{эт}$.

Абсолютное давление инжектируемого потока струйного аппарата нагнетательной (Рисунок 3.7, б) и эквивалентной нагнетательной (Рисунок 3.7, в) эрлифтной установки

$$p_{нн} = p_0 + \rho g \Delta H_n. \quad (3.16)$$

Коэффициент инжекции u_n воздухоструйного компрессора нагнетательной (Рисунок 3.7, б) u_n и эквивалентной нагнетательной (Рисунок 3.7, в) $u_{эн} = u_n$ эрлифтной установки определяется для значений p_p , $p_{нн}$ и $p_{сн}$, а коэффициент инжекции воздухоструйного компрессора эквивалентной традиционной $u_{эт}$ эрлифтной установки (Рисунок 3.7, г) для значений p_p , $p_{н0}$ и $p_{сн}$.

Удельный расход рабочего воздуха (из пневмосети) по аналогии с (3.9) определяется зависимостями:

- для эквивалентной нагнетательной (Рисунок 3.7, в) эрлифтной установки

$$q_{\text{рэн}} = \frac{q_{\text{эн}}}{1 + u_{\text{эн}}}, \quad (3.17)$$

- для эквивалентной традиционной (Рисунок 3.7 з) эрлифтной установки

$$q_{\text{рэт}} = \frac{q_{\text{эт}}}{1 + u_{\text{эт}}}. \quad (3.18)$$

Сравнение энергетической эффективности работы нагнетательного эрлифта и эрлифта традиционной технологической схемы выполнено на основе анализа рабочих процессов эквивалентного нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.7, в) и эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.7, з) при одинаковых геометрических погружениях смесителей $h_{\text{н}} = \text{idem}$ и одинаковых высотах подъема транспортируемой жидкости $H_{\text{н}}$, которые обеспечиваются длинами подъемных труб выше уровня свободной поверхности жидкости в зумпфах:

- для эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$H_{\text{эн}} = H + \Delta H_{\text{эн}} = H_{\text{н}} - \Delta H_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}}; \quad (3.19)$$

- для эквивалентного традиционного эрлифта

$$H_{\text{эт}} = H + \Delta H_{\text{н}} = H_{\text{н}}. \quad (3.20)$$

Для эквивалентного нагнетательного (Рисунок 3.7, в) и эквивалентного традиционного (Рисунок 3.7, з) эрлифтов с использованием выражений (3.3)...(3.5), (3.10)...(3.16) и компьютерной программы для вычисления коэффициента инжекции газоструйного компрессора u в диапазонах значений $p_{\text{р}} = 0,4 \dots 0,8$ МПа, $H_{\text{н}} = 1 \dots 10$ м, $\Delta H_{\text{н}} = 0,5 \dots 2,5$ м, $\alpha_{\text{н}} = 0,429 \dots 0,946$ определены

зависимости $q_{рэн}/q_{рэт} = f(h_n)$, $q_{рэн}/q_{рэт} = f(H_n)$, $q_{рэн}/q_{рэт} = f(\Delta H_n)$, $q_{рэн}/q_{рэт} = f(p_p)$

(Рисунок 3.8 – 3.10).

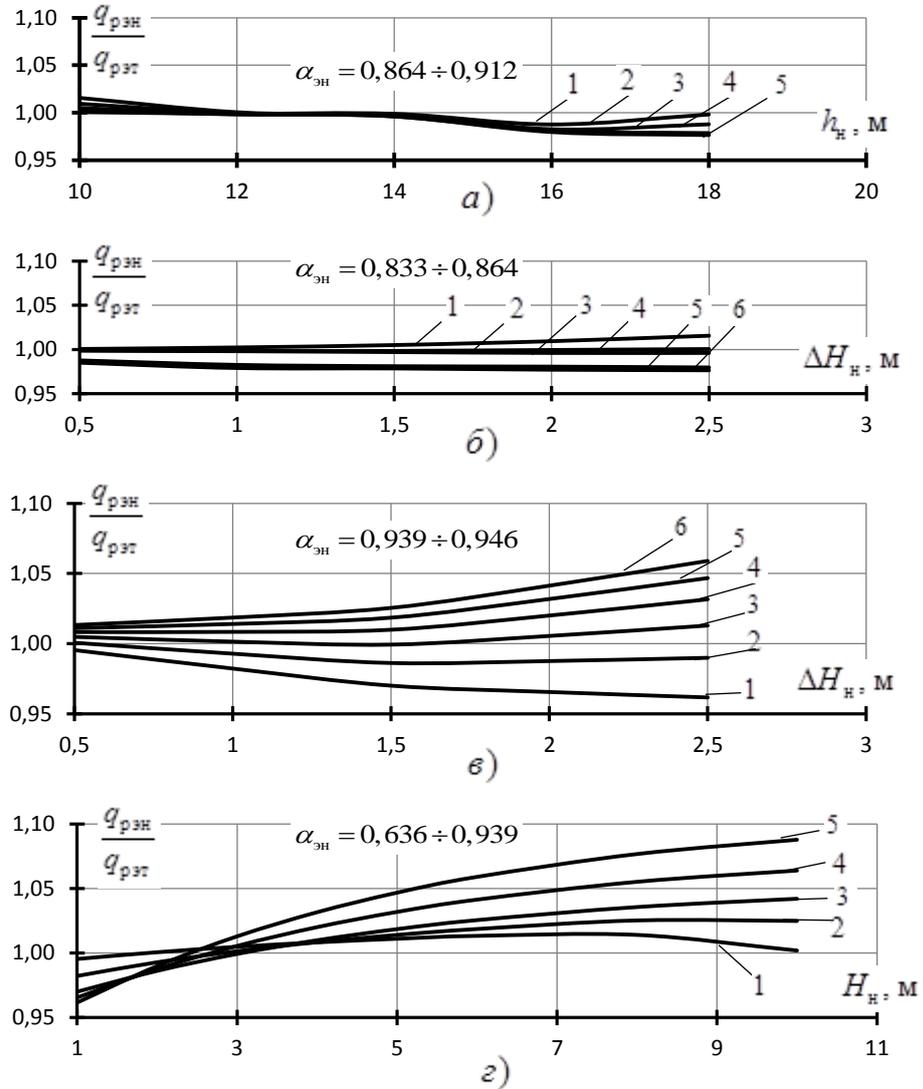


Рисунок 3.8 – Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{рэн}/q_{рэт}$ нагнетательного эрлифта при $p_p = 0,6$ МПа от:
 а – геометрического погружения смесителя h_n ;
 б, в – высоты переподъема ΔH_n ; г – высоты подъема H_n

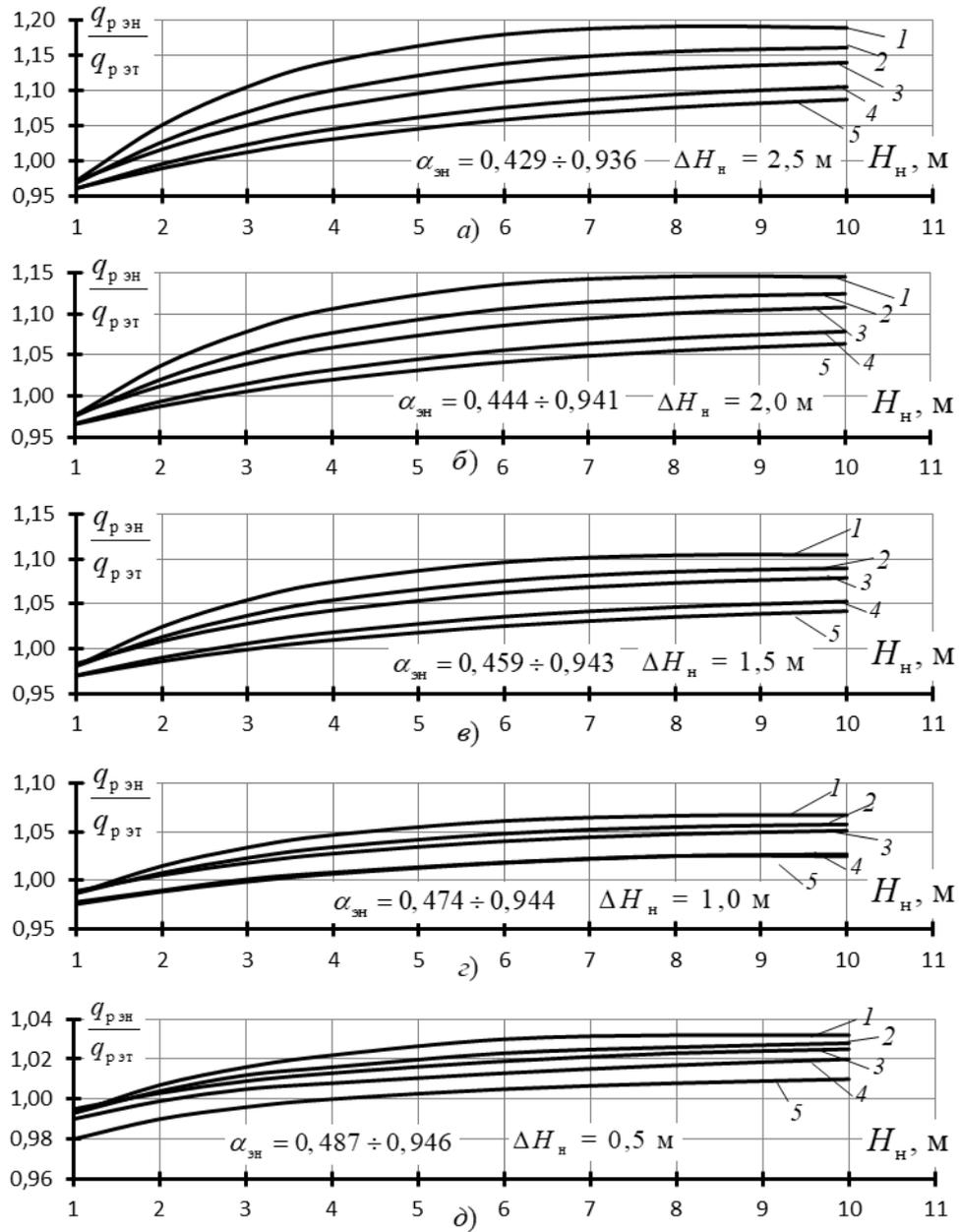


Рисунок 3.9 – Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха нагнетательного эрлифта от высоты подъема $q_{p\text{ эН}}/q_{p\text{ эт}} = f(H_{\text{Н}})$ при $p_p=0,6$ МПа, $\Delta H_{\text{Н}} = 0,5 \div 2,5$ м и $h_{\text{Н}}$: 1 – 10 м; 2 – 12 м; 3 – 14 м; 4 – 16 м; 5 – 18 м

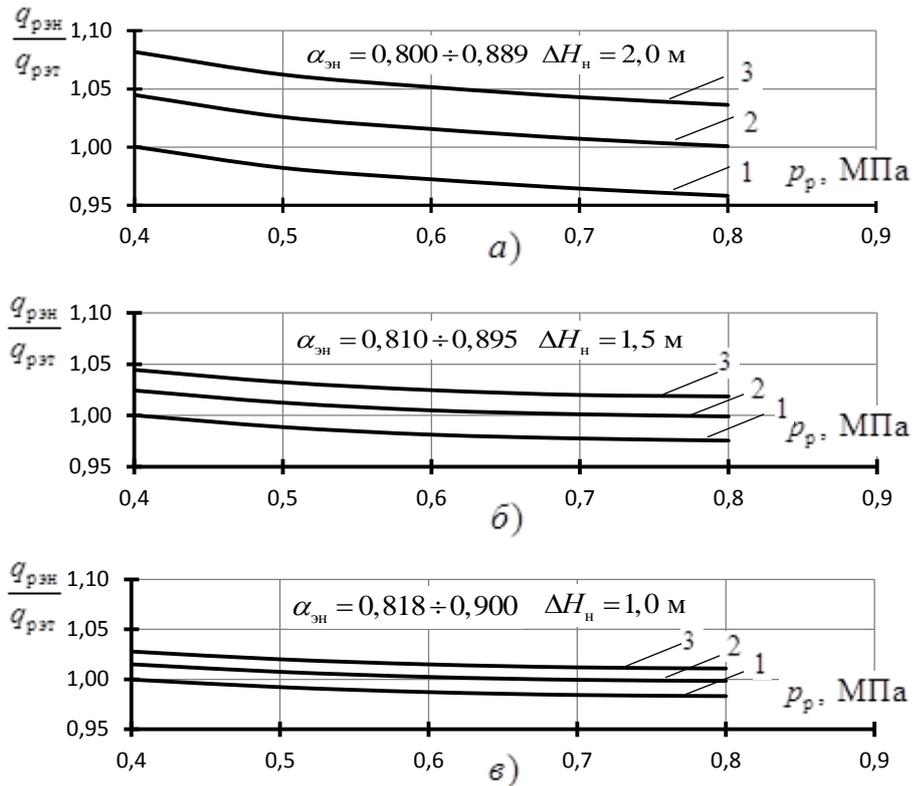


Рисунок 3.10 – Зависимости относительных удельных расходов рабочего воздуха $q_{pэж}/q_{pэт}$ нагнетательного эрлифта от абсолютного давления рабочего воздуха p_p при H_H : 1 – 1 м; 2 – 1,5 м; 3 – 2 м

На рисунке 3.8, а и 3.8, в ΔH_H : 1 – 0,5 м; 2 – 1 м; 3 – 1,5 м; 4 – 2 м; 5 – 2,5 м. На рисунке 3.8, б h_H : 1 – 10 м; 2 – 12 м; 3 – 14 м; 4 – 15 м; 5 – 16 м; 6 – 18 м. На рисунке 3.8, в H_H : 1 – 1 м; 2 – 2 м; 3 – 3 м; 4 – 4 м; 5 – 5 м; 6 – 6 м.

Как следует из полученных в результате расчетов и приведенных в качестве примеров зависимостей (Рисунок 3.8 – 3.10), для диапазонов значений давления рабочего воздуха $p_p = 0,4 \dots 0,8$ МПа, высоты подъема жидкости (гидросмеси) $H_H = 1 \dots 10$ м, относительного погружения смесителей $\alpha_H = 0,43 \dots 0,95$, высоты переподъема нагнетательного эрлифта $\Delta H_H = 0,5 \dots 2,5$ м удельный расход рабочего воздуха нагнетательного эрлифта $q_{pэж}$ отличается от удельного расхода рабочего воздуха традиционного эрлифта $q_{pэт}$ не более чем на $\pm 5 \dots 10$ % при прочих равных условиях, что доказывает практически равноценную энергоэффективность работы нагнетательного и традиционного эрлифтов с приведенными параметрами рабочих процессов при расширении области применения нагнетательных эрлифтных

установок с воздухоструйными компрессорами за счет возможности напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) от воздухоотделителя к потребителю.

3.2 Физическая модель и аналитический анализ рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями

3.2.1 Физическая модель рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями

В зависимости от индивидуальных газодинамических (расходных, энергетических) характеристик радиальных нагнетателей [87, с. 144, 88], утилизация энергии частично сжатого воздуха, подаваемого во всасывающий патрубок нагнетателя, для радиальных машин различного типоразмера в итоге может приводить к различной степени увеличения энергоэффективности работы всей нагнетательной эрлифтной установки в сравнении с эквивалентной установкой традиционной схемы.

Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем предполагает подвод частично сжатого воздуха от воздухоотделителя эрлифта во всасывающий патрубок нагнетателя.

Нагнетательная эрлифтная установка с радиальным нагнетателем [88, с. 11, 89, 90] (Рисунок 3.11) содержит эрлифт с подъемной трубой 1, в верхней части которой расположен герметичный воздухоотделитель 2 со сливной 3 и воздухоотводящей 4 трубами. Управление регулирующим клапаном 5 осуществляется по сигналу датчика уровня 6.

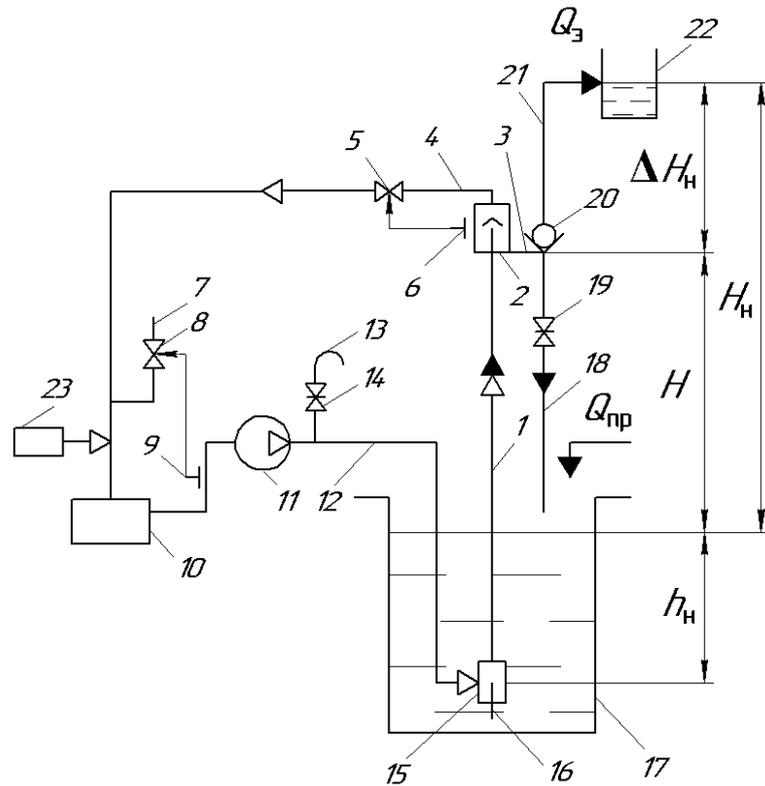


Рисунок 3.11 – Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем: 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель; 3 – сливная труба; 4 – воздухоотводящая труба; 5, 8 – регулирующие клапаны; 6 – датчик уровня; 7 – патрубок; 9 – датчик давления; 10 – влагоотделитель; 11 – радиальный нагнетатель; 12 – напорный воздухопровод; 13 – пусковой патрубок; 14, 19 – задвижка; 15 – смеситель; 16 – подающая труба; 17 – зумпф; 18 – сбросной трубопровод; 20 – обратный клапан; 21 – отводящий трубопровод; 22 – потребитель перекачиваемой жидкости; 23 – дополнительный источник сжатого воздуха, h_n – глубина погружения смесителя; H – высота подъема; ΔH_n – высота переподъема; H_n – высота подъема нагнетательного эрлифта

К воздухоотводящей трубе 4 подключен патрубок 7 с клапаном 8, положение запорно-регулирующего элемента которого задается управляющим датчиком давления 9. При открытом клапане 8 патрубок 7 обеспечивает соединение воздухоотводящей трубы 4 с атмосферой.

Воздухоотводящая труба 4 через влагоотделитель 10 присоединяется к всасывающему патрубку радиального нагнетателя 11. Напорный воздухопровод 12, оснащенный пусковым патрубком 13 с задвижкой 14, соединяет нагнетатель 11 со смесителем эрлифта 15 с подающей трубой 16.

Нижняя часть эрлифта расположена в зумпфе 17, куда направляется и перекачиваемая жидкость (гидросмесь) с расходом $Q_{\text{пр}}$.

Сбросной трубопровод 18 с задвижкой 19 подключен к сливной трубе 3. Обратный клапан 20 устанавливается на начальном участке отводящего трубопровода 21, обеспечивающего транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю 22. В рассматриваемом случае напор, компенсирующий требуемую высоту подъема жидкости (гидросмеси) после ее выхода из воздухоотделителя 2 и возникающие гидравлические потери, составляет величину $\Delta H_{\text{н}}$.

Ввод в работу нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем осуществляется в следующей последовательности.

При открытых клапане 8 и задвижке 14 запускается нагнетатель 11 – атмосферный воздух по патрубку 7 засасывается радиальной машиной, а по патрубку 13 – сбрасывается в атмосферу. Нагнетатель 11 выводится на стабильный режим работы.

В положении запорно-регулирующей арматуры задвижка 19 и клапан 5 – открыты, закрывается задвижка 14, и сжатый воздух по воздухопроводу 12 нагнетается в смеситель 15. Поступающая из зумпфа 17 через подающую трубу 16 жидкость (гидросмесь) смешивается в смесителе 15 со сжатым воздухом, образуя газожидкостную смесь (возможно – с включениями твердых частиц), которая по подъемной трубе 1 поднимается в воздухоотделитель 2. Выделившаяся из состава газожидкостной смеси жидкость (гидросмесь) по сливной трубе 3 и сбросному трубопроводу 18 возвращается в зумпф 17, а воздух из воздухоотделителя 2

удаляется по воздухоотводящей трубе 4. При открытом клапане 8 соотношения расходов воздуха по трубопроводам 4 и 7, всасываемого нагнетателем 11, определяются условиями параллельной работы этих трубопроводов. В таком положении запорно-регулирующей арматуры достигается устойчивая работа эрлифтной установки.

Для перевода эрлифтной установки в нагнетательный режим работы жидкость (гидросмесь) подается в зумпф 17, закрывается задвижка 19 и за счет частичного закрытия регулирующего клапана 5 и увеличения при этом его сопротивления обеспечивает давление в воздухоотделителе 2, соответствующее требуемому напору ΔH_n . Жидкость (гидросмесь) расходом $Q_э = Q_{пр}$ из воздухоотделителя 2 по сливной трубе 3, через обратный клапан 20 и дальше по отводящему трубопроводу 21 направляется потребителю 22.

Предотвращение затопления выходного сечения подъемной трубы 1 и возможного интенсивного влагуноса воздушным потоком, что может иметь место в нештатных режимах работы установки, обеспечивается регулированием давления в воздухоотделителе 2 клапаном 5 по сигналу датчика уровня 6. Так, при превышении уровня жидкости (гидросмеси) относительно заданного, проходное сечение клапана 5 по сигналу датчика 6 уменьшается, давление в воздухоотделителе 2 повышается. При этом, с одной стороны, увеличивается расход транспортируемой жидкости (гидросмеси) из воздухоотделителя 2 к потребителю 22, а с другой – уменьшается подача эрлифта по подъемной трубе 1. И первое, и второе препятствует затоплению выходного сечения подъемной трубы 1.

Обратный клапан 20 исключает движение жидкости (гидросмеси) от потребителя 22 в воздухоотделитель 2 после выключения эрлифтной установки и не допускает ее попадания в проточную часть нагнетателя 11.

Дополнительный источник сжатого воздуха 23 служит для компенсации уноса воздуха транспортируемой жидкостью.

Утилизация энергии сжатого воздуха, поступающего с избыточным давлением из воздухоотделителя 2 по воздухоотводящей трубе 4 во всасывающий

патрубок нагнетателя 11, реализуется согласованием работы регулирующих клапанов 5 и 8. При этом обеспечивается подача частично сжатого воздуха на вход нагнетателя 11 за счет максимально возможного закрытия проходного сечения клапана 8 (в штатном режиме работы установки – полное закрытие), при котором эрлифтная установка устойчиво работает в нагнетательном режиме. Такая организация схемы позволяет работать центробежному нагнетателю с повышенными значениями абсолютного давления сжатого воздуха и производительности при неизменной энергетической эффективности (Рисунок 3.11).

Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифтов традиционной, нагнетательной и эквивалентных схем установок позволяют обосновать правомерность принятой методики сравнения энергетической эффективности работы рассматриваемых газожидкостных подъемников (Рисунок. 3.12).

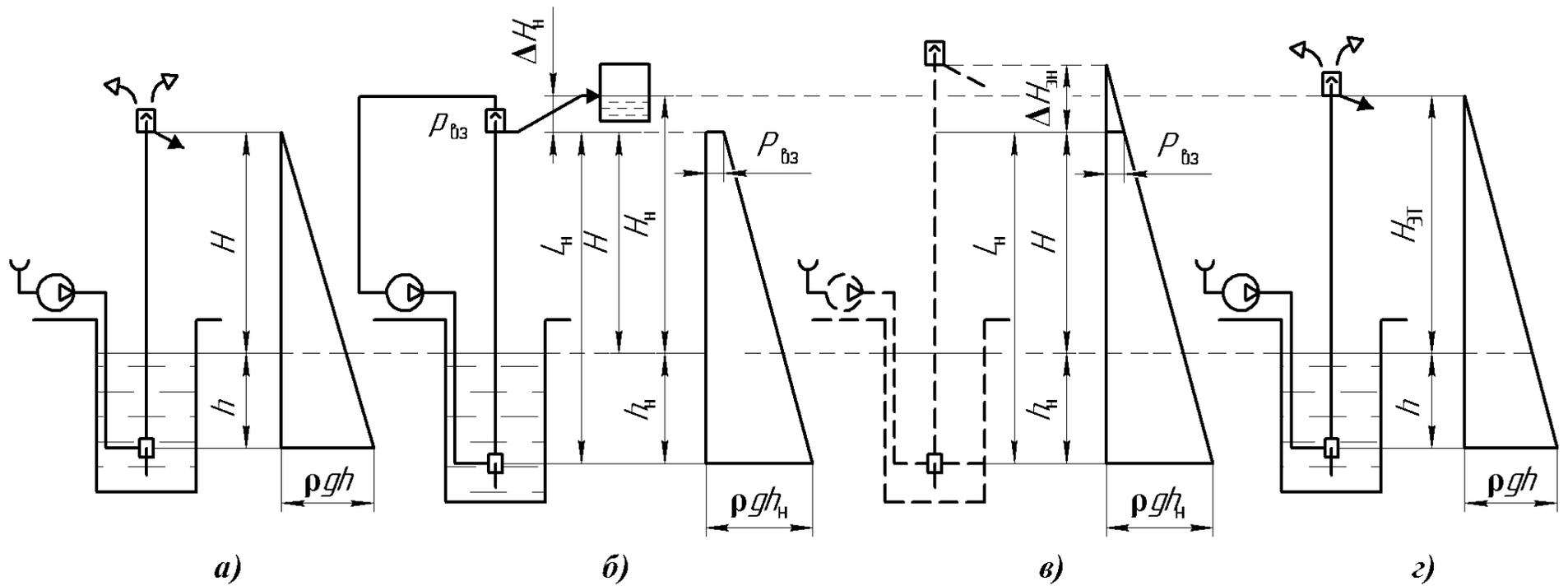


Рисунок 3.12 – Схемы эрлифтных установок с радиальным нагнетателем и эпюры давления в подъемных трубах эрлифтов:
a – традиционной технологической схемы, α_0 ; *б* – нагнетательного; *в* – эквивалентного нагнетательного, $\alpha_{Эн}$;
г – эквивалентного традиционного, $\alpha_{Эт}$ (α_0 , $\alpha_{Эн}$ и $\alpha_{Эт}$ – относительные погружения смесителя эрлифта соответствующей технологической схемы; h_n , h , – глубины погружения смесителя эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного эрлифтов соответственно)

Изменение газодинамических характеристик радиального нагнетателя при изменении давления всасываемого воздуха приведено на примере нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (Рисунок 3.13).

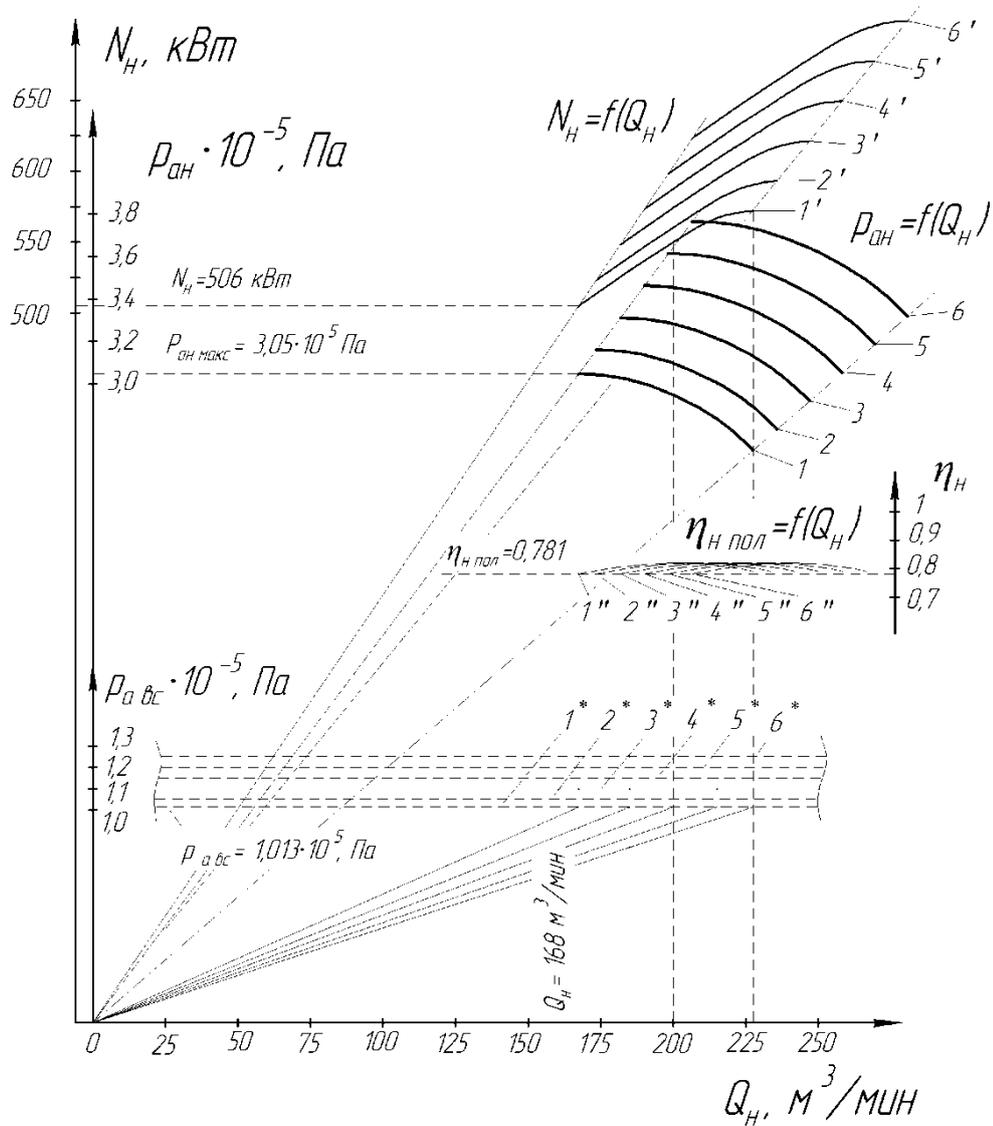


Рисунок 3.13 – Газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при абсолютных давлениях во всасывающем патрубке $p_{a вс} = (1,013 - 1,25) \cdot 10^5$ Па:
 1 – $1,013 \cdot 10^5$ Па; 2 – $1,05 \cdot 10^5$ Па; 3 – $1,1 \cdot 10^5$ Па; 4 – $1,15 \cdot 10^5$ Па; 5 – $1,2 \cdot 10^5$ Па;
 6 – $1,25 \cdot 10^5$ Па; 1 – 6 – $p_{aH} = f(Q_H)$; 1' – 6' – $N_H = f(Q_H)$, 1'' – 6'' – $\eta_H = f(Q_H)$;
 1* – 6* – линии постоянного абсолютного давления $p_{a вс}$

Используя методику, применяемую для построения характеристик центробежных машин при дросселировании на всасывании, [91] графическим методом построены газодинамические характеристики центробежного нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при давлении во всасывающей патрубке выше атмосферного, в диапазоне $p_{a\text{вс}} = (1,013-1,125) \cdot 10^5$ Па (ЦНВ 200/3 – центробежный воздушный нагнетатель, однокорпусной, одновальный, трехступенчатый).

Согласно заводских характеристик $p_{a\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$, $\eta_{\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$ и $N_{\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$ (Рисунок 3.13), нагнетатель ЦНВ 200/3,0 развивает максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{a\text{н макс}} = 3,05 \cdot 10^5$ Па при производительности $Q_{\text{н}} = 168$ м³/мин и потребляемой мощности двигателя $N_{\text{н}} = 506$ кВт, обеспечивая в этом режиме работы значение политропного КПД $\eta_{\text{н}} = 0,781$. Такие параметры работы нагнетателя имеют место при нормальных технических условиях на его входе (атмосферном давлении $p_{a\text{вс}} = p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, абсолютной температуре воздуха $T = 293$ К). Максимально возможная степень сжатия нагнетателя при этом $\varepsilon_{\text{макс}} = p_{a\text{н макс}}/p_0 = 3,05 \cdot 10^5/1,013 \cdot 10^5 = 3,01$.

Методика графического построения характеристик при давлении во всасывающей патрубке выше атмосферного имела несколько особенностей:

- заводские характеристики нагнетателя были разбиты на четыре части пятью точками, через которые проведены вертикальные прямые до оси производительности;

- были построены прямые, соединяющие каждую из этих точек с началом координат;

- построены горизонтальные отрезки прямых на вертикальной координате, соответствующей давлению во всасывающей патрубке нагнетателя ($l^* - b^* - p_{a\text{вс}} - \text{const}$);

- построены прямые, проходящие через начало координат, горизонтальный отрезок l^* и вертикальные прямые, разбивающие заводские характеристики. Данные прямые продлены до пересечения со всеми горизонтальными отрезками $l^* - b^*$;

- для получения горизонтальных координат характеристик нагнетателя для каждого из значений давления на всасе, построены вертикальные прямые, из точек пересечения прямых, проходящих через начало координат, и каждой соответствующей константы давления на всасе;

- для получения вертикальных координат характеристик нагнетателя для каждого из значений давления на всасе, выше упомянутые вертикальные прямые соединены с соответствующими наклонными отрезками, проведенными из начала координат.

Согласно графическому построению, повысив давление во всасывающем парубке до значения $p_{a\text{вз}} = 1,125 \cdot 10^5$ Па возможно добиться следующих параметров работы центробежного нагнетателя ЦНВ 200/3.0: $p_{a\text{н макс}} = 3,38 \cdot 10^5$ Па, $Q_{\text{н}} = 189$ м³/мин, $N_{\text{н}} = 561$ кВт при сохранении значений $\eta_{\text{н}} = 0,781$ и $\varepsilon_{\text{макс}} = 3,0$.

В составе общепромышленных эрлифтных установок целесообразно использовать ряд радиальных нагнетателей производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (г. Хабаровск, РФ, www.dalenergomash.ru), Lutos (Чехия, www.lutos.su) и Robuschi (Италия, www.robuschi.com) которые условно могут быть разделены на три классификационные группы – с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_{\text{н}} = 1,32 \div 1,65$ кгс/см² $[(1,29 \div 1,62) \cdot 10^5$ Па] и производительностью $Q_{\text{н}} = 40 \div 260$ м³/мин (0,667 ÷ 4,33 м³/с) (ЦНВ 60/1,4; ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,4; ЦНВ 100/1,6; ЦНВ 160/1,4; ЦНВ 160/1,6; ЦНВ 200/1,4; ЦНВ 200/1,6), с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_{\text{н}} = 1,57 \div 2,48$ кгс/см² $[(1,54 \div 2,43) \cdot 10^5$ Па] и производительностью $Q_{\text{н}} = 115 \div 890$ м³/мин (1,92 ÷ 14,8 м³/с) (RBS165, 175, 205, 225; ЦНВ 280/2,1; 360-21-1; 360-22-1; ЦНВ 750/2; DT100/552; DT120/1002; DT100/802) и с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_{\text{н}} = 2,73 \div 3,50$ кгс/см² $[(2,68 \div 3,43) \cdot 10^5$ Па] и производительностью $Q_{\text{н}} = 75 \div 226$ м³/мин (1,25 ÷ 3,77 м³/с) (ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 130/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3) [92, 93, 94, 95, 96, 97].

Для принятия обоснованных решений при проектировании нагнетательных эрлифтных установок необходимо иметь достоверные данные о технически и энергетически рациональных зонах применения таких установок с

воздухоснабжением от радиальных нагнетателей, представляющих каждую из вышеприведенных групп. До настоящего времени возможные зоны рационального использования нагнетательных эрлифтных установок с воздухоснабжением серийно производимыми радиальными нагнетателями не установлены.

Подробные описания схемы и работы нагнетательной эрлифтной установки (Рисунок 3.11), особенностей эпюр давления в подъемных трубах эрлифтов (Рисунок 3.12) и построения газодинамических характеристик радиальных нагнетателей при изменении давления всасываемого воздуха (Рисунок 3.13) на примере нагнетателя ЦНВ 200/3 приведены в [88, с. 13-14, 89, с. 25, 90, с. 26-27].

3.2.2 Аналитическое обоснование энергетической эффективности работы и рациональные области применения нагнетательной эрлифтной установки с радиальными нагнетателями

Анализ параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки рассмотрим на примере использования в качестве источника пневмоэнергии нагнетателя ЦНВ 200/3. Значения параметров нагнетателя ЦНВ 200/3 в диапазоне давлений во всасывающем патрубке $p_{\text{вс}} = (1,013 \div 1,250) \cdot 10^5$ Па (Таблица Б1) определены по газодинамическим характеристикам (Рисунок 3.13), а именно: $p_{\text{а н макс}}$ – максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха; $\varepsilon_{\text{макс}} = p_{\text{а н макс}}/p_0$ – максимально возможная степень сжатия нагнетателя ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па – атмосферное давление); $Q_{\text{н}}$, $\eta_{\text{н}}$ – соответственно производительность и КПД нагнетателя.

Возможное геометрическое погружение нагнетательного эрлифта

$$h_{\text{н}} = \frac{p_{\text{а н макс}} - p_0}{\rho \cdot g} \quad (3.21)$$

где ρ – плотность транспортируемой жидкости (гидросмеси) (как пример, расчеты выполнены для случая транспортирования воды, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$); g – ускорение свободного падения.

При использовании в составе эрлифтной установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и значении $p_{a \text{ н макс}} = 3,050 \cdot 10^5 \text{ Па}$ [давление во всасывающей патрубке нагнетателя равно атмосферному $p_{a \text{ вс}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$] геометрические погружения смесителей эрлифтов традиционной технологической схемы и нагнетательного равны между собой ($h = h_{\text{н}} = 20,8 \text{ м}$) (Рисунок 3.12, а, Таблица Б1).

Высота подъема эрлифта (Рисунок 3.12, а)

$$H = \frac{h(1 - \alpha_0)}{\alpha_0}, \quad (3.22)$$

где α_0 – начальное относительное погружение смесителя

Высота перепада эрлифта:

- нагнетательного (Рисунок 3.12, б)

$$\Delta H_{\text{н}} = \frac{p_{a \text{ в3}} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (3.23)$$

где $p_{a \text{ в3}}$ – абсолютное давление в воздухоотделителе;

- эквивалентного нагнетательного (Рисунок 3.12, в)

$$\Delta H_{\text{эн}} = \frac{L_{\text{н}} \cdot p_{\text{в3}}}{\rho \cdot g \cdot h_{\text{н}} - p_{\text{в3}}}, \quad (3.24)$$

где $L_{\text{н}} = h_{\text{н}} + H$ – длина подъемной трубы нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.12);

$p_{\text{в3}}$ – избыточное давление в воздухоотделителе, $p_{\text{в3}} = p_{a \text{ в3}} - p_0$.

Высота подъема нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.12, б)

$$H_{\text{н}} = H + \Delta H_{\text{н}}. \quad (3.25)$$

Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.12, в)

$$\alpha_{\text{эН}} = \frac{h_{\text{н}}}{L_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эН}}}, \quad (3.26)$$

где $h_{\text{н}}$ – геометрическое погружение смесителя нагнетательного эрлифта.

КПД нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.12, б)

$$\eta_{\text{эН}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{н}}}{q_{\text{н}} \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{\text{а н макс}}}{p_{\text{а в3}}}}. \quad (3.27)$$

Высота подъема эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.12, з)

$$H_{\text{эТ}} = H_{\text{н}} = H + \Delta H_{\text{н}}. \quad (3.28)$$

Относительное погружение эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.12, з)

$$\alpha_{\text{эТ}} = \frac{h}{H_{\text{эТ}} + h}. \quad (3.29)$$

КПД эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.12, з)

$$\eta_{\text{эт}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{эт}}}{q_{\text{эт}} \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{\text{а н макс}}}{p_0}}. \quad (3.30)$$

В (3.30) значение давления $p_{\text{а н макс}}$ неизменно и равно $3,05 \cdot 10^5$ Па.

Удельный расход воздуха

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}, \quad (3.31)$$

подача эрлифта

$$Q_{\text{э}} = \frac{Q_{\text{в}}}{q}, \quad (3.32)$$

КПД эрлифтной установки

$$\eta_{\text{эу}} = \eta_{\text{э}} \cdot \eta_{\text{н}}, \quad (3.33)$$

где $\eta_{\text{н}}$ – КПД радиального нагнетателя определяются по приведенным зависимостям как для нагнетательного эрлифта, так и для эрлифта традиционной конструкции при соответствующих значениях α , q , $Q_{\text{н}}$, $\eta_{\text{э}}$.

Вычисления были проведены по зависимостям (3.21) – (3.33) в диапазоне значений относительных погружений смесителя $\alpha_0 = 0,15 \div 0,90$ ($\Delta\alpha_0 = 0,05$). Как пример – результаты вычислений при начальном относительном погружении $\alpha_0 = 0,3$ приведены в таблице Б1.

Рекомендуемое [97, с. 52] относительное погружение эрлифтов традиционной конструкции составляет $0,15 \leq \alpha < 1$.

Повышение давления в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке нагнетателя ЦНВ 200/3) от атмосферного ($p_{\text{а вэ}}=p_{\text{а вс}}=1,013 \cdot 10^5$ Па) до избыточного ($p_{\text{а вэ}}=p_{\text{а вс}}=1,250 \cdot 10^5$ Па) обеспечивает увеличение относительного погружения смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта (Рисунок 3.12, в) $\alpha_{\text{эН}} = 0,300$ до

$\alpha_{\text{ЭН}} = 0,335$ при уменьшении относительного погружения смесителя эквивалентного традиционного эрлифта (Рисунок 3.12, *з*) от $\alpha_{\text{ЭТ}} = 0,300$ до $\alpha_{\text{ЭТ}} = 0,290$ при начальном относительном погружении смесителя эрлифта традиционной технологической схемы $\alpha_0 = 0,3$ (Рисунок 3.12, *а*, 3.14, 3.15).

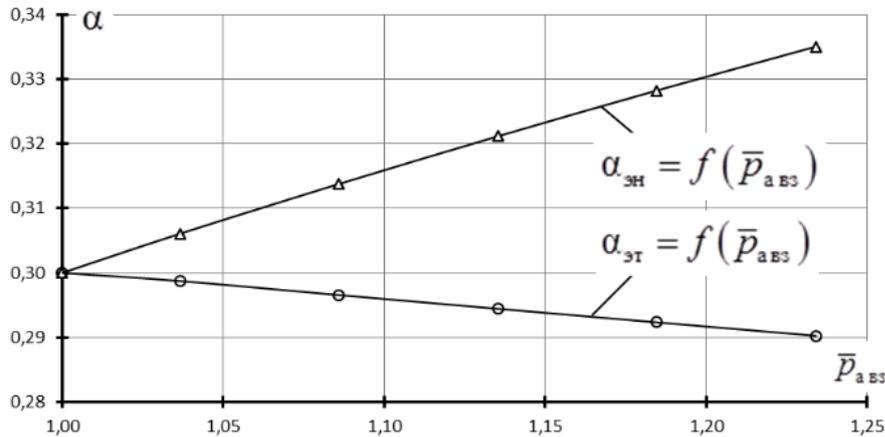


Рисунок 3.14 – Зависимости относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе ($\bar{p}_{\text{авз}} = p_{\text{авз}} / p_0$) при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и $\alpha_0 = 0,3$

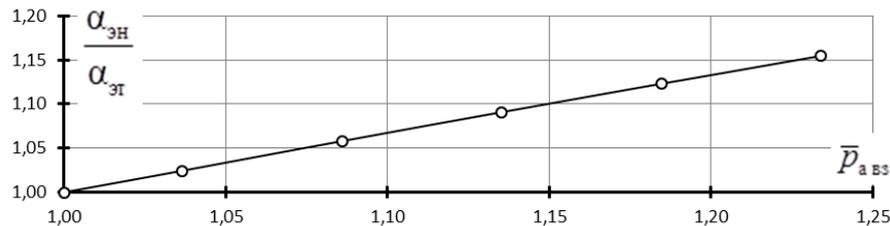


Рисунок 3.15 – Зависимость отношения относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе $\alpha_{\text{ЭН}} / \alpha_{\text{ЭТ}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$ ($\bar{p}_{\text{авз}} = p_{\text{авз}} / p_0$) при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и $\alpha_0 = 0,3$

Объясняется это преимущественным влиянием на величину $\alpha_{\text{ЭН}}$ интенсивности увеличения возможного геометрического погружения $h_{\text{н}}$, (Таблица Б1) нагнетательного эрлифта и интенсивности влияния на величину $\alpha_{\text{ЭТ}}$ увеличения высоты подъема $H_{\text{ЭТ}}$ при постоянном значении h эквивалентного

традиционного эрлифта в условиях роста давления в воздухоотделителе в диапазоне $p_{a\text{вз}} = (1,013 \div 1,250) \cdot 10^5$ Па.

Изложенная аналитическая методика исследования параметров рабочего процесса эрлифтных установок, содержащаяся также в источниках [98, 99, 100, 101], позволила получить зависимости КПД нагнетательного (3.34) и эквивалентного традиционного (3.35) эрлифтов от начального относительного погружения смесителя α_0 (источник пневмоэнергии ЦНВ 200/3, давление во всасывающем патрубке $p_{a\text{вс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па) (Рисунок 3.16).

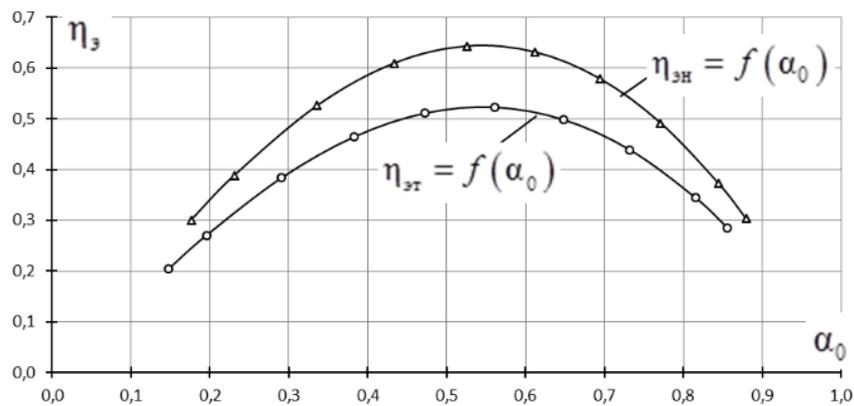


Рисунок 3.16 – Зависимости КПД нагнетательного $\eta_{3n} = f(\alpha_0)$ и эквивалентного традиционного $\eta_{3t} = f(\alpha_0)$ эрлифтов от начального относительного погружения смесителя (источник пневмоэнергии ЦНВ 200/3, давление во всасывающем патрубке $p_{a\text{вс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па)

Уравнения регрессии правомерны при использовании в составе эрлифтных установок нагнетателя ЦНВ 200/3,0, давлении во всасывающем патрубке $p_{a\text{вс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па и начальном относительном погружении смесителей $0,2 \leq \alpha_0 \leq 0,85$.

$$\eta_{3t} = -0,0447 + 1,86\alpha_0 - 1,13\alpha_0^2 - 0,701\alpha_0^3; \quad (3.34)$$

$$\eta_{3n} = -0,0649 + 2,37\alpha_0 - 1,53\alpha_0^2 - 0,782\alpha_0^3. \quad (3.35)$$

Адекватность уравнений (3.34), (3.35) подтверждена с использованием критерия Фишера [102].

Уравнения, аналогичные (3.34) и (3.35), позволили получить зависимости относительного КПД нагнетательного эрлифта от начального относительного погружения смесителя $\bar{\eta}_{\text{ЭН}} = f(\alpha_0)$ ($\bar{\eta}_{\text{ЭН}} = \eta_{\text{ЭН}}/\eta_{\text{ЭТ}}$) для эрлифтных установок, в составе которых в качестве источников пневмоэнергии используются нагнетатели ЦНВ 60/1,6, ЦНВ 100/1,6, 360-22-1 и ЦНВ 80/3,2 (Рисунок 3.17).

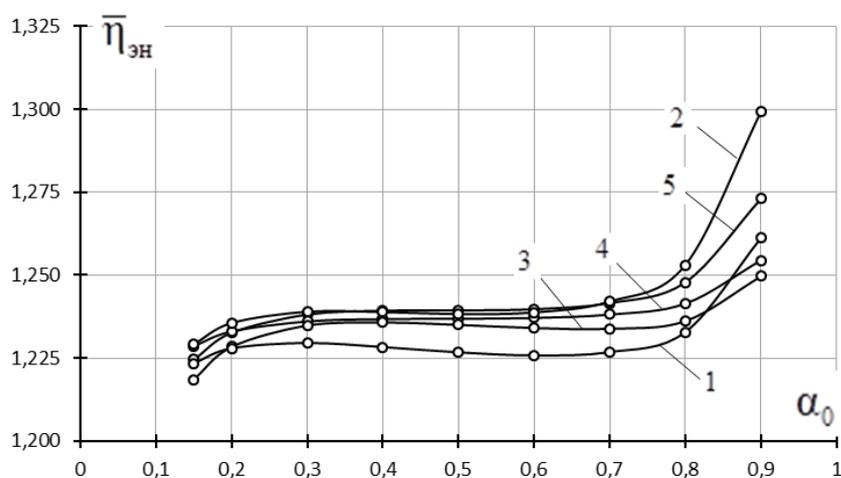


Рисунок 3.17 – Зависимости относительных КПД нагнетательных эрлифтов от начального относительного погружения смесителя $\bar{\eta}_{\text{ЭН}} = f(\alpha_0)$ с радиальными нагнетателями: 1 – ЦНВ 60/1,6; 2 – ЦНВ 100/1,6; 3 – 360-22-1; 4 – ЦНВ 80/3,2; 5 – ЦНВ 200/3

Для всех вариантов эрлифтных установок принято $p_{\text{авс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па. Таким образом, энергоэффективность работы нагнетательного эрлифта в сравнении с традиционным увеличивается для всего ряда приведенных радиальных нагнетателей во всем исследуемом диапазоне начальных относительных погружений смесителя ($0,15 \leq \alpha_0 \leq 0,90$). Так, при $0,15 \leq \alpha_0 \leq 0,80$ наблюдается увеличение энергоэффективности применения нагнетательного эрлифта на $21,9 \div 25,3$ %, а при $\alpha_0 > 0,8$ имеет место более интенсивное возрастание энергоэффективности его работы: с нагнетателем ЦНВ 60/1,6 – 26,1%, ЦНВ 100/1,6

– 29,9 %, 360-22-1 – 25,0 %, ЦНВ 80/3,2 – 25,4 % и ЦНВ 200/3 – 27,3 % (Таблица Б2, Б3).

Зависимости относительного КПД нагнетательного эрлифта от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{\eta}_{\text{эн}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$ ($\bar{p}_{\text{авз}} = p_{\text{авз}} / p_0$) позволили установить, что максимальные значения относительного КПД при граничном значении $\bar{p}_{\text{авз}} = 1,234$ достигают: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,27; ЦНВ 100/1,6 – 1,28; 360-22-1 – 1,33; ЦНВ 80/3,2 – 1,34 и ЦНВ 200/3 – 1,34 (Рисунок 3.18).

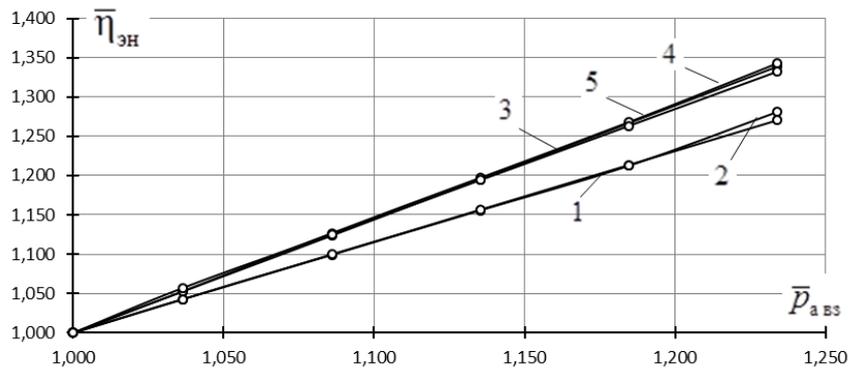


Рисунок 3.18 – Зависимости относительных КПД нагнетательных эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{\eta}_{\text{эн}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$ с радиальными нагнетателями: 1 – с ЦНВ 60/1,6; 2 – с ЦНВ 100/1,6; 3 – с 360-22-1; 4 – с ЦНВ 80/3,2; 5 – с ЦНВ 200/3 при $\alpha_0 = 0,3$

Получены также зависимости относительной высоты подъема $\bar{H}_{\text{эн}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$, где $\bar{H}_{\text{эн}} = H_{\text{н}} / H$ (Рисунок 3.19) и относительной подачи $\bar{Q}_{\text{эн}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$, где $\bar{Q}_{\text{эн}} = Q_{\text{эн}} / Q_{\text{эт}}$ (Рисунок 3.20) нагнетательного эрлифта от относительного давления в воздухоотделителе.

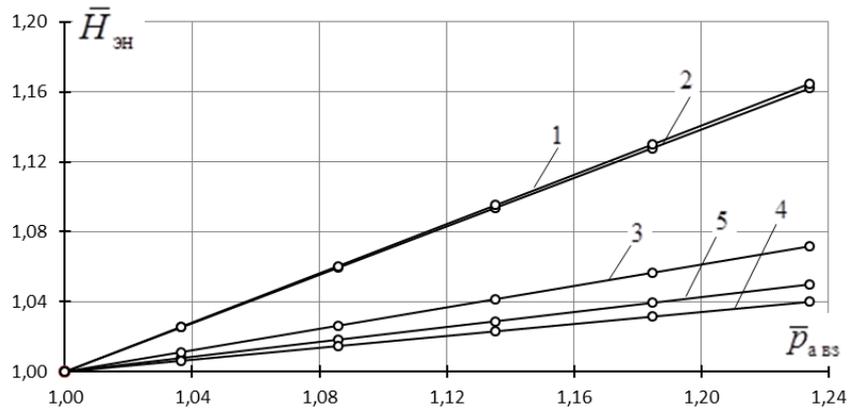


Рисунок 3.19 – Зависимости относительных высот подъема нагнетательных эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{H}_{эН} = f(\bar{p}_{авз})$ с радиальными нагнетателями: 1 – с ЦНВ 60/1,6; 2 – с ЦНВ 100/1,6; 3 – с 360-22-1; 4 – с ЦНВ 80/3,2; 5 – с ЦНВ 200/3 при $\alpha_0 = 0,3$

Из полученных результатов следует, что максимальные значения относительных высот подъема нагнетательных эрлифтов при граничном значении $\bar{p}_{авз} = 1,234$ достигают: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,17; ЦНВ 100/1,6 – 1,16; 360-22-1 – 1,07; ЦНВ 80/3,2 – 1,04 и ЦНВ 200/3 – 1,05 (Рисунок 3.19).

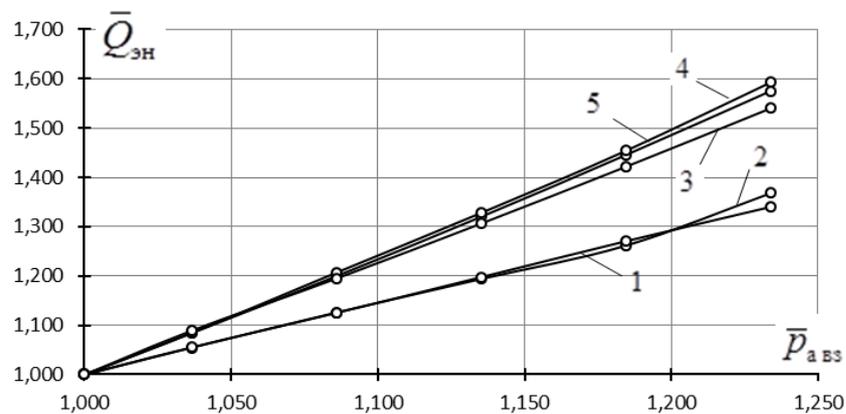


Рисунок 3.20 – Зависимости относительных подач нагнетательных эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{Q}_{эН} = f(\bar{p}_{авз})$ с радиальными нагнетателями: 1 – с ЦНВ 60/1,6; 2 – с ЦНВ 100/1,6; 3 – с 360-22-1; 4 – с ЦНВ 80/3,2; 5 – с ЦНВ 200/3 при $\alpha_0 = 0,3$

Максимальные значения относительных подач нагнетательных эрлифтов составляют: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,34; ЦНВ 100/1,6 – 1,37; 360-22-1 – 1,54; ЦНВ 80/3,2 – 1,59 и ЦНВ 200/3 – 1,58 (Рисунок 3.20).

Увеличение высоты подъема нагнетательного эрлифта $H_{\text{н}}=H+\Delta H_{\text{н}}$ (Рисунок 3.12, б) при росте давления в воздухоотделителе $p_{\text{авз}}$ обеспечивается увеличением высоты переподъема нагнетательного эрлифта $\Delta H_{\text{н}}$, которая соответствует значению гидростатического давления в воздухоотделителе.

Увеличение энергоэффективности работы нагнетательного эрлифта в сравнении с эрлифтом традиционной конструкции объясняется особенностью зависимостей $\alpha_{\text{эн}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$, $\alpha_{\text{эт}} = f(\bar{p}_{\text{авз}})$. Вид данных зависимостей, указывающих на превышение относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{\text{эн}}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{\text{эт}}$ в рассмотренном диапазоне значений $\bar{p}_{\text{авз}}$, характерен для всех нагнетателей ЦНВ 60/1,6, ЦНВ 100/1,6, ЦНВ 200/3, 360-22-1, ЦНВ 80/3,2, принятых к анализу. Параметры основных общепромышленных радиальных нагнетателей приведены в таблице Б4.

Однако кривая превышения относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{\text{эн}}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{\text{эт}}$ монотонно убывает при увеличении начального относительного погружения эрлифтов α_0 . ($\alpha_{\text{эн}}/\alpha_{\text{эт}}=1,192$ при $\alpha_0=0,15$; $\alpha_{\text{эн}}/\alpha_{\text{эт}}=1,036$ при $\alpha_0=0,90$) (Рисунок 3.21).

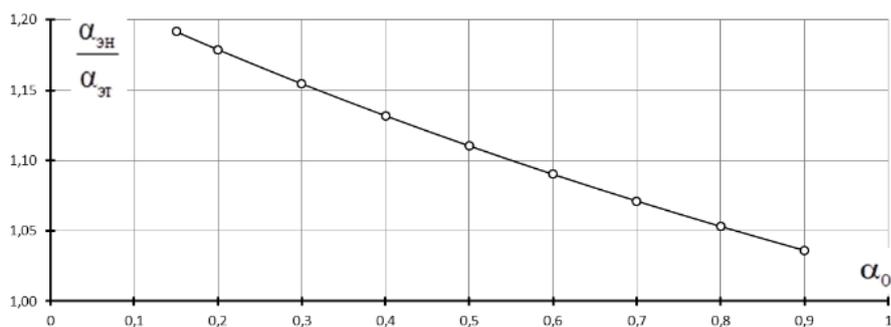


Рисунок 3.21 – Зависимость отношения относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от начального относительного погружения смесителя при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 с $\bar{p}_{авз} = 1,234$

Превышение относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эН}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эТ}$ (что обуславливает увеличение энергоэффективности) объясняется значительным увеличением глубины погружения h_n (на 35,1 %) и увеличением высоты подъема H_T на величину ΔH_n (на 5 %) (Рисунок 3.12, б) при увеличении относительного давления в воздухоотделителе до величины $\bar{p}_{авз} = 1,234$ (при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3).

Используемая аналитическая методика анализа параметров позволила построить диаграмму максимальных значений: КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эТ}$, КПД нагнетательного эрлифта $\eta_{эН}$, КПД эквивалентной традиционной эрлифтной установки $\eta_{эУТ}$ и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эУН}$ для ряда радиальных нагнетателей при абсолютном давлении во всасывающей патрубке нагнетателя $p_{авз} = p_{авс} = 1,250 \cdot 10^5$ Па (Рисунок 3.22). Построена также диаграмма относительных значений КПД $\bar{\eta}_{эН}$, относительных подач $\bar{Q}_{эН}$ и относительных высот подъема $\bar{H}_{эН}$ нагнетательного эрлифта (при $\alpha_0 = 0,3$) для исследуемого ряда нагнетателей (Рисунок 3.23).

При вычислении безразмерных величин $\bar{\eta}_{эН}$ и $\bar{Q}_{эН}$ в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров работы эквивалентной схемы традиционного эрлифта (Рисунок 3.12, з).

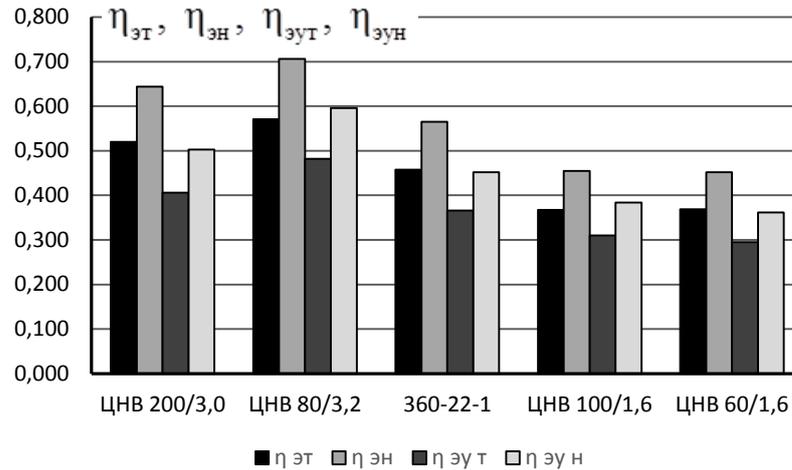


Рисунок 3.22 – Диаграмма максимальных значений КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эт}$, КПД нагнетательного эрлифта $\eta_{эн}$, КПД эквивалентной традиционной эрлифтной установки $\eta_{эут}$ и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эун}$ для ряда радиальных нагнетателей при $p_{a\text{ в3}}=p_{a\text{ вс}}=1,250 \cdot 10^5$ Па

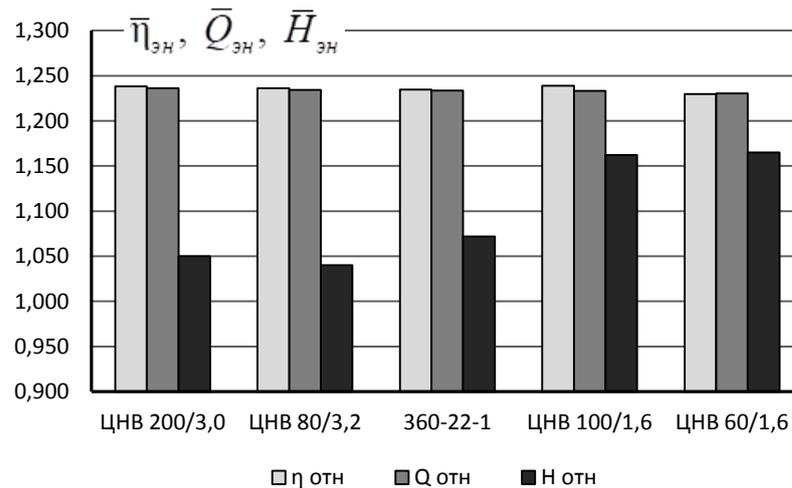


Рисунок 3.23 – Диаграмма относительных значений КПД, относительных подач и относительных высот подъема нагнетательного эрлифта для ряда радиальных нагнетателей при $p_{a\text{ в3}}=p_{a\text{ вс}}=1,250 \cdot 10^5$ Па

Для рассматриваемых условий КПД нагнетательного эрлифта – в диапазоне $0,452 \leq \eta_{эн} \leq 0,706$, КПД эквивалентной эрлифтной установки традиционной конструкции – в диапазоне $0,295 \leq \eta_{эут} \leq 0,482$, КПД нагнетательной эрлифтной установки – в диапазоне $0,362 \leq \eta_{эун} \leq 0,596$ (Рисунок 3.22).

Из диаграммы (Рисунок 3.23) следует, что при использовании рассматриваемого ряда нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных

установок значения относительного КПД находятся в диапазоне $1,23 \geq \bar{\eta}_{\text{ЭН}} \leq 1,24$, значения относительной подачи – в диапазоне $1,23 \leq \bar{Q}_{\text{ЭН}} \leq 1,24$, значения относительной высоты подъема – в диапазоне $1,04 \leq \bar{H}_{\text{ЭН}} \leq 1,17$ при абсолютном давлении во всасывающей патрубке нагнетателя $p_{\text{а в3}} = p_{\text{а вс}} = 1,250 \cdot 10^5$ Па и прочих равных условиях.

Увеличение подачи нагнетательного эрлифта $Q_{\text{ЭН}}$ в сравнении с подачей эрлифта традиционной конструкции $Q_{\text{ЭТ}}$ объясняется превышением относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{\text{ЭН}}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{\text{ЭТ}}$ при повышенном давлении в воздухоотделителе (Рисунок 3.14, 3.15) при прочих равных условиях.

Результаты анализа работы эрлифтных установок традиционной и нагнетательной конструкций при использовании в качестве источников пневмоэнергии рассматриваемого ряда радиальных нагнетателей позволили установить условия максимальной энергоэффективности работы таких установок при максимально возможных значениях высоты подъема H , подачи эрлифта Q_3 и геометрического погружения смесителя h (Таблица Б2, Б3).

В качестве примера рассмотрим методику анализа параметров эрлифтной установки при использовании в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3. При анализе работы установки примем допущение об отсутствии потерь давления в пневмопроводе между нагнетателем и эрлифтом при расходе воздуха $Q_{\text{в}}$ и равенстве избыточного давления, развиваемого нагнетателем, гидростатическому давлению $p_{\text{г.с.}}$ геометрического погружения смесителя h . Пренебрегая гидравлическими потерями в воздухоотводящей трубе 4 (Рисунок 3.11), принимаем, что давление частично сжатого воздуха на входе в нагнетатель 11 $p_{\text{вс}}$ равно давлению в воздухоотделителе 2, то есть $p_{\text{а в3}} = p_{\text{а вс}}$. Максимальное значения абсолютного давления на входе в нагнетатель $p_{\text{а вс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па принято исходя из допустимого значения мощности электродвигателя нагнетателя, которое, при данном давлении у всасывающей патрубка, не превышает номинальное значение мощности электродвигателя (Рисунок 3.13). Таким образом, при работе эрлифтной

установки в нагнетательном режиме используется резерв мощности электродвигателя центробежного нагнетателя.

Согласно заводских характеристик $p_{а н} = f(Q_n)$ и $\eta_n = f(Q_n)$, нагнетатель ЦНВ 200/3 развивает максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{а н макс} = 3,05 \cdot 10^5$ Па при производительности $Q_n = 168$ м³/мин, обеспечивая в этом режиме работы значение КПД $\eta_n = 0,781$. Такие параметры работы нагнетателя имеют место при нормальных технических условиях на его входе, то есть атмосферном давлении во всасывающей патрубке $p_{а вс} = p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па ($p_{а вс}$ - абсолютное давление во всасывающей трубке, p_0 - атмосферное давление) и абсолютной температуре воздуха $T = 293$ К. Максимально возможная степень сжатия нагнетателя при этом $\varepsilon_{макс} = p_{а н макс}/p_0 = 3,05 \cdot 10^5/1,013 \cdot 10^5 = 3,01$.

При транспортировании воды максимально возможное геометрическое погружение эрлифта составит

$$h_{макс} = \frac{p_{а н макс} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (3.36)$$

где ρ – плотность воды, $\rho = 1000$ кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

Тогда из (3.36)

$$h_{макс} = \frac{(3,05 - 1,013) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 20,8 \text{ м.}$$

На основании ранее проведенных экспериментальных исследований и опыта работы эрлифтных установок установлено, что устойчивый режим работы эрлифта традиционной конструкции сохраняется при значении относительного погружения $\alpha \geq 0,15$ до $\alpha \rightarrow 1$.

Выполним анализ работы нагнетательной эрлифтной установки в диапазоне относительных погружений $0,15 \leq \alpha \leq 0,95$. Для рассмотрения методики анализа работы установки, в качестве примера, примем значение относительного погружения $\alpha = 0,3$.

При заданных максимально возможном геометрическом $h_{\text{макс}} = 20,8$ м и относительном $\alpha = 0,3$ погружениях эрлифта, высота его подъема составит

$$H = \frac{h(1-\alpha)}{\alpha} = \frac{20,8(1-0,3)}{0,3} = 48,5 \text{ м.} \quad (3.37)$$

Общая длина подъемной трубы эрлифта составит (Рисунок 3.12, а)

$$L = H + h_{\text{макс}}, \quad (3.38)$$

что для рассматриваемого случая составит $L = 48,5 + 20,8 = 69,3$ м.

Отнеся рассматриваемый эрлифт к классу коротких, в соответствии с рекомендациями [49, с. 152], удельный расход воздуха

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}, \quad (3.39)$$

откуда при $\alpha = 0,3$ объемное количество воздуха, необходимое для транспортирования единицы объема жидкости (удельный расход воздуха) $q = 10,8$.

Коэффициент полезного действия эрлифта

$$\eta_3 = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{\text{а см}}}{p_0}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{\text{а н макс}}}{p_0}}, \quad (3.40)$$

где $p_{\text{а см}}$ - абсолютное давление в смесителе; принимаем его равным $p_{\text{а см}} = p_{\text{а н макс}}$.

Тогда в соответствии с (3.40)

$$\eta_э = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 48,5}{10,8 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{3,05 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5}} = 0,393.$$

КПД эрлифтной установки

$$\eta_{эу} = \eta_э \cdot \eta_н, \quad (3.41)$$

значение которого для рассматриваемого случая $\eta_{эу} = 0,393 \cdot 0,781 = 0,307$.

Подача эрлифта

$$Q_э = \frac{60Q_в}{q}, \quad (3.42)$$

откуда $Q_э = 60 \cdot 168 / 10,8 = 933 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Рассмотрим работу эрлифтной установки в нагнетательном режиме с тем же нагнетателем ЦНВ 200/3 в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{а\text{вз}} = (1,013 \div 1,25) \cdot 10^5 \text{ Па}$ (Рисунок 3.12, б).

Повысив давление в воздухоотделителе до значения $p_{а\text{вз}} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$ возможно добиться следующих изменений параметров работы эрлифтной установки:

а) увеличить высоту подъема эрлифта на величину

$$\Delta H_н = \frac{p_{а\text{вз}} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (3.43)$$

которая для конкретных условий будет иметь значение

$$\Delta H_{\text{н}} = \frac{(1,25 - 1,013) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 2,42 \text{ м};$$

б) обеспечить работу центробежного нагнетателя ЦНВ 200/3 с параметрами:
 $p_{\text{а н макс}} = 3,77 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $Q_{\text{н}} = 208 \text{ м}^3/\text{мин}$; $\eta_{\text{н}} = 0,781$; $\varepsilon_{\text{макс}} = 3,01$;

в) обеспечить значение геометрического погружения смесителя

$$h_{\text{н}} = \frac{p_{\text{ан.макс}} - p_0}{\rho \cdot g} = \frac{(3,77 - 1,013) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 28,1 \text{ м}. \quad (3.44)$$

Эквивалентная нагнетательная схема эрлифтной установки представлена на рисунке 3.12, в. Увеличение давления в воздухоотделителе примем равноценным увеличению высоты подъема традиционного эрлифта на величину $\Delta H_{\text{эН}}$.

Вышесказанное выразим пропорцией

$$\frac{\Delta H_{\text{эН}}}{L_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эН}}} = \frac{p_{\text{а в3}} - p_0}{\rho \cdot g \cdot h_{\text{н}}} = \frac{p_{\text{в3}}}{\rho \cdot g \cdot h_{\text{н}}}, \quad (3.45)$$

при этом избыточное давление в воздухоотделителе

$$p_{\text{в3}} = p_{\text{а в3}} - p_0, \quad (3.46)$$

что для данных условий имеет значение

$$p_{\text{в3}} = (1,25 - 1,013 \cdot 10^5) = 0,237 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Исходя из (3.45), справедливо соотношение

$$\Delta H_{\text{эН}} \cdot \rho \cdot g \cdot h_{\text{н}} = (L_{\text{н}} + \Delta H_{\text{т}}) \cdot p_{\text{в3}},$$

откуда высота переподъема традиционного эрлифта

$$\Delta H_{\text{эН}} = \frac{L_{\text{н}} \cdot p_{\text{в3}}}{\rho \cdot g \cdot h_{\text{н}} - p_{\text{в3}}}, \quad (3.47)$$

которая для данных условий имеет значение

$$\Delta H_{\text{эн}} = \frac{72,6 \cdot 0,237 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81 \cdot 28,1 - 0,237 \cdot 10^5} = 7,21 \text{ м.}$$

Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта, в этом случае

$$\alpha_{\text{эн}} = \frac{h_{\text{н}}}{L_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эн}}}, \quad (3.48)$$

значение которого при $h_{\text{н}} = 28,1$ м, $L_{\text{н}} = 72,6$ м и $\Delta H_{\text{эн}} = 7,21$ м составляет $\alpha_{\text{эн}} = 0,335$, а удельный расход воздуха в соответствии с (3.39) – $q_{\text{эн}} = 8,5$.

Высота подъема нагнетательного эрлифта от уровня свободной поверхности перекачиваемой жидкости (гидросмеси) в зумпфе установки

$$H_{\text{н}} = H + \Delta H_{\text{н}}. \quad (3.49)$$

Для рассматриваемого случая, в соответствие с (3.49), $H_{\text{н}} = 48,5 + 2,42 = 50,92$ м.

КПД нагнетательного эрлифта

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{н}}}{q_{\text{н}} \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{\text{а н макс}}}{p_0}}, \quad (3.50)$$

что составляет

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 50,92}{8,5 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{3,77 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5}} = 0,441.$$

КПД эрлифтной нагнетательной установки в соответствии с (3.41) - $\eta_{\text{эу н}} = 0,441 \cdot 0,781 = 0,384$. Подача эрлифта, согласно (3.42) - $Q_{\text{э н}} = 60 \cdot 208 / 8,5 = 1468 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,408 \text{ м}^3/\text{с}$).

Обеспечить высоту подъема традиционным эрлифтом $H_{\text{эт}} = H + \Delta H_{\text{н}} = 48,5 + 2,42 = 50,92 \text{ м}$ с нагнетателем ЦНВ 200/3 (Рисунок 3.12, з) возможно, в соответствие с вышеприведенными зависимостями со следующими параметрами работы соответственно: $h = 20,8 \text{ м}$; $\alpha_{\text{эт}} = 0,290$; $q_{\text{эт}} = 11,7$; $\eta_{\text{эт}} = 0,383$; $\eta_{\text{эу т}} = 0,299$; $Q_{\text{эт}} = 864 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,240 \text{ м}^3/\text{с}$).

3.3 Выводы

1. Доказано, что применение воздушоструйного компрессора, запитанного от пневмосетей общего назначения, для пневмоснабжения эрлифтов традиционной технологической схемы в диапазоне давления рабочего воздуха $p_{\text{р}} = 0,4 \div 0,8 \text{ МПа}$, высоты подъема эрлифта $H = 3 \div 10 \text{ м}$, относительного погружения $\alpha = 0,2 \div 0,5$ позволяет уменьшить до 2 раз расход рабочего воздуха из пневмосети за счет преобразования излишне высокого давления рабочего агента в расход инжектируемого потока (атмосферного воздуха).

2. Аналитически определено, что для диапазона давления рабочего воздуха $p_{\text{р}} = 0,4 \div 0,8 \text{ МПа}$, высоты подъема жидкости (гидросмеси) $H_{\text{н}} = 1 \div 10 \text{ м}$, относительного погружения смесителя $\alpha_{\text{н}} = 0,43 \div 0,95$, высоты переподъема нагнетательного эрлифта $\Delta H_{\text{н}} = 0,5 \div 2,5 \text{ м}$ энергоэффективность работы нагнетательных эрлифтных установок с воздушоструйными компрессорами практически не отличается (средние отклонения не превышают $\pm 5 \div 10 \%$) от энергоэффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы при прочих равных условиях. Однако возможность использования нагнетательных эрлифтных установок в стесненных (по вертикали) условиях и напорного транспортирования жидкости (гидросмеси) расширяет область применения эрлифтных установок.

3. Установлено, что 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 (производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, РФ) при высоте подъема $14,7 \leq H \leq 60,7$ м, высоте перепада $0 < \Delta H_n \leq 2,42$ м, относительном погружении смесителей $0,15 \leq \alpha \leq 0,90$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ЭРЛИФТНОЙ УСТАНОВКИ

4.1 Задачи и обоснование выбора объекта экспериментальных исследований

В задачи экспериментальных исследований нагнетательной эрлифтной установки входило доказательство возможности работы установки с энергоэффективностью не ниже традиционной, а также подтверждение адекватности разработанной математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта. В рамках экспериментального исследования были созданы две экспериментальные установки нагнетательного эрлифта: с воздушоструйным компрессором и радиальным нагнетателем в качестве источников сжатого воздуха.

При проведении экспериментальных исследований нагнетательной эрлифтной установки со воздушоструйным компрессором исследовались параметры ее работы по традиционной схеме и в нагнетательном режиме. Отдельно исследовались также параметры работы воздушоструйного компрессора, входящего в состав установки.

В задачи экспериментальных исследований нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем входило доказательство принципиальной возможности работы установки с увеличенной на величину ΔH_n высотой подъема с сохранением энергоэффективности работы, используя в качестве источника сжатого воздуха радиальный нагнетатель.

Основными критериями подобия эрлифтов согласно [58, с. 45, 103, 104] являются относительное погружение смесителя α , отношение длины подъемной трубы к ее диаметру l/D (где $l = H+h$) и автомодельность зоны числа Рейнольдса Re для газожидкостного потока в подъемной трубе. При натуральных экспериментальных исследованиях работы эрлифтов критерий подобия l/D

позволяет установить геометрические размеры газожидкостных подъемников, на которые правомерно распространить получаемые результаты исследований. При этом не рекомендуется использовать натурные модели эрлифтов с диаметрами подъемных труб $D < 30$ мм для исключения существенного влияния сил поверхностного натяжения [58, с. 46]. Экспериментальные исследования нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором проводились в диапазоне относительных геометрических погружений смесителя $\alpha = 0,15 \dots 0,4$, что позволило обеспечить, в том числе, снарядную структуру водовоздушного потока (при значении $\alpha = 0,4$. Из-за изменения давления в смесителе при изменении расхода сжатого воздуха выполнение постоянства динамического относительного погружения α_0 затруднительно, поэтому применяется критерий подобия α .

Критерий l/D , в том числе, является определяющим при классификации эрлифтов – короткий ($l/D < 200$) или длинный ($l/D > 200$) [99, с. 52], расчетные зависимости для которых при определении основных проектируемых параметров – диаметр подъемной трубы и расход воздуха, значительно отличаются. Исследуемые в настоящей работе гидродинамические процессы преимущественно имеют место и могут быть реализованы в коротких эрлифта, что ограничивает отношение длины подъемной трубы к ее диаметру значением $l/D < 200$. Исходя из изложенного, а также лабораторных технических возможностей, принята экспериментальная установка нагнетательного эрлифта с подъемной трубой $\varnothing 76 \times 4$ мм ГОСТ 8732-78 (внутренний диаметр $D = 68$ мм), длиной $l = H + h = 5$ м ($l/D = 73,5$). При этом относительному погружению $\alpha = 0,4$ соответствовало значение глубины погружения смесителя $h = 2$ м и высоты подъема жидкости $H = 3$ м. Высота перепада жидкости изменялась в пределах $\Delta H_n = 0,25 \dots 1,0$ м с шагом $\delta = 0,25$ м.

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.

4.2 Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором

4.2.1 Экспериментальная нагнетательная эрлифтная установка с воздушоструйным компрессором

Экспериментальная установка нагнетательного эрлифта была смонтирована в условиях учебной лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОННТУ».

В качестве источника пневмоэнергии использовался винтовой компрессор ВК 30-8 производства ЗАО «REMEZA», Республика Беларусь, г. Рогачев. Компрессор с эксплуатационными параметрами: избыточное давление $p_n = 8$ ат (0,785 МПа), производительность $Q_n = 3,5$ м³/мин (0,0583 м³/с), мощность электродвигателя $P_n = 22$ кВт снабжал сжатым воздухом струйный аппарат (воздушоструйный компрессор) 14 (Рисунок 4.1). Между компрессором ВК 30-8 и эрлифтной установкой был смонтирован ресивер 11 объемом 500 л (производитель – ЗАО «REMEZA», Республика Беларусь, г. Рогачев).

Сообщение эрлифта с основной емкостью 1 объемом 2,5 м³ (Рисунок 4.1) происходило посредством подающей трубы 2 длиной 4 м с внутренним диаметром $\varnothing 50$ мм.

Расход рабочего потока воздушоструйного компрессора Q_p регулировался клапаном 12, а его измерение осуществлялось по методике расчета расхода газа через сопло Лаваля [39, с. 250] с помощью образцового манометра $M4$ ($p = 0 \div 10$ кгс/см²) и спиртового термометра $T1$ ($t = 10 \div 70$ °С). Смешанный поток струйного аппарата по напорному воздухопроводу 16, внутренним диаметром $\varnothing 50$ мм, проходя через запорно-регулирующий клапан 17, поступал в смеситель эрлифта 3 (Рисунок 4.1). При этом расход смешанного потока Q_c , равный расходу воздуха эрлифтом Q_v , измерялся, согласно РД 50-213-80, [101] с помощью мерного узла, состоящего из диафрагмы $D2$ ($d = 35$ мм, $D = 52$ мм, $m = 0,453$), дифференциального манометра ДТ-50 (на рисунке 4.1 – ДМ2) и образцового

манометра $M6$ ($p = 0 \div 4,0$ кгс/см²). Для предотвращения попадания воды в ресивер 11 на линии смешанного потока напорный воздухопровод 16 был смонтирован в форме петли, верхний конец которой располагался выше поверхности воды в основной емкости 1.

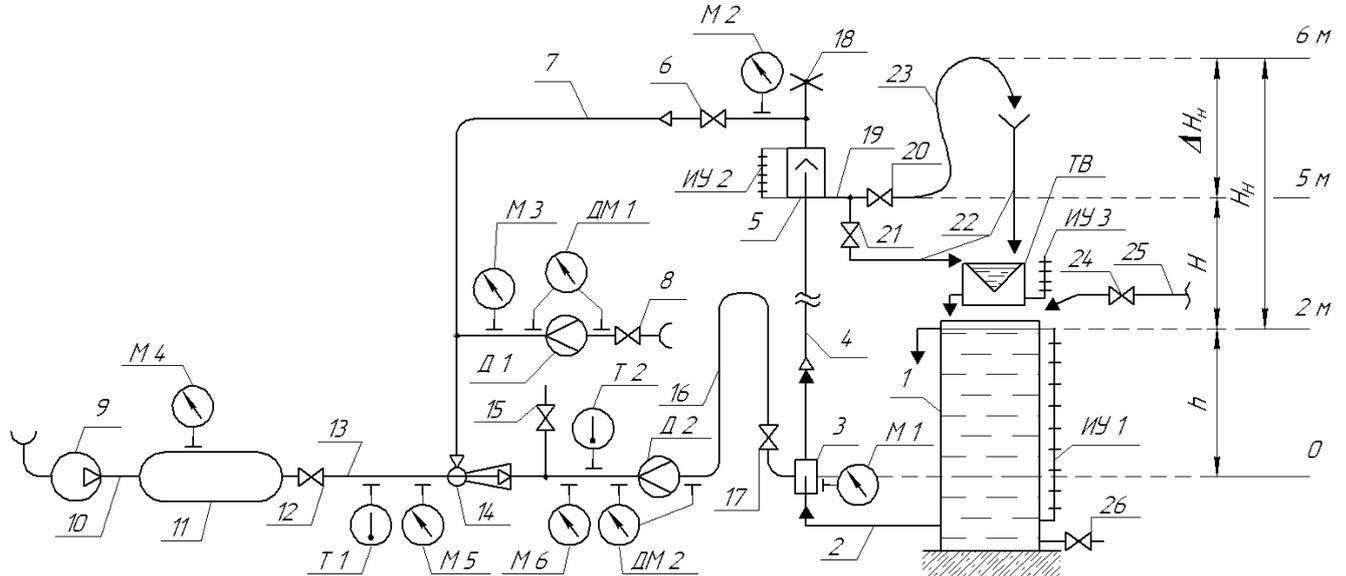


Рисунок 4.1 – Схема экспериментальной установки нагнетательного эрлифта с воздушоструйным компрессором:

- 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 потока; 14 – воздушоструйный компрессор;
 15 – сбросной клапан; 16 – напорный воздухопровод; 18 – пробка; 19 – сливная труба; 22 – трубопроводы; 23 – гибкий отводящий трубопровод;
 25 – трубопровод заполнения основной емкости; ТВ – треугольный водослив Томсона; М1, М2, М3, М4, М5, М6 – манометры образцовые; ДМ 1, ДМ 2 – дифференциальные манометры ДТ-50; Д1, Д2 – измерительные диафрагмы; ИУ 1, ИУ 2, ИУ 3 – измерители уровня жидкости; Т1, Т2 – термометры спиртовые;
 h – глубина погружения смесителя; H – высота подъема традиционного эрлифта;
 H_n – высота подъема нагнетательного эрлифта;
 ΔH_n – высота переподъема жидкости

Запуск эрлифтной установки в традиционном режиме работы осуществлялся в ниже приведенной последовательности. При заполненной до необходимого уровня, соответствующего выбранному значению относительного погружения α , основной емкости 1, при предварительно открытых клапанах 8, 21 и пробке 18, закрытых клапанах 6 и 20 осуществлялось плавное открытие запорно-

регулирующего клапана 12, устанавливалось необходимое значение давления рабочего потока p_p воздушоструйного компрессора 14. Рабочий поток по воздухопроводу 13 подавался к воздушоструйному компрессору 14, где смешивался с инжектируемым потоком атмосферного воздуха, проходящим через клапан 8. Смешанный поток, проходя через напорный воздухопровод 16, поступал в смеситель эрлифта 3. Образовавшаяся водовоздушная смесь поднималась по подъемной трубе 4 длиной 5 м и поступала в воздухоотделитель 5 (Рисунок 4.1), в котором происходило разделение водовоздушной смеси на фазы. Выделившийся воздух сбрасывался в атмосферу благодаря открытой пробке 18; жидкость через сливную трубу 19 и сбросной трубопровод 22 поступала обратно в основную емкость 1.

Перевод установки в нагнетательный режим работы осуществлялся следующим образом. При закрытии пробки 18, плавном закрытии клапана 21 и открытии клапана 20 производилось дросселирование клапана 6, что вызывало появление и рост избыточного давления в воздухоотделителе 5; значение избыточного давления фиксировалось с помощью образцового манометра $M2$ ($p = 0 \div 0,5$ кгс/см²). При этом жидкость, проходя через сливную трубу 19 и отводящий гибкий трубопровод 23 поднималась на установленную высоту перепада ΔH_n (в установке предусмотрена фиксация значений ΔH_n на уровне 0,25; 0,5; 0,75; и 1,0 м) и сливалась в мерный бак с треугольным водосливом Томсона TB ($\gamma = 90^\circ$) (Рисунок 4.1). Уровень жидкости в воздухоотделителе 5 контролировался с помощью измерителя уровня $IУ$ 2. При работе эрлифта в нагнетательном режиме через клапан 8 происходил сброс избытка воздуха в атмосферу, объемный расход которого $Q_{сбр}$ близок по значению к расходу рабочего воздуха воздушоструйного компрессора Q_p . Утилизация энергии частично сжатого воздуха, поступающего из воздухоотделителя 5 по воздухоотводящей трубе 7 во всасывающий патрубок воздушоструйного компрессора 14 реализовалась согласованием работы регулирующих клапанов 6 и 8. В определенном положении этих клапанов достигалась устойчивая работа нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором по подъему жидкости на высоту ΔH_n .

Измерение расхода воздуха $Q_{\text{сбр}}$, сбрасываемого в атмосферу через клапан 8, (Рисунок 4.1) осуществлялось расходомером в составе:

- а) диафрагма $Д1$ (диаметр отверстия $d_{20} = 26$ мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,25$);
- б) дифференциальный манометр ДТ-50 ($ДМ 1$, Рисунок 4.1) (уравновешивающая жидкость – вода, $\Delta p_{\text{max}} = 500$ мм. вод. ст.), подключенный к измерительной диафрагме $Д1$;
- в) манометр образцовый $М3$ установленный перед диафрагмой ($p = 0 \div 1,6$ кгс/см²);
- г) спиртовой термометр $T2$ ($t = 10 \div 70$ °С).

Измерение расхода сжатого воздуха, поступающего в эрлифт $Q_э$, осуществлялось расходомером в составе:

- а) диафрагма $Д2$ (диаметр отверстия $d_{20} = 35$ мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,453$);
- б) дифференциальный манометр ДТ-50 ($ДМ 2$, рисунок 4.1) (уравновешивающая жидкость – вода, $\Delta p_{\text{max}} = 500$ мм. вод. ст.), подключенный к измерительной диафрагме $Д2$;
- в) манометр образцовый $М6$ установленный перед диафрагмой ($p = 0 \div 4,0$ кгс/см²);
- г) спиртовой термометр $T2$ ($t = 10 \div 70$ °С).

Температура воздуха, сбрасываемого в атмосферу через клапан 8, принималась равной температуре воздуха, поступающего в эрлифт, измеряемой с помощью спиртового термометра $T2$.



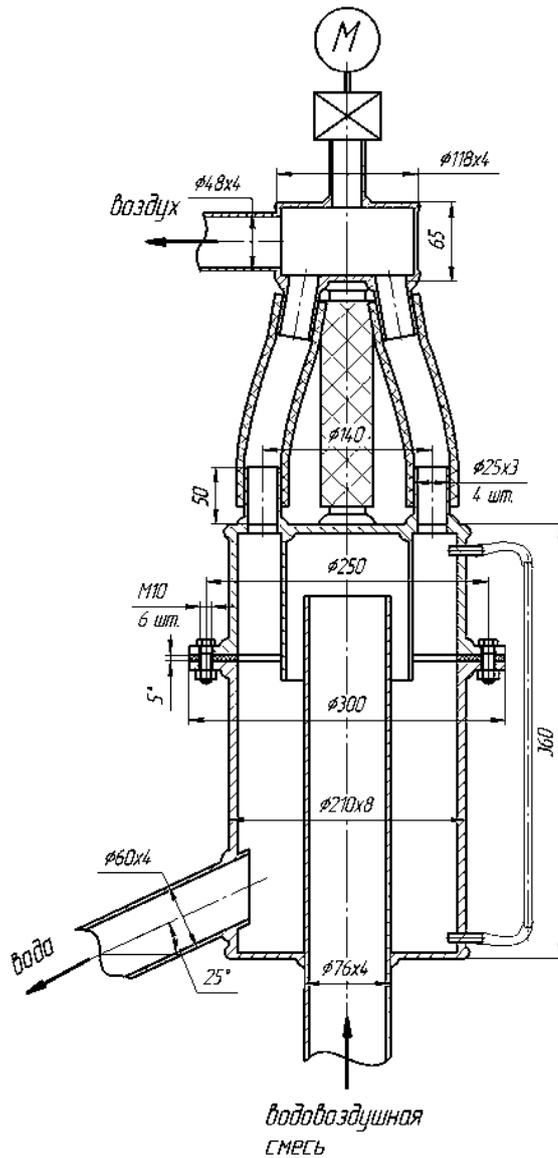
Рисунок 4.2 – Общий вид экспериментальной установки нагнетательного эрлифта с воздухоструйным компрессором



Рисунок 4.3 – Воздухоотделитель и измерительная емкость экспериментальной установки в негнетательном режиме работы



а)



б)

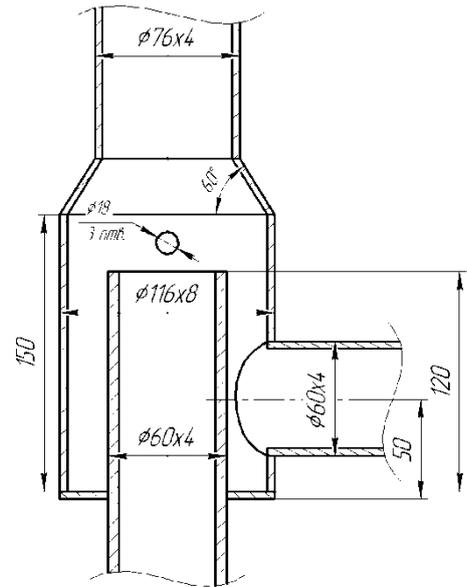
Рисунок 4.4 – Воздухоотделитель нагнетательного эрлифта: а) внешний вид; б) конструктивное исполнение

Давление в смесителе эрлифта (Рисунок 4.5) измерялось образцовым манометром $M1$ ($p = 0 \div 2,5$ кгс/см²) (Рисунок 4.1). Для осреднения измеряемого давления среды в смесителе, отбор давления в манометр осуществлялся через кольцо с тремя входами в смеситель.

При монтаже нормальных диафрагм, измерительного коллектора (Рисунок 4.8) и контрольно-измерительных приборов эрлифтной установки учтены требования и рекомендации, изложенные в [105, 106, 107].



а)



б)

Рисунок 4.5 – Смеситель нагнетательного экспериментального эрлифта:
а) внешний вид; б) конструктивное исполнение

Измерение избыточного давления в воздухоотделителе (Рисунок 4.1, 4.4) осуществлялось с помощью образцового манометра $M2$ ($p = 0 \div 0,5$ кгс/см²).

Среднеквадратичная относительная погрешность измерений расхода потока сжатого воздуха, поступающего в эрлифт Q_v составила $1,04 \div 3,90$ %, погрешность измерения избыточного давления в воздухоотделителе $p_{вз}$ – $2,5 \div 10$ %, геометрического напора жидкости перед водосливом (подачи эрлифта Q_3) – $1,0$ % (Приложение В1).

4.2.2 Объем, методика и результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором проведены в следующем объеме и ниже приведенной последовательности:

а) получение поля характеристик воздушоструйного компрессора для доказательства увеличения коэффициента инжекции струйного аппарата при увеличении давления инжектируемого потока;

- б) получение расходных характеристик эрлифта в традиционном режиме работы при различных значениях относительного погружения;
- в) получение расходных характеристик эрлифта в нагнетательном режиме работы при различных значениях высоты перепада.

На каждом из этих этапов были получены экспериментальные точки, проведена обработка экспериментальных данных с отсевом грубых ошибок, построены регрессионные кривые, проведено сравнение отклонений исследуемых параметров в точках регрессионных кривых от аналогичных параметров расчетных кривых при прочих равных условиях.

Необходимое количество опытов на каждом из этапов исследований определялось согласно рекомендаций [102, с. 37-44] исходя из потребной точности измерения режимных параметров. Для достижения относительной погрешности результатов $5 \div 10$ % при доверительной вероятности $0,9 \div 0,95$ производилось не менее 5 измерений на одном уровне контролируемых факторов.

Перед пуском установки в работу производились измерения атмосферного давления, влажности воздуха и температуры окружающей среды. После подготовки установки к проведению экспериментов производился пуск компрессора. В ресивере создавалось избыточное давление, которое автоматически поддерживалось на уровне $5 \dots 8$ кгс/см² ($0,490 \dots 0,785$ МПа), после чего плавно открывался вентиль 12 (Рисунок 4.1), установленный после ресивера и сжатый воздух поступал в воздухопровод рабочего потока и затем – к воздушоструйному компрессору 14.

4.2.3 Экспериментальные исследования работы воздушоструйного компрессора

Экспериментальные исследования работы воздушоструйного компрессора 14 (Рисунок 4.6), входящего в состав лабораторной эрлифтной установки, позволили подтвердить адекватность существующих методик расчета струйных аппаратов. Для этого воздухоотводящая труба 7 (Рисунок 4.1) была рассоединена и перед

входом во всасывающий патрубок воздуоструйного компрессора был установлен измерительный коллектор 8 (Рисунок 4.6) [105, с. 115]. Массовый расход рабочего потока G_p , поступающего от компрессора 1, измерялся по методике измерения расхода газа через сопло Лавалья и регулировался клапаном 4, с помощью которого устанавливалось также необходимое значение давления рабочего потока p_p . Таким образом было возможно определить коэффициент инжекции воздуоструйного компрессора u как

$$u = \frac{G_n}{G_p}. \quad (4.1)$$

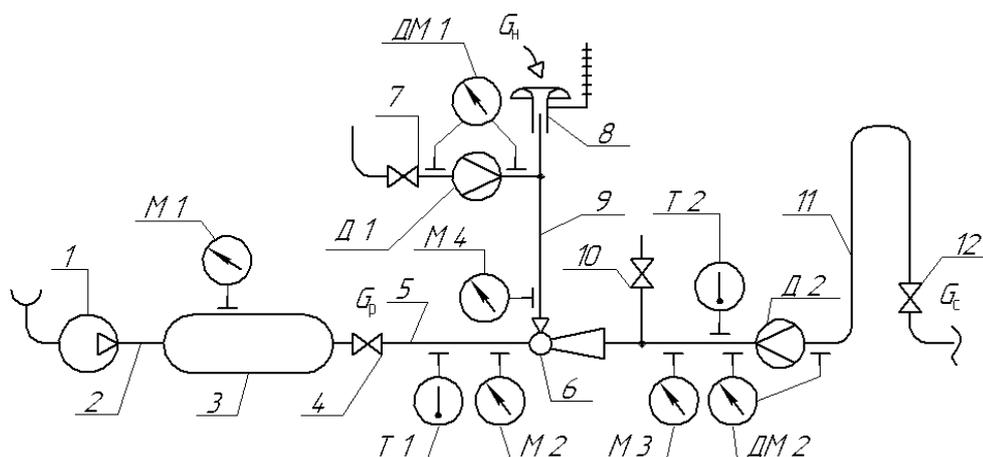


Рисунок 4.6 – Схема экспериментального исследования воздуоструйного компрессора: 1 – винтовой компрессор ВК 30-8; 2 – воздухопровод; 3 – ресивер Р-500; 4 – запорно-регулирующий клапан; 5 – воздухопровод рабочего потока; 6 – воздуоструйный компрессор; 7, 10, 12 – запорно-регулирующие клапаны; 8 – измерительный коллектор; 9 – всасывающий патрубок; 11 – напорный трубопровод; М1, М2, М3, М4 – манометры образцовые; ДМ1, ДМ2 – дифференциальные манометры ДТ-50; Д1, Д2 – измерительные диафрагмы; Т1, Т2 – термометры спиртовые; G_p , G_n , G_c – массовые расходы рабочего, инжектируемого и сжатого воздушных потоков соответственно

Для получения экспериментального поля характеристик воздуоструйного компрессора $p_c = f(u, p_p)$ (Рисунок 4.7) давление сжатия p_c изменялось с помощью регулирования клапана 12 и измерялось образцовым манометром М3. Во время работы воздуоструйного компрессора клапаны 7 и 10 были закрыты (Рисунок 4.6).

Массовый расход инжектируемого из атмосферы воздуха G_n измерялся с помощью коллектора 8.

Измерение массового расхода сжатого воздуха G_c осуществлялось расходомером в составе:

- а) диафрагма $D2$ (диаметр отверстия $d_{20} = 35$ мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,453$);
- б) дифференциальный манометр ДТ-50 (ДМ 2) (уравновешивающая жидкость – вода, $\Delta p_{\max} = 500$ мм. вод. ст.), подключенный к измерительной диафрагме $D2$;
- в) манометр образцовый $M3$ установленный перед диафрагмой ($p = 0 \div 4,0$ кгс/см²);
- г) спиртовой термометр $T2$ ($t = 10 \div 70$ °С) (Рисунок 4.6).

Экспериментальные зависимости $p_c = f(u, p_p)$ были получены для трех значений избыточного давления рабочего потока p_p (4, 5 и 6 кгс/см² или 0,394, 0,490 и 0,588 МПа соответственно). На рисунке 4.7 приведены регрессионные кривые, полученные по экспериментальным точкам. Данные обработки экспериментальных данных работы воздушоструйного компрессора приведены в приложении В8.

Экспериментально подтверждено (Рисунок 4.7), что при уменьшении давления сжатия p_c от 1,25 до 1,17 кг/см² (0,1226 ÷ 0,1197 МПа) коэффициент инжекции u увеличивается от 0,3 до 1,1 (в 3,7 раза) при давлении рабочего потока $p_p = 4$ кгс/см² (0,394 МПа); при уменьшении p_c от 1,31 до 1,17 кг/см² (0,1285 ÷ 0,1197 МПа) u увеличивается от 0,4 до 1,1 (в 2,8 раза) при давлении рабочего потока $p_p = 5$ кгс/см² (0,490 МПа); при уменьшении p_c от 1,38 до 1,18 кг/см² (0,1353 ÷ 0,1157 МПа) u увеличивается от 0,44 до 1,1 (в 2,5 раза) при давлении рабочего потока $p_p = 6$ кгс/см² (0,588 МПа).

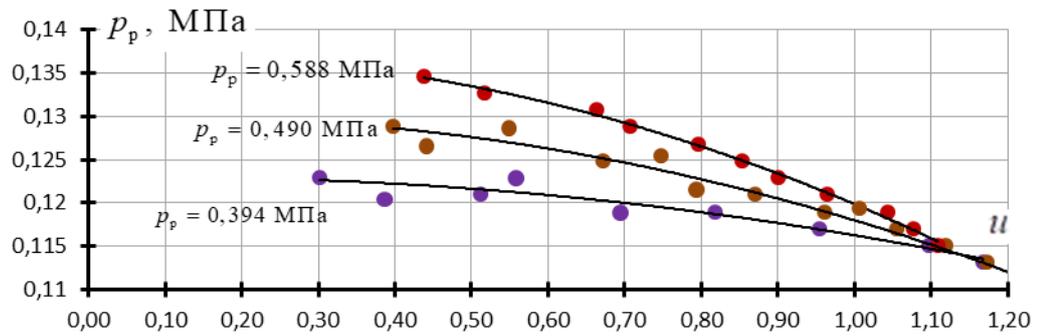


Рисунок 4.7 – Экспериментальные характеристики лабораторного воздустрейного компрессора $p_c = f(u, p_p)$

Расчетные характеристики $p_c = f(u, p_p)$ лабораторного воздустрейного компрессора при значениях давления рабочего потока $p_c = 4 \div 8$ кгс/см² (0,394÷0,785 МПа) получены с помощью программы на ПЭВМ для анализа и расчета струйных аппаратов, разработанной на кафедре энергомеханических систем ДОННТУ [89, с. 51] (Рисунок 4.8).

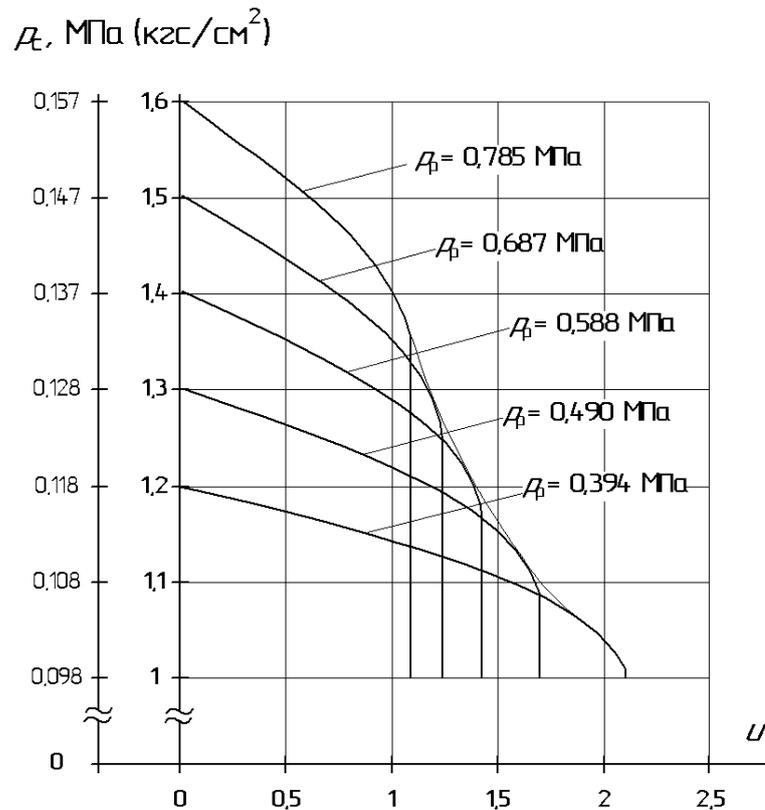


Рисунок 4.8 – Расчетные характеристики лабораторного воздустрейного компрессора $p_c = f(u, p_p)$

Расчетные и экспериментальные кривые $p_c = f(u)$ при $p_p = 5 \text{ кгс/см}^2$ (0,490 МПа) нанесены на одну плоскость (Рисунок 4.9), при этом среднее значение отклонений в точках характеристики, полученной расчетным путем, от экспериментальной характеристики составляет 2,64 % (Таблица 4.1), что свидетельствует об адекватности расчетной методики анализа характеристик воздушоструйного компрессора, реализуемой с помощью программы на ПЭВМ, разработанной на кафедре энергомеханических систем ДОННТУ.

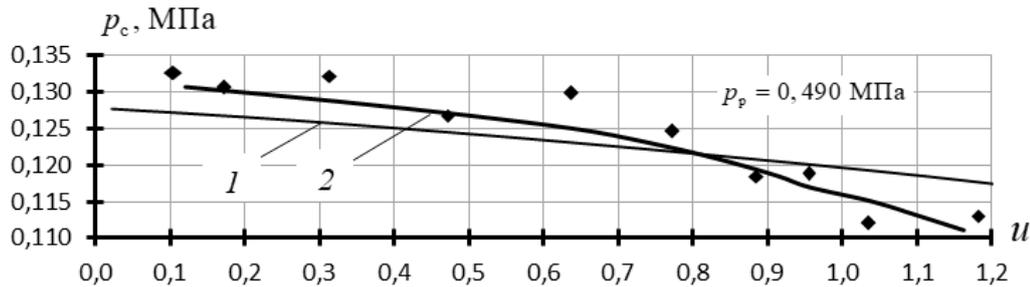


Рисунок 4.9 – Расчетные и экспериментальные кривые зависимостей $p_c = f(u)$ лабораторного воздушоструйного компрессора: 1 – расчетная кривая; 2 – экспериментальная регрессионная кривая

Таблица 4.1 – Расчетные и экспериментальные значения давления сжатия лабораторного воздушоструйного компрессора и соответствующие отклонения

Коэффициент инъекции u	Расчетное значение давления сжатия (избыточное) p_c , МПа	Экспериментальное значение давления сжатия (избыточное) p_c , МПа	Отклонение расчетных значений от экспериментальных Δ , %
0,1	0,131	0,127	3,01
0,3	0,119	0,126	2,10
0,5	0,127	0,124	2,45
0,7	0,124	0,122	1,93
0,9	0,120	0,119	1,15
1,1	0,119	0,113	5,22

Среднее отклонение составило

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{3,01 + 2,10 + 2,45 + 1,93 + 1,15 + 5,22}{6} = 2,64\% . \quad (4.2)$$

Экспериментальным путем получены зависимости коэффициента инжекции от давления инжектируемого потока $u = f(p_n, p_c)$ лабораторного воздушоструйного компрессора (Рисунок 4.10) при значениях абсолютного давления сжатия $p_c = 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$ кгс/см² (0,118; 0,128; 0,137; 0,147 МПа). Получены также зависимости $p_c/p_n = f(u)$ (Рисунок 4.11). При этом абсолютное давление рабочего потока p_p поддерживалось на уровне 6 кгс/см² (0,588 МПа).

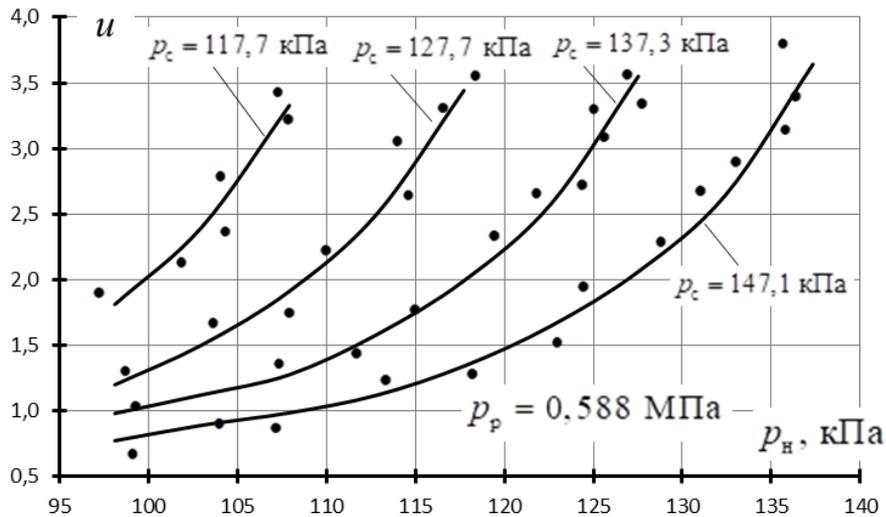


Рисунок 4.10 – Экспериментальные зависимости коэффициента инжекции от давления инжектируемого потока и давления сжатия $u = f(p_n, p_c)$ лабораторного воздушоструйного компрессора

Доказано (Рисунок 4.10), что при увеличении абсолютного давления инжектируемого потока p_n от 1,0 до 1,1 кгс/см² (98,1÷107,9 кПа) коэффициент инжекции u увеличивается в 1,79 раз (1,85÷3,32) при давлении сжатия $p_c = 1,2$ кгс/см² (117,7 кПа); при увеличении p_n от 1,0 до 1,2 кгс/см² (98,1÷117,7 кПа) коэффициент инжекции u увеличивается в 2,84 раз (1,22 ÷ 3,47) при $p_c = 1,3$ кгс/см² (127,7 кПа); при увеличении p_n от 1,0 до 1,3 кгс/см² (98,1÷127,7 кПа) коэффициент инжекции u увеличивается в 3,62 раза (0,98 ÷ 3,55) при $p_c = 1,4$ кгс/см² (137,3 кПа); при увеличении p_n от 1,0 до 1,4 кгс/см² (98,1÷137,3 кПа) коэффициент инжекции u увеличивается в 4,78 раз (0,77 ÷ 3,68) при $p_c = 1,5$ кгс/см² (147,1 кПа). При этом увеличение коэффициента инжекции u происходит тем интенсивнее, чем меньше давление сжатия p_c .

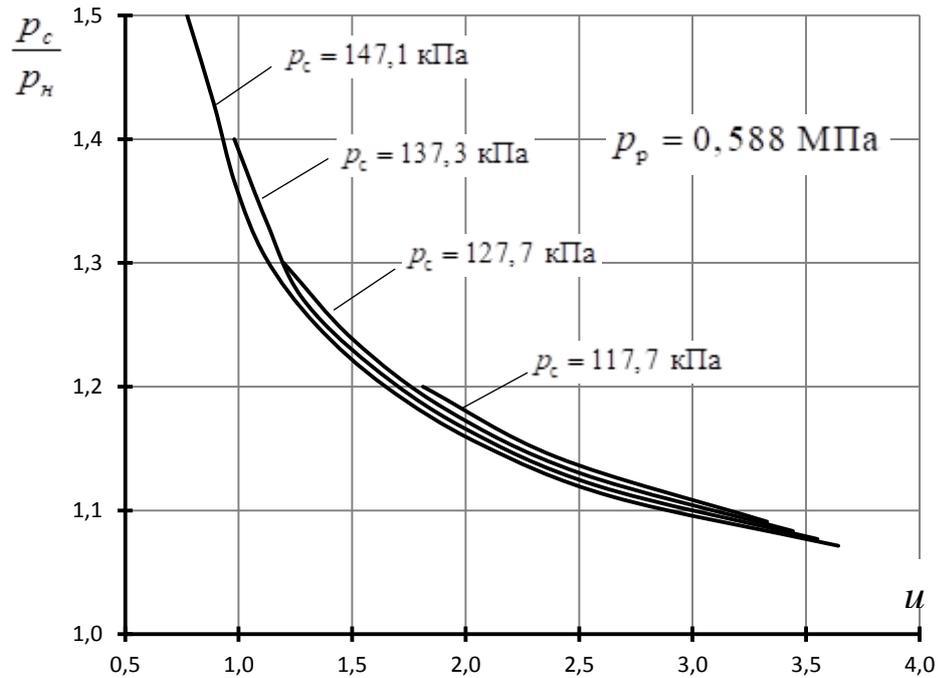


Рисунок 4.11 – Экспериментальные зависимости удельного давления сжатия от коэффициента инжекции и давления инжектируемого потока $p_c/p_n = f(u, p_n)$ лабораторного воздушнотруйного компрессора

Доказано (Рисунок 4.11), что при уменьшении удельного давления сжатия p_c/p_n от 1,50 до 1,075 коэффициент инжекции u увеличивается в 4,78 раз ($0,77 \div 3,68$) при $p_c = 147,1$ кПа; при уменьшении p_c/p_n от 1,40 до 1,082 коэффициент инжекции u увеличивается в 3,62 раза ($0,98 \div 3,55$) при $p_c = 137,3$ кПа; при уменьшении p_c/p_n от 1,30 до 1,09 коэффициент инжекции u увеличивается в 2,84 раз ($1,22 \div 3,47$) при $p_c = 127,7$ кПа; при уменьшении p_c/p_n от 1,20 до 1,095 коэффициент инжекции u увеличивается в 1,79 раз ($1,85 \div 3,32$) при $p_c = 117,7$ кПа. При этом интенсивность увеличения коэффициента инжекции увеличивается с уменьшением удельного давления сжатия p_c/p_n .

Уравнения регрессии $p_c/p_n = f(u)$, (формулы 4.3 – 4.6) полученные при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов имеют вид:

- при $p_c = 147,1$ кПа для $0,8 \leq u \leq 3,6$ со среднеквадратичной погрешностью 0,96 %

$$\frac{p_c}{p_n} = \frac{1}{0,367 + 0,954u + 0,0455u^2}; \quad (4.3)$$

- при $p_c = 137,3$ кПа для $1,0 \leq u \leq 3,5$ со среднеквадратичной погрешностью 1,02 %

$$\frac{p_c}{p_n} = \frac{1}{0,266 + 1,03u + 0,013u^2}; \quad (4.4)$$

- при $p_c = 127,7$ кПа для $1,2 \leq u \leq 3,4$ со среднеквадратичной погрешностью 1,34 %

$$\frac{p_c}{p_n} = \frac{1}{0,541 + 0,627u + 0,104u^2}; \quad (4.5)$$

- при $p_c = 117,7$ кПа для $1,8 \leq u \leq 3,3$ со среднеквадратичной погрешностью 1,55 %

$$\frac{p_c}{p_n} = \frac{1}{0,717 + 0,421u + 0,141u^2}. \quad (4.6)$$

Достоверность уравнений (4.3) – (4.6) подтверждена с использованием критерия Фишера [102, с. 45-46].

4.2.4 Экспериментальные исследования работы эрлифтной установки традиционной технологической схемы

После подготовки установки к проведению эксперимента производился пуск компрессора 9, в ресивере 11 создавалось избыточное давление, которое автоматически поддерживалось на уровне $0,490 \div 0,785$ МПа, после чего плавно открывался клапан 12, установленный после ресивера, и сжатый воздух поступал в воздухопровод рабочего потока 13 и затем – к воздушоструйному компрессору 14. Атмосферный воздух инжектировался через измерительную диафрагму 27 во всасывающий патрубок воздушоструйного компрессора. При работе установки в традиционном режиме воздухоотводящая труба 7 была рассоединена и при открытом клапане 6 и пробке 18 (для уменьшения сопротивления) отработанный воздух из воздухоотделителя 5 поступал в атмосферу. Клапан 20 находился в закрытом положении, клапан 21 – в открытом и перекачиваемая эрлифтом вода

поступала по трубопроводу 22 через треугольный водослив Томсона в основную емкость 1 (Рисунок 4.12).

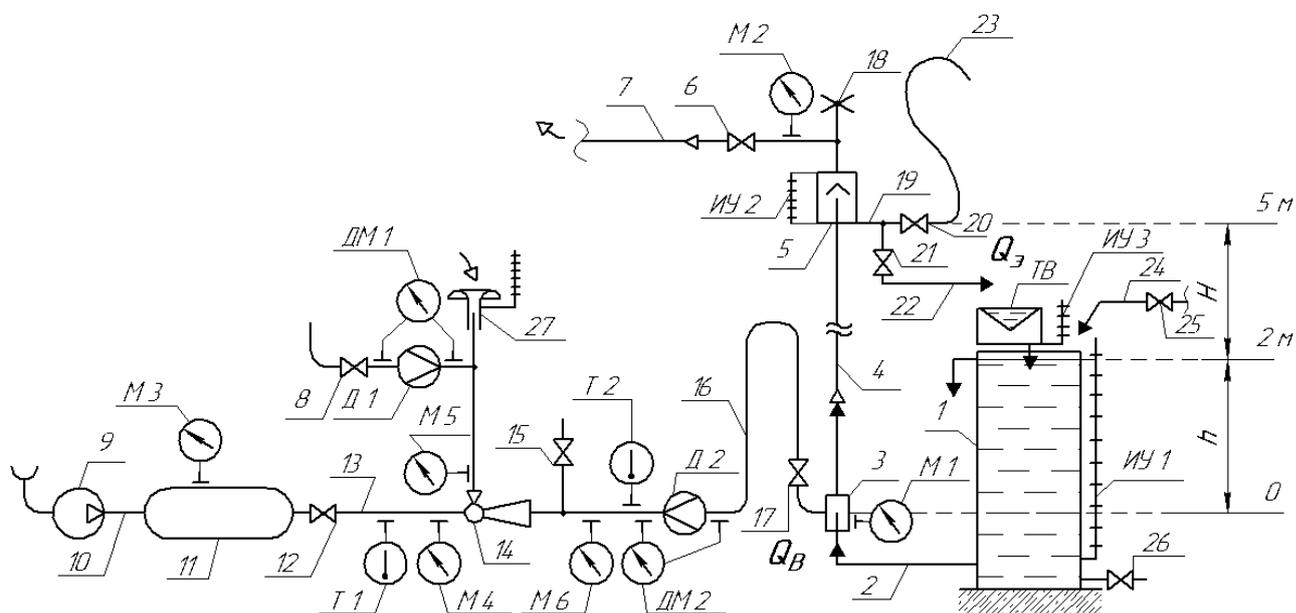


Рисунок 4.12 – Схема экспериментальной эрлифтной установки с воздушнотруйным компрессором, работающей в традиционном режиме:

- 1 – основная емкость; 2 – подающая труба; 3 – смеситель эрлифта;
 4 – подъемная труба; 5 – воздухоотделитель; 6, 8, 12, 17, 20, 21, 25, 26 – запорно-регулирующие клапаны; 7 – воздухоотводящая труба; 9 – винтовой компрессор ВК 30-8; 10 – воздухопровод; 11 – ресивер Р-500;
 13 – воздухопровод рабочего потока; 14 – воздушнотруйный компрессор; 15 – сбросной клапан; 16 – напорный воздухопровод; 18 – пробка; 19 – сливная труба; 22 – трубопровод; 23 – гибкий отводящий трубопровод;
 24 – трубопровод заполнения основной емкости; 27 – измерительный коллектор;
 ТВ – треугольный водослив Томсона; М1, М2, М3, М5, М6 – манометры образцовые; М4 – манометр; ДМ 1, ДМ 2 – дифференциальные манометры ДТ-50;
 Д1, Д2 – измерительные диафрагмы; ИУ 1, ИУ 2, ИУ 3 – измерители уровня жидкости; Т1, Т2 – термометры спиртовые; h – глубина погружения смесителя; H – высота подъема эрлифта

Расходные характеристики эрлифта в традиционном режиме работы были получены при относительных погружениях $\alpha = 0,15 \div 0,4$ с шагом $\delta\alpha = 0,05$ (Рисунок 4.13).

При снятии экспериментальных данных поддерживалось избыточное давление рабочего потока воздушнотруйного компрессора $p_p = 0,343$ МПа. Расход воздуха эрлифтом Q_B изменялся в пределах $0,3 \div 4,0$ м³/мин с помощью

регулирующего клапана 17 и клапана 15; подача эрлифта Q_3 измерялась с помощью треугольного водослива Томсона, установленного на верхнем полке установки (Рисунок 4.1). Максимальное значение подачи эрлифта, согласно регрессионной кривой (Рисунок 4.13) соответствует относительному погружению $\alpha = 0,4$ и составляет $Q_3 = 3,7 \text{ м}^3/\text{ч}$.

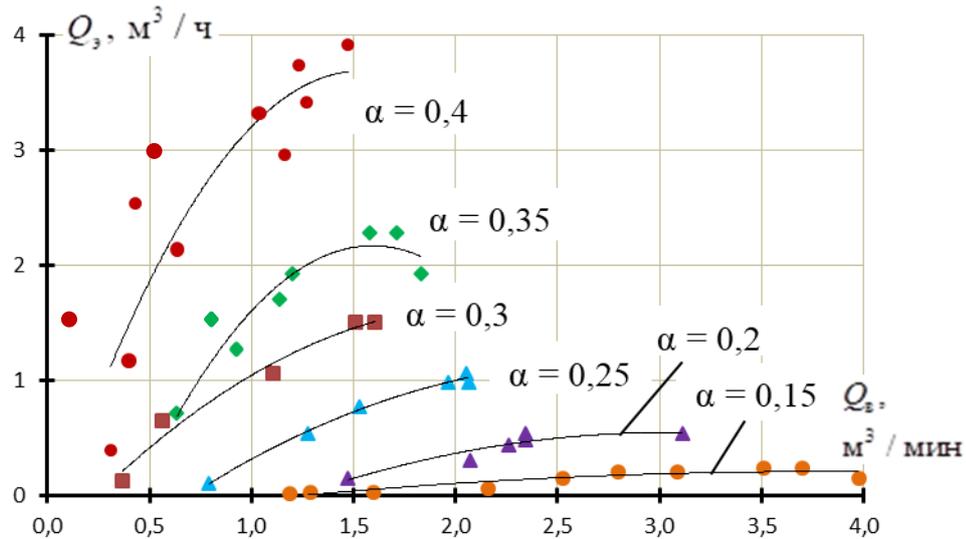


Рисунок 4.13 – Экспериментальные расходные характеристики эрлифта традиционной схемы ($h + H = 5 \text{ м}$, $D = 0,068 \text{ м}$) при различных относительных погружениях α

Приведена статистическая оценка, согласно методике [102, с. 42-47], (4.7) – (4.12) экспериментальных данных работы эрлифта в традиционном (Таблицы В7.3 – В7.7, Приложение В7) режиме. Для получения достоверных данных для построения расходных характеристик было выполнено по 5 измерений подачи эрлифта при близких к равным расходам воздуха эрлифтом $Q_в$ для каждого значения относительного погружения смесителя α .

При расходе сжатого воздуха $Q_с = 0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ и относительном погружении эрлифта, работающего в традиционном режиме с $\alpha = 0,4$ получено пять значений подачи эрлифта: $Q_3 = 1,75; 1,95; 2,0; 1,9; 2,05 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Математическое ожидание подачи эрлифта полученной в 5-ти параллельных опытах

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.7)$$

где x_i - значение подачи в i - м опыте; n - количество параллельных опытов.

Тогда

$$\bar{x} = \frac{1,75 + 1,95 + 2,0 + 1,9 = 2,05}{5} = 1,93 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Среднеквадратичное отклонение

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}}, \quad (4.8)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{(1,75 - 1,93)^2 + (1,95 - 1,93)^2 + (2,0 - 1,93)^2 + (1,9 - 1,93)^2 + (2,05 - 1,93)^2}{5-1}} = 0,117 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Дисперсия

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}, \quad (4.9)$$

$$S_x^2 = \frac{(1,75 - 1,93)^2 + (1,95 - 1,93)^2 + (2,0 - 1,93)^2 + (1,9 - 1,93)^2 + (2,05 - 1,93)^2}{5-1} = 0,014 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Минимальные и максимальные значение результата измерения на границе доверительного интервала

$$x_{\text{мин}} = \bar{x} - h \cdot S_x, \quad (4.10)$$

$$x_{\text{макс}} = \bar{x} + h \cdot S_x. \quad (4.11)$$

Параметр h выбираем из таблицы в зависимости от объема выборки $n = 5$, с вероятностью $P = 0,95$ ($\alpha = 0,05$) - $h = 1,67$.

$$x_{\min} = 1,93 - 1,67 \cdot 0,117 = 1,74 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$x_{\max} = 1,93 + 1,67 \cdot 0,117 = 2,13 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Результаты обработки экспериментальных данных подачи традиционного эрлифта при других значениях расхода сжатого воздуха при значении относительного погружения смесителя $\alpha = 0,4$ приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего по традиционной схеме при значении относительного погружения смесителя $\alpha = 0,4$

Расход сжатого воздуха $Q_{\text{в}}, \text{ м}^3/\text{мин}$	Подача эрлифта $Q_{\text{э}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	Математическое ожидание $\bar{x}, \text{ м}^3/\text{ч}$	Средне - квадратичное отклонение $S_x, \text{ м}^3/\text{ч}$	Дисперсия $S_x^2, \text{ м}^6/\text{ч}^2$	Значения на границах доверительного интервала $x_{\min} \div x_{\max}, \text{ м}^3/\text{ч}$
0,25	0,75; 1,15; 1,2; 0,8; 1,1	1,00	0,234	0,055	0,61 ÷ 1,39
0,50	1,75; 1,95; 2,0; 1,9; 2,05	1,93	0,117	0,014	1,74 ÷ 2,13
0,75	2,25; 2,65; 2,7; 2,8; 2,5	2,55	0,184	0,034	2,24 ÷ 2,86
1,0	3,1; 3,25; 3,3; 3,52; 2,8	3,19	0,267	0,071	2,75 ÷ 3,64
1,25	3,45; 3,7; 3,5; 3,6; 3,55	3,50	0,146	0,021	3,26 ÷ 3,74

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2}, \quad (4.12)$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,071}{0,014} = 5,23.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\max} = n_{\max} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\min} = n_{\min} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 5,23$), делаем вывод, что сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}; \quad (4.13)$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,055 \cdot 4 + 0,014 \cdot 4 + 0,034 \cdot 4 + 0,071 \cdot 4 + 0,021 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,0389 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики традиционного эрлифта при значении относительного погружения смесителя $\alpha = 0,4$, полученное при помощи ЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,25 %

$$Q_3 = -0,0723 + 3,79Q_B + 1,21Q_B^2 - 2,34Q_B^3 + 0,646Q_B^4. \quad (4.14)$$

Среднее отклонение расчетной подачи от полученной экспериментально для оптимального режима работы традиционного эрлифта для всех исследуемых значений относительного погружения α составляет (Приложение В7, Таблица В7.1)

$$\Delta Q_{\text{э.опт}}^{\text{град}} = \frac{15,1 + 11,4 + 12,9}{3} = 13,1\%,$$

для режима максимальной подачи

$$\Delta Q_{\text{э.макс}}^{\text{град}} = \frac{16,7 + 13,8 + 13,3}{3} = 14,6\%.$$

4.2.5 Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором

Экспериментальные исследования эрлифта в нагнетательном режиме работы проводилось при максимально возможном геометрическом погружении смесителя h_n в диапазоне относительного погружения нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,2 \div 0,35$ с шагом $\delta\alpha_{эн} = 0,05$ (при изменении высоты перепада нагнетательного эрлифта $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м с шагом 0,25 м).

В процессе работы установки устанавливалось конкретное значение высоты перепада ΔH_n . Экспериментальные расходные характеристики нагнетательного эрлифта в диапазоне значений относительного погружения $\alpha_{эн} = 0,20 \div 0,35$, высоты перепада $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м и расхода воздуха $Q_v = 0,2 \div 1,4$ м³/мин представлены на рисунке 4.14. Максимальное значение подачи эрлифта, согласно регрессионной кривой 1, соответствует значению высоты перепада $\Delta H_n = 0,25$ м и составляет $Q_s = 3,55$ м³/ч. Увеличение высоты перепада до $\Delta H_n = 0,5$ м привело к уменьшению максимального значения подачи на 12,7%; до $\Delta H_n = 0,75$ м – на 32,5%; до $\Delta H_n = 1,0$ м – на 59,9% в сравнении с минимально принятым значением $\Delta H_n = 0,25$ м соответственно. Однако, это не снижает практической ценности нагнетательных эрлифтных установок, учитывая возможность напорного транспортирования шахтной воды (в отличие от установок традиционной технологической схемы) и расширения их области применения.

Результат проведенной обработки экспериментальных данных нагнетательного эрлифта приведен на таблице 4.4 и в приложении В7 (Таблицы В7.8 – В7.10).

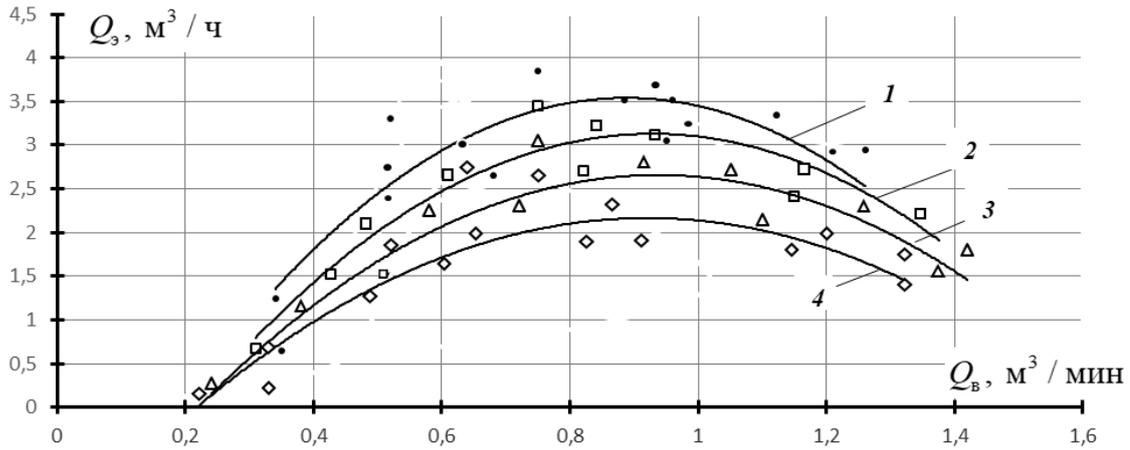


Рисунок 4.14 – Экспериментальные расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $h = 2$ м, $H = 3$ м, $\alpha = 0,4$, $D = 0,068$ м: 1 – при $\Delta H_n = 0,25$ м; 2 – при $\Delta H_n = 0,5$ м; 3 – при $\Delta H_n = 0,75$ м; 4 – при $\Delta H_n = 1,0$ м

В нагнетательном режиме работы эрлифтной установки экспериментальным методом получены регрессионные кривые расходных характеристик эрлифта $Q_э = f(Q_в)$ в диапазоне значений относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,20 \div 0,35$, высоты перепада $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м и расхода воздуха $Q_в = 0,2 \div 1,4$ м³/мин, которые размещены с экспериментальными точками и расчетными кривыми для таких же геометрических параметров установок на одной плоскости (Рисунок 4.15 – 4.18). Расчетные кривые были получены с помощью разработанной математической модели нагнетательного эрлифта в соответствующей программе на ПЭВМ.

Расчетным путем определены основные параметры оптимального (соответствующего наибольшей энергоэффективности) и максимального (при наибольшей подаче эрлифта) режимов работы нагнетательного эрлифта. Так, согласно расчетным данным, оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта при высоте перепада $\Delta H_n = 0,25$ м описывается характерными точками – значениями расхода воздуха $Q_{в. опт.} = 0,44$ м³/мин и подачи $Q_{э. опт.} = 2,85$ м³/ч; максимальный режим работы – расходом воздуха $Q_{в. макс.} = 0,70$ м³/мин и подачей $Q_{э. макс.} = 3,79$ м³/ч. Отклонение значений подачи нагнетательного эрлифта в характерных точках характеристик, полученных расчетным путем, от значений в точках регрессионной характеристики составили 8,8 % для оптимального режима

и 15,9 % для режима максимальной подачи (Приложение В7, Таблица В7.2, Рисунок 4.15).

Оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта при высоте перепада $\Delta H_{\text{н}} = 0,50$ м описывается значениями расхода воздуха $Q_{\text{в. опт.}} = 0,54$ м³/мин и подачи $Q_{\text{э. опт.}} = 2,80$ м³/ч; максимальный режим работы – расхода воздуха $Q_{\text{в. макс.}} = 0,82$ м³/мин и подачей $Q_{\text{э. макс.}} = 3,47$ м³/ч. Отклонение значений подачи в этом случае составили 9,4 % и 15,3 % для оптимального и максимального режимов соответственно (Рисунок 4.16).

Оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта при высоте перепада $\Delta H_{\text{н}} = 0,75$ м описывается значениями расхода воздуха $Q_{\text{в. опт.}} = 0,58$ м³/мин и подачи $Q_{\text{э. опт.}} = 2,49$ м³/ч; максимальный режим работы – расхода воздуха $Q_{\text{в. макс.}} = 0,80$ м³/мин и подачей $Q_{\text{э. макс.}} = 2,94$ м³/ч. Отклонение значений подачи в этом случае составили 10,7 % и 21,0 % для оптимального и максимального режимов соответственно (Рисунок 4.17).

Оптимальный режим работы нагнетательного эрлифта при высоте перепада $\Delta H_{\text{н}} = 1,0$ м описывается значениями расхода воздуха $Q_{\text{в. опт.}} = 0,59$ м³/мин и подачи $Q_{\text{э. опт.}} = 2,13$ м³/ч; максимальный режим работы – расхода воздуха $Q_{\text{в. макс.}} = 0,80$ м³/мин и подачей $Q_{\text{э. макс.}} = 2,48$ м³/ч. Отклонение значений подачи в этом случае составили 10,9 % и 15,3 % для оптимального и максимального режимов соответственно (Рисунок 4.18).

В таблице В7.2 (Приложение В7) представлены основные расчетные и экспериментальные параметры нагнетательного эрлифта и отклонения расчетных значений подачи эрлифта от экспериментальных для принятых значений высоты перепада $\Delta H_{\text{н}} = 0,25 \div 1,0$ м.

Среднее отклонение расчетной подачи от полученной экспериментально для оптимального режима составляет $\Delta Q_{\text{э. опт.}} = 9,9$ %, для режима максимальной подачи – $\Delta Q_{\text{э. макс.}} = 16,9$ % для всех принятых значений высоты перепада, что, учитывая особенности рассматриваемых процессов, подтверждает адекватность разработанной математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта эксперименту.

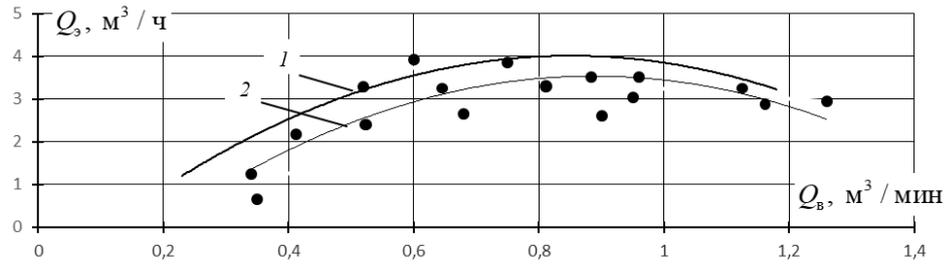


Рисунок 4.15 – Расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $h = 2$ м, $H = 3$ м, $\Delta H_H = 0,25$ м ($\alpha_{эН} = 0,35$), $D = 0,068$ м: 1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальная характеристика

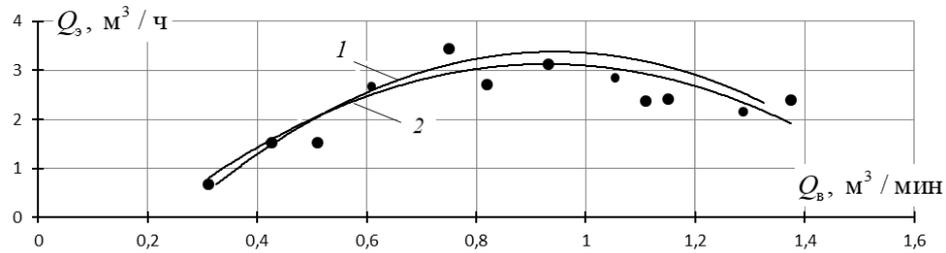


Рисунок 4.16 – Расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $h = 2$ м, $H = 3$ м, $\Delta H_H = 0,50$ м ($\alpha_{эН} = 0,3$), $D = 0,068$ м: 1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальная характеристика

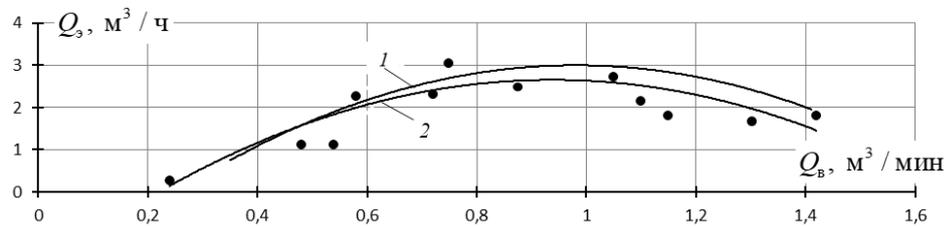


Рисунок 4.17 – Расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $h = 2$ м, $H = 3$ м, $\Delta H_H = 0,75$ м ($\alpha_{эН} = 0,25$), $D = 0,068$ м: 1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальная характеристика

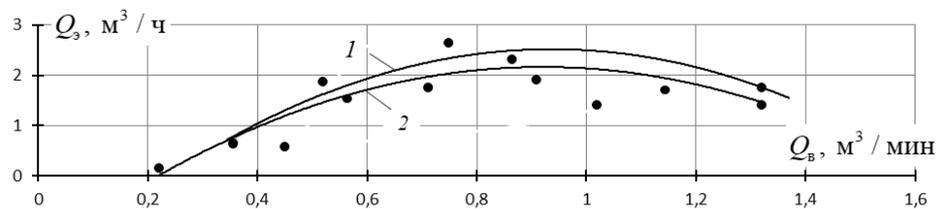


Рисунок 4.18 – Расходные характеристики нагнетательного эрлифта с $h = 2$ м, $H = 3$ м, $\Delta H_H = 1,0$ м ($\alpha_{эН} = 0,2$), $D = 0,068$ м: 1 – расчетная характеристика; 2 – экспериментальная характеристика

Приведена статистическая оценка, согласно (4.7) – (4.14) экспериментальных данных работы эрлифта в нагнетательном режиме работы при высотах перепада $\Delta H_n = 0,50; 0,75$ и $1,0$ м (Таблицы В7.8 – В7.10, Приложение В7). Для получения достоверных данных для построения расходных характеристик было выполнено по 5 измерений подачи эрлифта при близких к равным расходах воздуха эрлифтом Q_B , для каждого значения высоты перепада ΔH_n .

Получено при расходе сжатого воздуха $Q_B = 0,5$ м³/мин и относительном погружении эрлифта, работающего в нагнетательном с $\alpha_{эН} = 0,35$ при высоте перепада $\Delta H_n = 0,25$ м пять значений подачи эрлифта: $Q_э = 2,25; 2,40; 3,20; 2,65; 2,50$ м³/ч.

Математическое ожидание подачи эрлифта полученной в 5-ти параллельных опытах

$$\bar{x} = \frac{2,25 + 2,40 + 3,20 + 2,65 + 2,50}{5} = 2,60 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Среднеквадратичное отклонение

$$S_x = \sqrt{\frac{(2,25 - 2,6)^2 + (2,4 - 2,6)^2 + (3,2 - 2,6)^2 + (2,65 - 2,6)^2 + (2,5 - 2,6)^2}{5 - 1}} = 0,366 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Дисперсия

$$S_x^2 = \frac{(2,25 - 2,6)^2 + (2,4 - 2,6)^2 + (3,2 - 2,6)^2 + (2,65 - 2,6)^2 + (2,5 - 2,6)^2}{5 - 1} = 0,134 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Минимальные и максимальные значение результата измерения на границе доверительного интервала (параметр h выбираем из таблицы в зависимости от объема выборки $n = 5$, с вероятностью $P = 0,95$ ($\alpha = 0,05$), - $h = 1,67$)

$$x_{\min} = 2,60 - 1,67 \cdot 0,366 = 1,99 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$x_{\max} = 2,60 + 1,67 \cdot 0,366 = 3,21 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Результаты обработки экспериментальных данных подачи нагнетательного эрлифта при других значениях расхода сжатого воздуха при значении относительного погружения смесителя $\alpha_{\text{эН}} = 0,35$ и принятой в качестве примера высоте переподачи приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего в нагнетательном режиме при значении высоты переподачи $\Delta H_{\text{н}} = 0,25 \text{ м}$

Расход сжатого воздуха $Q_{\text{в}}$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{\text{э}}$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{\min} \div x_{\max}$, м ³ /ч
0,25	0,52; 0,65; 0,85; 0,47; 0,62	0,62	0,147	0,022	0,377 \div 0,867
0,50	2,25; 2,40; 3,20; 2,65; 2,50	2,60	0,366	0,134	1,99 \div 3,21
0,75	3,25; 3,70; 3,40; 3,45; 3,50	3,46	0,164	0,027	3,19 \div 3,73
1,0	3,40; 3,95; 3,35; 3,58; 3,55	3,57	0,236	0,056	3,17 \div 3,96
1,25	2,45; 3,20; 2,55; 2,77; 2,50	2,69	0,308	0,095	2,18 \div 3,21

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,134}{0,022} = 6,20.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\max} = n_{\max} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\min} = n_{\min} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 6,20$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,022 \cdot 4 + 0,134 \cdot 4 + 0,027 \cdot 4 + 0,056 \cdot 4 + 0,095 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,067 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики нагнетательного эрлифта при значении относительного погружения смесителя $\alpha_{\text{эН}} = 0,35$, полученное при помощи ЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 2,12 %

$$Q_3 = -2,27 + 13,5Q_{\text{в}} - 8,09Q_{\text{в}}^2 + 0,355Q_{\text{в}}^3. \quad (4.15)$$

Среднее отклонение расчетной подачи от полученной экспериментально для оптимального режима нагнетательного эрлифта для всех принятых значений высоты перепада $\Delta H_{\text{н}}$ составляет (Приложение В7, Таблица В7.1)

$$\Delta Q_{\text{э.опт}}^{\text{нагн}} = \frac{8,8 + 9,4 + 10,7 + 10,9}{4} = 9,9\%,$$

для режима максимальной подачи

$$\Delta Q_{\text{э.макс}}^{\text{нагн}} = \frac{15,9 + 15,3 + 21,0 + 15,3}{4} = 16,9\%.$$

Учитывая особенности рассматриваемых процессов, это подтверждает адекватность разработанной математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта эксперименту.

Данные проверки однородности дисперсий экспериментальных значений подачи эрлифта в традиционном режиме работы при других, принятых к исследованию, значениях относительного погружения смесителя α , а также эрлифта в нагнетательном режиме работы при других значениях высоты перепада ΔH_n приведены в Таблицах В7.3 – В7.10, Приложение В7.

4.3 Экспериментальные исследования работы нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем

В задачи экспериментальных исследований входило доказательство возможности поднятия жидкости над уровнем верхнего сечения подъемной трубы используя в качестве источника сжатого воздуха радиальный нагнетатель.

Лабораторная установка нагнетательного эрлифта была собрана на базе учебной экспериментальной установки кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ» (Рисунок 4.19, 4.20). Экспериментальные исследования работы установки были проведены как в традиционном ($\Delta H_n = 0$), так и в нагнетательном режимах при высоте перепада $\Delta H_n = 0,2$ м.

Геометрические параметры установки:

- диаметр подъемной трубы $D = 0,03$ м;
- высота подъема $H = 1,0$ м;
- высота подъема нагнетательного эрлифта $H_n = 1,2$ м;
- высота перепада $\Delta H_n = 0,2$ м;
- глубина погружения смесителя $h_n = 0,4$ м;
- относительное погружение нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,179$;
- относительное погружение традиционного эрлифта $\alpha = 0,286$;
- максимальное значение подачи эрлифта $Q_{э.макс} = 0,35$ м³/ч.

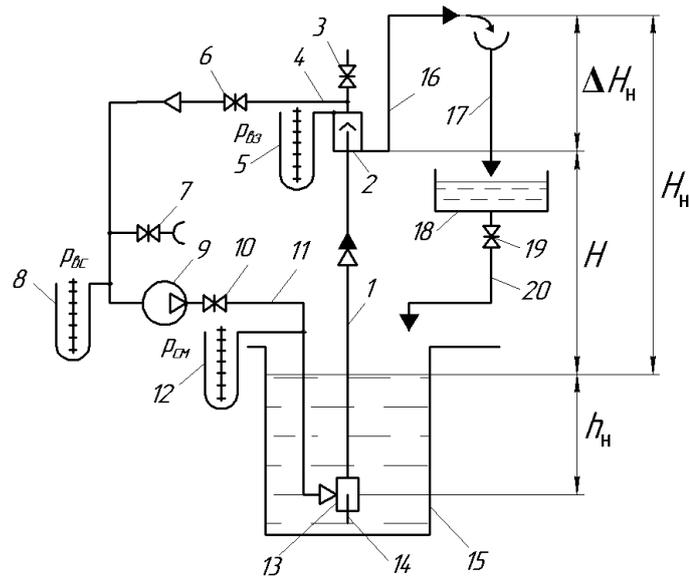


Рисунок 4.19 – Схема экспериментальной установки нагнетательного эрлифта с радиальным нагнетателем: 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель; 3, 6, 7, 10, 19 – запорно-регулирующие клапаны; 4 – воздухопровод; 5, 8, 12 – U-образные манометры; 9 – радиальный нагнетатель; 11 – напорный воздухопровод; 13 – смеситель; 14 – подающая труба; 15 – основная емкость; 16 – отводящий трубопровод; 17, 20 – сливные трубки; 18 – измерительный бак; H – высота подъема традиционного эрлифта; H_H – высота подъема нагнетательного эрлифта; ΔH_H – высота переподъема; h_H – глубина погружения смесителя; $p_{вс}$ – давление воздуха во всасывающей патрубке радиального нагнетателя; $p_{вз}$ – давление в воздухоотделителе; $p_{см}$ – давление в смесителе



Рисунок 4.20 – Лабораторная установка нагнетательного эрлифта с радиальным нагнетателем

Установка состоит из основной емкости 15, в которую погружена прозрачная подъемная труба эрлифта 1 со смесителем 13 и подающей трубой 14 в нижней части и воздухоотделителем 2 в верхней части. В качестве источника сжатого воздуха использовался центробежный нагнетатель 9, всасывающий патрубок которого был соединен с воздухоотделителем эрлифта через воздухопровод 4, а рабочий поток воздуха подавался по воздухопроводу 11 в смеситель 13. Запорно-регулирующие клапаны 3, 6, 7 использовались в пусковом режиме. При пуске установки клапаны 3, 7 и 10 – открыты, клапан 6 – закрыт. Постепенным регулированием этих клапанов установка выводилась на рабочий режим, при котором клапаны 3, 7 – закрыты, клапаны 6 – открыт; клапан 10 использовался для регулирования объема воздуха, поступающего в эрлифт. При поднятии давления $p_{вз}$ в воздухоотделителе выше атмосферного жидкость поднималась по отводящему трубопроводу 16 на высоту перепада ΔH_n , эквивалентную избыточному давлению в воздухоотделителе. По сливным трубкам 17 и 20, пройдя через измерительный бак 18 и клапан 19, жидкость возвращалась обратно в основную емкость 15. U -образные манометры 5, 8 и 12 использовались для контроля и измерения давлений: в воздухоотделителе $p_{вз}$, во всасывающем патрубке радиального нагнетателя $p_{вс}$ и в смесителе эрлифта $p_{см}$ соответственно.

В ходе исследований была экспериментально подтверждена возможность поднятия жидкости над уровнем верхнего сечения подъемной трубы нагнетательного эрлифта, используя в качестве источника сжатого воздуха радиальный нагнетатель. Установлено, что высота перепада жидкости достигала $\Delta H_n = 200$ мм, при этом избыточное давление в воздухоотделителе $p_{вз}$ и у всасывающего патрубка нагнетателя $p_{вс}$ колебались около отметки 200 мм. вод. ст. с погрешностью ± 10 мм. вод. ст. Показания U -образного манометра (избыточное давления в смесителе) составляли $\Delta p_{см} = 400$ мм вод. ст. соответствовали глубине погружения смесителя $h_n = 400$ мм.

Результаты экспериментальных исследований были зафиксированы с помощью фото- и видеосъемки (Рисунок 4.20).

4.4 Выводы

1. В условиях учебной лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ» разработана и смонтирована экспериментальная нагнетательная эрлифтная установка с воздушоструйным компрессором ($h_n = 2$ м, $H = 3$ м, $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м, $D = 0,068$ м, $\alpha_{\max} = 0,4$, $Q_{\text{э.макс}} = 8$ м³/ч), а также лабораторная установка с радиальным нагнетателем ($h_n = 0,4$ м, $H = 1,2$ м, $\Delta H_n = 0,2$ м, $D = 0,03$ м, $\alpha_{\max} = 0,4$, $Q_{\text{э.макс}} = 0,35$ м³/ч). Установки будут использоваться для дальнейших научных исследований и в учебном процессе.

2. Проведены экспериментальные и аналитические исследования характеристик воздушоструйного компрессора для доказательства увеличения коэффициента инжекции при увеличении давления инжектируемого потока. Экспериментально доказано, что при увеличении избыточного давления инжектируемого потока p_n от 1,0 до 1,4 кгс/см² (0,098 ÷ 0,137 МПа) коэффициент инжекции i возрастает в 1,79 ÷ 4,78 раза при давлении сжатия $p_c = 1,2 \div 1,5$ кгс/см² (0,118 ÷ 0,147 МПа) при избыточном давлении рабочего потока $p_c = 6,0$ кгс/см² (0,588 МПа). При этом возрастание коэффициента инжекции i происходит тем интенсивнее, чем меньше давление сжатия p_c .

3. Экспериментально получены расходные характеристики эрлифта, работающего по традиционной технологической схеме при значении относительного погружения смесителя $\alpha = 0,15 \div 0,40$; проведена обработка экспериментальных данных с помощью методов математической статистики и сравнение их с расчетными. Отклонения значений подач в характерных точках расходных характеристик традиционного эрлифта, полученных аналитически, от значений в точках регрессионных характеристик составило: для оптимального режима работы – 13,1 %, для режима максимальной подачи – 14,6 %.

4. Экспериментально получены расходные характеристики эрлифта в нагнетательном режиме с высотой перепада $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м; проведена обработка экспериментальных данных с помощью методов математической

статистики и сравнение их с расчетными. Отклонения значений подач в характерных точках расходных характеристик нагнетательного эрлифта, полученных аналитически от значений в точках регрессионных характеристик составило: для оптимального режима работы – 9,9 %, для режима максимальной подачи – 16,9 %, что подтверждают адекватность разработанной математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта эксперименту.

5. Экспериментально доказана возможность подъема жидкости над уровнем верхнего сечения подъемной трубы нагнетательного эрлифта, используя в качестве источника сжатого воздуха радиальный нагнетатель.

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ И ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК

5.1 Инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок

Исходными данными для проектирования нагнетательных эрлифтных установок для очистки водосборных емкостей являются:

- уровень воды в водосборной емкости H_e , м;
- максимальная крупность твердых частиц d_T , мм;
- плотность твердого материала ρ_T , кг/м³;
- возможное геометрическое погружение смесителя h_n , м;
- высота подъема жидкости (гидросмеси) H , м;
- необходимая высота перепада ΔH_n , м;
- рабочее давление в пневмосети p_p , МПа (кгс/см²).

Методику расчета рассмотрим на примере установки с воздушоструйным компрессором (Рисунок 3.2).

Диаметр подающей трубы [51, с. 160]

$$d' \geq (2,5 \div 3,0) \cdot d_T. \quad (5.1)$$

В качестве подающей трубы принимается труба $d_n \times \delta$ по ГОСТ 33228-2015 ближайшего большего диаметра $d \geq d'$ ($d = d_n - 2\delta$, где d_n – наружный диаметр, δ – толщина стенки).

Необходимая скорость гидросмеси в подающей трубе [51, с. 161]

$$v = 6,5 \sqrt{d_T \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)}, \quad (5.2)$$

где ρ – плотность несущей жидкости.

Необходимая подача эрлифта

$$Q'_3 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v. \quad (5.3)$$

Длина подъемной трубы нагнетательного эрлифта

$$L_H = h_H + H. \quad (5.4)$$

Высота подъема нагнетательного эрлифта

$$H_H = H + \Delta H_H. \quad (5.5)$$

Требуемое избыточное давление в воздухоотделителе (принимается равным давлению инжестируемого во всасывающий патрубок воздухоструйного компрессора потока)

$$p_{вз} = p_H = \rho g \Delta H_H. \quad (5.6)$$

Высота переподъема эквивалентного нагнетательного эрлифта
[Приложение А4]

$$\Delta H_{эН} = \frac{\Delta H_H (H_H - \Delta H_H + h_H)}{h_H - \Delta H_H}. \quad (5.7)$$

Относительные погружения смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта (Рисунок 2.3)

$$\alpha_{эН} = \frac{h_H}{H_H - \Delta H_H + \Delta H_{эН} + h_H}. \quad (5.8)$$

Удельный (при нормальных технических условиях) расход воздуха для нагнетательных эрлифтов:

– для коротких эрлифтов, при $(H + h)/D < 200$, $\rho gh/p_0 < 2$ при $4 \leq h_n \leq 10$ м и $\alpha_{эН} \leq 0,5$ (D – эквивалентный диаметр подъемной трубы, p_0 – атмосферное давление)

$$q_{эН} = 0,767 \alpha_{эН}^{-2,2}; \quad (5.9)$$

– для коротких эрлифтов при $\alpha_{эН} > 0,5$

$$q_{эН} = \frac{q_c}{\frac{p_0}{\rho gh_n} \ln\left(1 + \frac{\rho gh_n}{p_0}\right)}, \quad (5.10)$$

где $q_c = (22,7 + 10,1\alpha_{эН}) \cdot 0,0063^{0,97\alpha_{эН}}$ – среднее газосодержание в подъемной трубе.

Диаметр подъемной трубы

$$D' = \left(\frac{Q_s}{c}\right)^{0,4}, \quad (5.11)$$

где c – коэффициент подачи эрлифта; в соответствии с рекомендациями [3, с. 118] $c = 0,643 - 3,13 \cdot \alpha_{эН} + 9,25 \cdot \alpha_{эН}^2$.

В качестве подъемной трубы принимается труба $D_n \times \delta$ по ГОСТ 33228-2015 ближайшего большего диаметра $D \geq D'$ ($D = D_n - 2\delta$, где D_n – наружный диаметр, δ – толщина стенки).

Подача эрлифта [3, с. 121]

$$Q_s = c \cdot D^{2,5}. \quad (5.12)$$

Расход воздуха эрлифтом

$$Q_B = q_{ЭН} \cdot Q_3 \quad (5.13)$$

Диаметр воздухопровода

$$d'_B = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_B \cdot p_0}{\pi \cdot v_B \cdot (p_0 + \rho \cdot g \cdot h_H)}}, \quad (5.14)$$

где p_0 – атмосферное давление, $p_0 = 9,81 \cdot 10^4$ Па;

v_B – скорость воздуха в воздухопроводе, рекомендуется $v_B = 15 \div 20$ м/с;

g – ускорение свободного падения.

В качестве воздухоподающей трубы принимается труба $d_{ВН} \times \delta$ по ГОСТ 33228-2015 ближайшего большего диаметра $d_B \geq d'_B$ ($d_B = d_{ВН} - 2\delta$, где $d_{ВН}$ – наружный диаметр, δ – толщина стенки).

Потери давления в воздухопроводе [9, с. 26]

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{8 \cdot l \cdot Q_B^2 \cdot \rho_B \cdot (p_0 + \rho \cdot g \cdot h_H)}{\pi^2 \cdot d_B^5 \cdot p_0}, \quad (5.15)$$

где ρ_B – плотность воздуха при нормальных условиях, $\rho_B = 1,2$ кг/м³;

l – длина воздухопровода;

λ – коэффициент гидравлического трения, рекомендуется $\lambda = 0,03$.

Давление сжатия струйного аппарата

$$p_c = k \cdot (\rho \cdot g \cdot h_H + \Delta p), \quad (5.16)$$

где k – коэффициент запаса, учитывающий необходимость повышения давления при пуске, $k = 1,15 \div 1,20$.

Достижимый коэффициент инжекции воздуходвухоструйного компрессора в составе нагнетательной эрлифтной установки $u_{\text{ЭН}}$ определяются давлениями потоков (абсолютными): p_p – рабочего (из пневмосети), p_n – инжектируемого, p_c – сжатого. Расчеты производятся в разработанной на кафедре «Энергомеханические системы» ГОУВПО ДОННТУ компьютерной программе [85, с. 111].

Удельный расход рабочего воздуха из пневмосети нагнетательной эрлифтной установкой

$$q_{\text{рЭН}} = \frac{q_{\text{ЭН}}}{1 + u_{\text{ЭН}}}. \quad (5.17)$$

Расход рабочего воздуха (из пневмосети)

$$Q_p = Q_3 \cdot q_{\text{рЭН}}. \quad (5.18)$$

Производительность воздуходвухоструйного компрессора

$$Q_c = Q_p + Q_n, \quad (5.19)$$

где $Q_n = Q_p \cdot u_{\text{ЭН}}$ – расход инжектируемого воздуха. (5.20)

Проверка условия $Q_c \geq Q_b$.

5.2 Нагнетательная эрлифтная установка для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК»

5.2.1 Существующая схема очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м

Водоотлив шахты трехступенчатый. Главный водоотлив гор. 270 м. расположен в руддворе горизонта 270 м. В насосной камере установлены 2 насоса типа ЦНС 300х420 и один насос ЦНС 300х360 (Рисунок 5.1). Суммарный приток воды 481 м³/час. Вода откачивается по трем трубопроводам диаметром 250 мм, проложенным по клетьевому стволу «Новый» в поверхностный отстойник. Геодезическая высота подъема и геодезическая отметка водоотлива - 270 м. Перекачка воды с главного водоотлива гор. 270 м. на поверхность является третьей ступенью водоотлива.

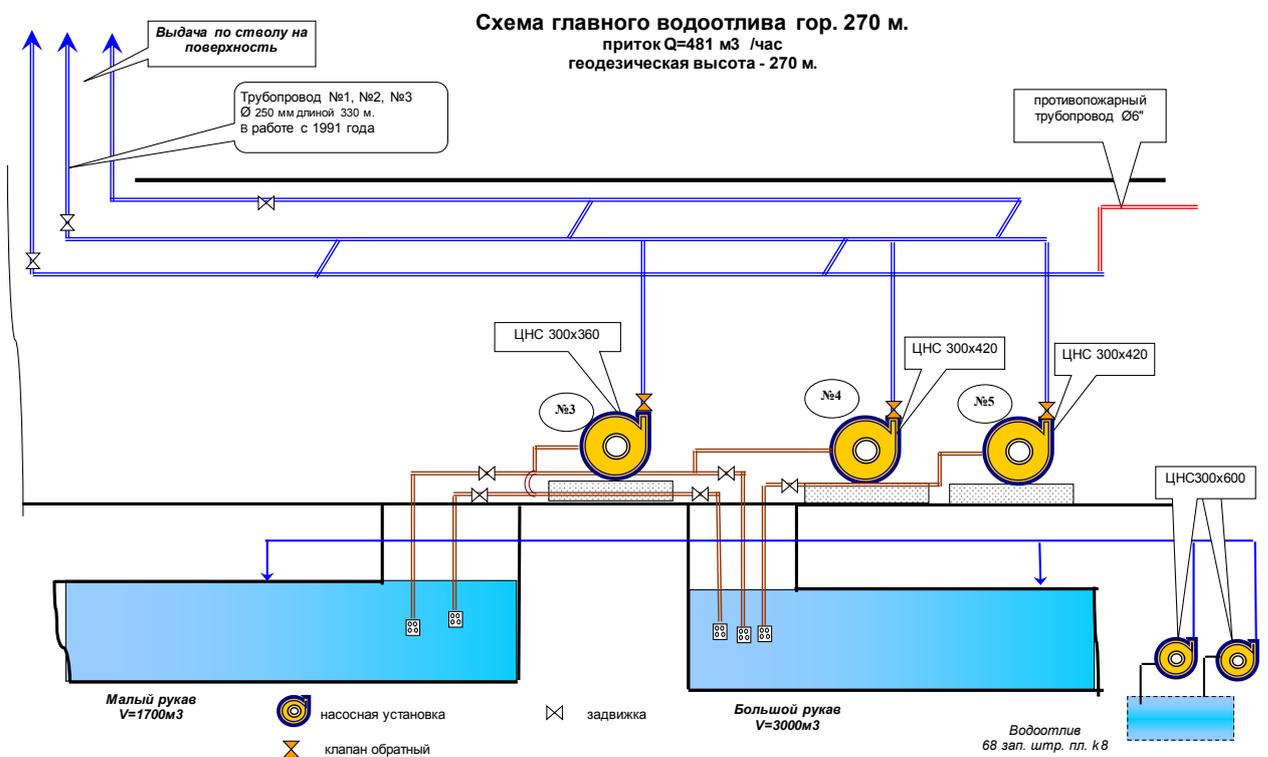


Рисунок 5.1 – Схема главного водоотлива гор. 270 м ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГП «ДУЭК»

Главный водоотлив гор. 270 м. работает в режиме ручного управления. Водосборников по проекту и по факту - два. Большой - емкостью 3000 м³, малый - 1700 м³. Заиленность большого рукава - 5%, малого рукава - 70%. Насосная камера главного водоотлива гор.270 м рассчитана на монтаж шести насосных установок.

В рамках плана реконструкции водоотливного комплекса ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГП «ДУЭК» предусмотрено приведение водоотлива 68 западного штрека, водоотлива горизонтов 270 и 882 м., а также водоотлива ходка мех. доставки 3 ступени в проектное состояние. В частности, в числе прочих операций на водоотливе гор. 270 м. запланированы операции по расширению камеры водоотлива, монтажу новых насосных установок, чистке водосборников и др.

На сегодняшний момент чистка водосборников главного водоотлива (Рисунок 5.1) осуществляется не чаще одного раза в год полумеханизированным способом с использованием шламовых насосов ШН – 250-34, вспомогательных лебедок 1ЛШВ-01 и другого оборудования с применением ручного неквалифицированного труда. Для осуществления этой операции в тяжелых, антисанитарных и нередко - опасных условиях необходимо привлечение как минимум четырех горнорабочих (для очистки одного приемного колодца), а также одного электрослесаря подземного. При этом необходимо полное или частичное осушение ветви водосборника и приемного колодца.

Применяемый способ очистки является устаревшим и низкоэффективным, характеризуется значительными трудо- и временными затратами, при этом допускается значительное заиливание водосборных емкостей, что может привести к опасной ситуации.

5.2.2 Расчет нагнетательной эрлифтной установки для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м

Нагнетательная эрлифтная установка для очистки приемной емкости главного водоотлива гор. 270 м будет способствовать значительному повышению эффективности этой операции, сокращению времени, материальных и трудовых затрат на очистку, повышению безопасности ведения работ. Внедрение эрлифтной очистки от твердого материала исключает постоянное обслуживающего персонала, поэтому данная схема выгодна с санитарно-гигиенической точки зрения и решает вопрос ликвидации тяжелого неквалифицированного труда. Гидромеханизованная очистка также способствует предупреждению и оперативной ликвидации возможных аварий, т.к. при этом не допускается значительное заиливание водосборных емкостей.

Новая схема очистки с применением нагнетательных эрлифтных установок (Рисунок 5.2) предполагает установку одного нагнетательного эрлифта в каждый из приемных колодцев (малого и большого рукава водосборников) с питанием обоих эрлифтов сжатым воздухом от передвижного компрессора УКВШ 5/7, имеющегося на балансе предприятия, с применением в схеме одного воздушоструйного компрессора, преобразующего энергию избыточного давления рабочего воздуха от компрессора в расход воздуха, всасываемый из атмосферы. Вода с включениями твердых частиц будет напорно транспортироваться в недействующий Восточный рукав водосборника 68 западного штрека пласта k_8 . Высота перепада $\Delta H_n = 3$ м, создаваемая эрлифтом будет компенсировать гидравлические потери при транспортировке пульпы, т.к. Восточный рукав водосборника 68 западного штрека, расположенный на горизонте околоствольного двора располагается на той же геодезической отметке.

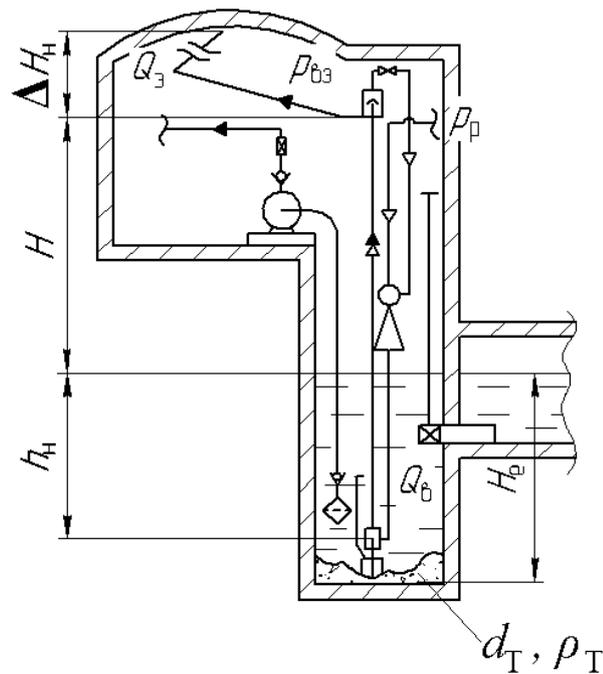


Рисунок 5.2 – Предлагаемая схема очистки приемного колодца с применением нагнетательного эрлифта

Исходными данными при проектировании нагнетательной эрлифтной установки для очистки приемного колодца водоотливных насосов являются:

- уровень воды в приемном колодце H_e , м;
- максимальная крупность твердых частиц $d_T = 50$ мм;
- плотность твердого материала $\rho_T = 1400$ кг/м³;
- возможное геометрическое погружение смесителя $h_n = 6$ м;
- высота подъема жидкости (гидросмеси) $H = 3$ м;
- необходимая высота переподачи $\Delta H_n = 3$ м;
- рабочее давление в пневмосети $p_p = 0,588$ МПа (6,0 кгс/см²).

Использована методика расчета нагнетательной эрлифтной установки с воздушнотруйным компрессором в пневмопроводе в соответствии с (5.1) – (5.19).

Диаметр подающей трубы

$$d \geq (2,5 \div 3,0) \cdot d_T;$$

$$d = 2,5 \cdot 50 = 125 \text{ мм.}$$

В качестве подающей трубы принимаем трубу 133x5 по ГОСТ 33228-2015 (внутренний диаметр $d = 133 - 2 \cdot 5 = 123$ мм).

Необходимая скорость гидросмеси в подающей трубе

$$v = 6,5 \sqrt{d_T \left(\frac{\rho_T}{\rho} - 1 \right)} = 6,5 \sqrt{0,05 \cdot \left(\frac{1400}{1000} - 1 \right)} = 0,92 \text{ м/с},$$

где $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность несущей жидкости.

Необходимая подача эрлифта

$$Q'_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v = \frac{3,14 \cdot 0,123^2}{4} \cdot 0,92 = 0,0109 \text{ м}^3 / \text{с} \text{ (} 39,3 \text{ м}^3 / \text{ч)}.$$

Длина подъемной трубы

$$L_H = h_H + H = 6 + 3 = 9 \text{ м}$$

Высота подъема

$$H_H = H + \Delta H_H = 3 + 3 = 6 \text{ м}.$$

Требуемое избыточное давление в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке воздушоструйного компрессора)

$$p_{вз} = p_H = \rho g \Delta H_H = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3 = 29430 \text{ Па} = 29,4 \text{ кПа}.$$

Высота переподъема эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$\Delta H_{эH} = \frac{\Delta H_H (H_H - \Delta H_H + h_H)}{h_H - \Delta H_H} = \frac{3 \cdot (6 - 3 + 6)}{6 - 3} = 9 \text{ м}.$$

Относительные погружения смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта

$$\alpha_{\text{эН}} = \frac{h_{\text{н}}}{H_{\text{н}} - \Delta H_{\text{н}} + \Delta H_{\text{эН}} + h_{\text{н}}} = \frac{6}{6 - 3 + 9 + 6} = 0,333.$$

Удельный (при нормальных технических условиях) расход воздуха для нагнетательных эрлифтов:

$$q_{\text{эН}} = 0,767 \cdot \alpha_{\text{эН}}^{-2,2} = 0,767 \cdot 0,333^{-2,2} = 8,62.$$

Диаметр подъемной трубы

$$D' = \left(\frac{Q'_3}{c} \right)^{0,4} = \left(\frac{0,0109}{0,627} \right)^{0,4} = 0,198 \text{ м},$$

где c – коэффициент подачи эрлифта;

$$c = 0,643 - 3,13 \cdot \alpha_{\text{эН}} + 9,25 \cdot \alpha_{\text{эН}}^2 = 0,643 - 3,13 \cdot 0,333 + 9,25 \cdot 0,333^2 = 0,627.$$

В качестве подъемной трубы принимаем трубу 219х7 по ГОСТ 33228-2015 (внутренний диаметр $D = 219 - 2 \cdot 7 = 205$ мм).

Подача эрлифта

$$Q_3 = c \cdot D^{2,5} = 0,627 \cdot 0,205^{2,5} = 0,0119 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (42,8 \text{ м}^3 / \text{ч}).$$

Расход воздуха эрлифтом

$$Q_{\text{в}} = q_{\text{эН}} \cdot Q_3 = 8,62 \cdot 0,0119 = 0,1026 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (6,15 \text{ м}^3 / \text{мин}).$$

Диаметр воздухопровода

$$d'_B = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_B \cdot p_a}{\pi \cdot v_B \cdot (p_a + \rho \cdot g \cdot h_H)}},$$

где $p_a = 9,81 \cdot 10^4$ Па – атмосферное давление;

$v_B = 17$ м/с – скорость воздуха в воздухопроводе,

тогда

$$d'_B = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,1026 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{3,14 \cdot 17 \cdot (9,81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 6)}} = 0,0693 \text{ м.}$$

В качестве воздухоподающей трубы принимаем трубу 76x5 по ГОСТ 33228-2015 (внутренний диаметр $d_B = 76 - 2 \cdot 5 = 66$ мм).

Потери давления в воздухопроводе

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{8 \cdot l \cdot Q_B^2 \cdot \rho_B \cdot (p_a + \rho \cdot g \cdot h_H)}{\pi^2 \cdot d_B^5 \cdot p_a},$$

где $\rho_B = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях;

$l = 30$ м – длина воздухопровода;

$\lambda = 0,03$ – коэффициент гидравлического трения,

тогда $\Delta p = 0,03 \cdot \frac{8 \cdot 30 \cdot 0,1026^2 \cdot 1,2 \cdot (9,81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 6)}{3,14^2 \cdot 0,066^5 \cdot 9,81 \cdot 10^4} = 11779 \text{ Па} = 11,8 \text{ кПа.}$

Давление сжатия струйного аппарата

$$p_c = k \cdot (\rho \cdot g \cdot h_H + \Delta p) = 1,2 \cdot (1000 \cdot 9,81 \cdot 6 + 11779) = 84767 \text{ Па} = 84,8 \text{ кПа,}$$

где $k = 1,2$ – коэффициент запаса.

Расчет, произведенный с помощью разработанной на кафедре «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ» программы показал, что для данных условий достижимый коэффициент инжекции воздухом струйного компрессора $u_{ЭН} = 1,22$.

Удельный расход рабочего воздуха (из пневмосети)

$$q_{\text{рэн}} = \frac{q_{\text{эн}}}{1 + u_{\text{эн}}} = \frac{8,62}{1 + 1,22} = 3,89.$$

Расход рабочего воздуха (из пневмосети)

$$Q_p = Q_3 \cdot q_{\text{рэн}} = 0,0119 \cdot 3,89 = 0,0463 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (2,78 \text{ м}^3 / \text{мин}).$$

Производительность воздуходувного компрессора

$$Q_c = Q_p + Q_n = 2,78 + 3,39 = 6,17 \text{ м}^3 / \text{мин}.$$

где $Q_n = Q_p \cdot u_{\text{эн}} = 2,78 \cdot 1,22 = 3,39 \text{ м}^3 / \text{мин}$ – расход инжестируемого воздуха.

Проверка условия $Q_c \geq Q_B$: $6,17 > 6,15 \text{ (м}^3/\text{мин)}$.

5.2.3 Расчет ожидаемого годового экономического эффекта от применения нагнетательных эрлифтных установок

Расчет экономического эффекта выполнен в соответствии с «Методикой расчета экономической эффективности внедрения новой техники и технологии» и заключается в сравнении приведенных затрат при существующем (базовом) способе очистки и способе с применением нагнетательных эрлифтных установок. Экономия достигается в основном за счет изменения следующих элементов затрат: сокращение затрат по элементам «заработная плата» и «материалы».

Годовой экономический эффект

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = Z_1 - Z_2, \text{ руб.}, \quad (5.21)$$

где Z_1 – приведенные затраты на очистку приемных колодцев главного водоотлива по базовому варианту; Z_2 – приведенные затраты на очистку с применением нагнетательных эрлифтов.

Расчет приведенных затрат на очистку водосборных емкостей по базовому варианту.

Приведенные затраты по базовому варианту

$$Z_1 = C_1 + E_n \cdot K_1, \text{ руб.}, \quad (5.22)$$

где C_1 – эксплуатационные расходы по базовому варианту; E_n – нормативный коэффициент капитальных вложений ($E_n = 0,15$); K_1 – капитальные вложения по базовому варианту.

Капитальные затраты при базовом варианте не учитываем, т.к. аварийный выход из строя шламовых насосов и вспомогательных лебедок происходит крайне редко. Приведенные затраты по базовому варианту равны эксплуатационным

$$Z_1 = C_1, \text{ руб.}$$

Эксплуатационные затраты целесообразно разделить на следующие составляющие:

- а) стоимость электроэнергии, потребляемой шламовыми насосами и вспомогательными лебедками;
- б) заработная плата обслуживающего персонала;
- в) затраты на вспомогательный инвентарь и запчасти;
- г) амортизационные отчисления.

Мощность приводного двигателя шламового насоса ШН 250-34 – 55 кВт. При эксплуатации в период очистки в работе находится 2 насоса (по одному насосу в каждом приемном колодце). Учитывая, что за год колодцы находятся на очистке в течение 2 недель по 2 смены в день (168 часов) при коэффициенте использования

1,0 и коэффициенте нагрузки 1,0, а также действующей стоимости электроэнергии 3,21 руб./кВт·ч, КПД двигателя 0,95, КПД сети 0,98

$$S_{\text{э}} = \frac{N_{\text{у}} \cdot C_{\text{э}} \cdot K_{\text{Н}} \cdot T}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{с}}}, \quad (5.23)$$

где $N_{\text{у}}$ – установленная мощность электродвигателя, кВт;

$C_{\text{э}}$ – цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб;

$K_{\text{Н}}$ – коэффициент нагрузки двигателя по мощности;

T – время работы;

$\eta_{\text{дв}}$ – КПД электродвигателя;

$\eta_{\text{с}}$ – КПД электрической сети.

Расход электроэнергии при эксплуатации шламовых насосов составляет

$$S_{\text{э. шн}} = \frac{2 \cdot 55 \cdot 3,21 \cdot 168}{0,95 \cdot 0,98} = 63717 \text{ руб.}$$

Расход электроэнергии при эксплуатации лебедок составляет

$$S_{\text{э. леб}} = \frac{2 \cdot 11 \cdot 3,21 \cdot 0,5 \cdot 168}{0,95 \cdot 0,98} = 6372 \text{ руб.}$$

Стоимость электроэнергии, потребляемой оборудованием приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Расходы по электроэнергии при очистке водоотливных емкостей по базовой схеме

Потребитель	Мощность, кВт	Стоимость, руб. в год
Шламовый насос ШН-250-34 (2 шт)	55	63717
Лебедка 1ЛШВ-01 (2 шт.)	11	6372
Всего	-	70089

Заработная плата обслуживающего персонала (Таблица 5.2)

$$Z_{\text{баз}} = Ч_{\text{тс}} \cdot N_{\text{р}} \cdot \Phi_{\text{р}} \cdot K_{\text{д}}, \quad (5.24)$$

где $Ч_{\text{тс}}$ – часовая тарифная ставка соответствующего разряда, руб/час;

$N_{\text{р}}$ – количество рабочих;

$\Phi_{\text{р}}$ – фонд времени одного рабочего, час;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы ($K_{\text{д}} = 1$).

Тогда

$$Z_{\text{баз}} = 262,5 \cdot 168 \cdot 4 + 375 \cdot 168 \cdot 1 = 239400 \text{ руб.}$$

Таблица 5.2 - Расчет оплаты труда при существующем способе очистки

Должность	Часовая тарифная ставка, руб./час	Количество рабочих, чел.	Фонд времени одного рабочего, час.
Горнорабочий	262,5	4	168
Электрослесарь подземный	375	1	168

Стоимость материалов и запчастей (брони) при ежегодном плановом ремонте насосов ШН 250-34 и лебедок 1ЛШВ-01 составляет 127000 руб.

Амортизационные отчисления на используемое оборудование, а также на оборудование предлагаемой схемы определяются прямолинейным способом. Расчет суммы амортизации на первый год работы приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Результаты расчета амортизационных отчислений

Базовый вариант				Новый вариант			
Оборудование	Балансовая стоимость, руб.	Норма амортизации, %	Годовые амортиз. отчисления	Оборудование	Балансовая стоимость, руб.	Норма амортизации, %	Годовые амортиз. отчисления
Шлам. насосы	1000000	10	100000	Подъемные трубы	40000	10	4000
Лебедки	500000	10	50000	Воздухоподающие трубы	24000	10	2400
Бадьи	200000	10	20000	Смесители	16000	10	1600
-	-	-	-	Воздухоотделители	16000	10	1600
-	-	-	-	Воздухоструйный компрессор	20000	10	2000
-	-	-	-	Запорно-регулирующая арматура	44000	10	4400
Всего	1700000	-	170000	Всего	160000	-	16000

Приведенные годовые расходы на очистку емкостей при существующем способе

$$Z_1 = 70089 + 239400 + 127000 + 170000 = 606489 \text{ руб.}$$

Расчет приведенных затрат на очистку приемных колодцев с использованием нагнетательных эрлифтов.

Эксплуатационные затраты целесообразно разделить на следующие составляющие:

- а) стоимость электроэнергии потребляемой компрессором;
- б) заработная плата обслуживающего персонала;
- в) затраты на капитальные вложения;
- г) амортизационные отчисления.

При эксплуатации эрлифтной установки, целесообразно принимать в качестве источника сжатого воздуха компрессор УКВШ 15/7 (номинальная мощность $N = 90$ кВт), имеющийся на балансе предприятия и имеющий расход воздуха $Q = 15\text{м}^3/\text{мин}$.

Принимая, что за год эрлифтные установки будут находиться в работе 144 часа (включаться 2 раза в месяц и работать в течение рабочей смены электрослесаря – 6 ч), с учетом КПД компрессора 0,68, КПД приводного двигателя 0,9 и КПД электрической сети 0,98, затраты на электроэнергию составят (Таблица 5.4)

$$S_{\text{э.эн}} = \frac{90 \cdot 3,21 \cdot 1 \cdot 144}{0,68 \cdot 0,9 \cdot 0,98} = 69263 \text{ руб.}$$

Таблица 5.4 - Затраты на электроэнергию при очистке и водоотливе емкостей с использованием нагнетательных эрлифтов

Потребитель	Мощность кВт	Стоимость, руб. в год
Компрессор УКВШ 15/7	90	69263

При эрлифтном способе очистки работы по обслуживанию установок осуществляет один электрослесарь подземный, имеющий тарифную часовую ставку 375 руб/час и два горнорабочих, имеющих тарифную часовую ставку 262,5 руб/час (Таблица 5.5).

Таблица 5.5 - Расчет оплаты труда при новом способе очистки

Должность	Часовая тарифная ставка, руб./час	Количество рабочих, чел.	Фонд времени одного рабочего, час.
Электрослесарь подземный 5 разряда	375	1	144
Горнорабочий	262,5	2	144

Затраты на заработную плату составляют

$$Z_{\text{нов}} = 375 \cdot 144 + 262,5 \cdot 2 \cdot 144 = 75654 \text{ руб.}$$

Капитальные вложения на организацию эрлифтного способа очистки водосборных емкостей приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Капитальные затраты

Наименование	Количество	Стоимость, руб.	Стоимость монтажа, руб.	Всего, руб.
Подъемная труба $D = 194 \text{ мм}$, $l = 9 \text{ м}$	2 шт.	40000	2000	42000
Воздухоподающая труба $d_b = 54 \text{ мм}$, $l = 15 \text{ м}$.	2 шт.	24000	2000	26000
Воздухоструйный компрессор	1 шт.	200000	1000	21000
Воздухоотделитель (внешн. труба $D_{\text{во}} = 400 \text{ мм}$)	2 шт.	16000	1000	17000
Смеситель (внешн. труба $D_{\text{см}} = 350 \text{ мм}$)	2 шт.	16000	1000	17000
Запорно-регулирующая арматура	6 шт.	44000	5000	49000
Всего	-	160000	12000	172000

Полные капитальные вложения на организацию эрлифтного способа очистки

$$K_2 = 80000 + 7000 = 87000 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления при новом способе очистки (Таблица 5.3)

$$A = 16000 \text{ руб.}$$

Годовые приведенные затраты на очистку нагнетательными эрлифтами

$$Z_2 = C_2 + E_n \cdot K_2, \text{ руб.};$$

$$Z_2 = 69263 + 75654 + 160000 + 12000 + 172000 \cdot 0,15 = 342718 \text{ руб.}$$

Суммарный годовой экономический эффект от применения нагнетательных эрлифтных установок

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = Z_1 - Z_2 = 606489 - 342718 = 263861 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости

$$T = K_2 / \mathcal{E}_{\text{год}}, \quad (5.25)$$

где K_2 – суммарные капитальные затраты на сооружение эрлифтных установок

$$T = 172000 / 263861 = 0,65 \text{ года.}$$

5.3 Требования к конструктивным и технологическим параметрам нагнетательных эрлифтных установок

Анализ условий эксплуатации шахтных водосборных емкостей (раздел 1) показывает, что нагнетательные эрлифтные установки для водоотлива и гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей должны отвечать следующим основным требованиям:

- обеспечивать эффективную работу по гидромеханизированному удалению твердого материала и откачке притока воды;
- практически полностью, насухо удалять гидросмесь из емкости (если есть такая необходимость);
- всасывающее устройство эрлифта должно обеспечивать прохождение в подъемную трубу всей поступающей в водоосборную емкость горной массы;
- иметь подачу, обеспечивающую в подводящем трубопроводе эрлифта транспортную скорость для гидросмеси.

Опыт эксплуатации и результаты научных исследований [29, с. 25, 30, с. 17-22, 31, с. 54, 32, с. 4, 108, 109, 110] позволяют сделать следующие рекомендации по усовершенствованию эрлифтных установок в горной промышленности:

- необходимо совмещать водоотлив с гидравлической чисткой зумпфа от просыпающихся частиц угля и породы. При этом следует отказаться от малонадежных механических средств чистки, применение которых связано обычно с высокой трудоемкостью;
- средства зумпфового водоотлива должны быть просты и надежны в эксплуатации и полностью автоматизированы, что позволит исключить пребывание человека в зумпфе. Этому требованию полностью отвечают нагнетательные эрлифтные установки;
- установки, откачивающие твердую фракцию из зумпфов, должны быть оборудованы всасывающими устройствами, обеспечивающими захват и дозирование твердого без предварительного перемешивания и взмучивания;
- нижнюю часть ствола выше максимального уровня воды необходимо перекрывать прочным полком с решеткой, препятствующей попаданию негабаритных кусков угля и различных предметов;
- гидросмесь должна откачиваться на поверхность, для осветления в специальных отстойниках, или сгущаться непосредственно на горизонте околоствольного двора; густая пульпа (влажностью около 50%) может подаваться в специальные вагонетки или посредством в бункер скипового подъема;

- эрлифтные установки специальной конструкции рекомендуется применять для чистки предварительных отстойников, сооружаемых для осаждения твердого перед обычными водосборниками, а также чистки водосборных колодцев насосов главного водоотлива;
- эрлифтные установки целесообразно применять на участковом водоотливе шахт и поступлении воды с бремсберговых полей.

Изученные данные о состоянии зумпфов стволов и других водосборных емкостей [9, с. 26-27, 10, с. 28-29, 11, с. 73-75, 12, с. 44, 111, 112, 113] действующих шахт позволили сформулировать основные требования к работе эрлифтов при их гидромеханизированной очистке:

- эрлифтная установка должна обеспечивать эффективный гидроподъем всего разрыхленного твердого материала, поданного ко всасывающему устройству подводящей трубы, включая крупные одиночные куски ($d = 80 \div 100$ мм, $\rho_T \leq 2600$ кг/м³) и металлические предметы;
- наибольшая высота подъема гидросмеси над уровнем жидкости определяется расположением улавливающего бункера и предохранительного полка в зумпфе и составляет $10 \div 12$ м;
- подача эрлифтной установки по твердому материалу должна определяться полезным объемом примыкающих к стволу выработок, отводимых под шламонакопитель, временем их наполнения и очистки, при объемных подачах эрлифта от 20 до 150 м³/ч пульпы, и составлять в среднем $8 \div 10$ т/ч при консистенции Т:Ж = 1:1 ÷ 1:5.

В ходе исследований нагнетательной эрлифтной установки с воздушоструйным компрессором как средства гидроочистки водосборных емкостей шахт сформулированы следующие требования к проектированию таких установок:

- необходимо производить согласованный расчет эрлифтной установки и воздушоструйного компрессора для конкретных горно-геологических условий;

- размещать струйный компрессор необходимо как можно ближе к воздухоотделителю эрлифта (для уменьшения потерь давления на всасе в струйный компрессор);
- конструкция воздухоотделителя должна быть спроектирована таким образом, чтобы минимизировать попадание воздуха в сливную трубу, а также не допускать интенсивный влагунос во всасывающий тракт струйного компрессора.

Исходя из анализа особенностей математической модели рабочего процесса существуют следующие требования к соотношениям конструктивных параметров нагнетательных эрлифтных установок:

- высота перепада нагнетательного эрлифта должна быть меньше величины геометрического погружения смесителя ($\Delta H_n < h_n$);
- с целью обеспечения снарядной структуры водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта величины геометрического погружения смесителя должна так соотноситься с высотой подъема: $h_n \geq 0,67 \cdot H_n$.

Конструкция всасывающего устройства для очистки водосборных емкостей представлена на рисунке 5.3. Всасывающее устройство отстойников типа УВ₀ [3, с. 137], состоит из всасывающего трубопровода 1, являющегося продолжением всасывающего трубопровода эрлифта, с днищем 2 и камерой подпитки 3 составляют основные рабочие полости всасывающего устройства. Камера подпитки 3 ограничивает доступ твердого материала к всасывающему трубопроводу 1 и обеспечивает засыпание последнего твердым материалом на высоту $(1...1,5) \cdot d_b$, где d_b - диаметр всасывающего трубопровода 1. Камера подпитки 3 создает условия для подвода подпитывающего потока во всасывающий трубопровод 1 через систему подпитки 4 (патрубок с отверстиями). При изменении условий фильтрации (изменение слоя завала устройства твердым материалом и состава последнего) изменяется и перепад напоров на системе подпитки 4, вызывая изменение подпитывающего расхода. В результате концентрация гидросмеси, которая поступает во всасывающий трубопровод, будет оставаться приблизительно постоянной, то есть обеспечивается автоматическое дозирование твердого материала.

Для строгой фиксации рабочего зазора Δh устройство имеет стойки 5, а для обеспечения подтекания твердого материала в зону захвата всасывающего устройства форма дна отстойника должна представлять собой металлическую чашу (днище всасывающего устройства 2 и металлический настил 6, который примыкает к нему, выполненный под углом не менее 50° к горизонту).

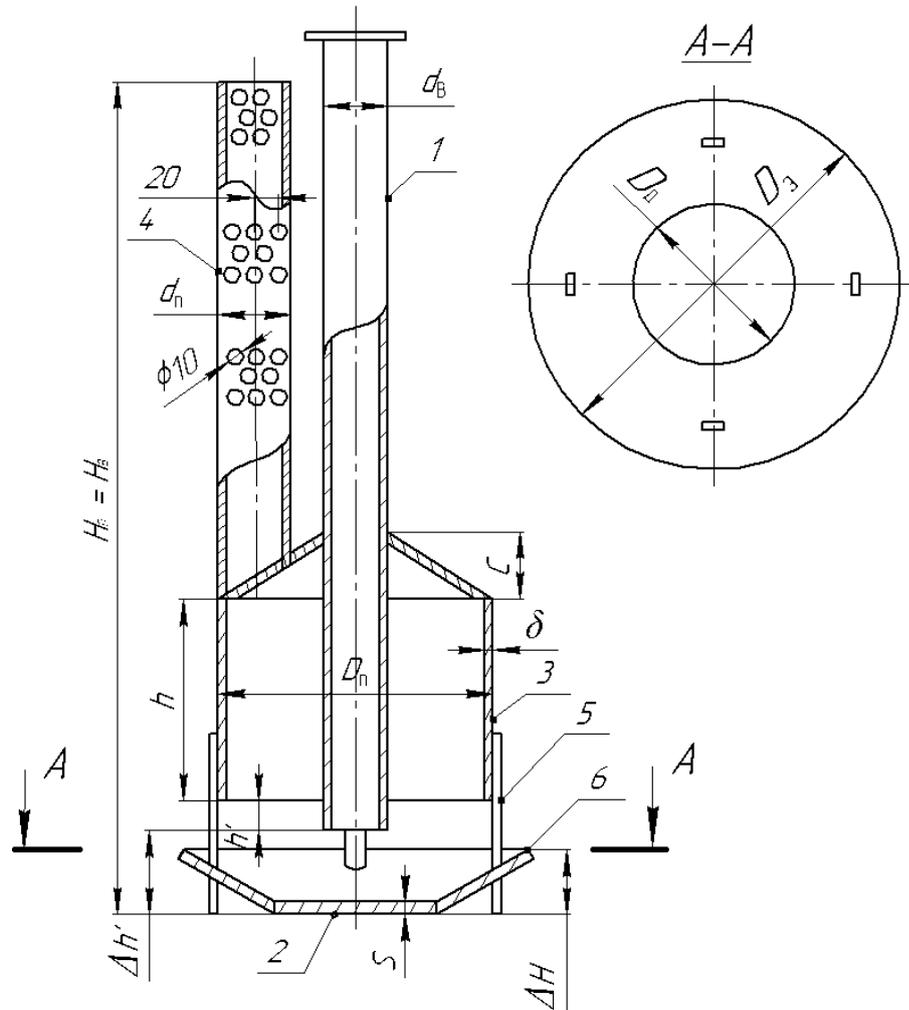


Рисунок 5.3 – Всасывающее устройство типа УВ₀ и расчетные зависимости:
 1 – всасывающее устройство, 2 – днище, 3 – камера подпитки,
 4 – подпитывающий патрубок, 5 – стойки строгой фиксации зазора h' ,
 6 – металлический настил

Анализ условий проектирования и действующих на шахтах отстойников показывает, что для очистки последних возможен диапазон подач гидротранспортного агрегата $50 \dots 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ гидросмеси. Исходя из этого диапазона были разработаны три типоразмера всасывающих устройств отстойников: УВ₀₋₅₀, УВ₀₋₇₀, УВ₀₋₁₅₀. В конструкциях учтена возможность соединения всасывающего

устройства с погружным насосом специальной конструкции (для отстойников), разработанных в ДОННТУ. Всасывающее устройство обеспечивает пуск установки при наличии слоя твердого материала над всасом и его дозирование.

Конструктивные размеры и параметры всасывающих устройств типа УВ₀ приведены в таблице Г2.1.

Исходными параметрами для расчета всасывающего устройства нагнетательного эрлифта является: подача по гидросмеси Q , м³/ч и характеристика транспортируемого твердого материала (максимальный размер куска d_T , см; эквивалентный диаметр $d_э$, см; плотность твердого материала $\rho_{ТВ}$; минералогический состав).

Основные конструктивные размеры (Рисунок 5.3) всасывающего устройства нагнетательного эрлифта определяются зависимостями [34, с. 3-5]:

- диаметр заборной части

$$D_3 = \frac{Q}{\left(k \Delta h \sqrt{d_T \left(\frac{\rho_{ТВ}}{\rho_{ж}} - 1 \right)} \right)}; \quad (5.26)$$

- диаметр камеры подпитки

$$D_{II} = 4 \cdot d_B; \quad (5.27)$$

- высота камеры подпитки

$$h = \frac{2kl_B d_B^2}{D_{II}^2}; \quad (5.28)$$

- необходимый расход подпитывающего потока

$$Q'_n = (1...1,5)^4 \sqrt{\frac{Q_n^2}{\Delta H \cdot 10^2}}, \quad (5.29)$$

где $Q_n = Q - Q_\phi$ – расход подпитывающего потока (Q – подача эрлифта; Q_ϕ – фильтрационные потери расхода через слой твердого материала), $\Delta H = 1,2 \cdot d_b$.

Фильтрационные потери расхода определяются зависимостью

$$Q_\phi = (16...17) D_3 \Delta h \sqrt{d_3 \left(\frac{\rho_{ТВ}}{\rho_{ж}} - 1 \right)}. \quad (5.30)$$

Пульпа через всасывающее устройство вместе с воздухом, подаваемым от источника, поступает в смеситель эрлифта, откуда образовавшаяся аэрогидросмесь по подъемной трубе поступает в воздухоотделитель нагнетательного эрлифта (Рисунок 5.4). Воздухоотделитель обеспечивает качественное, без выделения капель жидкости, отделение воздуха; пульпа из воздухоотделителя напорно транспортируется к месту назначению.

При движении водовоздушной смеси с примесями твердых частиц по подъемной трубе 1 нагнетательного эрлифта (Рисунок 5.4), осуществляется подъем смеси. Дойдя до заглушенного торца 2 подъемной трубы 1 смесь через боковые окна 4 поступает в отражатель 5, ударяется о его внутреннюю поверхность и перемещается вниз вдоль его стенок. Гидросмесь через прорези 9 горизонтальной перегородки 8 попадает в нижнюю часть корпуса 3 для слива жидкости и удаляется через установленный на выходе из воздухоотделителя дроссель 11, а отделившийся воздух через отверстие 7 на боковой поверхности цилиндрической обечайки 6 поступает в верхнюю часть корпуса 3 и через дроссель 12, установленный на патрубке 10, отводится во всасывающий патрубок источника сжатого воздуха нагнетательной эрлифтной установки.

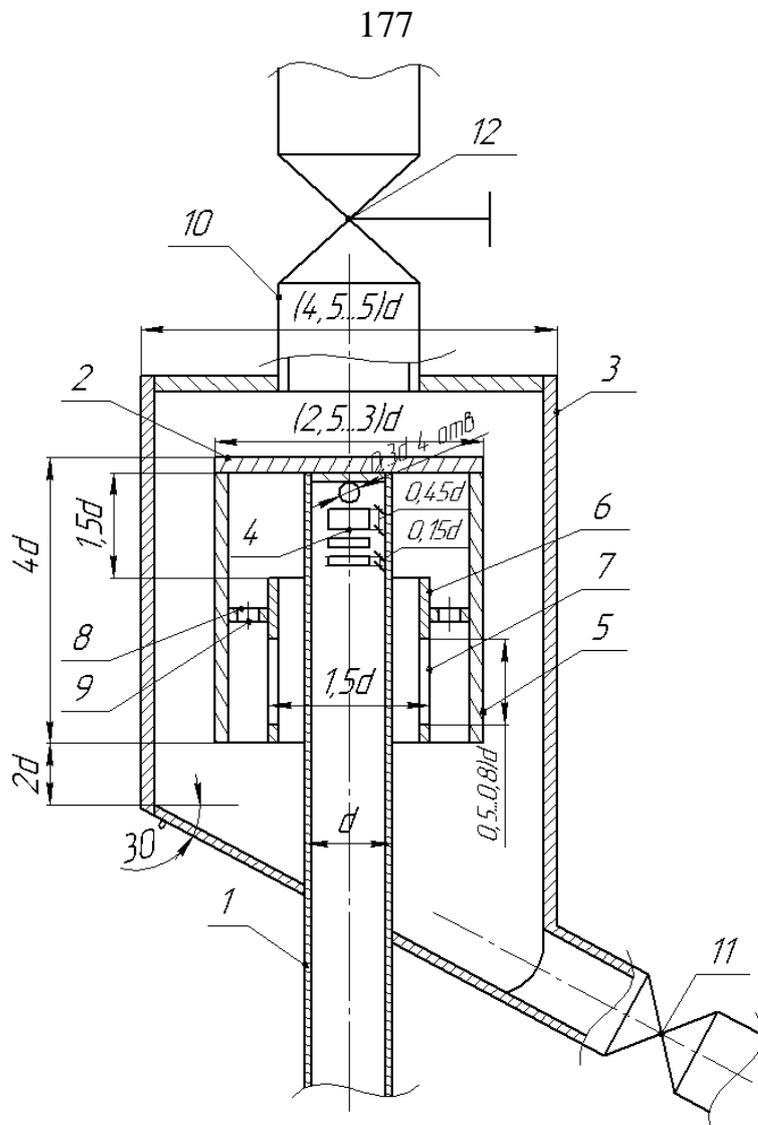


Рисунок 5.4 – Расчетная схема воздухоотделителя нагнетательного эрлифта: d – диаметр подъемной трубы, 1 – подъемная труба, 2 – торец, 3 – корпус, 4 – боковые окна, 5 – отражатель, 6 – обечайка цилиндрическая, 7 – отверстие, 8 – горизонтальная перегородка, 9 – прорези, 10 – воздухоотводящий патрубок, 11, 12 – регулирующие дроссели

5.4 Использование результатов исследований в учебном процессе

Результаты работы, а именно: математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта; экспериментальные нагнетательные эрлифтные установки; инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок внедрены в учебный процесс кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОННТУ» при подготовке специалистов, 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», что отражено в учебной программе и методических указаниях для проведения лабораторных работ по указанным дисциплинам (Приложение Г1).

5.5 Перспективы практического использования нагнетательных эрлифтных установок

Применение нагнетательных эрлифтных установок экологически и технически перспективно, помимо условий водоотлива и гидромеханизированной очистки водосборных емкостей шахт, для добычи полезных ископаемых (песок, гравий, руда и др.), органических удобрений и лечебных материалов со дна различных водоемов [53, с. 48-52, 54, с. 50-54], а также для гидроподъема пульпы в строительстве, на обогатительных и горнорудных комбинатах. в технологических системах тепловых электростанций (ТЭС) [43, с. 15-18, 44, с. 57-62, 45, с. 73-84].

Многочисленные исследования по созданию систем гидрозолошлакоудаления на ТЭС с эрлифтными установками, подтверждают в ряде случаев их преимущества в сравнении с традиционными схемами с грунтовыми (багерными) насосами. Основной особенностью применения эрлифтных установок в системах ГЗУ ТЭС в сравнении с другими областями их использования, является непрерывность технологического процесса производства электроэнергии и связанные с этим высокие требования к надежности оборудования.

5.6 Выводы

1. Разработана инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок, включающая определение основных конструктивных и технологических параметров установки. Разработанные рекомендации позволят в дальнейшем определять рациональные параметры нагнетательных эрлифтных установок, сокращая время их проектирования.

2. Разработана нагнетательная эрлифтная установка для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м. ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК» (две одинаковые установки планируется применить на большом и малом рукавах водосборников) с $D = 205$ мм, $H_n = 6$ м, $h_n = 6$ м, $\Delta H_n = 3$ м, $\alpha_{эп} = 0,333$, которая, работая с производительностью $Q_э = 42,8$ м³/ч, расходом воздуха $Q_в = 6,15$ м³/мин, расходом рабочего воздуха $Q_р = 2,78$ м³/мин позволит свести к минимуму долю тяжелого немеханизированного труда, имеющего место в значительной степени при существующем способе очистки водосборных емкостей. Ожидаемый экономический эффект от применения нагнетательных эрлифтных установок составит 263,9 тыс. руб. Применение нагнетательных эрлифтных установок обеспечит уменьшение материальных затрат на очистку в 1,8 раз по сравнению с устаревшей схемой, а срок окупаемости новой схемы составит около 8 месяцев.

3. Приведены рекомендации по конструктивным и технологическим параметрам нагнетательных эрлифтных установок для очистки шахтных водосборных емкостей.

4. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Энергомеханические системы» ГОУ ВПО «ДОННТУ».

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

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 воздушоструйным

компрессором и радиальным нагнетателем, а также аналитического обоснования степени повышения энергетической эффективности работы эрлифтных установок традиционной технологической схемы с воздушоструйным 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 переподачи $0,5 \leq \Delta H_n \leq 2,5$ 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 переподачи $0 < \Delta H_n \leq 2,42$ 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 переподачи $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ 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, 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».

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папаяни, Ф. А. Энциклопедия эрлифтов [Текст] / Ф. А. Папаяни, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пащенко, А. П. Кононенко - М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
2. Гейер, В. Г. Эрлифтные установки : [Текст] учебное пособие / В. Г. Гейер, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пащенко, Я. К. Антонов – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
3. Козыряцкий, Л. Н. Эрлифты и гидроэлеваторы в горной промышленности : [Текст] учебное пособие / Л. Н. Козыряцкий, В. М. Моргунов, В. М. Яковлев, О. А. Геммерлинг. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 160 с.
4. Малеев, В. Б. Специальные средства водоотлива и гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей [Текст] / В. Б. Малеев, Е. И. Данилов, В. М. Яковлев // Учебн. пособие. – Донецк: ДПИ, 1986. – 36 с.
5. Козыряцкий, Л. Н. Эрлифтная гидроочистка шахтных водоотливных емкостей в условиях шахты им. Бажанова [Текст] : материалы XIV Международной научно-технической студенческой конференции «Механика жидкости и газа» / Л. Н. Козыряцкий, В. В. Сас // Донецк 2–4 декабря 2015 г. – Донецк: ДОННТУ, 2015. – С. 48-49.
6. Заря, А. Н. Шахтные водоотстойники [Текст] / А. Н. Заря, В. Б. Малеев // Сб. трудов горно-электромеханический факультета ДонГТУ. - Донецк.- 1996. - С. 138 - 142.
7. Малеев, В. Б. Новые способы и средства очистки шахтных технологических вод [Текст] / В. Б. Малеев // Международный симпозиум "Горная техника на пороге XXI века" .- Московский государственный горный университет. - Москва. - 1996. - С. 530-535.
8. Гейер, В. Г. Воздушные подъемники (эрлифты) как водоотливные средства при проходке вертикальных стволов [Текст] / В. Г. Гейер // Уголь.- 1953.- №11.- С.23-26.
9. Гейер, В. Г. Эрлифты для участкового и вспомогательного водоотлива [Текст] / В. Г. Гейер, С. С. Малыгин // Уголь Украины. – 1965. - №1. - С. 26-27.

10. Гейер, В. Г. Наклонные эрлифты для очистки зумпфов и водоотливы из них [Текст] / В. Г. Гейер, А. А. Каплюхин, Е. И. Данилов, В. И. Дергач // Уголь Украины. – 1979. - № 5. - С. 28-29.
11. Гейер, В. Г. Перекачной эрлифтный водоотлив шахты имени Гаевого [Текст] / В. Г. Гейер, В. Б. Малеев, В. И. Мизерный, А. П. Швед // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 64. - Киев: Техніка. – 1983. - С. 72 -76.
12. Гейер, В. Г. Методические рекомендации по применению средств механизации очистки шахтных водосборных емкостей [Текст] // В. Г. Гейер, Я. К. Антонов, А. Г. Боруменский [и др.] ; – Донецк: ЦБНТИ Минуглепрома УССР, 1983. – 50 с.
13. Гейер, В. Г. Эрлифтный зумпфовой водоотлив с малой относительной глубиной погружения [Текст] / В. Г. Гейер, Е. И. Данилов // Уголь Украины. – 1978. - № 9. - С. 19-20.
14. Малыгин, С. С. Применение эрлифтов для зумпфowego водоотлива шахт и механизация чистки зумпфов скиповых стволов [Текст] / С. С. Малыгин, А. И. Быков // В кн.: Гидравлическая добыча угля. - М.: Недра, 1965. - № 6. - С. 7-11.
15. Разработка усовершенствованных и новых схем и конструкций эрлифтных установок для гидроподъемов (в условиях реконструкции гидрошахты «Красноармейская») [Текст] : Отчет о НИР Х-75-30 (заключительн.) / ДПИ. Руководитель темы Гейер В. Г. - №ГР75042677; Инв. №5498530. - Донецк, 1975. – 106 с. - Отв. исполнитель Антонов Я. К.
16. Создать, освоить в производстве и внедрить новые схемы и средства водоотливного комплекса шахт, обеспечивающие исключение тяжелого неквалифицированного труда [Текст] : Отчет о НИР Х-77-36 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – №ГР81014088; Инв. № 02890036452.- Донецк, 1988. – 232 с. – Отв. исполнитель Малеев В. Б.
17. Трейгер, А. В. Применение эрлифтов для откачки воды из ствола при углубке / А. В. Трейгер, С. И. Степных [Текст] // Уголь Украины. – 1982. - № 10. - С. 19-20.

18. Малеев, В. Б. Исследование и разработка сифонно-вакуумного эрлифта для очистки шахтных водоотливных емкостей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 : защищена : 17.11.1980 г. утв. 15.02.1981 г. / Малеев Виктор Борисович. – Донецк: ДПИ, 1980. – 289 с.
19. Триллер, Е. А. Разработка схем и средств транспорта горной массы из подземных технологических емкостей [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 : защищена : 23.05.1983 г. утв. 04.09.1983 г. / Триллер Евгений Арнольдович. - Донецк: ДПИ, 1983. – 232 с. – Библиогр.: с. 220–230. – 04200204433.
20. Данилов, Е. И. Исследование и разработка эрлифта для гидромеханизированной очистки водоотливных емкостей [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 : защищена : 13.06.1979 г. утв. 10.10.1979 г. / Данилов Евгений Иванович - Донецк: ДПИ, 1979. – 298 с.
21. Малыгин, С. С. Применение эрлифтов для водоотлива шахт [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 : защищена : 15.12.1966 г. утв. 25.12.1967 г. / Малыгин Спартак Семенович. - Донецк: ДПИ, 1966. – 264 с.
22. Кононенко, А. П. Повышение эффективности гидромеханической чистки подземных емкостей угольных шахт [Текст] / А. П. Кононенко, В. В. Гокун // XVI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідраліка і пневматика». Суми 14-16 жовтня 2015 р.: Матеріали конференції. - Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2015. - С. 180-181.
23. Разработка усовершенствованных и новых схем и конструкций эрлифтных установок для гидроподъемов (в условиях реконструкции гидрошахты «Красноармейская») [Текст] : Отчет о НИР Х-75-30 (заключительн.) / ДПИ. Руководитель темы Гейер В. Г. - №ГР75042677; Инв. №5498530. - Донецк, 1975. – 106 с. - Отв. исполнитель Антонов Я. К.
24. Новые способы и средства очистки шахтных технологических вод [Текст] // Международный симпозиум «Горная техника на пороге XXI века». – Московский государственный горный университет. – Москва. – 1996. – с. 530-535.
25. Игнатов, Н. Н. Откачка шахт при восстановлении Донбасса [Текст] /

- Н. Н. Игнатов, В. Г. Гейер, Н. Н. Чернавкин. - М.-Л.: Углетехиздат, 1950. – 195 с.
26. Козыряцкий, Л. Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 : защищена : 2.06.1976 г. утв. 10.11.1976 г. / Козыряцкий Леонид Никитович. - Донецк: ДПИ, 1976. – 197 с.
 27. Стифеев, Ф. Ф. Исследования режимов работы эрлифта для подъема пульпы повышенной плотности [Текст] / Ф. Ф. Стифеев // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2014. – Вип. 2014-3(107). – С. 89-95.
 28. Гейер, В. Г. Эрлифтный гидроподъем гидрошахты «Красноормейская №2» [Текст] / В. Г. Гейер, В. С. Костанда, Н. Г. Логвинов [и др.] // В реф. сб.: Гидравлическая добыча угля. – 1969. - №1. - С. 30-32;
 29. Логвинов, Н. Г. Расчет и результаты испытаний гидравлической модели эрлифтного гидроподъема гидрошахты "Самсоновская №1" [Текст] / Н. Г. Логвинов, В. С. Костанда, Е. В. Винда, Е. В. Усков // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 20. - Киев: Техніка. – 1970. - С. 123-130.
 30. Логвинов, Н. Г. Принципы и системы автоматического управления эрлифтов [Текст] / Н. Г. Логвинов // Вопросы горной механики и технической кибернетики. Тезисы докладов VI республиканской научно-технической конференции. Донецк. – 1969.
 31. Логвинов, Н. Г. Системы автоматического управления гидравлическими подъемами [Текст] / Н. Г. Логвинов // Научно-исследовательские работы в области горнодобывающей промышленности. – Материалы научно-технической конференции ДПИ, Донецк. – 1970.
 32. Козыряцкий Л. Н., Яценко А.Ф. Система гидроподъема твердых фракций эрлифтом как система регулирования [Текст] Горный журнал. Выпуск 1(32) - 2 (33) 2014 - Донецк: 2014 - 8 с.
 33. Малеев, В. Б. Автоматизированные эрлифтные установки для подъема полезных ископаемых с больших глубин и шахтного водоотлива: монография

- [Текст] / В. Б. Малеев, Н. И. Скорынин, А. В. Малеев, А. А. Кудрявцев. – Донецк: Издательство «Донецкая политехника» ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2021. – 415 с.
34. Козиряцкий Л. Н., Яценко А.Ф. Система гидроподъема твердых фракций эрлифтом как система регулирования [Текст] Горный журнал. Выпуск 1(32) - 2 (33) 2014 - Донецк: 2014 - 8 с.
35. А.с. N 1086236, М. кл.3 F04F 1/18. Эрлифтная установка [Текст] / В. Г. Гейер, С. С. Малыгин, Е. И. Данилов, В. И. Мизерный (СССР). – № 3511928; заявл. 18.11.1982; опубл. 15.04.1984, Бюл. № 14. – 2 с. : ил.
36. А.с. N 1430612, МПК F04F 1/00. Газлифтная установка [Текст] / А. П. Кононенко, В. А. Панов, Е. В. Усков, Е. И. Данилов ; заявитель Донецкий политехнический институт. – № 1414309/25-06. заявл; 10.11.1986; опубл. 15.10.1988, Бюл. N 38, 1988.
37. А.с. N 987200, М. кл.3 F04F 1/18. Эрлифт для подъема пульпы [Текст] / В. Г. Гейер, В. Б. Малеев, В. И. Мизерный, Е. И. Данилов, Л. Н. Козыряцкий ; заявитель Донецкий ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. – № 3224296; заявл. 19.10.1980; опубл. 07.01.1983, Бюл. N 1, 1983.
38. Алексеев, Д. П. Сравнительный анализ методик расчета эрлифтных установок [Текст] / Алексеев Д. П., Шейпак А. А. // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(19), 2014, т. 4. Серия «Естественные науки». С. – 111-116.
39. Кононенко, А. П. Разработка эрлифтных установок с пароструйными компрессорами [Текст] : Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06; 05.14.19 : защищена : 22.12.1988 г. утв. 12.04.1989 г. / Кононенко Анатолий Петрович. - Донецк: ДПИ, 1988. – 381 с.
40. Малыгин, С. С. К вопросу обоснования рациональной формы сечения подъемной трубы короткого эрлифта [Текст] / С. С. Малыгин, В. Б. Малеев // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 16, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ – 2000. - С. 198-203.
41. Карпушин, М. Ю. Обоснование параметров рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) [Текст] : Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.17 : защищена : 26.03.2013 г. утв. 31.05.2013 г. / Карпушин

- Михаил Юрьевич. - Донецк: ДонНТУ, 2013.– 255 с.
42. Калиниченко, В. В Повышение эффективности работы эрлифта дискретной подачей сжатого воздуха [Текст] : Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.17 : защищена : 25.01.2015 г. утв. 15.05.2015 г. / Калиниченко Валерий Викторович. – Красноармейск: КИИ ДонНТУ 2015. – 250 с.
 43. Совершенствование эрлифтных систем ГЗУ, авторский надзор за монтажом и эксплуатацией эрлифтов Экибастузской ГРЭС-1 : Отчет о НИР Х-81-72 (заключительн.) [Текст] / ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. - № ГР81051696; Инв. № 02860016668. - Донецк, 1985. – 100 с. - Отв. Исполнитель Кононенко А. П.
 44. Исследование и освоение систем пневмогидравлического транспорта твердого материала в условиях Экибастузской ГРЭС-1 (а.с. № 1423861) : Отчет о НИР Х-89-65 (промежуточн.) [Текст] /ДПИ. Руководитель Кононенко А. П. – № ГР01890001355; –Донецк, 1991. – 148 с. – Отв. исполнитель Глухман Л. Л.
 45. Исследование и разработка системы пневмогидравлического удаления золошлаков в условиях Новосибирской ТЭЦ-5 : Отчет о НИР Х 87- 66 (заключительн.) [Текст] / ДПИ. Руководитель Кононенко А. П. - № ГР01870006335; Инв. №02900056181. - Донецк, 1990. - 155 с. - Отв. исполнитель Мизерный В. И.
 46. Кононенко А. П. О потерях напора на трение при движении водовоздушной смеси в подъемной вертикальной трубе эрлифта [Текст] / А. П. Кононенко, С. И. Криль / Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки: Науково-технічний збірник. Вип. 24. - К.: КНУБА, 2014. – С. 155-163.
 47. Кононенко А. П. Особенности применения пневматических насосов вытеснения увеличенной высоты подъема [Текст] / А. П. Кононенко, В. М. Яковлев, Д. О. Барабанов / XVI Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП “Промислова гідраліка і пневматика». Суми 14-16 жовтня 2015 р.: Матеріали конференції. - Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2015. - С. 70-71.
 48. Бойко, М. Г. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди [Текст] : навчальний посібник / Л. М. Козиряцький, А. П. Кононенко – Донецьк: ДонНТУ, 2007. –

- 296 с.
49. Финкельштейн, З. Л. Средства гидромеханизации [Текст] : учебное пособие / З. Л. Финкельштейн, Л. Н. Козыряцкий. - Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 168 с.
 50. Козыряцкий, Л. Н. Эрлифтно-земснарядные комплексы по добыче полезных ископаемых внутренних водоемов [Текст] / Л. Н. Козыряцкий, Р. Н. Галушко // Материалы XIV Международной научно-технической студенческой конференции «Механика жидкости и газа». Донецк 2–4 декабря 2015 г. – Донецк: ДОННТУ, 2015 г. – С. 31.
 51. Козыряцкий, Л. Н. Глубоководный эрлифтно-земснарядный комплекс для удаления ила со дна водохранилищ ГЭС [Текст] / Л. Н. Козыряцкий, Р. И. Божко // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». Донецк: ДОННТУ, 2020. Т. 3: 3. – 2020. С. – 156-163.
 52. Холмогоров, А. П. Эксплуатация эрлифтно-земснарядных комплексов в Западной Сибири [Текст] / А. П. Холмогоров, Л. Н. Козыряцкий и др. // – Строительство трубопроводов, 1990, №4.
 53. Козыряцкий, Л. Н. Эрлифтно-гидроэлеваторный комплекс по добычи гравия со дна водоемов [Текст] / Л. Н. Козыряцкий [и др.] ; Донецк, 1990. – с. 48–52. - Деп. в ЦНИЭИуголь 05.04.1990, № 9.
 54. Третьяк, А. Я. Технология гидродобычи железной руды на месторождениях курской магнитной аномалии [Текст] / А. Я. Третьяк, Ю. Ф. Литкевич, А. Н. Гроссу // Сборник научных трудов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова. 2015. № 5 (1). – С. 50-54.
 55. Божко Р. И. Модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко, В. А. Панов // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля № 11 (29) 2019, – С. 75-79.
 56. Кононенко, А. П. Теория и рабочий процесс эрлифтов [Текст] : Дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.17 : защищена : 27.12 2007 г. утв. 21.05.2008 г. / Кононенко Анатолий Петрович. - Донецк: ДонНТУ, 2007. - 565 с.

57. Кононенко, А. П. Рабочий процесс эрлифта и его моделирование [Текст] / А. П. Кононенко ; Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. – 171 с.
58. Кононенко, А. П. Уравнения сохранения массы и импульса вертикального восходящего водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта [Текст] / А. П. Кононенко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. - №3(13). – С. 44-48.
59. Кононенко, А. П. Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». Донецк: ДонНТУ, 2020. Т. 3: 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – 2020. С. – 164-170.
60. Кононенко, А. П. Границы структур вертикальных водовоздушных потоков в эрлифтах [Текст] / А. П. Кононенко // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції „СУЧАСНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ – 2006”. Том 16. Технічні науки. - Дніпропетровськ: Наука і освіта. - 2006. - С. 67-71.
61. Кононенко, А. П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока [Текст] / А. П. Кононенко // Промислова гідравліка і пневматика. - Вінниця. - 2006. - №1 (11). - С. 34-37.
62. Калиниченко, В. В. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока [Текст] / А. П. Кононенко, В. В. Калиниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – №5 (979).– С. 110 – 118.
63. Калиниченко, В. В. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока [Текст] / А. П. Кононенко, В. В. Калиниченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 2(26). – С. 151 – 164.
64. Калиниченко, В. В. Аналитическое решение математической модели рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока [Текст] / А. П. Кононенко, Г. В. Улитин, В. В. Калиниченко MOTROL:

Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – 2014. – Vol. 16 №5. – С. 137 – 140.

65. Бойко, Н. Г. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси [Текст] / Н. Г. Бойко, А. П. Кононенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Гірниче-електромеханічна". - Донецьк: ДонНТУ. - 2006. - Вип. 104. - С. 17-29.
66. Кириченко, Е. А. Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъема полезных ископаемых [Текст] : Дис. ... докт. техн. наук: 05.05.06 : защищена : 03.04.2001 г. утв. 27.07.2001 г. – Днепропетровск: НГАУ, 2001. – 337 с.
67. Кириченко, Е. А., Теория и алгоритм расчета снарядного течения в эрлифте [Текст] / В. Е. Кириченко, В. В. Евтеев. – Днепропетровск: Национальный горный университет. – 2013. – 263 с.
68. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. ч. I. [Текст] / Р. И. Нигматулин ; – М.: Наука, Гл. ред. физ. - мат. лит., 1987. – 464 с.
69. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. ч. II. [Текст] / Р. И. Нигматулин ; – М.: Наука, Гл. ред. физ. - мат. лит., 1987. – 360 с.
70. Гриценко, А. И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах [Текст] / А. И. Грицаенко, О. В. Клапчук, Ю. А. Харченко ; М. : Недра, 1994. – 238 с.
71. Кутателадзе, С. С. Гидродинамика газожидкостных систем [Текст] / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович ; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1976. - 296 с.
72. Гриценко, А. И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах [Текст] / А. И. Грицаенко, О. В. Клапчук, Ю. А. Харченко ; М. : Недра, 1994. - 238с.
73. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения [Текст] / Г. Уоллис. - М.: Мир, 1972. – 440 с.
74. Кононенко, А. П. Распределение давлений и мощностей водовоздушных потоков в подъемных трубах эрлифтов [Текст] / А. П. Кононенко // Промислова гідравліка і пневматика. - Вінниця. - 2008. - №3 (13). - С. 44-48.

75. Кононенко, А. П. Энергетическая эффективность эрлифта / А. П. Кононенко [Текст] // Науковий журнал "Вісник Донецького університету". Серія А, „Природничі науки”. Донецьк: ДонНУ. – 2006. - №1, Частина 1. - С. 205-212.
76. Кононенко, А. П. Определение истинного газосодержания водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта [Текст] / А. П. Кононенко, С. И. Криль // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. – Вип. 23. - К.: КНУБА, 2014. – С. 154-161.
77. Кононенко, А. П. Ограничения в подаче эрлифта [Текст] / А. П. Кононенко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць: "Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва". Випуск 2005-7(55). – Макіївка: ДНАБА – 2005. - С. 71-81.
78. Логвинов, Н. Г. Определение числа Рейнольда и кинематической вязкости смеси в подъемной трубе эрлифта [Текст] / Н. Г. Логвинов, Е. И. Надеев, В. В. Калиниченко [и др.] // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – Вип. 42. – С. 144 – 148.
79. Божко, Р. И. Рациональная область применения нагнетательных эрлифтных установок с воздуструйными компрессорами [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. Серия А - "Естественные науки". - 2019. - № 3(17)'2019, – С. 17-25.
80. Малеев, В. Б. Совместная работа эрлифтной установки с эжектором [Текст] / В. Б. Малеев, С. С. Малыгин, Е. А. Комисова ; Донецк: ДПИ, – 1986. – 23 с. – Деп. в УкрНИИИТИ №575.
81. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты [Текст] / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
82. Кононенко, А. П. Экспериментальное обоснование рациональной методики расчета газоструйного компрессора [Текст] / А. П. Кононенко, В. А. Панов // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2018. – №3(13). – С. 25-33.
83. Кононенко, А. П. Влияние режимов работы сопла на КПД газоструйного аппарата [Текст] / А. П. Кононенко, В. А. Панов // XVII Міжнародна науково-

- технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика». Харків 19 – 21 жовтня 2016 р. Матеріали конференції. - Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2016. - С. 50-51.
84. Кононенко, А. П. Возможности уменьшения потерь в газоструйных аппаратах [Текст] / А. П. Кононенко, В. А. Панов // XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» Київ 24 – 27 травня 2016 р. Матеріали конференції. - Київ, 2016. - С.171-173.
85. Кононенко, А. П. Сущность инжекции газоструйного инжектора с регулирующим устройством [Текст] А. П. Кононенко, В. А. Панов // IX Международной научно-методической конференции «Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров» // Сухум 01 – 09 октября 2016 г. – Донецк: МСМ, 2016. – С. 110-112.
86. Панов, В. А. Способы снижения потерь в газоструйном аппарате [Текст] / В. А. Панов // Горная энергомеханика и автоматика: материалы XVI Международной научно-технической конференции, 22-24 ноября 2016 г., Донецк - Донецк: ДонНТУ, 2016. - С. 52-54.
87. Цейтлин, Ю. А. Пневматические установки шахт [Текст] / В. А. Мурзин, Ю. А. Цейтлин // М.: Недра. – 1991. – 268 с.
88. Божко, Р. И. Обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. Серия А - "Естественные науки". - 2017. - № 1(7), – С. 11-19.
89. Божко, Р. И. Области применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Современное промышленное и гражданское строительство. ДонНАСА. 2018 ТОМ 14, НОМЕР 1, – С. 23-31.
90. Божко, Р. И. Особенности применения радиальных нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных установок [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. Серия А - "Естественные науки". - 2018. - № 4(14), – С. 24-33.

91. Рис, В. Ф. Центробежные компрессорные машины [Текст] / В. Ф. Рис. – М.-Л., Изд. Машиностроение, 1964. - 336 с.
92. Кононенко, А. П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС [Текст] / А. П. Кононенко, В. И. Мизерный, Л. Л. Глухман // Энергетика та електрифікація. – 2006. – № 11. – С. 8-12.
93. Карпушин, М. Ю. Теоретические диапазоны возможных подач эрлифтов с блочным воздухомоснабжением центробежными нагнетателями [Текст] / А. П. Кононенко, В. В. Чернюк, М. Ю. Карпушин. // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. –2011. – Вип. 22 (195). – С. 116-134.
94. Кононенко, А. П. Подача эрлифтов с блочным воздухомоснабжением центробежными нагнетателями [Текст] / А. П. Кононенко, В. В. Чернюк, М. Ю. Карпушин. // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – Вип. 23(196). – С. 110-123.
95. Кононенко, А. П. Подача эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности [Текст] / А. П. Кононенко, М. Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – Вип. 2(24). – С. 118-132.
96. Кононенко, А. П. Рабочий режим и особенности формирования подачи эрлифта в условиях переменных притоков гидросмесей (жидкостей). MOTROL [Текст] / А. П. Кононенко, М. Ю. Карпушин ; Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. - Lublin. - 2010. - Vol. 12 С. - pp. 300-308.
97. Карпушин, М. Ю. Экспериментальное обоснование энергетической целесообразности подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы эрлифта [Текст] / М. Ю. Карпушин, А. П. Кононенко // Наукові праці ДонНТУ. Випуск 20 (176), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – С. 51-60.
98. Малыгин С. С. Оптимальное относительное погружение эрлифтов [Текст] / С. С. Малыгин, В. Б. Малеев // Труды Донецкого государственного

- технического университета. Выпуск 7, серия горно-электромеханическая. - Донецк: ДонГТУ, - 1999. - С. 166-168.
99. Кононенко, А. П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников [Текст] / А. П. Кононенко, Т. А. Устименко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. - № 3 (29) - С. 51-53.
100. Грабовский, А. А. Гидравлика и нагнетатели: учебное пособие для вузов [Текст] / А. А. Грабовский, О. Н. Цабиев . – К.: УМК ВО, 1992. – 288 с.
101. Малеев, В. Б. Работа эрлифта при постоянном расходе сжатого воздуха [Текст] / В. Б. Малеев, А. В. Игнатов // Наукові праці ДНТУ. Серія: «Гірничо-геологічна». – Випуск 7(135) . - Донецьк: ДонНТУ. – 2008. - С. 108-113.
102. Тимошенко, Г. М. Теория инженерного эксперимента : учебное пособие [Текст] / Г. М. Тимошенко, П. Ф. Зима. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 93 с.
103. Малеев, В. Б. Сходственные режимы эрлифтных установок [Текст] // В сб.: Гірничча електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГАУ. – 1999. - №2(61). – С. 168-173.
104. Малеев, В. Б. Соотношение между основными параметрами подобных эрлифтов [Текст] // Науковий вісник НГА України. – 1999. - №2. – С. 49-50.
105. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами [Текст] : РД 50-213-80. - М.: Изд-во стандартов, 1982. – 320 с.
106. Заворотный, Д. В. Экспериментальное определение параметров моделирования аэротенков-осветлителей с затопленной эрлифтной системой аэрации [Текст] / Д. В. Заворотный // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» 2018. № 10 (53): Строительство и архитектура. – С. 107-109.
107. Василевский, М. В. Оценки методов транспортировки жидкостей эрлифтными устройствами [Текст] / М. В. Василевский, В.И. Романдин // Вестник науки Сибири. 2012. № 1 (2): Серия 5. Инженерные науки. – С. 120-125.
108. Нездойминов, В. И. Аэротенк-отстойник с обновляющимся взвешенным слоем [Текст] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – Вып. 2016-5(121): Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 15–19.
109. Нездойминов, В. И. Исследование допустимой подачи затопленной эрлифтной

- системы аэрации в аэротенке-осветлителе [Текст] / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный, В. С. Рожков // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Вып. 2017-3(125): Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий. – С. 80-85.
110. Яковлев, А. А. Обоснование конструктивно-технологической схемы пневмовакуумной (эрлифтной) насосной установки [Текст] / А. А. Яковлев, Е. С. Саркынов, Е.Т. Кайпбаев // Сборник научных трудов Казахского национального аграрного университета. 2015. № 2 (1). – С. 57-61.
111. Kyrychenko, Y. Advanced method for calculation of deep-water airlifts and the special software development [Текст] / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Taturevych // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 215-222.
112. Cho Nam-Cheol, Hwang In-Ju, Lee Chae-Moon, Park Jung-Won. An experimental study on the airlift pump with air jet nozzle and booster pump [Текст] Journal of Environmental sciences (2009): S19-S23.
113. Research of processes of a deep aerobic mineralization of activated sludge [Электронный ресурс] / V. Nezdoiminov, V. Ziatina, V. Rozhkov, D. Nemova // Procedia Engineering. – 2015. – Т. 117. – С. 1027–1032. – Режим доступа: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815018676>.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А – К разделу «Численное решение математической модели рабочего процесса нагнетательного эрлифта».

ПРИЛОЖЕНИЕ А1 – Фрагмент текста разработанной программы (язык программирования Delphi)

```

for i := 1 to 5 do
begin
  CrP[i,0] := 0;
  CrP[i,1] := 0;
  CrP[i,2] := 0;
  if p_smr[i] >= 0 then
  begin
    if ZQ > 0 then
    begin
      for j := fp[i] to kp[i] - 1 do
        if (Mas[0,j] - ZQ) * (Mas[0,j+1] - ZQ) <= 0 then
        begin
          CrP[i,1] := ZQ;
          CrP[i,0] := Mas[i,j] + (Mas[i,j+1] - Mas[i,j])
            * abs(Mas[0,j] - ZQ) / abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
          Memo2.Lines.Add(Format('%d - (p = %f)', [i, p_smr[i]]));
          Memo2.Lines.Add(Format('Q э = %7.3f (%7.3f)^\', [3600*CrP[i,0], CrP[i,0]]));
          Memo2.Lines.Add('-----');
          CalEx:=true;
          break;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;
fGraph1.PB.Visible := true;
end
else
begin
  if SendGr = 2 then
  begin
    fGraph2.PB.Visible := false;
    if ZQv > 0 then
    begin
      if ZQv <= MaxX / 60 then
      begin
        Memo2.Lines.Add(Format('Qв = %5.3f (%6.1f)', [ZQv, ZQv*60]));
        Memo2.Lines.Add('-----');
        ZQ := ZQv * 60;
      end
      else
      begin
        Memo2.Lines.Add(Format('Qв = %6.1f (%5.3f)', [ZQv, ZQv/60]));
        Memo2.Lines.Add('-----');
        ZQ := ZQv;
      end;
    end;
    CrP[1,0] := 0; CrP[1,1] := 0; CrP[1,2] := 0;
    CrP[2,0] := 0; CrP[2,1] := 0; CrP[2,2] := 0;
    CrP[3,0] := 0; CrP[3,1] := 0; CrP[3,2] := 0;
    CrP[4,0] := 0; CrP[4,1] := 0; CrP[4,2] := 0;
    if ZQ > 0 then
    begin
      for j := fp[1] to kp[1] - 1 do
        if (Mas[0,j] - ZQ) * (Mas[0,j+1] - ZQ) <= 0 then
        begin
          CrP[1,1] := ZQ;

```

```

        CrP[1,0] := Mas[1,j] + (Mas[1,j+1] - Mas[1,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
        Memo2.Lines.Add(Format('P cym = %7.3f (%7.3f)', [9.81e1*CrP[1,0], CrP[1,0]]));
        Memo2.Lines.Add('-----');
        CrP[2,1] := ZQ;
        CrP[2,0] := Mas[2,j] + (Mas[2,j+1] - Mas[2,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
        Memo2.Lines.Add(Format('P tp = %7.3f (%7.3f)', [9.81e1*CrP[2,0], CrP[2,0]]));
        Memo2.Lines.Add('-----');
        CrP[3,1] := ZQ;
        CrP[3,0] := Mas[3,j] + (Mas[3,j+1] - Mas[3,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
        Memo2.Lines.Add(Format('P yck = %7.3f (%7.3f)', [9.81e1*CrP[3,0], CrP[3,0]]));
        Memo2.Lines.Add('-----');
        CrP[4,1] := ZQ;
        CrP[4,0] := Mas[4,j] + (Mas[4,j+1] - Mas[4,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
        Memo2.Lines.Add(Format('P g = %7.3f (%7.3f)', [9.81e1*CrP[4,0], CrP[4,0]]));
        Memo2.Lines.Add('-----');
        CalEx:=true;
        break;
    end;
end;
end;
fGraph2.PB.Visible := true;
end
else
if SendGr = 3 then
begin
fGraph3.PB.Visible := false;
if ZQv > 0 then
begin
if ZQv <= MaxX / 60 then
begin
Memo2.Lines.Add(Format('QB = %5.3f (%6.1f)', [ZQv, ZQv*60]));
Memo2.Lines.Add('-----');
ZQ := ZQv * 60;
end
else
begin
Memo2.Lines.Add(Format('QB = %6.1f (%5.3f)', [ZQv, ZQv/60]));
Memo2.Lines.Add('-----');
ZQ := ZQv;
end;
end;
CrP[1,0] := 0; CrP[1,1] := 0; CrP[1,2] := 0;
CrP[2,0] := 0; CrP[2,1] := 0; CrP[2,2] := 0;
CrP[3,0] := 0; CrP[3,1] := 0; CrP[3,2] := 0;
CrP[4,0] := 0; CrP[4,1] := 0; CrP[4,2] := 0;
CrP[5,0] := 0; CrP[5,1] := 0; CrP[5,2] := 0;
CrP[6,0] := 0; CrP[6,1] := 0; CrP[6,2] := 0;
if ZQ > 0 then
begin
for j := fp[1] to kp[1] - 1 do
if (Mas[0,j] - ZQ) * (Mas[0,j+1] - ZQ) <= 0 then
begin
CrP[1,1] := ZQ;
CrP[1,0] := Mas[1,j] + (Mas[1,j+1] - Mas[1,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
Memo2.Lines.Add(Format('N cym = %7.3f', [CrP[1,0]]));
Memo2.Lines.Add('-----');
CrP[2,1] := ZQ;
CrP[2,0] := Mas[2,j] + (Mas[2,j+1] - Mas[2,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
abs(Mas[0,j] - Mas[0,j+1]);
Memo2.Lines.Add(Format('N tp = %7.3f', [CrP[2,0]]));
Memo2.Lines.Add('-----');
CrP[3,1] := ZQ;
CrP[3,0] := Mas[3,j] + (Mas[3,j+1] - Mas[3,j]) * abs(Mas[0,j] - ZQ) /
...

```

ПРИЛОЖЕНИЕ А2 – Расчетные данные численного решения математической модели рабочего процесса эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного эрлифтов

Таблица А1 – Основные геометрические и эксплуатационные параметры

Глубина погружения смесителя эквивалентного нагнетательного (традиционного) эрлифтов $h = h_n$, м	Относительное погружение эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн}$	Расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $Q_{в.эн.опт}$, м ³ /мин	Расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в режиме максимальной подачи $Q_{в.эн.опт}$, м ³ /мин	Подача эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $Q_{э.эн.опт}$, м ³ /ч	Подача эквивалентного нагнетательного эрлифта в максимальном режиме $Q_{э.эн.опт}$, м ³ /ч	Удельный расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $q_{эн. опт.}$	Удельный расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в максимальном режиме $q_{эн. макс}$
1	2	3	4	5	6	7	8
6	0,364	4,35	7,20	26,8	34,8	9,75	12,4
14	0,632	2,25	8,85	67,9	134	2,00	3,96
22	0,741	1,65	9,60	71,3	175	1,31	3,53
30	0,800	1,35	10,4	73,1	197	1,05	3,43
42	0,851	1,05	11,3	75,7	216	0,861	3,30
50	0,873	0,90	12,0	78,2	224	0,788	3,22
58	0,889	0,81	12,6	80,8	229	0,737	3,20
66	0,901	0,75	13,4	83,4	234	0,697	3,15
74	0,911	0,75	14,0	87,6	237	0,665	3,13

(продолжение таблицы А1)

Относительное погружение эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{\text{ЭТ}}$	Расход воздуха эквивалентного традиционного эрлифта в оптимальном режиме $Q_{\text{в.эт.опт}}$, м ³ /мин	Расход воздуха эквивалентного традиционного эрлифта в режиме максимальной подачи $Q_{\text{в.эт.опт}}$, м ³ /мин	Подача эквивалентного традиционного эрлифта в оптимальном режиме $Q_{\text{э.эт.опт}}$, м ³ /ч	Подача эквивалентного традиционного эрлифта в максимальном режиме $Q_{\text{э.эт.опт}}$, м ³ /ч	Отклонения значений подачи эрлифтов в оптимальном режиме работы $\delta Q_{\text{э.опт}}$	Отклонения значений подачи эрлифтов в режиме максимальной подачи $\delta Q_{\text{э.макс}}$	Удельный расход воздуха эквивалентного традиционного эрлифта в оптимальном режиме $q_{\text{ЭТ.опт}}$	Удельный расход воздуха эквивалентного традиционного эрлифта в максимальном режиме $q_{\text{ЭТ.макс}}$	Соотношение удельных расходов эрлифтов в оптимальном режиме $\delta q_{\text{ЭТ.опт}}$	Соотношение удельных расходов эрлифтов в максимальном режиме $\delta q_{\text{ЭТ.макс}}$
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,462	3,15	7,44	45,1	71,3	40,6	51,2	4,19	6,31	2,327	1,967
0,667	1,95	8,71	66,8	148	4,57	9,09	1,65	3,54	1,209	1,119
0,759	1,50	9,45	72,2	182	5,17	3,85	1,18	3,48	1,113	1,057
0,811	1,20	10,2	73,1	201	5,05	2,15	0,976	3,28	1,078	1,037
0,857	1,05	11,3	76,8	218	4,80	1,17	0,820	3,27	1,050	1,021
0,877	0,91	11,9	79,4	225	4,10	0,84	0,756	3,17	1,043	1,016
0,892	0,75	12,6	83,4	231	4,05	0,64	0,712	3,13	1,035	1,012
0,904	0,74	13,2	85,6	235	3,09	0,49	0,675	3,09	1,032	1,006
0,914	0,74	13,8	89,4	238	2,61	0,39	0,648	3,03	1,027	1,005

Таблица А2 – Энергетические характеристики эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного эрлифтов

Глубина погружения смесителя эквивалентного нагнетательного (традиционного) эрлифтов $h_{\text{н}}$, м	Мощность эквивалентного нагнетательного эрлифта, обусловленная силой тяжести, N_g , кВт	Мощность воздушного потока N'' , кВт	Мощность потока жидкости N' , кВт	Коэффициент полезного действия эквивалентного нагнетательного эрлифта, $\eta_{\text{эн}}$	Мощность, обусловленная силой тяжести, N_g , кВт	Мощность воздушного потока N'' , кВт	Мощность потока жидкости N' , кВт	Коэффициент полезного действия эквивалентного традиционного эрлифта, $\eta_{\text{эт}}$	Соотношение КПД нагнетательного и традиционного эрлифтов $\eta_{\text{эн}}/\eta_{\text{эт}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	1,22	3,34	0,438	0,234	1,61	2,42	0,737	0,361	0,650
14	4,12	3,22	2,58	0,480	4,09	2,79	2,70	0,498	0,963
22	6,16	3,14	4,52	0,522	6,08	2,85	4,57	0,527	0,990
30	7,94	3,06	6,30	0,536	7,50	2,72	6,03	0,538	0,996
42	9,90	2,83	8,37	0,542	10,3	2,83	8,79	0,543	0,999
50	10,8	2,64	9,33	0,541	11,2	2,64	9,73	0,542	0,998
58	13,1	2,82	11,6	0,541	11,3	2,35	9,99	0,540	1,000
66	12,9	2,49	11,6	0,538	13,3	2,49	12,0	0,535	1,005
74	15,0	2,61	13,6	0,536	15,4	2,61	14,0	0,536	1,000

Таблица А3 – Исследования эрлифтов при переменной высоте перепада ΔH_n

Высота перепада эквивалентного нагнетательного эрлифта ΔH_n , м	Относительное погружение эквивалентного нагнетательного эрлифта, $\alpha_{эн}$	Расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $Q_{в.эн.опт}$, м ³ /мин	Подача эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $Q_{э.эн.опт}$, м ³ /ч	Удельный расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $q_{эн.опт}$	Расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в максимальном режиме $Q_{в.эн.опт}$, м ³ /мин	Подача эквивалентного нагнетательного эрлифта в максимальном режиме $Q_{э.эн.макс}$, м ³ /ч	Удельный расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта в оптимальном режиме $q_{эн.опт}$	Соотношение удельных расходов эрлифтов в оптимальном режиме $\delta q_{э.опт}$	Соотношение удельных расходов эрлифтов в максимальном режиме $\delta q_{э.опт}$
0	0,667	1,65	67,4	1,47	7,80	148	3,16	1	1
1	0,643	1,80	64,4	1,68	7,95	139	3,43	1,14	1,09
2	0,615	2,10	64,9	1,94	8,10	129	3,78	1,32	1,20
3	0,583	2,40	62,3	2,31	8,25	117	4,25	1,58	1,34
4	0,545	2,70	56,7	2,86	8,27	102	4,84	1,94	1,53
5	0,502	3,15	50,4	3,75	8,40	84,9	5,94	2,55	1,88

ПРИЛОЖЕНИЕ А3 – Примеры расчета эквивалентного нагнетательного и эквивалентного традиционного эрлифтов

Таблица А4 – Расчет параметров рабочего процесса эквивалентного нагнетательного эрлифта ($h_n = 10$ м, $H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 2$ м, $D = 0,15$ м)

Нагнетательный эрлифт (ДонНТУ - ФИММ - ЭМС)

Расчет от 06.11.2019 г. 15:25:14 – вариант А

Режим - текстовый.

Параметры:

Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: Уоллиса Г.
Истинное газосодержание по формулам: Уоллиса Г.
Вид процесса изменения состояния воздуха: изотермический

Исходные данные:

Плотность воды, кг/м³ 1000
Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³ 1,2
Кинематическая вязкость воды, м²/с 1E-6
Атмосферное давление, Па 98100
Динамическая вязкость воды, Па·с 0,001
Динамическая вязкость воздуха, Па·с 1,79E-5
Кoeffициент поверхностного натяжения, Н/м 0,0723
Показатель политропы 1
Показатель степени в формуле Арманда 1,53
Расход воздуха при нормальных условиях, м³/мин 1 - 15 - 1
Давление в смесителе, кг/см² 1
Высота подъема, м 7
Высота переподъема, м 2
Диаметр подъемной трубы, м 0,15
Эквивалентная шероховатость трубы, м 0,0002
Ускорение свободного падения, м/с² 9,81
Относительная длина жидкой пробки 2
Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 3,75

1 - p = 1,0

Qэ max = 100,73 (0,0280)
Qв max = 10,94 (0,1823)
Qэ opt = 56,84 (0,0158)
Qв opt = 3,66 (0,0610)

Qv = 1,000 м³/мин: Qe = 0,002564 м³/сек (9,230 м³/час)

	H+h				
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	4,688	9,375	15,000	18,750
Давление в сечении z, кг/см ² :	2,000	1,750	1,500	1,200	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	2,400	2,100	1,800	1,440	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	593,743	565,896	533,963	488,864	453,629
Объемное расходное воздуходождение:	0,765	0,788	0,813	0,844	0,867
Массовое расходное воздуходождение:	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,702	0,702	0,702	0,702	0,702
Площадь сечения трубы, м ² :	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Приведенная скорость смеси, м/с:	0,617	0,684	0,774	0,931	1,088
Приведенная скорость воды, м/с:	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145
Приведенная скорость воздуха, м/с:	0,472	0,539	0,629	0,786	0,943
Истинная скорость воды, м/с:	0,245	0,257	0,272	0,297	0,320
Истинная скорость воздуха, м/с:	1,158	1,239	1,347	1,535	1,724
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	78,244	82,721	88,303	97,267	105,495
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	146,213	146,213	146,213	146,213	146,213
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,923	2,015	3,658	5,068
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,019	0,043	0,082	0,118
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	271,934	529,890	817,950	994,814
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	272,876	531,948	821,690	1000,001

Геометричес. погружение смесителя, м:	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,533	0,533	0,533	0,533	0,533
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	0,671	0,783	0,940	1,235	1,555
w''':	0,024	0,024	0,024	0,023	0,023
Истинное газосодержание:	0,407	0,435	0,467	0,512	0,547
w''':	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,250	0,500	0,800	1,000
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	4,455	4,576	4,753	4,899
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,109	0,224	0,373	0,481
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,000	0,001	0,002	0,002
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,119	0,238	0,381	0,478
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,218	0,470	0,835	1,133
Мощность потока воды, кВт:	0,252	0,252	0,252	0,252	0,252
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,608	-0,029	0,156	0,200
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,252	0,470	0,722	1,087	1,385
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,253	0,361	0,497	0,714	0,904
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	225,548	213,513	198,395	187,876
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	580,126	565,216	545,300	530,567
Ср. плотн. по средн. давлен., кг/м ³ :	237,108	225,606	213,756	199,053	188,945
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,500	0,533	0,571	0,625	0,667

Qv = 2,000 м³/мин: Qe = 0,010259 м³/сек (36,931 м³/час)

	H+h				
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	4,688	9,375	15,000	18,750
Давление в сечении z, кг/см ² :	2,000	1,750	1,500	1,200	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	2,400	2,100	1,800	1,440	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	581,160	553,342	521,583	476,980	442,336
Объемное расходное воздухосодержание:	0,619	0,650	0,684	0,730	0,765
Массовое расходное воздухосодержание:	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,824	0,824	0,824	0,824	0,824
Площадь сечения трубы, м ² :	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Приведенная скорость смеси, м/с:	1,524	1,658	1,838	2,152	2,467
Приведенная скорость воды, м/с:	0,581	0,581	0,581	0,581	0,581
Приведенная скорость воздуха, м/с:	0,943	1,078	1,258	1,572	1,886
Истинная скорость воды, м/с:	1,001	1,051	1,115	1,219	1,314
Истинная скорость воздуха, м/с:	2,246	2,408	2,624	3,001	3,378
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	161,128	166,982	174,448	186,816	198,552
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	582,779	582,779	582,779	582,779	582,779
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	5,118	10,952	19,346	26,247
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,301	0,685	1,310	1,883
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	266,038	518,144	799,361	971,871
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	271,458	529,780	820,016	1000,000
Геометричес. погружение смесителя, м:	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,533	0,533	0,533	0,533	0,533
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	3,791	4,267	4,928	6,158	7,477
w''':	0,023	0,022	0,022	0,022	0,022
Истинное газосодержание:	0,420	0,448	0,479	0,524	0,558
w''':	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,250	0,500	0,800	1,000
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	18,149	18,652	19,387	19,989
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,445	0,915	1,522	1,961
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,009	0,020	0,037	0,051
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,001	0,001	0,002	0,004
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,474	0,948	1,520	1,906
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,437	0,941	1,670	2,267
Мощность потока воды, кВт:	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-1,220	-0,062	0,308	0,397
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	1,006	1,443	1,947	2,677	3,273
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	1,007	0,998	1,032	1,155	1,312
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	367,203	350,868	329,698	314,512
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	567,548	552,686	532,907	518,331
Ср. плотн. по средн. давлен., кг/м ³ :	382,487	367,329	351,413	331,230	317,066
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	1,000	1,067	1,143	1,250	1,333

Таблица А5 – Расчет параметров рабочего процесса эквивалентного традиционного эрлифта ($h_n = 10$ м, $H_n = 7$ м, $\Delta H_n = 0$, $D = 0,15$ м)

Нагнетательный эрлифт (ДонНТУ – ФИММ – ЭМС)

Расчет от 06.11.2019 г. 15:30:35 – вариант А

Режим – текстовый.

Параметры:

Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: Уоллиса Г.
 Истинное газосодержание по формулам: Уоллиса Г.
 Вид процесса изменения состояния воздуха: изотермический

Исходные данные:

Плотность воды, кг/м³ 1000
 Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³ 1,2
 Кинематическая вязкость воды, м²/с 1E-6
 Атмосферное давление, Па 98100
 Динамическая вязкость воды, Па·с 0,001
 Динамическая вязкость воздуха, Па·с 1,79E-5
 Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м 0,0723
 Показатель политропы 1
 Показатель степени в формуле Арманда 1,53
 Расход воздуха при нормальных условиях, м³/мин 1 - 15 - 1
 Давление в смесителе, кг/см² 1
 Высота подъема, м 7
 Высота переподъема, м 0
 Диаметр подъемной трубы, м 0,15
 Эквивалентная шероховатость трубы, м 0,0002
 Ускорение свободного падения, м/с² 9,81
 Относительная длина жидкой пробки 2
 Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 0,00

1 - p = 1,0

Qэ max = 122,12 (0,0339)
 Qв max = 10,66 (0,1777)
 Qэ opt = 62,40 (0,0173)
 Qв opt = 2,96 (0,0493)

Qv = 1,000 м³/мин: Qe = 0,005157 м³/сек (18,565 м³/час)

	H+h				
	0,000	4,250	8,500	17,000	17,000
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	4,250	8,500	17,000	17,000
Давление в сечении z, кг/см ² :	2,000	1,750	1,500	1,000	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	2,400	2,100	1,800	1,200	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	647,366	619,918	587,852	504,260	504,260
Объемное расходное воздуходождение:	0,618	0,649	0,683	0,764	0,764
Массовое расходное воздуходождение:	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,825	0,825	0,825	0,825	0,825
Площадь сечения трубы, м ² :	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Приведенная скорость смеси, м/с:	0,763	0,831	0,921	1,235	1,235
Приведенная скорость воды, м/с:	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292
Приведенная скорость воздуха, м/с:	0,472	0,539	0,629	0,943	0,943
Истинная скорость воды, м/с:	0,451	0,471	0,497	0,579	0,579
Истинная скорость воздуха, м/с:	1,334	1,415	1,523	1,900	1,900
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	89,842	93,625	98,381	113,211	113,211
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	292,952	292,952	292,952	292,952	292,952
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	1,359	2,913	7,011	7,011
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,060	0,138	0,387	0,387
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	269,443	526,278	992,605	992,605
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	270,862	529,329	1000,003	1000,003
Геометричес. погружение смесителя, м:	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,588	0,588	0,588	0,588	0,588
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	1,108	1,252	1,451	2,215	2,215
w''':	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023
Истинное газосодержание:	0,353	0,381	0,413	0,496	0,496
w''':	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418

Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,250	0,500	1,000	1,000
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	8,167	8,368	8,911	8,911
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,200	0,410	0,874	0,874
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,001	0,002	0,006	0,006
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,216	0,432	0,868	0,868
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,218	0,470	1,133	1,133
Мощность потока воды, кВт:	0,506	0,506	0,506	0,506	0,506
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-1,328	-0,157	0,319	0,319
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,506	0,724	0,976	1,639	1,639
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,507	0,524	0,566	0,765	0,765
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	368,446	352,085	315,657	315,657
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	633,984	619,150	583,885	583,885
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	383,752	368,573	352,633	318,226	318,226
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,500	0,533	0,571	0,667	0,667

Qv = 2,000 м³/мин: Qe = 0,014673 м³/сек (52,822 м³/час)

	H+h				
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	4,250	8,500	17,000	17,000
Давление в сечении z, кг/см ² :	2,000	1,750	1,500	1,000	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	2,400	2,100	1,800	1,200	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	630,471	602,787	570,637	487,784	487,784
Объемное расходное воздухо содержание:	0,532	0,565	0,602	0,694	0,694
Массовое расходное воздухо содержание:	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,870	0,870	0,870	0,870	0,870
Площадь сечения трубы, м ² :	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Приведенная скорость смеси, м/с:	1,773	1,908	2,088	2,717	2,717
Приведенная скорость воды, м/с:	0,830	0,830	0,830	0,830	0,830
Приведенная скорость воздуха, м/с:	0,943	1,078	1,258	1,886	1,886
Истинная скорость воды, м/с:	1,319	1,379	1,457	1,704	1,704
Истинная скорость воздуха, м/с:	2,546	2,708	2,924	3,678	3,678
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	192,734	198,271	205,366	228,416	228,416
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	832,579	832,579	832,579	832,579	832,579
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	6,693	14,174	33,082	33,082
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,516	1,179	3,289	3,289
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	262,208	511,737	963,629	963,629
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	269,417	527,090	1000,000	1000,000
Геометричес. погружение смесителя, м:	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,588	0,588	0,588	0,588	0,588
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	5,517	6,098	6,899	9,935	9,935
w''':	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
Истинное газосодержание:	0,370	0,398	0,430	0,513	0,513
w''':	0,418	0,418	0,418	0,418	0,418
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,250	0,500	1,000	1,000
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	23,851	24,458	26,095	26,095
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,585	1,200	2,560	2,560
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,016	0,034	0,085	0,085
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,001	0,003	0,008	0,008
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,614	1,228	2,467	2,467
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,437	0,941	2,267	2,267
Мощность потока воды, кВт:	1,439	1,439	1,439	1,439	1,439
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-1,891	-0,225	0,453	0,453
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	1,439	1,876	2,380	3,706	3,706
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	1,440	1,291	1,180	1,146	1,146
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	453,226	435,587	395,201	395,201
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	616,961	602,044	566,841	566,841
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	469,467	453,393	436,319	398,776	398,776
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	1,000	1,067	1,143	1,333	1,333

ПРИЛОЖЕНИЕ А4 – Методика вычисления высоты перепада эквивалентного нагнетательного эрлифта $\Delta H_{\text{ЭН}}$

Согласно рисунку 2.3, справедливо соотношение

$$\frac{p_{\text{ВЗ}}}{\rho g h_{\text{Н}}} = \frac{\Delta H_{\text{ЭН}}}{H + h_{\text{Н}} + \Delta H_{\text{ЭН}}} \quad \text{или}$$

$$p_{\text{ВЗ}} (H + h_{\text{Н}} + \Delta H_{\text{ЭН}}) = \rho g h_{\text{Н}} \cdot \Delta H_{\text{ЭН}}.$$

После необходимых математических операций получим

$$p_{\text{ВЗ}} \cdot H + p_{\text{ВЗ}} \cdot h_{\text{Н}} + p_{\text{ВЗ}} \cdot \Delta H_{\text{ЭН}} = \rho g h_{\text{Н}} \cdot \Delta H_{\text{ЭН}};$$

$$p_{\text{ВЗ}} (H + h_{\text{Н}}) = \Delta H_{\text{ЭН}} (\rho g h_{\text{Н}} - p_{\text{ВЗ}}), \quad \text{откуда}$$

$$\Delta H_{\text{ЭН}} = \frac{p_{\text{ВЗ}} (H + h_{\text{Н}})}{\rho g h_{\text{Н}} - p_{\text{ВЗ}}}.$$

Исходя из Основного уравнения гидростатики, избыточное давление в воздухоотделителе $p_{\text{ВЗ}} = \rho g \Delta H_{\text{Н}}$. Применяя подстановку получим

$$\Delta H_{\text{ЭН}} = \frac{\rho g \Delta H_{\text{Н}} (H + h_{\text{Н}})}{\rho g h_{\text{Н}} - \rho g \Delta H_{\text{Н}}} = \frac{\rho g \Delta H_{\text{Н}} (H + h_{\text{Н}})}{\rho g (h_{\text{Н}} - \Delta H_{\text{Н}})};$$

$$\Delta H_{\text{ЭН}} = \frac{\Delta H_{\text{Н}} (H + h_{\text{Н}})}{h_{\text{Н}} - \Delta H_{\text{Н}}}.$$

Т.к. $H = H_{\text{Н}} - \Delta H_{\text{Н}}$ (Рисунок 2.3) выразим высоту перепада эквивалентного нагнетательного эрлифта как

$$\Delta H_{\text{ЭН}} = \frac{\Delta H_{\text{Н}} (H_{\text{Н}} + h_{\text{Н}} - \Delta H_{\text{Н}})}{h_{\text{Н}} - \Delta H_{\text{Н}}}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б – К разделу «Физическая модель и аналитический анализ
рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с радиальными
нагнетателями»

Таблица Б1 – Результаты расчета параметров работы эрлифтов (нагнетательного и традиционного) с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений во всасывающем патрубке нагнетателя $p_{a\text{ вс}} = (1,013 \div 1,250) \cdot 10^5$ Па при $\alpha_0 = 0,3$

Абсолютное давление во всасывающем патрубке $p_{a\text{ вс}} \cdot 10^{-5}$, Па	1,013	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250
Максимальное абсолютное давление нагнетателя $p_{aн\text{ макс}} \cdot 10^{-5}$, Па	3,050	3,163	3,313	3,464	3,614	3,765
Степень сжатия нагнетателя ε	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01
Производительность нагнетателя Q_n , м ³ /мин (м ³ /с)	168 (2,80)	174 (2,90)	183 (3,05)	191 (3,18)	199 (3,32)	208 (3,47)
КПД нагнетателя η_n	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781
Глубина погружения нагнетательного эрлифта h_n , м	20,8	21,9	23,4	25,0	26,5	28,1
Высота подъема традиционного эрлифта H , м	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5
Высота перепада нагнетательного эрлифта ΔH_n , м	0,00	0,38	0,89	1,40	1,91	2,42
Высота перепада эквивалентного нагнетательного эрлифта $\Delta H_{эн}$, м	0,00	1,23	2,83	4,35	5,81	7,21
Высота подъема эквивалентного нагнетательного эрлифта $H_n = H_{эм}$, м	48,5	48,8	49,3	49,8	50,4	50,9
Относительное погружение эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн}$	0,300	0,306	0,314	0,321	0,328	0,335

Удельный расход воздуха эквивалентного нагнетательного эрлифта $q_{эн}$	10,8	10,4	9,82	9,33	8,89	8,50
КПД эквивалентного нагнетательного эрлифта $\eta_{эн}$	0,393	0,413	0,441	0,469	0,497	0,526
КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эун}$	0,307	0,323	0,345	0,366	0,388	0,411
Подача эквивалентного нагнетательного эрлифта $Q_{эн}$, м ³ /ч (м ³ /с)	930 (0,258)	1008 (0,280)	1115 (0,310)	1228 (0,341)	1314 (0,373)	1465 (0,407)
Относительное погружение эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эм}$	0,300	0,299	0,297	0,294	0,292	0,290
Удельный расход воздуха эквивалентного традиционного эрлифта $q_{эм}$	10,8	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7
КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эм}$	0,394	0,392	0,390	0,388	0,385	0,383
КПД установки эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эут}$	0,307	0,306	0,304	0,303	0,301	0,299
Подача эквивалентного традиционного эрлифта $Q_{эм}$, м ³ /ч (м ³ /с)	930 (0,258)	921 (0,256)	906 (0,252)	892 (0,248)	878 (0,244)	864 (0,240)

Таблица Б2 – Основные параметры эрлифтных установок традиционной конструкции с центробежными нагнетателями

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	ЦНВ 100/1,6	360-22-1	ЦНВ 80/3,2	ЦНВ 200/3
Давление нагнетателя (абсолютное): - максимально возможное $p_{н.макс} \cdot 10^{-5}$; - минимально допустимое $p_{н.мин} \cdot 10^{-5}$.	Па	1,60 1,51	1,64 1,32	2,43 2,01	3,56 3,00	3,05 2,70
Производительность нагнетателя Q_n при: - максимально возможном давлении $p_{н.макс}$; - минимально допустимом давлении $p_{н.мин}$.	м ³ /мин (м ³ /с)	56,5 0,942	89,2 1,487	260 4,332	82,0 1,374	168 2,822
Мощность нагнетателя $N_{потр}$ при: - максимально возможном давлении $p_{н.макс}$; - минимально допустимом давлении $p_{н.мин}$.	кВт	66,5 79,5	103 119	585 735	260 324	505 572

Политропный КПД нагнетателя $\eta_{n\text{ пол}}$ при: - максимально возможном давлении $p_{n\text{ макс}}$; - минимально допустимом давлении $p_{n\text{ мин}}$.	-	0,798 0,745	0,845 0,503	0,800 0,689	0,844 0,755	0,781 0,790
Геометрическое погружение смесителя эрлифта: - максимально возможное $h_{\text{ макс}}$; - минимально допустимое $h_{\text{ мин}}$.	м	6,30 5,10	6,40 3,13	14,4 10,2	26,0 20,3	20,8 17,2
Высота подъема эрлифта H при $h_{\text{ макс}}$ и $\alpha = 0,3$	м	14,7	14,9	33,6	60,7	48,5
Длина подъемной трубы эрлифта $H+h_{\text{ макс}}$ при $\alpha = 0,3$	м	21,0	21,3	48,0	86,7	69,3

Таблица Б3 – Основные параметры эрлифтных установок (традиционной и нагнетательной) при абсолютном давлении во всасывающем патрубке радиального нагнетателя $p_{a\text{ в с}} = 1,250 \cdot 10^5$ Па

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	ЦНВ 100/1,6	360-22-1	ЦНВ 80/3,2	ЦНВ 200/3
Максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{a\text{ н макс}} \cdot 10^{-5}$	Па	2,01	2,03	3,01	4,39	3,77
Производительность нагнетателя $Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	$\text{м}^3/\text{мин}$ ($\text{м}^3/\text{с}$)	69,4 (1,16)	110 (1,83)	322 (5,37)	101 (1,68)	208 (3,47)
Максимально возможное геометрическое погружение смесителя нагнетательного эрлифта $h_{\text{макс}}$	м	10,2	10,4	20,4	34,4	28,1

Относительное погружение эрлифта $\alpha_{эн}$ (при $\alpha_0 = 0,3$)	-	0,312	0,315	0,332	0,337	0,335
Высота подъема нагнетательного эрлифта $H_n = H + \Delta H_n$	м	17,1	17,3	36,1	63,0	50,9
КПД эрлифта $\eta_{э}$ (при $\alpha_0 = 0,3$) - традиционной конструкции $\eta_{эт}$ - нагнетательного эрлифта $\eta_{эн}$	-	0,276 0,350	0,276 0,354	0,344 0,458	0,431 0,578	0,394 0,526
КПД эрлифтной установки $\eta_{эу}$ (при $\alpha_0 = 0,3$): - традиционной конструкции $\eta_{эут}$ - нагнетательной $\eta_{эун}$	-	0,220 0,280	0,234 0,299	0,275 0,367	0,363 0,488	0,307 0,411
Подача эрлифта $Q_{э}$ (при $\alpha_0 = 0,3$): - традиционной конструкции $Q_{эт}$ - нагнетательного эрлифта $Q_{эн}$	$\text{м}^3/\text{ч}$ $(\text{м}^3/\text{с})$	312 (0,0867) 418 (0,116)	494 (0,137) 675 (0,188)	1444 (0,401) 2225 (0,618)	454 (0,126) 723 (0,201)	932 (0,259) 1465 (0,407)

Таблица Б4 – Параметры основных общепромышленных радиальных нагнетателей

Тип машины	Производительность, м ³ /мин	Конечное абсолютное давление, кгс/см ²	Потребляемая Мощность, кВт	Частота вращения ротора об./мин	Масса, т	Мощность двигателя, кВт	Напряжение, В
ЦНВ 800/1,6	510-800-920	1,76-1,69-1,59	690-960-1035	4293	12,8	1250	6000, 10000
ЦНВ 135/2	115-135-160	2,10-2,0-1,85	200-225-270	7518	7,6	315	6000
ЦНВ 750/2	700-750-890	2,04-2,05-1,90	1250-1300- 1420	4882	13,3	1600	6000, 10000
360-22-1	260-310-360	2,48-2,40-2,05	586-670-736	7841	7,9	800	6000, 10000
ЦНВ 80/3,2	75-80-105	3,2-3,4-3,2	230-255-325	2960	5,7	315	380/660
ЦНВ 100/3,2	85-100-110	3,35-3,2-2,9	270-310-335	2960	5,8	400	380/660
ЦНВ 130/3,2	120-135-140	3,4-3,3-3,2	375-405-430	2970	5,9	500	6000
ЦНВ 160/3,2	130-160-170	3,4-3,2-2,7	410-480-500	2970	5,9 6,6	630	6000 10000
ЦНВ 200/3	166-200-226	3,13-3,00-2,73	500-550-572	9649	7,6	630	6000, 10000

ПРИЛОЖЕНИЕ В – К разделу «Экспериментальные исследования рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки»

ПРИЛОЖЕНИЕ В1 – Погрешность измерений расхода воздуха эрлифтом, давления в воздухоотделителе и подачи эрлифта

Расход сжатого воздуха, измеренный с помощью стандартной диафрагмы, вычисляется по зависимости [105, с 42]:

$$Q_B = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_\phi \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{ном} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (\text{B.1})$$

где Q_B - объемный расход воздуха, приведенный к нормальным условиям

($p_{ном} = 1,0332 \text{ кг/см}^2$ и $T_{ном} = 293,15 \text{ К}$);

α – коэффициент расхода;

ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды (коэффициент расширения);

k_t – поправочный множитель на тепловое расширение материала сужающего устройства;

k_ϕ – коэффициент коррекции расхода на влажность воздуха;

d_{20} – диаметр отверстия сужающего устройства при температуре 20°C , мм;

$\Delta p'$ - перепад давления на сужающем устройстве, кг/м^2 ;

p – абсолютное давление перед сужающим устройством, кгс/см^2 ;

$\rho_{ном}$ – плотность воздуха при нормальных условиях, $\rho_{ном} = 1,2046 \text{ кг/м}^3$;

T – температура воздуха, К;

K – коэффициент сжатости воздуха.

1. Для измерения расхода сжатого воздуха, поступающего в смеситель эрлифта, использовалась диафрагма со следующими геометрическими параметрами: диаметр отверстия при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ $d_{20} = 35 \text{ мм}$, внутренний

диаметр трубопровода перед диафрагмой при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,453$.

Среднеквадратичная относительная погрешность измерения расхода сжатого воздуха, поступающего в смеситель эрлифта

$$\sigma_{Q_e} = \left[\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{k_{\varphi}}^2 + 0,25(\sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_{\rho_{ном}}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_T^2 + \sigma_K^2) \right]^{0,5}, \quad (\text{B.2})$$

где σ_{α} , σ_{ε} , $\sigma_{k_{Re}}$, $\sigma_{k_{\varphi}}$, $\sigma_{\Delta p}$, $\sigma_{\rho_{ном}}$, σ_p , σ_T , σ_K - среднеквадратичные относительные погрешности α , ε , k_{Re} , k_{φ} , Δp , $\rho_{ном}$, p , T , K .

Соответственно с [105, с. 64] составляющие погрешности $\sigma_{d_{20}}^2$ и $\sigma_{k_t}^2$ опущены ввиду их малости.

Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента расхода

$$\sigma_{\alpha} = \left[\sigma_{\alpha'}^2 + \sigma_{k_{uu}}^2 + \sigma_{k_n}^2 \right]^{0,5}, \quad (\text{B.3})$$

где для диафрагмы с $m = 0,453$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[(0,5m)^2 + \sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\alpha_D}^2 \right]^{0,5}. \quad (\text{B.4})$$

Относительная площадь сужающего устройства

$$m = \left(\frac{d}{D} \right)^2, \quad (\text{B.5})$$

где d – диаметр отверстия диафрагмы при рабочей температуре, мм;

D – внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой при рабочей температуре, мм.

Используется диафрагма с $m = 0,453$.

Погрешности

$$\sigma_{\alpha_d} = 2\sigma_d \left(1 + \frac{m^2}{\alpha} \right), \quad (\text{B.6})$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2\sigma_D \frac{m^2}{\alpha}. \quad (\text{B.7})$$

Согласно [105, с. 72] при $m \geq 0,4$ значения $\sigma_d = 0,025$ и $\sigma_D = 0,15$.

Для оценки погрешности принимаем расчетное значение коэффициента расхода $\alpha = 0,661$ [102, с. 66].

Тогда согласно (B.6), (B.7) и (B.4)

$$\sigma_{\alpha_d} = 2 \cdot 0,025 \left(1 + \frac{0,453^2}{0,661} \right) = 0,066,$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2 \cdot 0,15 \frac{0,453^2}{0,661} = 0,093,$$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[(0,5 \cdot 0,453)^2 + 0,066^2 + 0,093^2 \right]^{0,5} = 0,238.$$

В соответствие с [105, с. 73] для условий проведения эксперимента поправочный множитель на шероховатость трубопровода $k_{ш} = 1$ (используются новые, не бывавшие в эксплуатации с $k = 0,02 \div 0,10$ мм) и поправочный множитель на притупление входной кромки отверстия диафрагмы $k_n = 1$. Тогда погрешности $\sigma_{k_{ш}} = 0$ и $\sigma_{k_n} = 0$.

Итак, среднеквадратичная относительная погрешность в соответствие с (B.3)

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha'} = 0,238.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[\sigma_{\chi}^2 + \sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_p^2 \right]^{0,5} + \sigma_0, \quad (\text{B.8})$$

где для диафрагмы с $0,4 < m \leq 0,64$

$$\sigma_0 = 4 \frac{\Delta p}{p}, \quad (\text{B.9})$$

где $\Delta p = p_{\max} - p_{\min} = 1,433 - 1,153 = 0,28$ (кгс/см²) – перепад абсолютных изменяемых давлений; p – абсолютное давление измеряемой среды.

Погрешность определения показателя адиабаты воздуха

$$\sigma_{\chi} = 50 \frac{\Delta K}{K}, \quad (\text{В.10})$$

где ΔK – максимальная абсолютная погрешность величины K (показателя адиабаты), равна половине единицы розряда последней значащей цифры в табличном значении K .

Показатель адиабаты для воздуха $K = 1,400$, тогда $\Delta K = 0,5 \cdot 10^{-4}$ и в соответствии с (В.10)

$$\sigma_{\chi} = 50 \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{1,400} = 0,002.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность дифманометра

$$\sigma_{\Delta p} = 0,5 \frac{\Delta p_{np}}{\Delta p} S_{\Delta p} \quad (\text{В.11})$$

где Δp_{np} - наибольший измеряемый перепад давлений;

Δp - диапазон измеряемых давлений;

$S_{\Delta p}$ - класс точности прибора.

Для дифманометра ДТ-50, в котором использовалась вода в качестве уравнивающей жидкости (наибольший измеряемый перепад давлений 500 мм. вод. ст., цена деления шкалы - 1 мм)

$$S_{\Delta p} = \frac{1}{500} 100 = 0,2.$$

Значения среднеквадратичной относительной погрешности дифманометра (для дифманометра ДТ-50 при $\Delta p_{np} = 500$ мм. вод. ст. и $\Delta p = 10 \div 270$ мм. вод. ст.), согласно (В.11) $\sigma_{\Delta p} = 0,185 \div 5,0$.

Погрешность измерения абсолютного давления

$$\sigma_p = \left[\sigma_{p_0}^2 + \left(\sigma_{p_u} \frac{p_u}{p} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (\text{B.12})$$

Погрешность измерения барометрического давления

$$\sigma_{p_0} = 50 \frac{\Delta p_0}{p}, \quad (\text{B.13})$$

где Δp_0 – максимальная абсолютная погрешность измерения барометрического давления, $\Delta p_0 = 0,5$ мм. рт. ст. = $0,68 \cdot 10^{-3}$ кгс/см²; p – абсолютное давление измеряемой среды, $p = 1,153 \div 1,433$ кгс/см².

Тогда согласно с (B.13) $\sigma_{p_0} = 0,024 \div 0,029$.

Погрешность измерения избыточного давления манометром

$$\sigma_{p_u} = 0,5 \frac{p_{np}}{p_u} S_{p_u}, \quad (\text{B.14})$$

где p_{np} – значение верхней границы шкалы измерений манометра, $p_{np} = 4,0$ кгс/см²;
 p_u – значение измеряемого избыточного давления, $p_u = 0,15 \div 0,40$ кгс/см²;

S_{p_u} – класс точности прибора $S_{p_u} = 1,5$.

Тогда в соответствии с (B.14) $\sigma_{p_u} = 7,5 \div 20$.

Тогда, согласно выражению (B.12) погрешность измерения абсолютного давления $\sigma_p = 0,976 \div 5,58$.

Согласно (B.9) $\sigma_\theta = 0,782 \div 0,981$.

Значение коэффициента расширения $\varepsilon = 0,961 \div 0,995$.

Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды согласно с (B.8) $\sigma_\varepsilon = 0,822 \div 1,02$.

Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха

$$\sigma_{k_\phi} = \left[\left(\frac{1 - k_\phi}{k_\phi} \right)^2 (\sigma_\phi^2 + \sigma_{p_{\text{ен.макс}}}^2 + \sigma_p^2) \right]^{0,5}, \quad (\text{B.15})$$

где σ_ϕ - погрешность определения относительной влажности воздуха,

$$\sigma_\phi = \left[\sigma_{p_{\text{ен}}}^2 + \sigma_{p_{\text{ен.макс}}}^2 \right]^{0,5}; \quad (\text{B.16})$$

$\sigma_{p_{\text{ен}}}$ - погрешность определения давления водного пара;

$\sigma_{p_{\text{ен.макс}}}$ - погрешность определения наибольшего возможного давления водного пара.

Значения

$$\sigma_{p_{\text{ен.макс}}} = \left[\sigma_t^2 + \sigma_{p_{\text{ен}}}^2 \right]^{0,5}. \quad (\text{B.17})$$

Среднеквадратичная относительная погрешность измерения температуры атмосферного воздуха

$$\sigma_t = 50 \frac{\Delta t}{t}, \quad (\text{B.18})$$

где t – значение границы шкалы измерения термометра; Δt – максимальная абсолютная погрешность измерения температуры.

В данном случае $t = 50$ °C, $\Delta t = 0,1$ °C. Тогда

$$\sigma_t = 50 \frac{0,1}{50} = 0,1.$$

Значение

$$\sigma_{p_{\text{ен}}} = 50 \frac{\Delta p_{\text{ен}}}{p_{\text{ен}}}, \quad (\text{B.19})$$

где Δp_{en} – максимальная абсолютная погрешность величины p_{en} , равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении p_{en} .

Для данных условий $p_{en} = 0,0200 \div 0,1000$ кгс/см², $\Delta p_{en} = 5 \cdot 10^{-5}$ кгс/см².

Тогда в соответствии с (В.19) $\sigma_{p_{en}} = 0,025 \div 0,125$, и в соответствии с (В.17) $\sigma_{p_{en, \max}} = 0,103 \div 0,160$.

Величина погрешности определения относительной влажности воздуха (В.16) $\sigma_{\varphi} = 0,105 \div 0,203$.

Величина коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха $k_{\varphi} = 0,994 \div 0,995$.

Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха (В.15) $\sigma_{k_{\varphi}} = 0,003 \div 0,008$.

Среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольдса

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re}) \sigma_{\mu}, \quad (\text{В.20})$$

где σ_{μ} - погрешность определения вязкости измеряемой среды.

Расход воздуха при действительных рабочих параметрах и допущении, что $Re = 10^6$:

$$Q_g^* = 0,2109 \cdot \alpha^* \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_{\varphi} \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{ном} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{час}, \quad (\text{В.21})$$

где α^* - значение коэффициента расхода α при $Re = 10^6$.

Коэффициент расхода

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \left[0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,1840 \cdot m^4 + 0,0029 \cdot m^{1,25} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} \right] \quad (\text{В.22})$$

при $Re = 10^6$ коэффициент расхода $\alpha^* = 0,661$.

Для расчетов принимаем $d_{20} = 35$ мм; $\varepsilon = 0,995$; $k_t^2 = 1,001$; $k_\varphi = 0,995$; $\Delta p' = 120$ кгс/м²; $p = 0,30$ кгс/см²; $\rho_{ном} = 1,2046$ кгс/м³; $T = 378,15$ К; $K = 1,0$;

При принятых значениях переменных $Q_6^* = 48$ м³/ч.

Критерий Рейнольдса при расходе воздуха Q_6^*

$$Re^* = 0,353 \frac{Q_6^* \cdot \rho_{ном}}{D \cdot \mu}, \quad (B.23)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха в рабочих условиях, $\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ кгс/м².

Значение критерия Рейнольдса при расходе воздуха Q_6^*

$$Re^* = 0,353 \frac{48 \cdot 1,2046}{52 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 1,8 \cdot 10^5.$$

Действительное число Рейнольдса

$$Re = \frac{Re^* \cdot C}{\alpha^* \left\{ 1 - S \left[1 - S(1 - S)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}}, \quad (B.24)$$

где вспомогательные величины

$$B = \frac{0,0029m^{1,25}}{\sqrt{1 - m^2}}, \quad (B.25)$$

$$C = \left(0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 \right) \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}, \quad (B.26)$$

$$S_1 = B \frac{Re^*}{\alpha^* \cdot 10^6}, \quad (B.27)$$

$$S_2 = C \frac{Re^*}{\alpha^* \cdot 10^6}, \quad (B.28)$$

$$S = \frac{S_1}{S_2^{1,75}}. \quad (B.29)$$

Результаты расчетов:

$$B = \frac{0,0029 \cdot 0,25^{1,25}}{\sqrt{1 - 0,25^2}} = 0,53 \cdot 10^{-3},$$

$$C = (0,5959 + 0,0312 \cdot 0,25^{1,05} - 0,184 \cdot 0,25^4) \frac{1}{\sqrt{1 - 0,25^2}} = 0,62,$$

$$S_1 = 0,53 \cdot 10^{-3} \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,661 \cdot 10^6} = 0,095 \cdot 10^{-3},$$

$$S_2 = 0,62 \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,661 \cdot 10^6} = 0,17$$

$$S = \frac{0,095 \cdot 10^{-3}}{0,17^{1,75}} = 2,1 \cdot 10^{-3},$$

$$Re = \frac{1,8 \cdot 10^5 \cdot 0,62}{0,661 \left\{ 1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \left[1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \left(1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \right)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}} = 1,69 \cdot 10^5;$$

Коэффициент коррекции на число Рейнольдса

$$k_{Re} = \frac{C + B \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75}}{C + B}, \quad (B.30)$$

$$k_{Re} = \frac{0,62 + 0,53 \cdot 10^{-3} \left(\frac{10^6}{1,69 \cdot 10^5} \right)^{0,75}}{0,62 + 0,53 \cdot 10^{-3}} = 1,002.$$

Тогда среднеквадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольда

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re}) \sigma_{\mu} = (1 - 1,004) \sigma_{\mu} = 0.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность измерения температуры

$$\sigma_T = 0,5 \frac{N_T}{273,15 + t} S_t, \quad (B.31)$$

где N_T – диапазон шкалы измерения термометра, $N_T = 100 + 273,15 = 373,15$ К;

S_t – класс точности термометра,

$$S_t = \frac{1}{100} 100 = 1;$$

t – диапазон измеряемых температур, $t = 23 \div 27^\circ\text{C}$.

Тогда в соответствии с (В.32) $\sigma_T = 0,62 \div 0,63$.

Среднеквадратичная относительная погрешность определения плотности сухого воздуха в нормальных условиях

$$\sigma_{\rho_{ном}} = 50 \frac{\Delta\rho_{ном}}{\rho_{ном}}, \quad (\text{В.32})$$

где $\Delta\rho_{ном}$ – максимальная абсолютная погрешность величины $\rho_{ном}$, равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении $\rho_{ном}$, $\Delta\rho_{ном} = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³.

Тогда

$$\sigma_{\rho_{ном}} = 50 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1,2046} = 0,01.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости воздуха

$$\sigma_K = 50 \frac{\Delta K}{K}, \quad (\text{В.33})$$

где ΔK – максимальная абсолютная погрешность величины K , равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении величины K , $\Delta K = 5 \cdot 10^{-3}$.

Тогда

$$\sigma_K = 50 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 0,25.$$

Среднеквадратичная относительная погрешность измерения расхода воздуха эрлифтом в соответствии с (В.2)

$$\sigma_{Q_3} = \left\{ 0,238^2 + (0,822 \div 1,02)^2 + 0^2 + (0,003 \div 0,008)^2 + \right. \\ \left. + 0,25 \left[(0,185 \div 5,0)^2 + 0,01^2 + (0,976 \div 5,58)^2 + (0,62 \div 0,63)^2 + 0,25^2 \right] \right\}^{0,5} = \\ = 1,04 \div 3,90.$$

2. Погрешность измерения избыточного давления в воздухоотделителе манометром, в соответствии с (В.14)

$$\sigma_{p_u} = 0,5 \frac{p_{np}}{p_u} S_{p_u},$$

которая при принятых переменных: $p_{np} = 0,5$ кгс/см²; $p_u = 0,025 \div 0,10$ кгс/см²; $S_{p_u} = 1,0$ будет принимать значения $\sigma_{p_u} = 2,5 \div 10$.

3. Среднеквадратичная относительная погрешность определения геометрического напора жидкости над водосливом H (определения подачи эрлифта Q_3)

$$\sigma_H = 100 \frac{\Delta H}{H}, \quad (\text{В.34})$$

где ΔH - максимальная абсолютная погрешность величины H ; H - значение границы шкалы измерения пьезометра.

В данном случае $\Delta H = 1$ мм, $H = 100$ мм.

$$\sigma_H = 100 \frac{1}{100} = 1.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В2 – Протоколы экспериментальных исследований работы традиционного эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 68$ мм и длиной $H+h = 5$ м, геометрическим погружением смесителя $h = 2$ м

Протокол №1						
15.09.2019 г.						
<p>Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух. Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Относительное погружение смесителя $\alpha = 0,40$. Барометрическое давление $p_b = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.</p>						
№ п/п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,037	0,00028	23	1,27	25	0,0042
2	0,042	0,00054	45	1,26	25	0,0083
3	0,047	0,00071	55	1,23	25	0,0117
4	0,050	0,00089	52	1,22	25	0,0167
5	0,053	0,00097	75	1,22	25	0,0208

Протокол №2

15.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Относительное погружение смесителя $\alpha = 0,35$. Барометрическое давление $p_b = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,020	0,000185	12	1,29	25	0,0106
2	0,040	0,000473	40	1,27	25	0,0189
3	0,042	0,000534	45	1,26	25	0,0200
4	0,045	0,000633	80	1,24	25	0,0263
5	0,045	0,000633	95	1,23	25	0,0285
6	0,042	0,000534	110	1,22	25	0,0305

Протокол №3

15.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Относительное погружение смесителя $\alpha = 0,30$. Барометрическое давление $p_b = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,014	0,000105	7	1,35	25	0,0062
2	0,027	0,000179	10	1,31	25	0,0094
3	0,033	0,000294	40	1,27	25	0,0137
4	0,038	0,000317	80	1,27	25	0,0185
5	0,042	0,000447	90	1,21	25	0,0268
6	0,055	0,000495	97	1,20	25	0,0289

Протокол №4

15.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Относительное погружение смесителя $\alpha = 0,25$. Барометрическое давление $p_0 = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,013	0,000029	20	1,27	25	0,0132
2	0,025	0,000148	55	1,24	25	0,0213
3	0,029	0,000214	80	1,23	25	0,0255
4	0,032	0,000273	135	1,22	25	0,0327
5	0,032	0,000273	150	1,21	25	0,0344
6	0,033	0,000294	155	1,20	25	0,0342

Протокол №5

15.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Относительное погружение смесителя $\alpha = 0,20$. Барометрическое давление $p_0 = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,015	0,000042	70	1,23	25	0,0246
2	0,020	0,000085	125	1,21	25	0,0345
3	0,023	0,000121	142	1,19	25	0,0376
4	0,024	0,000134	173	1,18	25	0,0391
5	0,025	0,000148	187	1,16	25	0,0415

Протокол №6

15.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Относительное погружение смесителя $\alpha = 0,15$. Барометрическое давление $p_0 = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,010	0,0000154	150	1,29	25	0,0360
2	0,015	0,0000420	210	1,27	25	0,0421
3	0,017	0,0000572	270	1,25	25	0,0466
4	0,017	0,0000572	330	1,23	25	0,0514
5	0,018	0,0000659	420	1,22	25	0,0585

**ПРИЛОЖЕНИЕ В3 – Протоколы экспериментальных исследований работы нагнетательного эрлифта с подъемной трубой
диаметром $D = 68$ мм, $h_n = 2$ м, $H+h_n = 5$ м, $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м**

Протокол №1

17.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h_n = 5$ м. Геометрическое погружение смесителя $h_n = 2$ м. Высота перепада $\Delta H_n = 0,25$ м. Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,35$. Барометрическое давление $p_b = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	0,035	0,00025	15	1,43	25	0,0044
2	0,038	0,00049	24	1,32	25	0,0087
3	0,041	0,00064	44	1,23	25	0,0122
4	0,043	0,00080	57	1,22	25	0,0175
5	0,042	0,00074	64	1,21	25	0,0218

Протокол №2

17.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h_n = 5$ м. Геометрическое погружение смесителя $h_n = 2$ м. Высота перепада $\Delta H_n = 0,50$ м. Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,30$. Барометрическое давление $p_0 = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,033	0,00022	16	1,45	25	0,0048
2	0,036	0,00044	25	1,33	25	0,0096
3	0,039	0,00057	43	1,27	25	0,0134
4	0,041	0,00066	55	1,24	25	0,0193
5	0,043	0,00071	58	1,22	25	0,0244

Протокол №3

17.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h_n = 5$ м. Геометрическое погружение смесителя $h_n = 2$ м. Высота перепада $\Delta H_n = 0,75$ м. Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,25$. Барометрическое давление $p_б = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,032	0,00020	17	1,47	25	0,0050
2	0,035	0,00038	28	1,35	25	0,0085
3	0,037	0,00052	45	1,29	25	0,0140
4	0,039	0,00061	58	1,27	25	0,0230
5	0,040	0,00065	62	1,25	25	0,0255

Протокол №4

17.09.2019 г.

Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.

Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 50$ мм. Длина подъемной трубы $H+h_n = 5$ м. Геометрическое погружение смесителя $h_n = 2$ м. Высота переподъема $\Delta H_n = 1,0$ м. Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эн} = 0,20$. Барометрическое давление $p_\delta = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 25$ °С.

№ п/ п	Подача эрлифта		Расход воздуха			
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, м	Расход технической воды, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (полн.), кгс/см ²	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7
1	0,031	0,00019	19	1,52	25	0,0054
2	0,033	0,00038	32	1,39	25	0,0110
3	0,034	0,00049	47	1,33	25	0,0150
4	0,037	0,00056	59	1,29	25	0,0220
5	0,039	0,00061	66	1,25	25	0,0270

**ПРИЛОЖЕНИЕ В4 – Результаты численного решения математической модели
рабочего процесса лабораторного эрлифта с помощью разработанной
компьютерной программы**

**Таблица В4.1 – Результаты численного решения математической модели эрлифта
традиционной конструкции ($H+h = 5$ м, $h = 2,0$ м, $\alpha = 0,4$, $D = 0,068$ м)**

```

=====
Традиционный эрлифт (ДонНТУ - ФИММ - ЭМС)
Расчет от 15.09.2019 г. 19:27:18 - вариант А
-----
Режим - текстовый.
=====
Параметры:
=====
Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: ..... Уоллиса Г.
Истинное газосодержание по формулам: ..... Уоллиса Г.
Вид процесса изменения состояния воздуха: ..... изотермический
=====
Исходные данные:
=====
Плотность воды, кг/м^3 ..... 1000
Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ..... 1,2
Кинематическая вязкость воды, м^2/с ..... 1E-6
Атмосферное давление, Па ..... 98100
Динамическая вязкость воды, Па·с ..... 0,001
Динамическая вязкость воздуха, Па·с ..... 1,79E-5
Кэффициент поверхностного натяжения, Н/м ..... 0,0723
Показатель политропы ..... 1
Показатель степени в формуле Арманда ..... 1,53
Расход воздуха при нормальных условиях, м^3/мин ..... 0 - 1,6 - 0,2
Давление в смесителе, кг/см^2 ..... 0,2
Высота подъема, м ..... 3
Высота переподъема, м ..... 0
Диаметр подъемной трубы, м ..... 0,068
Эквивалентная шероховатость трубы, м ..... 0,0002
Ускорение свободного падения, м/с^2 ..... 9,81
Относительная длина жидкой пробки ..... 2
Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 0,00
=====
Qv = 0,000 м^3/мин: нет реш.
-----
N+h
Qv = 0,200 м^3/мин: Qe = 0,000273 м^3/сек (0,983 м^3/час)
-----
N+h
Значения z по эквивалент. схеме, м:          0,000      1,250      2,500      5,000      5,000
Давление в сечении z, кг/см^2:              1,200      1,150      1,100      1,000      1,000
Плотность воздуха, кг/м^3:                   1,440      1,380      1,320      1,200      1,200
Плотность смеси, кг/м^3:                     407,786    400,552    393,141    377,756    377,756
Объемное расходное воздухо содержание:       0,910      0,914      0,917      0,924      0,924
Массовое расходное воздухо содержание:       0,014      0,014      0,014      0,014      0,014
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:       0,558      0,558      0,558      0,558      0,558
Площадь сечения трубы, м^2:                 0,004      0,004      0,004      0,004      0,004
Приведенная скорость смеси, м/с:           0,840      0,873      0,910      0,993      0,993
Приведенная скорость воды, м/с:            0,075      0,075      0,075      0,075      0,075
Приведенная скорость воздуха, м/с:         0,765      0,798      0,834      0,918      0,918
Истинная скорость воды, м/с:                0,185      0,188      0,192      0,200      0,200
Истинная скорость воздуха, м/с:             1,290      1,330      1,373      1,473      1,473
Число Рейнольдса смеси · 10^-3:             41,740     42,623     43,572     45,707     45,707
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м^2·с:       76,322     76,322     76,322     76,322     76,322
Давл., обус. трением · 10^3, кг/см^2:       0,000      0,792      1,633      3,483      3,483
Давл., обус. ускорен. · 10^3, кг/см^2:      0,000      0,003      0,006      0,013      0,013
Давл., об. силой тяж. · 10^3, кг/см^2:     0,000      50,523     100,131    196,509    196,509
Сумма пред. давлений · 10^3, кг/см^2:     0,000      51,318     101,770    200,005    200,005
Геометричес. погружение смесителя, м:      2,000      2,000      2,000      2,000      2,000
Относит. геом. погружение смесителя:       0,400      0,400      0,400      0,400      0,400

```

Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	1,027	1,088	1,156	1,319	1,319
w''':	0,029	0,029	0,028	0,028	0,028
Истинное газосодержание:	0,593	0,600	0,608	0,623	0,623
w''':	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,050	0,100	0,200	0,200
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	0,686	0,692	0,706	0,706
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,003	0,007	0,014	0,014
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,003	0,007	0,014	0,014
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,014	0,028	0,060	0,060
Мощность потока воды, кВт:	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,141	0,051	0,138	0,138
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,005	0,019	0,034	0,065	0,065
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,006	0,016	0,027	0,051	0,051
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	89,122	87,386	83,887	83,887
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	404,184	400,523	393,018	393,018
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	90,849	89,123	87,390	83,905	83,905
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,167	0,170	0,174	0,182	0,182

Qv = 0,400 м³/мин: Qe = 0,001094 м³/сек (3,937 м³/час)

	H+h				
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	1,250	2,500	5,000	5,000
Давление в сечении z, кг/см ² :	1,200	1,150	1,100	1,000	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	1,440	1,380	1,320	1,200	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	383,708	376,939	370,021	355,714	355,714
Объемное расходное воздухосодержание:	0,836	0,841	0,847	0,859	0,859
Массовое расходное воздухосодержание:	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715
Площадь сечения трубы, м ² :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси, м/с:	1,831	1,897	1,970	2,137	2,137
Приведенная скорость воды, м/с:	0,301	0,301	0,301	0,301	0,301
Приведенная скорость воздуха, м/с:	1,530	1,596	1,669	1,836	1,836
Истинная скорость воды, м/с:	0,787	0,801	0,816	0,848	0,848
Истинная скорость воздуха, м/с:	2,479	2,558	2,646	2,846	2,846
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	66,806	68,012	69,317	72,282	72,282
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	303,313	303,313	303,313	303,313	303,313
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	3,405	6,999	14,844	14,844
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,045	0,093	0,198	0,198
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	47,542	94,229	184,959	184,959
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	50,992	101,320	200,001	200,001
Геометричес. погружение смесителя, м:	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	4,426	4,664	4,930	5,562	5,562
w''':	0,028	0,028	0,028	0,027	0,027
Истинное газосодержание:	0,617	0,624	0,631	0,645	0,645
w''':	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,050	0,100	0,200	0,200
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	2,896	2,923	2,979	2,979
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,014	0,029	0,058	0,058
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,001	0,002	0,004	0,004
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,014	0,027	0,054	0,054
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,028	0,057	0,119	0,119
Мощность потока воды, кВт:	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,286	0,098	0,273	0,273
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,021	0,049	0,078	0,141	0,141
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,022	0,035	0,050	0,082	0,082
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	162,770	159,846	153,917	153,917
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	380,336	376,914	369,917	369,917
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	165,667	162,773	159,860	153,972	153,972
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,333	0,340	0,348	0,364	0,364

Результаты расчета эрлифта традиционной конструкции с другими значениями относительного погружения α не приведены ввиду их объемности.

Таблица В4.2 – Результаты численного решения математической модели эрлифта,
 работающего по нагнетательной схеме ($H+h = 5$ м, $h = 2,0$ м,

$$\Delta H_H = 0,25 \text{ м}, D = 0,068 \text{ м})$$

```

=====
Нагнетательный эрлифт (ДонНТУ - ФИММ - ЭМС)

Расчет от 15.09.2019 г. 20:12:10 – вариант А
-----
Режим - текстовый.
=====
Параметры:
=====
Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: ..... Уоллиса Г.
Истинное газосодержание по формулам: ..... Уоллиса Г.
Вид процесса изменения состояния воздуха: ..... изотермический
=====
Исходные данные:
=====
Плотность воды, кг/м^3 ..... 1000
Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ..... 1,2
Кинематическая вязкость воды, м^2/с ..... 1E-6
Атмосферное давление, Па ..... 98100
Динамическая вязкость воды, Па·с ..... 0,001
Динамическая вязкость воздуха, Па·с ..... 1,79E-5
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м ..... 0,0723
Показатель политропы ..... 1
Показатель степени в формуле Арманда ..... 1,53
Расход воздуха при нормальных условиях, м^3/мин ..... 0 - 1,6 - 0,2
Давление в смесителе, кг/см^2 ..... 0,2
Высота подъема, м ..... 3,25
Высота переподъема, м ..... 0,25
Диаметр подъемной трубы, м ..... 0,068
Эквивалентная шероховатость трубы, м ..... 0,0002
Ускорение свободного падения, м/с^2 ..... 9,81
Относительная длина жидкой пробки ..... 2
Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 0,71
=====

Qv = 0,000 м^3/мин: нет реш.
-----
H+h

Qv = 0,200 м^3/мин: нет реш.
-----
H+h

Qv = 0,400 м^3/мин: Qe = 0,000585 м^3/сек (2,108 м^3/час)
-----
H+h
Значения z по эквивалент. схеме, м: 0,000 1,429 2,857 5,000 5,714
Давление в сечении z, кг/см^2: 1,200 1,150 1,100 1,025 1,000
Плотность воздуха, кг/м^3: 1,440 1,380 1,320 1,230 1,200
Плотность смеси, кг/м^3: 338,931 333,182 327,333 318,365 315,322
Объемное расходное воздухо содержание: 0,905 0,908 0,912 0,917 0,919
Массовое расходное воздухо содержание: 0,013 0,013 0,013 0,013 0,013
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с: 0,575 0,575 0,575 0,575 0,575
Площадь сечения трубы, м^2: 0,004 0,004 0,004 0,004 0,004
Приведенная скорость смеси, м/с: 1,691 1,757 1,830 1,952 1,997
Приведенная скорость воды, м/с: 0,161 0,161 0,161 0,161 0,161
Приведенная скорость воздуха, м/с: 1,530 1,596 1,669 1,791 1,836
Истинная скорость воды, м/с: 0,477 0,485 0,494 0,508 0,513
Истинная скорость воздуха, м/с: 2,311 2,391 2,478 2,624 2,678
Число Рейнольдса смеси · 10^-3: 67,796 69,268 70,861 73,519 74,486
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м^2·с: 163,409 163,409 163,409 163,409 163,409
Давл., обус. трением · 10^3, кг/см^2: 0,000 2,937 6,057 11,128 12,937
Давл., обус. ускорен. · 10^3, кг/см^2: 0,000 0,015 0,031 0,058 0,067
Давл., об. силой тяж. · 10^3, кг/см^2: 0,000 48,009 95,190 164,376 187,008
Сумма пред. давлений · 10^3, кг/см^2: 0,000 50,962 101,279 175,562 200,011
Геометричес. погружение смесителя, м: 2,000 2,000 2,000 2,000 2,000
Относит. геом. погружение смесителя: 0,350 0,350 0,350 0,350 0,350
Дополнительные параметры:
Касательные напряжения, Па: 3,330 3,531 3,757 4,149 4,297
w'': 0,028 0,028 0,027 0,027 0,027
Истинное газосодержание: 0,662 0,668 0,674 0,682 0,686
w'': 0,282 0,282 0,282 0,282 0,282
Суммарный перепад давления, кг/см^2: 0,000 0,050 0,100 0,175 0,200

```

Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	1,766	1,781	1,806	1,814
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,009	0,017	0,031	0,036
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,001	0,001	0,002	0,002
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,008	0,017	0,029	0,033
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,028	0,057	0,103	0,119
Мощность потока воды, кВт:	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,114	0,090	0,171	0,183
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,011	0,039	0,068	0,115	0,131
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,012	0,031	0,051	0,084	0,095
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	94,811	92,975	90,203	89,274
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	336,065	333,166	328,753	327,264
Ср. плотн. по средн. давлен., кг/м ³ :	96,637	94,812	92,980	90,218	89,294
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,333	0,340	0,348	0,360	0,364

Qv = 0,600 м³/мин: Qe = 0,000913 м³/сек (3,287 м³/час)

	H+h				
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	1,429	2,857	5,000	5,714
Давление в сечении z, кг/см ² :	1,200	1,150	1,100	1,025	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	1,440	1,380	1,320	1,230	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	313,329	308,251	303,097	295,223	292,559
Объемное расходное воздуходоержание:	0,901	0,905	0,909	0,914	0,916
Массовое расходное воздуходоержание:	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,584	0,584	0,584	0,584	0,584
Площадь сечения трубы, м ² :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси, м/с:	2,546	2,646	2,755	2,938	3,005
Приведенная скорость воды, м/с:	0,251	0,251	0,251	0,251	0,251
Приведенная скорость воздуха, м/с:	2,295	2,394	2,503	2,686	2,754
Истинная скорость воды, м/с:	0,805	0,818	0,832	0,854	0,862
Истинная скорость воздуха, м/с:	3,337	3,457	3,587	3,807	3,888
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	92,853	94,928	97,180	100,949	102,325
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	254,742	254,742	254,742	254,742	254,742
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	6,048	12,476	22,939	26,673
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,038	0,078	0,142	0,164
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	44,399	88,068	152,177	173,169
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	50,485	100,622	175,258	200,007
Геометричес. погружение смесителя, м:	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	6,854	7,274	7,745	8,565	8,875
w''':	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Истинное газосодержание:	0,688	0,693	0,698	0,706	0,708
w''':	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,050	0,100	0,175	0,200
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	2,977	3,002	3,041	3,054
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,015	0,029	0,052	0,060
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,002	0,004	0,007	0,008
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,013	0,026	0,045	0,052
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,042	0,085	0,155	0,179
Мощность потока воды, кВт:	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,119	0,094	0,178	0,190
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,018	0,060	0,103	0,173	0,197
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,019	0,045	0,074	0,120	0,137
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	98,170	96,276	93,415	92,456
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	310,796	308,238	304,354	303,046
Ср. плотн. по средн. давлен., кг/м ³ :	100,053	98,171	96,281	93,431	92,477
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,500	0,511	0,522	0,539	0,545

Таблица В4.3 – Результаты численного решения математической модели эрлифта, работающего по нагнетательной схеме ($H+h = 5$ м, $h = 2,0$ м, $\Delta H_n = 0,5$ м, $D = 0,068$ м)

```

=====
Нагнетательный эрлифт (ДонНТУ - ФИММ - ЭМС)
Расчет от 15.09.2019 г. 20:20:05 - вариант А
-----
Режим - текстовый.
=====
Параметры:
=====
Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: ..... Уоллиса Г.
Истинное газосодержание по формулам: ..... Уоллиса Г.
Вид процесса изменения состояния воздуха: ..... изотермический
=====
Исходные данные:
=====
Плотность воды, кг/м^3 ..... 1000
Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ..... 1,2
Кинематическая вязкость воды, м^2/с ..... 1E-6
Атмосферное давление, Па ..... 98100
Динамическая вязкость воды, Па·с ..... 0,001
Динамическая вязкость воздуха, Па·с ..... 1,79E-5
Кэффициент поверхностного натяжения, Н/м ..... 0,0723
Показатель политропы ..... 1
Показатель степени в формуле Арманда ..... 1,53
Расход воздуха при нормальных условиях, м^3/мин ..... 0 - 1,6 - 0,2
Давление в смесителе, кг/см^2 ..... 0,2
Высота подъема, м ..... 3,5
Высота переподъема, м ..... 0,5
Диаметр подъемной трубы, м ..... 0,068
Эквивалентная шероховатость трубы, м ..... 0,0002
Ускорение свободного падения, м/с^2 ..... 9,81
Относительная длина жидкой пробки ..... 2
Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 1,67
=====
Qv = 0,000 м^3/мин: нет реш.
-----
Qv = 0,200 м^3/мин: нет реш.
-----
Qv = 0,400 м^3/мин: Qe = 0,000128 м^3/сек (0,459 м^3/час)
-----
Значения z по эквивалент. схеме, м:
Давление в сечении z, кг/см^2:
Плотность воздуха, кг/м^3:
Плотность смеси, кг/м^3:
Объемное расходное воздухосодержание:
Массовое расходное воздухосодержание:
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:
Площадь сечения трубы, м^2:
Приведенная скорость смеси, м/с:
Приведенная скорость воды, м/с:
Приведенная скорость воздуха, м/с:
Истинная скорость воды, м/с:
Истинная скорость воздуха, м/с:
Число Рейнольдса смеси · 10^-3:
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м^2·с:
Давл., обус. трением · 10^3, кг/см^2:
Давл., обус. ускорен. · 10^3, кг/см^2:
Давл., об. силой тяж. · 10^3, кг/см^2:
Сумма пред. давлений · 10^3, кг/см^2:
Геометричес. погружение смесителя, м:
Относит. геом. погружение смесителя:
Дополнительные параметры:
Касательные напряжения, Па:
w'':
Истинное газосодержание:
w'':
Суммарный перепад давления, кг/см^2:
Средн. расход ВВ смеси · 10^3, м^3/с:
Суммарная мощность, кВт:

```

				H+h	H+h
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	1,667	3,333	5,000	6,667
Давление в сечении z, кг/см^2:	1,200	1,150	1,100	1,050	1,000
Плотность воздуха, кг/м^3:	1,440	1,380	1,320	1,260	1,200
Плотность смеси, кг/м^3:	292,618	288,131	283,588	278,986	274,326
Объемное расходное воздухосодержание:	0,978	0,978	0,979	0,980	0,981
Массовое расходное воздухосодержание:	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,236	0,236	0,236	0,236	0,236
Площадь сечения трубы, м^2:	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси, м/с:	1,565	1,631	1,704	1,783	1,871
Приведенная скорость воды, м/с:	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Приведенная скорость воздуха, м/с:	1,530	1,596	1,669	1,748	1,836
Истинная скорость воды, м/с:	0,120	0,122	0,124	0,126	0,128
Истинная скорость воздуха, м/с:	2,159	2,239	2,326	2,422	2,527
Число Рейнольдса смеси · 10^-3:	131,933	135,431	139,224	143,353	147,867
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м^2·с:	37,337	37,337	37,337	37,337	37,337
Давл., обус. трением · 10^3, кг/см^2:	0,000	2,460	5,095	7,926	10,980
Давл., обус. ускорен. · 10^3, кг/см^2:	0,000	0,002	0,005	0,008	0,011
Давл., об. силой тяж. · 10^3, кг/см^2:	0,000	48,397	96,041	142,923	189,033
Сумма пред. давлений · 10^3, кг/см^2:	0,000	50,859	101,140	150,857	200,024
Геометричес. погружение смесителя, м:	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	2,381	2,545	2,731	2,940	3,178
w'':	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Истинное газосодержание:	0,708	0,713	0,717	0,722	0,727
w'':	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
Суммарный перепад давления, кг/см^2:	0,000	0,050	0,100	0,150	0,200
Средн. расход ВВ смеси · 10^3, м^3/с:	-----	0,467	0,471	0,474	0,478
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,002	0,005	0,007	0,009

Таблица В4.4 – Результаты численного решения математической модели эрлифта,
 работающего по нагнетательной схеме ($H+h = 5$ м, $h = 2,0$ м,
 $\Delta H_H = 0,75$ м, $D = 0,068$ м)

```

=====
Нагнетательный эрлифт (ДонНТУ - ФИММ - ЭМС)

Расчет от 15.09.2019 г. 21:04:12 - вариант А
-----
Режим - текстовый.
=====
Параметры:
=====
Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: ..... Уоллиса Г.
Истинное газосодержание по формулам: ..... Уоллиса Г.
Вид процесса изменения состояния воздуха: ..... изотермический
=====
Исходные данные:
=====
Плотность воды, кг/м^3 ..... 1000
Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ..... 1,2
Кинематическая вязкость воды, м^2/с ..... 1E-6
Атмосферное давление, Па ..... 98100
Динамическая вязкость воды, Па·с ..... 0,001
Динамическая вязкость воздуха, Па·с ..... 1,79E-5
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м ..... 0,0723
Показатель политропы ..... 1
Показатель степени в формуле Арманда ..... 1,53
Расход воздуха при нормальных условиях, м^3/мин ..... 0 - 1,6 - 0,2
Давление в смесителе, кг/см^2 ..... 0,2
Высота подъема, м ..... 3,75
Высота переподъема, м ..... 0,75
Диаметр подъемной трубы, м ..... 0,068
Эквивалентная шероховатость трубы, м ..... 0,0002
Ускорение свободного падения, м/с^2 ..... 9,81
Относительная длина жидкой пробки ..... 2
Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 2,00
=====

Qv = 0,000 м^3/мин: нет реш.
-----
H+h

Qv = 0,200 м^3/мин: Qe = 0,000078 м^3/сек (0,280 м^3/час)
-----
H+h
Значения z по эквивалент. схеме, м: 0,000 2,000 4,000 6,000 8,000
Давление в сечении z, кг/см^2: 1,300 1,225 1,150 1,075 1,000
Плотность воздуха, кг/м^3: 1,560 1,470 1,380 1,290 1,200
Плотность смеси, кг/м^3: 389,385 379,815 369,940 359,748 349,221
Объемное расходное воздухо содержание: 0,971 0,972 0,974 0,976 0,977
Массовое расходное воздухо содержание: 0,049 0,049 0,049 0,049 0,049
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с: 0,271 0,271 0,271 0,271 0,271
Площадь сечения трубы, м^2: 0,004 0,004 0,004 0,004 0,004
Приведенная скорость воды, м/с: 0,727 0,771 0,820 0,875 0,939
Приведенная скорость смеси, м/с: 0,021 0,021 0,021 0,021 0,021
Приведенная скорость воздуха, м/с: 0,706 0,749 0,798 0,854 0,918
Истинная скорость воды, м/с: 0,055 0,056 0,058 0,060 0,061
Истинная скорость воздуха, м/с: 1,154 1,206 1,265 1,332 1,409
Число Рейнольдса смеси · 10^-3: 71,018 73,389 76,013 78,941 82,238
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м^2·с: 22,489 22,489 22,489 22,489 22,489
Давл., обус. трением · 10^3, кг/см^2: 0,000 0,885 1,855 2,925 4,114
Давл., обус. ускорен. · 10^3, кг/см^2: 0,000 0,001 0,002 0,003 0,004
Давл., об. силой тяж. · 10^3, кг/см^2: 0,000 76,925 151,906 224,880 295,782
Сумма пред. давлений · 10^3, кг/см^2: 0,000 77,811 153,763 227,808 299,901
Геометричес. погружение смесителя, м: 3,000 3,000 3,000 3,000 3,000
Относит. геом. погружение смесителя: 0,375 0,375 0,375 0,375 0,375
Дополнительные параметры:
Касательные напряжения, Па: 0,706 0,772 0,848 0,939 1,047
w'': 0,027 0,027 0,027 0,027 0,027
Истинное газосодержание: 0,612 0,621 0,631 0,641 0,652
w'': 0,282 0,282 0,282 0,282 0,282
Суммарный перепад давления, кг/см^2: 0,000 0,075 0,150 0,225 0,300
Средн. расход ВВ смеси · 10^3, м^3/с: ----- 0,212 0,215 0,218 0,221
Суммарная мощность, кВт: ----- 0,002 0,003 0,005 0,007
Мощность комп. потерь на трение, кВт: ----- 0,000 0,000 0,000 0,000 0,000

```

Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,002	0,003	0,005	0,006
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,019	0,040	0,062	0,086
Мощность потока воды, кВт:	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,035	0,023	0,041	0,048
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,002	0,022	0,042	0,064	0,088
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,003	0,020	0,039	0,060	0,082
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	30,049	29,180	28,310	27,437
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	384,624	379,764	374,800	369,728
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	30,916	30,049	29,181	28,312	27,441
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,154	0,158	0,163	0,168	0,174

Qv = 0,400 м³/мин: Qe = 0,000784 м³/сек (2,823 м³/час)

	H+h				
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	2,000	4,000	6,000	8,000
Давление в сечении z, кг/см ² :	1,300	1,225	1,150	1,075	1,000
Плотность воздуха, кг/м ³ :	1,560	1,470	1,380	1,290	1,200
Плотность смеси, кг/м ³ :	369,232	360,251	351,011	341,502	331,711
Объемное расходное воздухо содержание:	0,867	0,874	0,881	0,888	0,895
Массовое расходное воздухо содержание:	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643
Площадь сечения трубы, м ² :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси, м/с:	1,628	1,714	1,812	1,924	2,052
Приведенная скорость воды, м/с:	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216
Приведенная скорость воздуха, м/с:	1,412	1,499	1,596	1,708	1,836
Истинная скорость воды, м/с:	0,586	0,601	0,617	0,634	0,653
Истинная скорость воздуха, м/с:	2,235	2,339	2,456	2,590	2,744
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	63,523	65,269	67,221	69,419	71,918
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	218,136	218,136	218,136	218,136	218,136
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	4,209	8,768	13,739	19,199
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,034	0,072	0,113	0,157
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	72,953	144,083	213,339	280,665
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	77,196	152,923	227,191	300,021
Геометричес. погружение смесителя, м:	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Относит. геом. погружение смесителя:	0,375	0,375	0,375	0,375	0,375
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения, Па:	3,377	3,648	3,964	4,337	4,782
w''':	0,028	0,028	0,028	0,028	0,027
Истинное газосодержание:	0,632	0,641	0,650	0,659	0,669
w''':	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,075	0,150	0,225	0,300
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	2,172	2,200	2,229	2,260
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,016	0,032	0,049	0,067
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,001	0,002	0,003	0,004
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,016	0,031	0,047	0,062
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,039	0,080	0,124	0,172
Мощность потока воды, кВт:	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,194	0,100	0,190	0,228
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,023	0,062	0,103	0,147	0,195
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,024	0,046	0,071	0,098	0,128
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	130,620	127,215	123,775	120,300
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	364,763	360,208	355,565	350,831
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	133,989	130,624	127,233	123,815	120,371
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,308	0,317	0,327	0,337	0,348

Таблица В4.5 – Результаты численного решения математической модели эрлифта, работающего по нагнетательной схеме ($H+h = 5$ м, $h = 2,0$ м, $\Delta H_n = 1,0$ м, $D = 0,068$ м)

```

=====
Нагнетательный эрлифт (ДонНТУ - ФИММ - ЭМС)

Расчет от 15.09.2019 г. 21:13:32 – вариант А
=====
Режим - текстовый.
=====
Параметры:
=====
Касатель. напряжения и коэф-ты сопротивления по формулам: ..... Уоллиса Г.
Истинное газосодержание по формулам: ..... Уоллиса Г.
Вид процесса изменения состояния воздуха: ..... изотермический
=====
Исходные данные:
=====
Плотность воды, кг/м^3 ..... 1000
Плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ..... 1,2
Кинематическая вязкость воды, м^2/с ..... 1E-6
Атмосферное давление, Па ..... 98100
Динамическая вязкость воды, Па·с ..... 0,001
Динамическая вязкость воздуха, Па·с ..... 1,79E-5
Коэффициент поверхности шероховатого натяжения, Н/м ..... 0,0723
Показатель политропы ..... 1
Показатель степени в формуле Арманда ..... 1,53
Расход воздуха при нормальных условиях, м^3/мин ..... 0 - 1,6 - 0,2
Давление в смесителе, кг/см^2 ..... 0,2
Высота подъема, м ..... 4
Высота переподъема, м ..... 1
Диаметр подъемной трубы, м ..... 0,068
Эквивалентная шероховатость трубы, м ..... 0,0002
Ускорение свободного падения, м/с^2 ..... 9,81
Относительная длина жидкой пробки ..... 2
Высота переподъема экв. нагнетат. эрлифта (вычисленная), м 3,00
=====

Qv = 0,000 м^3/мин: нет реш.
-----
H+h

Qv = 0,200 м^3/мин: нет реш.
-----
H+h

Qv = 0,400 м^3/мин: Qe = 0,000389 м^3/сек (1,400 м^3/час)
-----
H+h
Значения z по эквивалент. схеме, м:          0,000      2,250      4,500      6,000      9,000
Давление в сечении z, кг/см^2:              1,300      1,225      1,150      1,100      1,000
Плотность воздуха, кг/м^3:                  1,560      1,470      1,380      1,320      1,200
Плотность смеси, кг/м^3:                    330,070    322,398    314,548    309,213    298,293
Объемное расходное воздухо содержание:      0,930      0,933      0,937      0,940      0,945
Массовое расходное воздухо содержание:      0,020      0,020      0,020      0,020      0,020
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:       0,475      0,475      0,475      0,475      0,475
Площадь сечения трубы, м^2:                 0,004      0,004      0,004      0,004      0,004
Приведенная скорость смеси, м/с:           1,519      1,606      1,703      1,776      1,943
Приведенная скорость воды, м/с:            0,107      0,107      0,107      0,107      0,107
Приведенная скорость воздуха, м/с:         1,412      1,499      1,596      1,669      1,836
Истинная скорость воды, м/с:                0,325      0,333      0,341      0,347      0,360
Истинная скорость воздуха, м/с:             2,105      2,208      2,326      2,413      2,613
Число Рейнольдса смеси · 10^-3:             71,816     74,138     76,736     78,648     83,000
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м^2·с:        109,252    109,252    109,252    109,252    109,252
Давл., обус. трением · 10^3, кг/см^2:       0,000      3,670      7,679      10,570     16,976
Давл., обус. ускорен. · 10^3, кг/см^2:      0,000      0,011      0,022      0,031      0,049
Давл., об. силой тяж. · 10^3, кг/см^2:      0,000      73,406     145,066     191,849     282,983
Сумма пред. давлений · 10^3, кг/см^2:      0,000      77,087     152,767     202,450     300,009
Геометричес. погружение смесителя, м:      3,000      3,000      3,000      3,000      3,000
Относит. геом. погружение смесителя:        0,333      0,333      0,333      0,333      0,333
Дополнительные параметры:
Касательные напряжения, Па:                 2,607      2,839      3,112      3,321      3,823
w'':                                          0,027      0,027      0,027      0,027      0,027
Истинное газосодержание:                     0,671      0,679      0,686      0,692      0,703
w'':                                          0,282      0,282      0,282      0,282      0,282
Суммарный перепад давления, кг/см^2:        0,000      0,075      0,150      0,200      0,300
Средн. расход ВВ смеси · 10^3, м^3/с:       -----    1,216      1,231      1,241      1,263
Суммарная мощность, кВт:                   -----    0,009      0,018      0,024      0,037

```

Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,000	0,001	0,001	0,002
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,009	0,018	0,023	0,035
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,039	0,080	0,109	0,172
Мощность потока воды, кВт:	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,069	0,076	0,109	0,138
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,011	0,050	0,092	0,121	0,183
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,012	0,041	0,074	0,096	0,146
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	69,984	68,040	66,738	64,120
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	326,249	322,368	319,748	314,426
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	71,918	69,986	68,045	66,748	64,141
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,308	0,317	0,327	0,333	0,348

Qv = 0,600 м³/мин: Qe = 0,000692 м³/сек (2,492 м³/час)

						H+h
Значения z по эквивалент. схеме, м:	0,000	2,250	4,500	6,000	9,000	
Давление в сечении z, кг/см ² :	1,300	1,225	1,150	1,100	1,000	
Плотность воздуха, кг/м ³ :	1,560	1,470	1,380	1,320	1,200	
Плотность смеси, кг/м ³ :	307,073	300,264	293,321	288,615	279,015	
Объемное расходное воздухо содержание:	0,917	0,922	0,926	0,929	0,935	
Массовое расходное воздухо содержание:	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	
Динамич. вязкость смеси · 1000, Па·с:	0,517	0,517	0,517	0,517	0,517	
Площадь сечения трубы, м ² :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	
Приведенная скорость смеси, м/с:	2,309	2,438	2,585	2,694	2,944	
Приведенная скорость воды, м/с:	0,191	0,191	0,191	0,191	0,191	
Приведенная скорость воздуха, м/с:	2,118	2,248	2,394	2,503	2,754	
Истинная скорость воды, м/с:	0,623	0,637	0,652	0,662	0,685	
Истинная скорость воздуха, м/с:	3,052	3,208	3,384	3,514	3,815	
Число Рейнольдса смеси · 10 ⁻³ :	93,284	96,339	99,769	102,302	108,089	
Привед. масс. ск-ть смеси, кг/м ² ·с:	193,886	193,886	193,886	193,886	193,886	
Давл., обус. трением · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	7,770	16,260	22,383	35,957	
Давл., обус. ускорен. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	0,033	0,068	0,093	0,147	
Давл., об. силой тяж. · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	68,328	135,109	178,755	263,906	
Сумма пред. давлений · 10 ³ , кг/см ² :	0,000	76,131	151,436	201,230	300,010	
Геометричес. погружение смесителя, м:	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	
Относит. геом. погружение смесителя:	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	
Дополнительные параметры:						
Касательные напряжения, Па:	5,520	6,012	6,590	7,034	8,103	
w''':	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	
Истинное газосодержание:	0,694	0,701	0,708	0,712	0,722	
w''':	0,282	0,282	0,282	0,282	0,282	
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,075	0,150	0,200	0,300	
Средн. расход ВВ смеси · 10 ³ , м ³ /с:	-----	2,319	2,346	2,364	2,403	
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,017	0,035	0,046	0,071	
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,002	0,004	0,005	0,008	
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000	
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,016	0,031	0,041	0,062	
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	0,058	0,120	0,164	0,257	
Мощность потока воды, кВт:	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	
КПД нагнетатель. эрлифта по мощностям:	-----	-0,083	0,089	0,129	0,163	
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,020	0,079	0,141	0,184	0,278	
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,021	0,062	0,106	0,138	0,207	
Ср. плотн. по расх. в-содерж., кг/м ³ :	-----	81,751	79,507	78,003	74,976	
Ср. плотн. по ист. в-содерж., кг/м ³ :	-----	303,679	300,242	297,924	293,228	
Ср. плотн. по средн. давлен.:, кг/м ³ :	83,981	81,753	79,515	78,016	75,005	
Объемный расход воздуха, м ³ /мин:	0,462	0,475	0,490	0,500	0,522	

ПРИЛОЖЕНИЕ В5 – Расходные характеристики лабораторного эрлифта традиционной конструкции, полученные численным методом

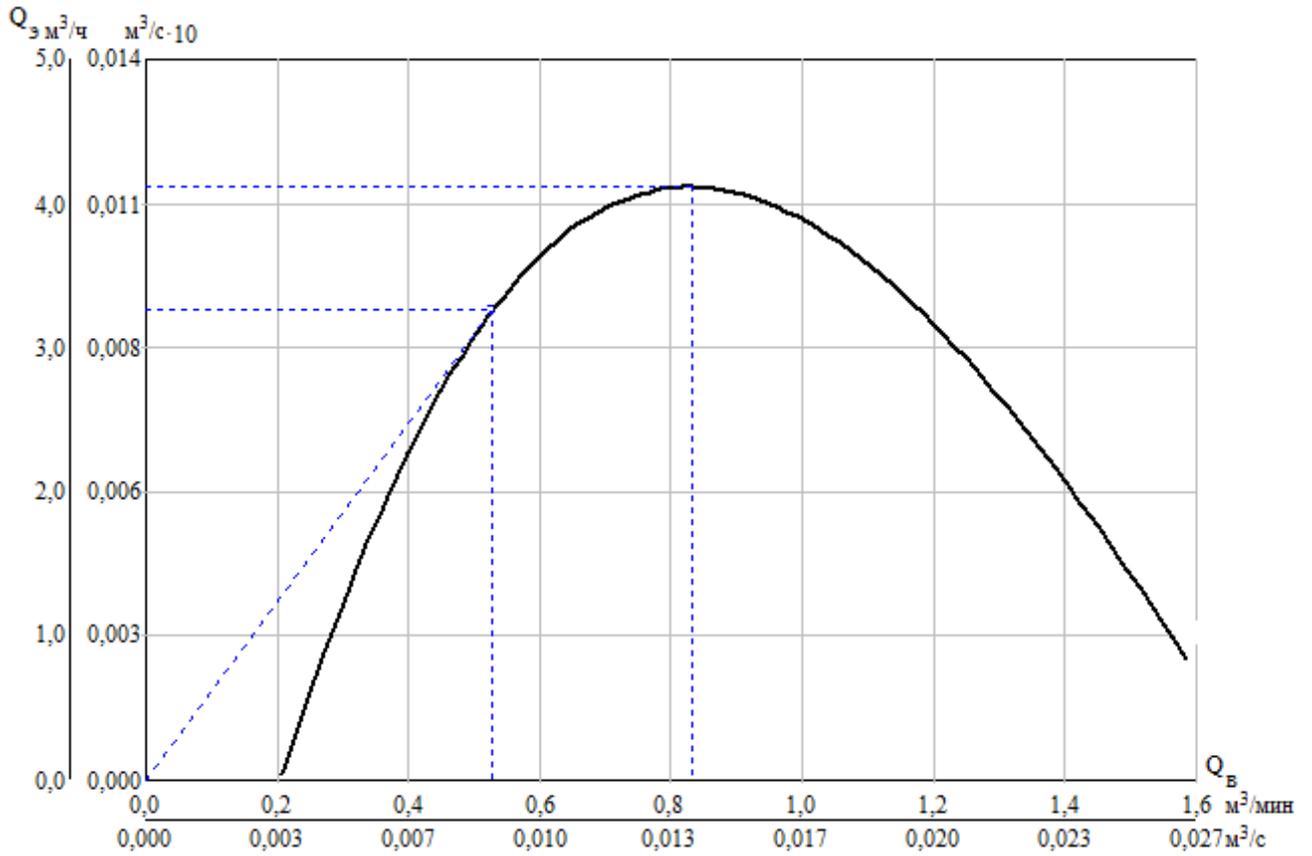


Рисунок В5.1 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта традиционной конструкции с $H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $\alpha = 0,4$, $D = 0,068$ м ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,53$ $\text{м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 3,26$ $\text{м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,83$ $\text{м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 4,11$ $\text{м}^3/\text{ч}$.)

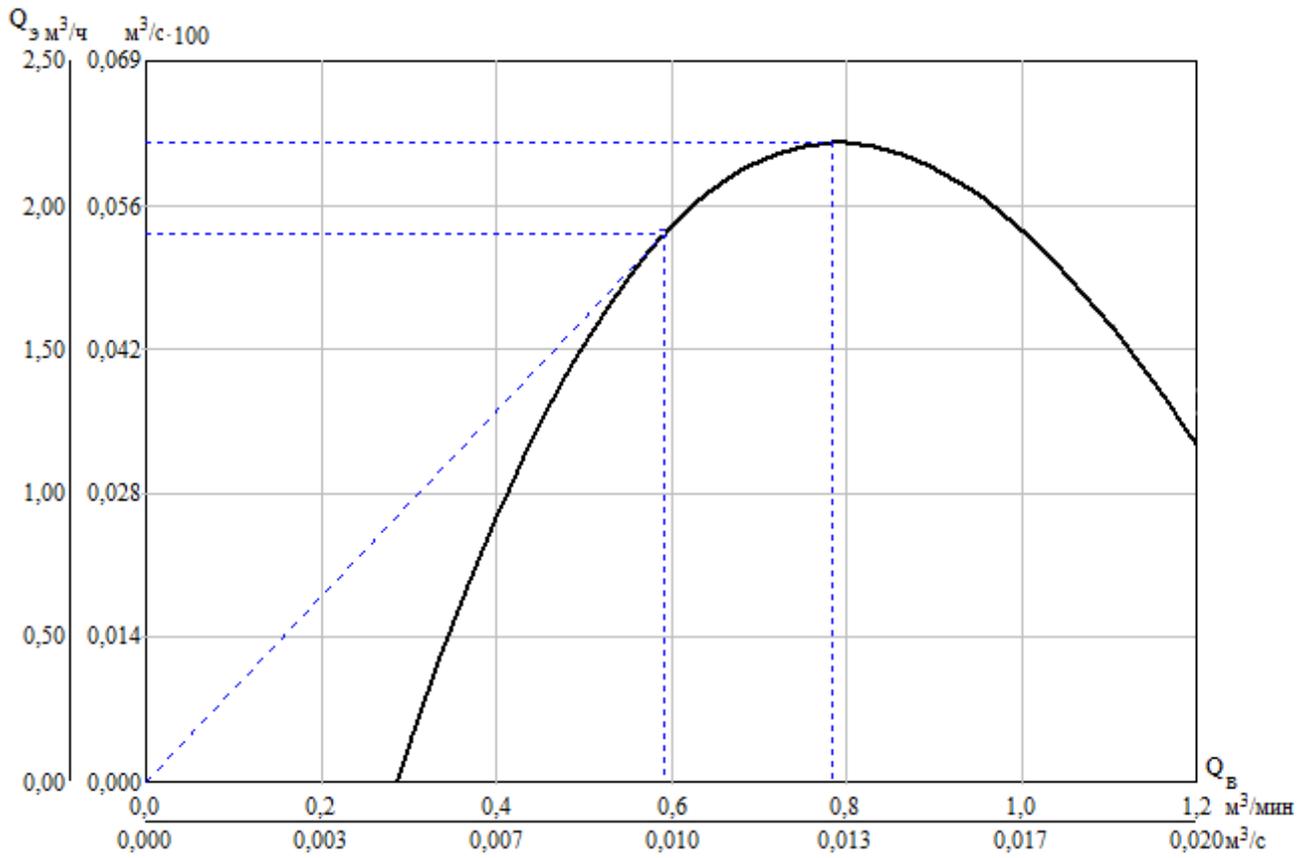


Рисунок В5.2 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта традиционной конструкции с $H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $\alpha = 0,35$, $D = 0,068$ м ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,59$ $\text{м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 1,90$ $\text{м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,78$ $\text{м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 2,22$ $\text{м}^3/\text{ч}$.)

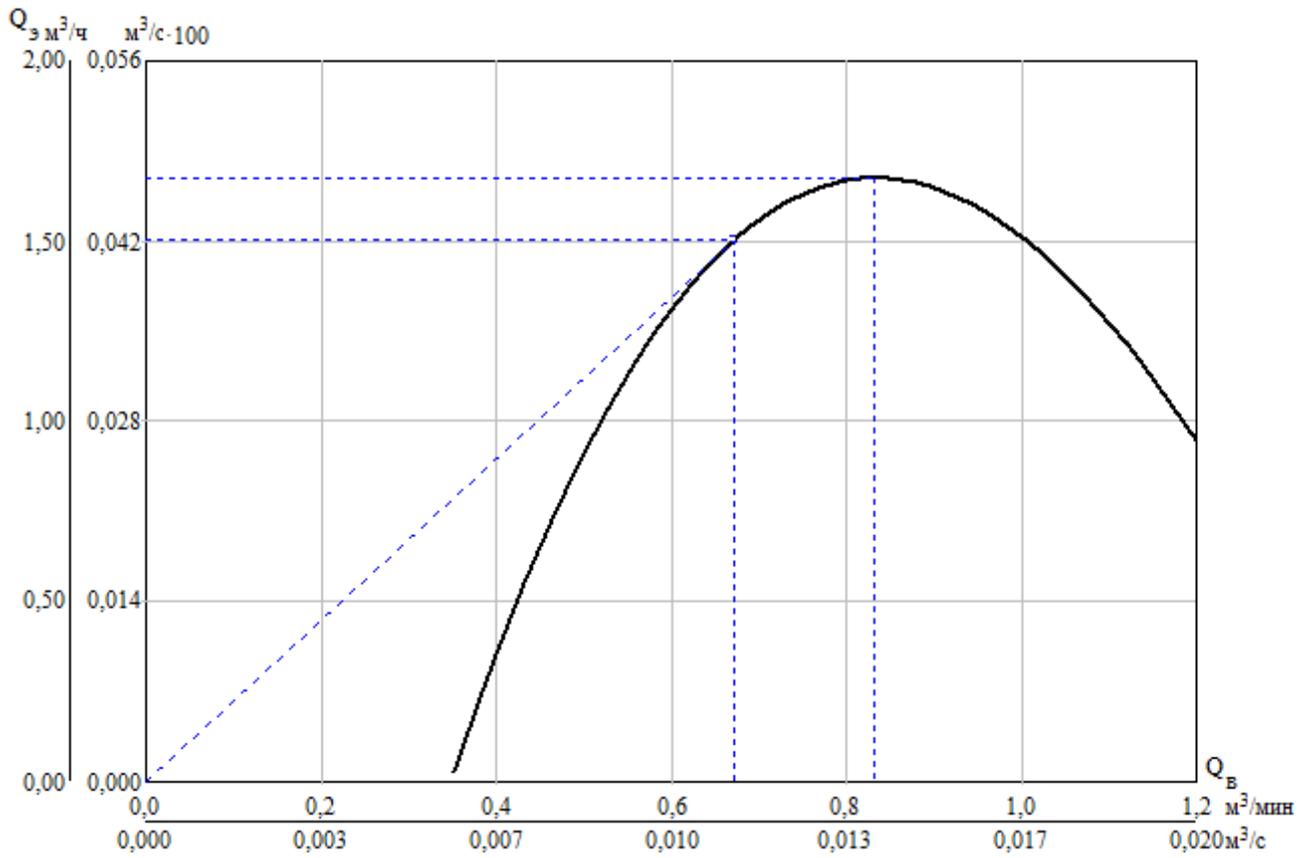


Рисунок В5.3 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта традиционной конструкции с $H+h = 5 \text{ м}$, $h = 2 \text{ м}$, $\alpha = 0,30$, $D = 0,068 \text{ м}$ ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,67 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 1,50 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,83 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 1,68 \text{ м}^3/\text{ч}$.)

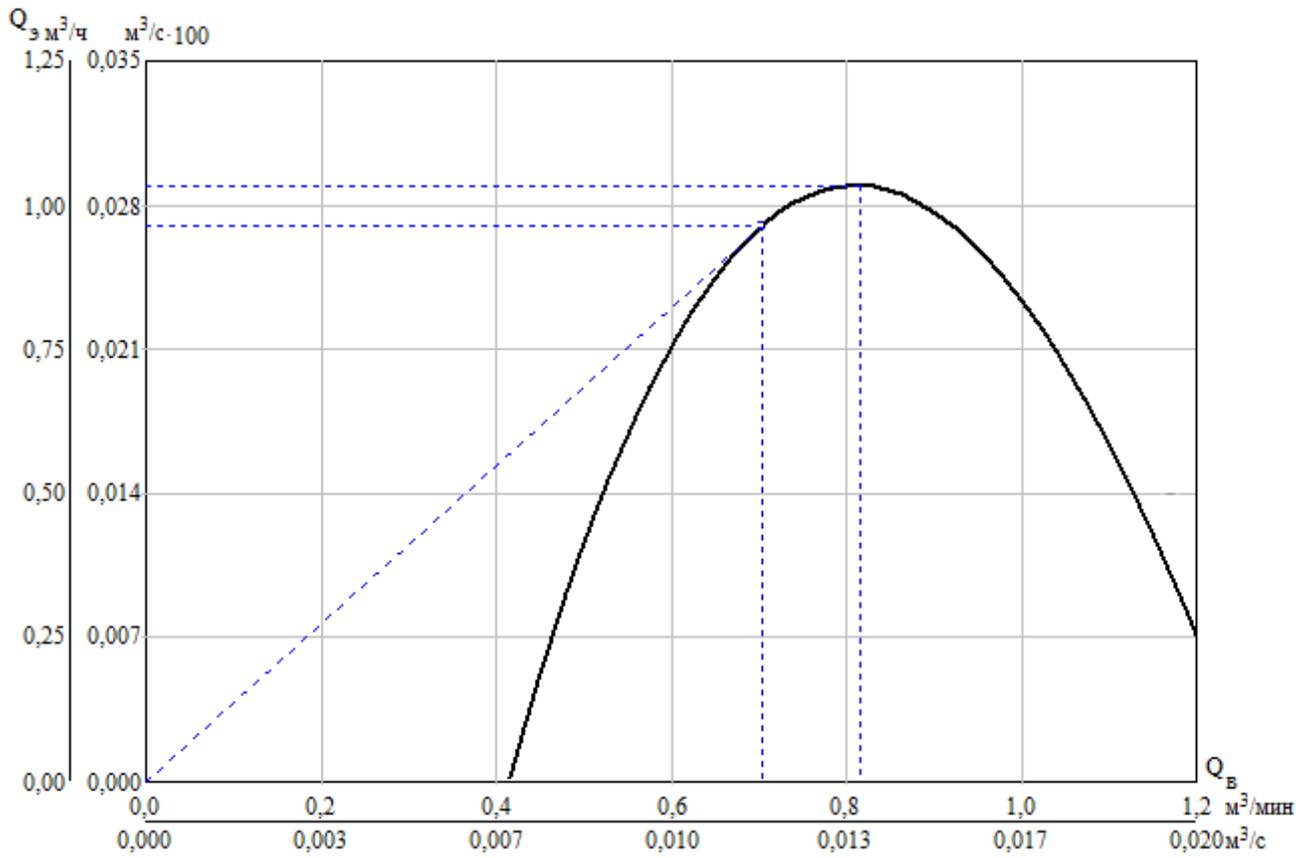


Рисунок В5.4 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта традиционной конструкции с $H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $\alpha = 0,25$, $D = 0,068$ м ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,70$ м³/мин, $Q_{\text{э. опт.}} = 0,96$ м³/ч, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,82$ м³/мин, $Q_{\text{э. макс.}} = 1,03$ м³/ч.)

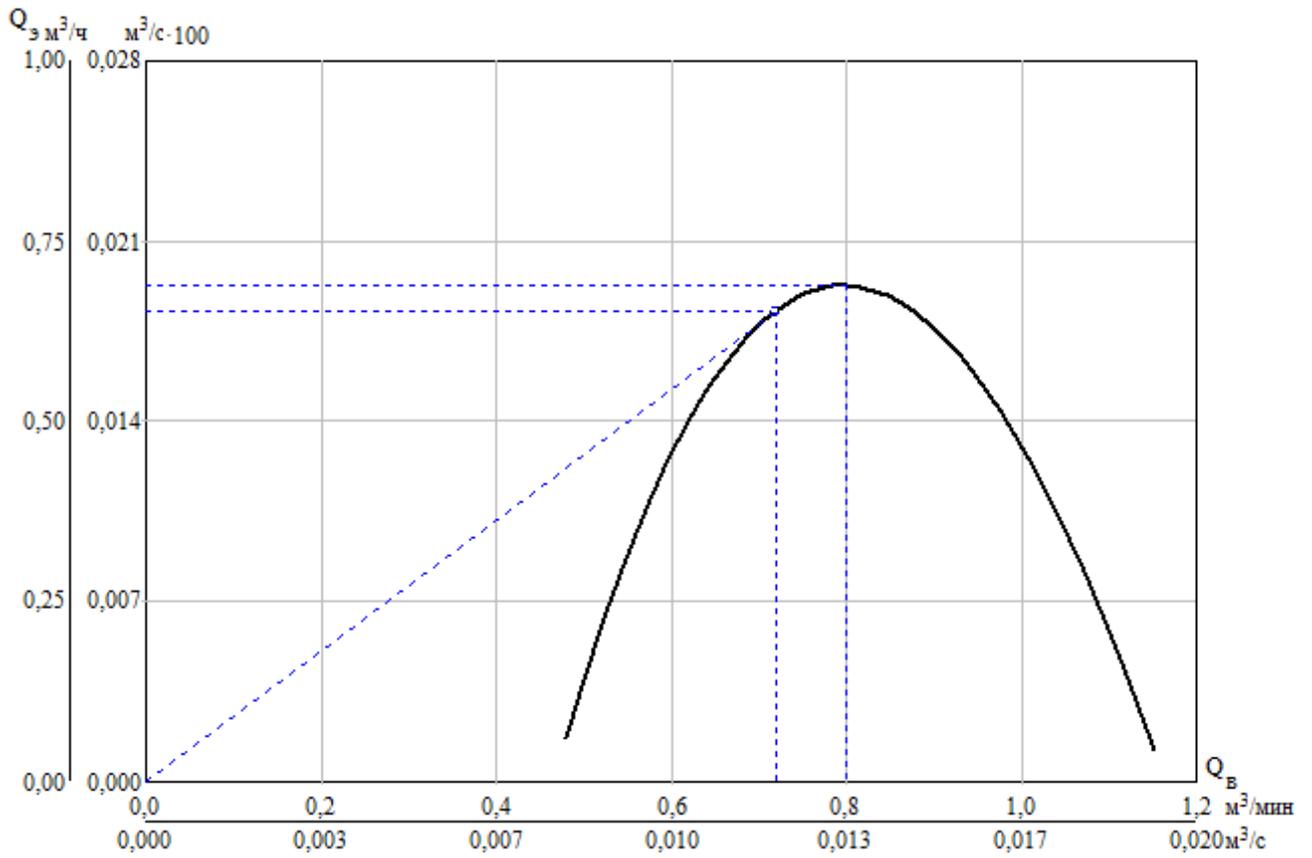


Рисунок В5.5 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта традиционной конструкции с $H+h = 5 \text{ м}$, $h = 2 \text{ м}$, $\alpha = 0,20$, $D = 0,068 \text{ м}$ ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,72 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 0,65 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,80 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 0,69 \text{ м}^3/\text{ч}$.)

Приложение В6 – Расходные характеристики лабораторного нагнетательного эрлифта, полученные численным методом

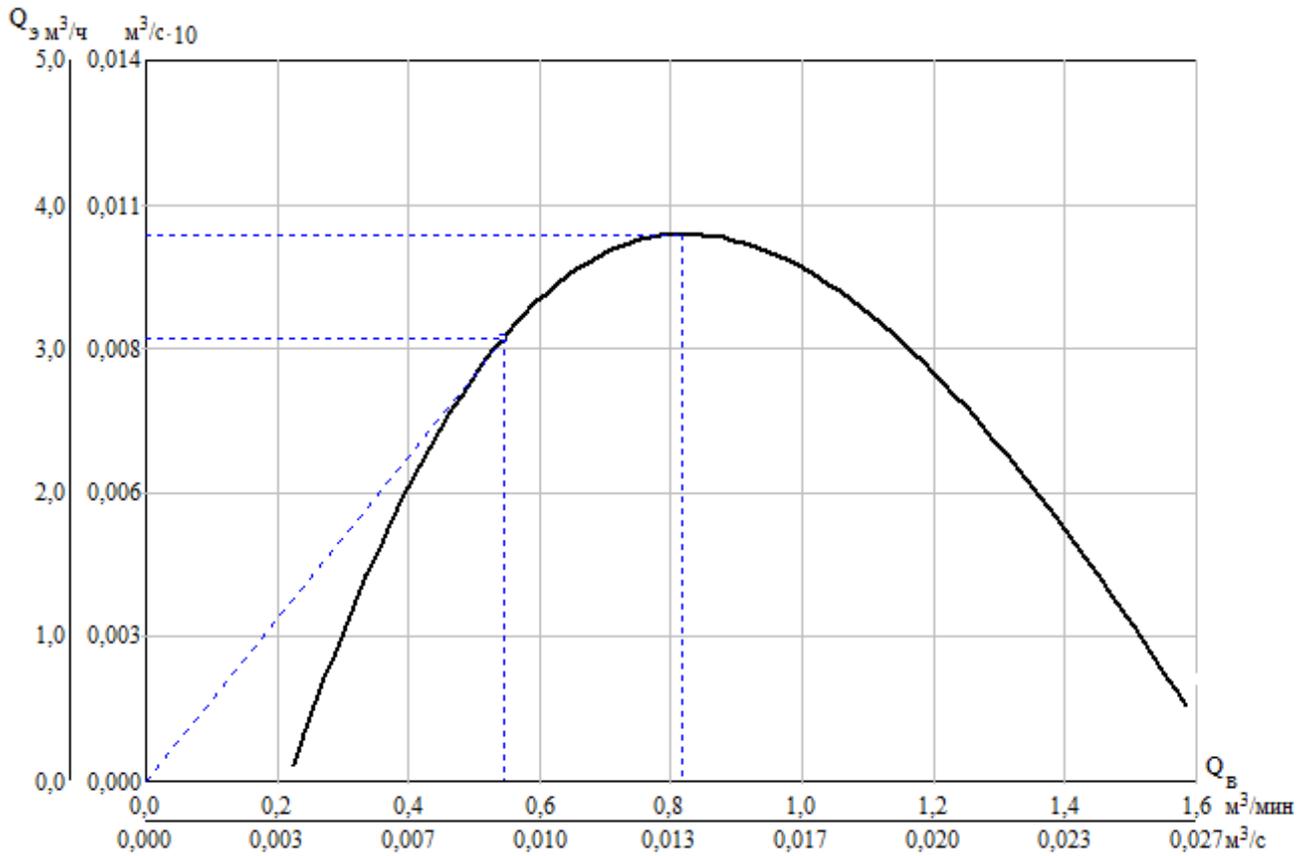


Рисунок В6.1 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта в нагнетательном режиме с $H_{\text{н}} + h_{\text{н}} = 5,25 \text{ м}$, $\Delta H_{\text{н}} = 0,25 \text{ м}$, $h_{\text{н}} = 2 \text{ м}$, $\alpha_{\text{эН}} = 0,35$, $D = 0,068 \text{ м}$ ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,54 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 3,08 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,82 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 3,79 \text{ м}^3/\text{ч}$.)

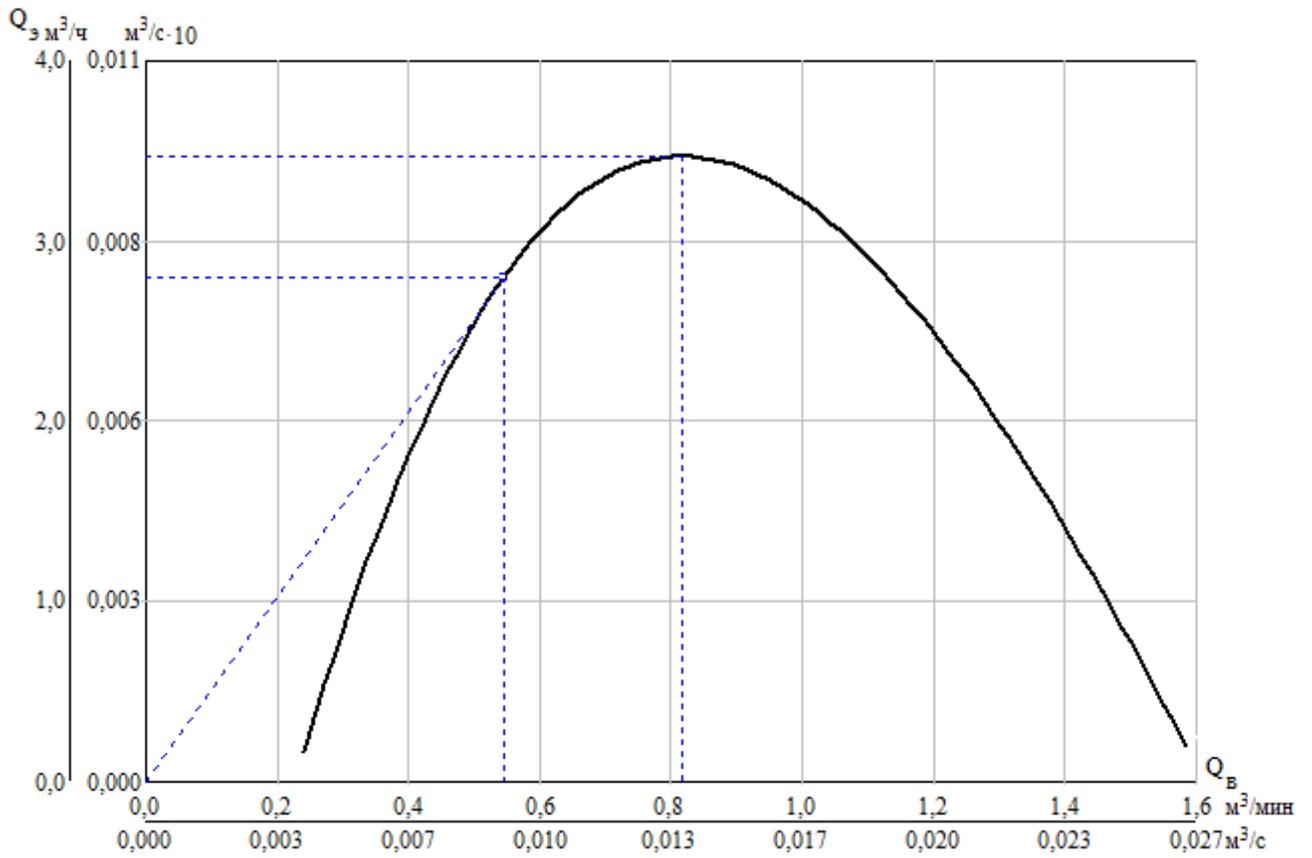


Рисунок В6.2 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта в нагнетательном режиме с $H_{\text{н}} + h_{\text{н}} = 5,5 \text{ м}$, $\Delta H_{\text{н}} = 0,50 \text{ м}$, $h_{\text{н}} = 2 \text{ м}$, $\alpha_{\text{эН}} = 0,3$, $D = 0,068 \text{ м}$ ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,54 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 2,80 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,82 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 3,47 \text{ м}^3/\text{ч}$.)

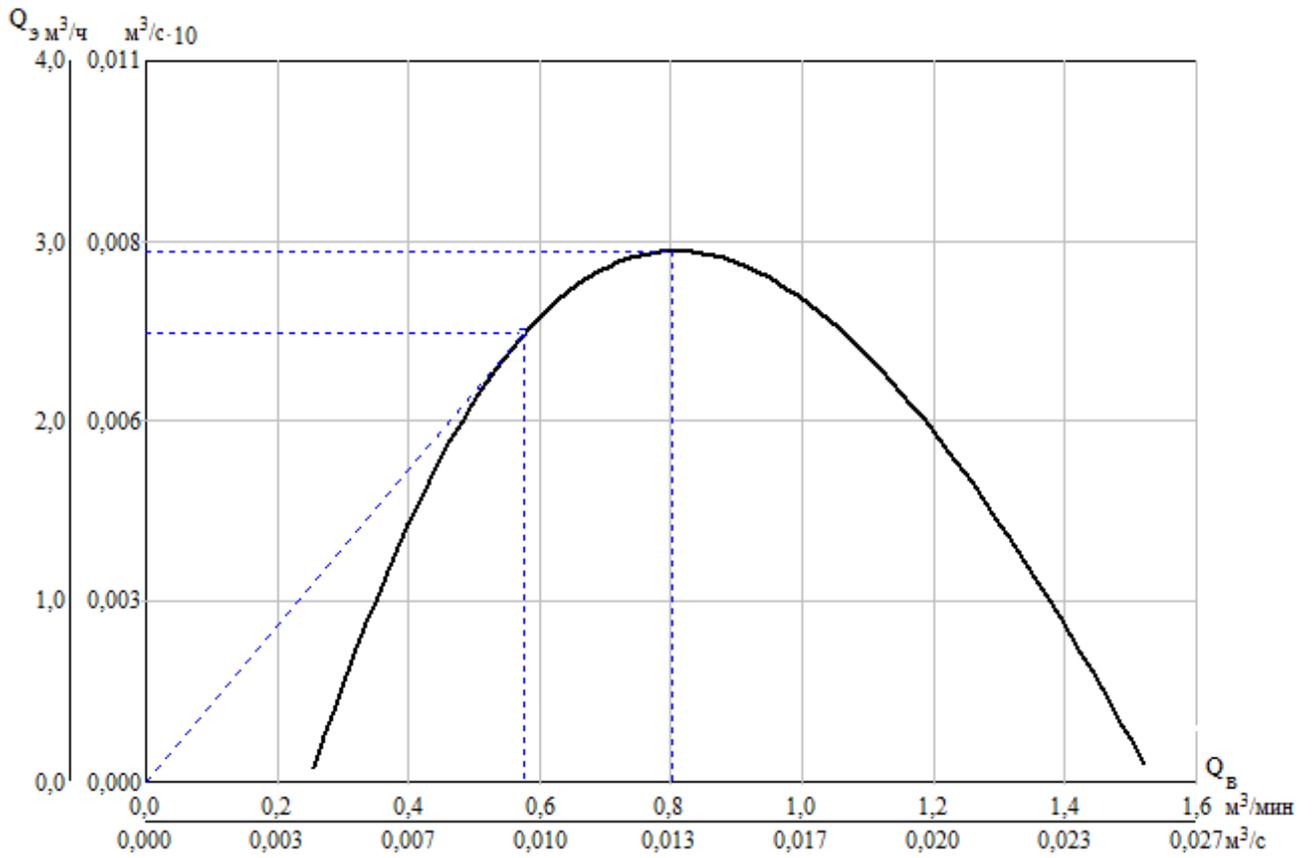


Рисунок В6.3 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта в нагнетательном режиме с $H_{\text{н}} + h_{\text{н}} = 5,75 \text{ м}$, $\Delta H_{\text{н}} = 0,75 \text{ м}$, $h_{\text{н}} = 2 \text{ м}$, $\alpha_{\text{эН}} = 0,25$, $D = 0,068 \text{ м}$ ($Q_{\text{в. опт.}} = 0,58 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. опт.}} = 2,49 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_{\text{в. макс.}} = 0,80 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_{\text{э. макс.}} = 2,94 \text{ м}^3/\text{ч}$.)

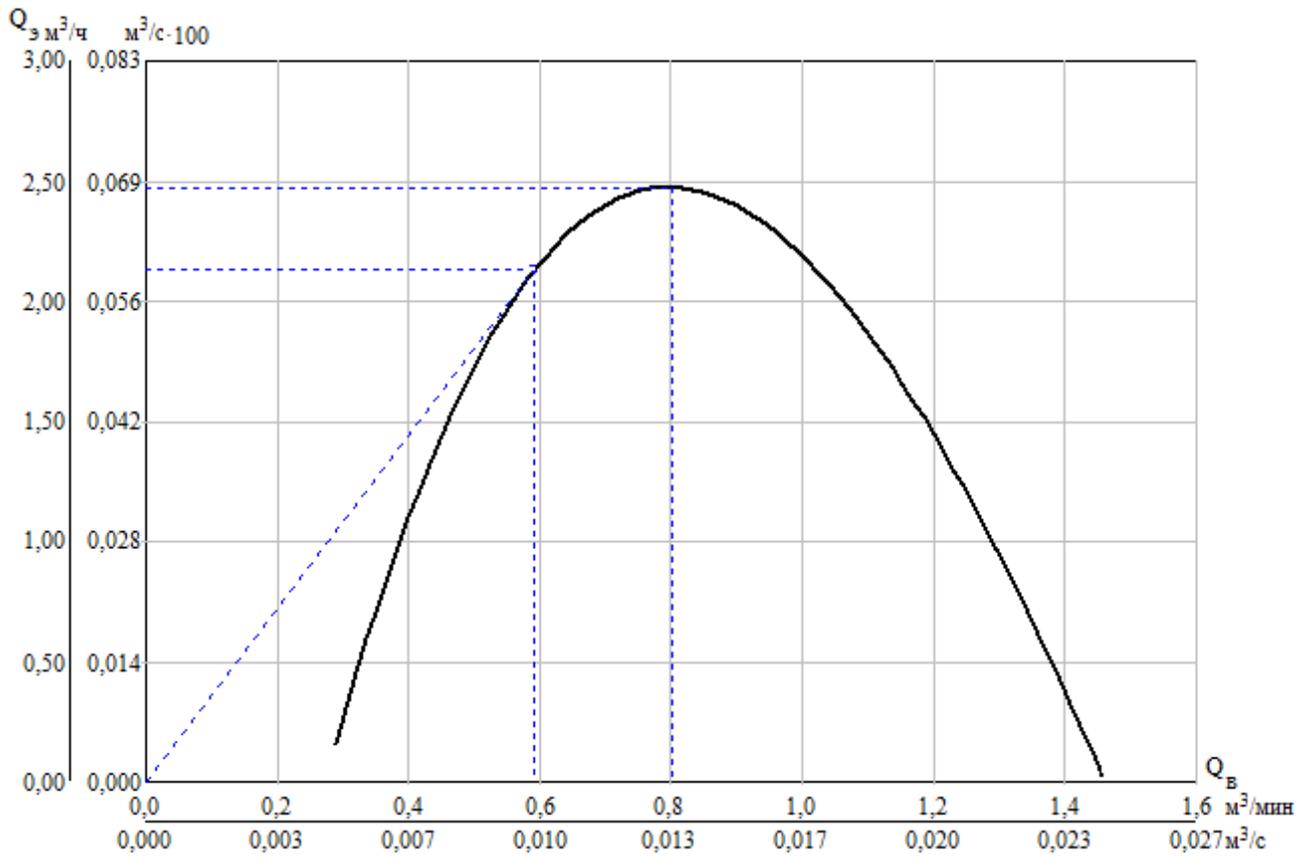


Рисунок В6.4 – Расходная характеристика лабораторного эрлифта в нагнетательном режиме с $H_{н} + h_{н} = 6,0$ м, $\Delta H_{н} = 1,0$ м, $h_{н} = 2$ м, $\alpha_{эН} = 0,25$, $D = 0,068$ м ($Q_{в. опт.} = 0,59$ м³/мин, $Q_{э. опт.} = 2,13$ м³/ч, $Q_{в. макс.} = 0,80$ м³/мин, $Q_{э. макс.} = 2,48$ м³/ч.)

ПРИЛОЖЕНИЕ В7 – Обработка экспериментальных данных работы лабораторного эрлифта, работающего в традиционном и нагнетательном режимах

Таблица В7.1 – Расчетные и экспериментальные значения подачи эрлифта в традиционном режиме работы и отклонения расчетных значений от экспериментальных ($h = 2$ м, $H = 3$ м, $D = 0,068$ м, $\alpha = 0,30; 0,35; 0,4$)

	Относительное погружение $\alpha = 0,30$		Относительное погружение $\alpha = 0,35$		Относительное погружение $\alpha = 0,40$	
	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,67$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,83$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,59$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,80$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,53$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,78$ м ³ /мин
Расчетное значение подачи $Q_э$, м ³ /ч	1,45	1,68	1,95	2,22	3,24	4,25
Экспериментальное значение подачи $Q_э$, м ³ /ч	1,26	1,44	1,75	1,95	2,87	3,75
Отклонение расчетных значений от экспериментальных $\Delta Q_э$, %	15,1	16,7	11,4	13,8	12,9	13,3

Таблица В7.2 – Расчетные и экспериментальные значения подачи нагнетательного эрлифта и отклонения расчетных значений от экспериментальных ($h_n = 2$ м, $H = 3$ м, $D = 0,068$ м, $\Delta H_n = 0,25 \div 1,0$ м, $p_{cm} = 0,2$ кгс/см²)

	Высота перепада $\Delta H_n = 0,25$ м		Высота перепада $\Delta H_n = 0,50$ м		Высота перепада $\Delta H_n = 0,75$ м		Высота перепада $\Delta H_n = 1,0$ м	
	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,44$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,70$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,54$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,82$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,58$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,80$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в оптимальном режиме работы $Q_{в. опт.} = 0,59$ м ³ /мин	Расход сжатого воздуха в максимальном режиме работы $Q_{в. макс.} = 0,80$ м ³ /мин
Подача эрлифта согласно расчету $Q_э$, м ³ /ч	2,85	3,79	2,80	3,47	2,49	2,94	2,13	2,48
Подачи эрлифта согласно экспериментальным данным $Q_э$, м ³ /ч	2,62	3,27	2,56	3,01	2,25	2,43	1,92	2,15
Отклонение расчетных данных подачи от экспериментальных $\Delta Q_э$, %	8,80	15,9	9,40	15,3	10,7	21,0	10,9	15,3

Таблица В7.3 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего по традиционной схеме с $h_n = 2$ м, $H = 3$ м, $D = 0,068$ м, $\alpha = 0,15$

Расход сжатого воздуха $Q_{в,}$ м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э,}$ м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
1,5	0,05; 0,07;0,11; 0,12; 0,08	0,086	0,028	0,0008	0,039 ÷ 0,133
2,0	0,06; 0,12; 0,15; 0,05; 0,11	0,098	0,042	0,0018	0,028 ÷ 0,168
2,5	0,07; 0,09; 0,16; 0,10; 0,13	0,110	0,035	0,0013	0,051 ÷ 0,169
3,0	0,21; 0,18; 0,16; 0,23; 0,19	0,194	0,027	0,0007	0,149 ÷ 0,239
3,5	0,25; 0,35; 0,17; 0,21; 0,23	0,242	0,067	0,0045	0,130 ÷ 0,354

Расчетный критерий Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{макс}^2}{S_{мин}^2},$$

$$F_{расч} = \frac{0,0045}{0,0007} = 6,19.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{макс} = n_{макс} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{мин} = n_{мин} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{табл} = 6,39$.

Из условия $F_{табл} > F_{расч}$, которое выполняется ($6,39 > 6,19$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,0008 \cdot 4 + 0,0018 \cdot 4 + 0,0013 \cdot 4 + 0,0007 \cdot 4 + 0,0045 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,00181 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,75 %

$$Q_3 = -1,42 + 2,21Q_B - 1,22Q_B^2 + 0,307Q_B^3 - 0,0284Q_B^4.$$

Таблица В7.4 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего по традиционной схеме при значении относительного погружения $\alpha = 0,20$

Расход сжатого воздуха Q_B , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_3 , м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{\text{мин}} \div x_{\text{макс}}$, м ³ /ч
1,5	0,13; 0,25; 0,12; 0,17; 0,16	0,166	0,051	0,0026	0,080 ÷ 0,252
2,0	0,35; 0,27; 0,12; 0,17; 0,16	0,346	0,053	0,0028	0,257 ÷ 0,435
2,5	0,45; 0,56; 0,50; 0,32; 0,60	0,486	0,109	0,0119	0,304 ÷ 0,668
3,0	0,54; 0,60; 0,55; 0,35; 0,57	0,522	0,099	0,0098	0,357 ÷ 0,687
3,2	0,52; 0,55; 0,50; 0,40; 0,45	0,484	0,059	0,0035	0,385 ÷ 0,583

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0119}{0,0026} = 4,52.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 4,52$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,0026 \cdot 4 + 0,0028 \cdot 4 + 0,0119 \cdot 4 + 0,0098 \cdot 4 + 0,0035 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,0061 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 0,96 %

$$Q_3 = -2,89 + 3,88Q_B - 1,73Q_B^2 + 0,37Q_B^3 - 0,0316Q_B^4.$$

Таблица В7.5 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего по традиционной схеме при значении относительного погружения $\alpha = 0,25$

Расход сжатого воздуха $Q_{в}$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э}$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
0,75	0,1; 0,18; 0,13; 0,095; 0,09	0,119	0,037	0,0014	0,056 ÷ 0,182
1,0	0,25; 0,22; 0,28; 0,30; 0,35	0,280	0,049	0,0025	0,197 ÷ 0,363
1,25	0,60; 0,72; 0,55; 0,65; 0,63	0,630	0,063	0,0040	0,252 ÷ 0,735
1,5	0,85; 0,78; 0,80; 0,83; 0,73	0,798	0,047	0,0022	0,720 ÷ 0,876
1,75	0,90; 0,85; 0,77; 0,95; 1,0	0,894	0,089	0,0079	0,745 ÷ 1,043
2,0	1,11; 1,25; 1,11; 1,05; 1,15	1,134	0,074	0,0055	1,010 ÷ 1,258

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0079}{0,0014} = 5,64.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 5,64$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{CB}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{CB}}^2 = \frac{0,0014 \cdot 4 + 0,0025 \cdot 4 + 0,004 \cdot 4 + 0,0022 \cdot 4 + 0,0079 \cdot 4 + 0,0055 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,0039 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 2,62 %

$$Q_3 = -1,48 + 3,11Q_B - 1,88Q_B^2 + 0,669Q_B^3 - 0,0959Q_B^4.$$

Таблица В7.6 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего по традиционной схеме при значении относительного погружения $\alpha = 0,30$

Расход сжатого воздуха Q_B , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_3 , м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{\text{мин}} \div x_{\text{макс}}$, м ³ /ч
0,25	0,17; 0,16; 0,22; 0,26; 0,15	0,192	0,047	0,0022	0,114 ÷ 0,270
0,50	0,25; 0,32; 0,30; 0,35; 0,37	0,318	0,047	0,0022	0,240 ÷ 0,396
0,75	0,65; 0,70; 0,72; 0,63; 0,80	0,700	0,067	0,0045	0,589 ÷ 0,811
1,0	1,1; 0,9; 1,0; 1,12; 0,89	1,002	0,108	0,0116	0,822 ÷ 1,182
1,25	1,5; 1,55; 1,4; 1,65; 1,57	1,534	0,092	0,0085	1,380 ÷ 1,688

1,5	1,4; 1,3; 1,25; 1,35; 1,55	1,370	0,1150	0,0133	1,178 ÷ 1,562
-----	----------------------------------	-------	--------	--------	---------------

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0133}{0,0022} = 6,11.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 6,11$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,0022 \cdot 4 + 0,0022 \cdot 4 + 0,0045 \cdot 4 + 0,0116 \cdot 4 + 0,0085 \cdot 4 + 0,0133 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,007 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,41 %

$$Q_3 = -0,36 + 1,54Q_B + 0,248Q_B^2 - 0,467Q_B^3 + 0,104Q_B^4.$$

Таблица В7.7 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего по традиционной схеме при значении относительного погружения $\alpha = 0,35$

Расход сжатого воздуха $Q_{в}, \text{м}^3/\text{мин}$	Подача эрлифта $Q_{э}, \text{м}^3/\text{ч}$	Математическое ожидание $\bar{x}, \text{м}^3/\text{ч}$	Средне - квадратичное отклонение $S_x, \text{м}^3/\text{ч}$	Дисперсия $S_x^2, \text{м}^6 / \text{ч}^2$	Значения на границах доверительного интервала $x_{\text{мин}} \div x_{\text{макс}}, \text{м}^3/\text{ч}$
0,50	0,75; 0,55; 0,85; 0,72; 0,80	0,734	0,114	0,0130	0,543 ÷ 0,925
0,75	1,0; 1,12; 1,15; 1,2; 0,8	1,054	0,160	0,0256	0,787 ÷ 1,321
1,0	1,7; 1,5; 1,65; 1,82; 1,55	1,644	0,126	0,0159	1,433 ÷ 1,855
1,25	1,7; 2,2; 2,1; 2,15; 2,3	2,090	0,230	0,0530	1,706 ÷ 2,274
1,5	2,2; 2,25; 1,75; 1,9; 2,4	2,100	0,267	0,0713	1,654 ÷ 2,546
1,75	2,3; 2; 1,95; 2,1; 2,4	2,150	0,194	0,0375	1,827 ÷ 2,473

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0713}{0,0130} = 5,47.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 5,47$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,0130 \cdot 4 + 0,0256 \cdot 4 + 0,0159 \cdot 4 + 0,0530 \cdot 4 + 0,0713 \cdot 4 + 0,0375 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,036 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 2,14 %

$$Q_3 = -0,142 - 0,854Q_B + 5,68Q_B^2 - 3,81Q_B^3 + 0,721Q_B^4.$$

Таблица В7.8 – Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего в нагнетательном режиме при значении высоты перепада $\Delta H_H = 0,50$ м, $\rho_{\text{см}} = 0,2$ кгс/см²

Расход сжатого воздуха Q_B , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_3 , м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{\text{мин}} \div x_{\text{макс}}$, м ³ /ч
0,25	0,4; 0,6; 0,9; 0,72; 0,68	0,660	0,182	0,033	0,356 ÷ 0,964
0,50	1,8; 2,25; 2,55; 1,65; 2,1	2,07	0,358	0,128	1,47 ÷ 2,67
0,75	2,85; 3,27; 3,44; 3,55; 2,6	3,14	0,403	0,163	2,47 ÷ 3,82
1,0	2,8; 3,1; 3,15; 3,3; 3,65	3,20	0,310	0,096	2,682 ÷ 3,72

1,25	2,4; 2,85; 3,2; 2,6; 2,65	2,74	0,303	0,092	2,23 ÷ 3,25
------	---------------------------------	------	-------	-------	-------------

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,128}{0,033} = 4,90.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 4,90$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,033 \cdot 4 + 0,128 \cdot 4 + 0,163 \cdot 4 + 0,096 \cdot 4 + 0,092 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,102 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,52 %

$$Q_3 = -2,23 + 11,9Q_B - 6,85Q_B^2 + 0,297Q_B^3.$$

Таблица В7.9 – Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего в нагнетательном режиме при значении высоты перепада $\Delta H_H = 0,75$ м, $p_{см} = 0,2$ кгс/см²

Расход сжатого воздуха Q_B , м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_э$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
0,25	0,41; 0,63; 0,6; 0,72; 0,65	0,602	0,116	0,014	0,408 ÷ 0,796
0,50	1,45; 1,65; 1,6; 1,55; 1,85	1,62	0,148	0,022	1,37 ÷ 1,87
0,75	2,45; 2,6; 2,5; 2,3; 2,45	2,46	0,108	0,012	2,28 ÷ 2,64
1,0	2,75; 2,7; 2,95; 2,75; 2,85	2,80	0,100	0,010	2,63 ÷ 2,97
1,25	2,15; 2,35; 2,25; 2,55; 2,6	2,38	0,192	0,037	2,06 ÷ 2,70

Расчетный критерий Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{макс}^2}{S_{мин}^2},$$

$$F_{расч} = \frac{0,037}{0,010} = 3,70.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{макс} = n_{макс} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{мин} = n_{мин} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{табл} = 6,39$.

Из условия $F_{табл} > F_{расч}$, которое выполняется ($6,39 > 3,70$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,014 \cdot 4 + 0,022 \cdot 4 + 0,012 \cdot 4 + 0,010 \cdot 4 + 0,037 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,019 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,64 %

$$Q_3 = -1,87 + 9,71Q_B - 5,13Q_B^2 - 0,0455Q_B^3.$$

Таблица В7.10 – Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта, работающего в нагнетательном режиме при значении высоты перепада $\Delta H_n = 1,0 \text{ м}$, $p_{\text{см}} = 0,2 \text{ кгс/см}^2$

Расход сжатого воздуха Q_B , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_3 , м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ / ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{\text{мин}} \div x_{\text{макс}}$, м ³ /ч
0,25	0,35; 0,5; 0,61; 0,67; 0,58	0,542	0,124	0,015	0,336 ÷ 0,748
0,50	1,3; 1,1; 1,25; 1,45; 1,7	1,36	0,227	0,052	0,980 ÷ 1,740
0,75	2,15; 2,2; 1,95; 2,0; 2,3	2,12	0,144	0,021	1,88 ÷ 2,36
1,0	2,26; 2,1; 2,4; 1,95; 1,9	2,12	0,210	0,044	1,77 ÷ 2,47
1,25	1,75; 1,95; 2,1; 2,25; 1,65	1,94	0,246	0,061	1,53 ÷ 2,35

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,061}{0,015} = 3,96.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 3,96$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,015 \cdot 4 + 0,052 \cdot 4 + 0,021 \cdot 4 + 0,044 \cdot 4 + 0,061 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,038 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,83 %

$$Q_3 = -1,57 + 8,21Q_B - 4,52Q_B^2 + 0,0369Q_B^3.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В8 – Обработка экспериментальных данных работы
воздухоструйного компрессора, входящего в состав лабораторной эрлифтной
установки

Таблица В8.1 – Результаты обработки экспериментальных данных давления
сжатия p_c лабораторного воздухоструйного компрессора при избыточном
давлении рабочего потока $p_p = 4 \text{ кгс/см}^2$
(расход рабочего воздушного потока $Q_p = 1,54 \text{ м}^3/\text{мин}$)

Расход инжектируемого воздуха (через коллектор) $Q_h, \text{ м}^3/\text{мин}$	Коэффициент инжекции $u = Q_h/Q_p$	Давление сжатия p_c , кгс/см ²	Математическое ожидание $\bar{x}, \text{ м}^3/\text{ч}$	Средне-квадратичное отклонение $S_x, \text{ м}^3/\text{ч}$	Дисперсия $S_x^2, \text{ м}^6/\text{ч}^2$	Значения на границах Доверительного интервала $X_{\text{мин}} \div X_{\text{макс}}, \text{ м}^3/\text{ч}$
0,47	0,241	1,21; 1,28; 1,27; 1,24; 1,23	1,25	0,029	0,00083	1,20 ÷ 1,29
0,79	0,409	1,20; 1,25; 1,23; 1,27; 1,22	1,23	0,027	0,00073	1,19 ÷ 1,28
1,26	0,654	1,17; 1,22; 1,21; 1,24; 1,19	1,21	0,027	0,00073	1,16 ÷ 1,25
1,69	0,877	1,15; 1,18; 1,1; 1,21; 1,17	1,17	0,023	0,00053	1,14 ÷ 1,21
1,80	0,934	1,12; 1,15; 1,17; 1,16; 1,14	1,15	0,019	0,00037	1,12 ÷ 1,18
2,11	1,09	1,11; 1,12; 1,15; 1,14; 1,12	1,13	0,016	0,00027	1,10 ÷ 1,16

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,00083}{0,00027} = 3,07.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\max} = n_{\max} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\min} = n_{\min} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 3,07$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,00083 \cdot 4 + 0,00073 \cdot 4 + 0,00073 \cdot 4 + 0,00053 \cdot 4 + 0,00037 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} + \frac{0,00027 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,00058 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,23 %

$$p_c = 0,908 - 0,167u - 0,0628u^2 + 0,0266u^3 - 0,0595u^4.$$

Таблица В8.2 – Результаты обработки экспериментальных данных давления сжатия p_c лабораторного воздушнотруйного компрессора при избыточном давлении рабочего потока $p_p = 5 \text{ кгс/см}^2$ (расход рабочего воздушного потока $Q_p = 1,93 \text{ м}^3/\text{мин}$)

Расход инжектируемого воздуха (через коллектор) $Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	Коэффициент инжекции $u = Q_n/Q_h$	Давление сжатия $p_c, \text{ кгс/см}^2$	Математическое ожидание $\bar{x}, \text{ м}^3/\text{ч}$	Средне - квадратичное отклонение $S_x, \text{ м}^3/\text{ч}$	Дисперсия $S_x^2, \text{ м}^6/\text{ч}^2$	Значения на границах Доверительного интервала $X_{\text{мин}} \div X_{\text{макс}}, \text{ м}^3/\text{ч}$
0,77	0,497	1,33; 1,25; 1,32; 1,35; 1,31	1,31	0,038	0,0014	1,25 ÷ 1,37
1,29	0,839	1,29; 1,35; 1,17; 1,19; 1,38	1,28	0,094	0,0088	1,12 ÷ 1,43
1,67	1,09	1,15; 1,25; 1,22; 1,27; 1,24	1,23	0,046	0,0021	1,15 ÷ 1,30
1,85	1,20	1,21; 1,28; 1,17; 1,20; 1,19	1,21	0,042	0,0018	1,14 ÷ 1,28
2,16	1,40	1,15; 1,13; 1,23; 1,19; 1,16	1,17	0,039	0,0015	1,11 ÷ 1,24
2,32	1,51	1,05; 1,14; 1,17; 1,13; 1,15	1,13	0,046	0,0021	1,05 ÷ 1,20

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,0088}{0,0014} = 6,18.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 6,18$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{CB}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{CB}}^2 = \frac{0,0014 \cdot 4 + 0,0088 \cdot 4 + 0,0021 \cdot 4 + 0,0018 \cdot 4 + 0,0015 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} + \frac{0,0021 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,003 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 2,12 %

$$p_c = 1,15 - 0,197u - 0,111u^2 - 0,198u^3 + 0,0521u^4.$$

Таблица В8.3 – Результаты обработки экспериментальных данных давления сжатия p_c лабораторного воздушоструйного компрессора при избыточном давлении рабочего потока $p_p = 6 \text{ кгс/см}^2$ (расход рабочего потока $Q_p = 2,31 \text{ м}^3/\text{мин}$)

Расход инжектируемого воздуха (через коллектор) $Q_{\text{н}}$, $\text{м}^3/\text{мин}$	Коэффициент инжекции $u = Q_{\text{н}}/Q_{\text{п}}$	Давление сжатия p_c , кгс/см^2	Математическое ожидание \bar{x} , $\text{м}^3/\text{ч}$	Средне-квадратичное отклонение S_x , $\text{м}^3/\text{ч}$	Дисперсия S_x^2 , $\text{м}^6/\text{ч}^2$	Значения на границах Доверительного интервала $x_{\text{мин}} \div x_{\text{макс}}$, $\text{м}^3/\text{ч}$
1,01	0,437	1,39; 1,41; 1,34; 1,36; 1,37	1,37	0,027	0,00073	1,33 ÷ 1,42
1,20	0,519	1,35; 1,28; 1,37; 1,36; 1,38	1,35	0,040	0,00157	1,28 ÷ 1,41
1,63	0,706	1,30; 1,35; 1,27; 1,29; 1,31	1,30	0,030	0,00088	1,25 ÷ 1,35
1,97	0,853	1,25; 1,28; 1,29; 1,26; 1,25	1,27	0,018	0,00033	1,24 ÷ 1,30

2,23	0,965	1,25; 1,17; 1,21; 1,26; 1,24	1,23	0,036	0,00133	1,17 ÷ 1,29
2,56	1,11	1,15; 1,19; 1,12; 1,16; 1,14	1,15	0,026	0,00067	1,11 ÷ 1,20

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2},$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,00157}{0,00033} = 4,76.$$

Табличное значение критерия Фишера по степеням свободы $f_{\text{макс}} = n_{\text{макс}} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\text{мин}} = n_{\text{мин}} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

Из условия $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($6,39 > 4,76$), – сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,00073 \cdot 4 + 0,00157 \cdot 4 + 0,00088 \cdot 4 + 0,00033 \cdot 4 + 0,00133 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4} + \frac{0,00067 \cdot 4}{4} = 0,00092 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 0,96 %

$$p_c = 1,42 - 0,273u - 0,367u^2 + 0,082u^3 - 0,104u^4.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г – К разделу «Методика проектирования, рекомендации по разработке и практическому использованию нагнетательных эрлифтных установок»

ПРИЛОЖЕНИЕ Г1 – Справки о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс ГОУВПО «ДОННТУ» и о принятии результатов диссертационной работы ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК»



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

28.10.2022 № 30-12/127

На № _____

Диссертационный совет Д 01.008.01 при
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Божко Руслана Игоревича на тему: «Обоснование рациональных параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки для очистки шахтных водосборных емкостей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 – Горные машины (технические науки), в учебный процесс кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Результаты диссертационной работы Божко Р.И., а именно: математическая модель рабочего процесса нагнетательного эрлифта; экспериментальные нагнетательные эрлифтные установки; инженерная методика расчета нагнетательных эрлифтных установок, внедрены в учебный процесс кафедры «Энергомеханические системы» ГОУВПО «ДОННТУ» при подготовке специалистов и магистров, обучающихся соответственно 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», что отражено в учебной программе и методических указаниях для проведения лабораторных работ по указанным дисциплинам.

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить уровень подготовки инженеров в области проектированию специальных водостливных установок для горных предприятий.

Первый проректор
ГОУВПО «ДОННТУ»
канд. техн. наук, доцент

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОННТУ»
канд. техн. наук, доцент

Заведующий кафедрой «Энергомеханические
системы» ГОУВПО «ДОННТУ»
д-р техн. наук, профессор



Б.В. Гавриленко

А.П. Кононенко



МИНИСТЕРСТВО УГЛЯ И ЭНЕРГЕТИКИ
 ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
 ШАХТА ИМЕНИ ЧЕЛЮСКИНЦЕВ ГОСУДАРСТВЕННОГО
 УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «ДОНЕЦКАЯ УГОЛЬНАЯ
 ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ»

83022, г. Донецк, пл. Правды, 1а тел: (062) 203-31-28,
 факс: (062) 203-30-88, код ЕГРПОУ 35204678

20.10.2022 № 17-09/152

На № _____

В диссертационный совет Д 01.008.01 при
 ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
 НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
 УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о передаче результатов диссертационной работы **Божко Руслана Игоревича** на тему:
 «**Обоснование рациональных параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки для очистки шахтных водосборных емкостей**», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.06 – Горные машины (технические науки).

Результаты работы, а именно: расчет нагнетательной эрлифтной установки для очистки приемных колодцев водоотливных насосов гор. 270 м, включающий расчет годового экономического эффекта от внедрения установки взамен существующей схемы очистки, приняты к внедрению ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК».

На сегодняшний момент очистка приемных колодцев водоотливных насосов главного водоотлива гор. 270 м осуществляется полумеханизированным способом с использованием шламовых насосов и вспомогательных лебедок с применением ручного немеханизированного труда.

Разработана нагнетательная эрлифтная установка с $D = 205$ мм, $H_n = 6$ м, $h_n = 6$ м, $\Delta H_n = 3$ м, $a_{эн} = 0,333$, $Q_э = 42,8$ м³/ч, $Q_в = 6,15$ м³/мин, $Q_p = 2,78$ м³/мин.

Предполагается, что внедрение в схему очистки приемных колодцев разработанной нагнетательной эрлифтной установки позволит свести к минимуму долю ручного немеханизированного труда и даст годовой экономический эффект в размере 263,9 тыс. руб. при сроке окупаемости новой схемы около 5 месяцев.

Директор
 ОП «Шахта имени Челюскинцев» ГУП «ДУЭК»



(Handwritten signature)

Г.И. Кушниренко



И.А. Бершадский

ПРИЛОЖЕНИЕ Г2 – Конструктивные параметры всасывающего устройства эрлифта

Таблица Г2.1 – Основные конструктивные параметры

Тип всасывающего устройства	Параметры всасывающих устройств																
	a	D_d	D_{II}	h	ΔH	H_B	D_3	$\Delta h'$	h'	S'	S	C	H_{II}	$d_{э}, \text{мм}$		$d_{II}, \text{мм}$	
	$\text{м}^3/\text{ч}$	м	м	м	м	м	м	м	м	мм	мм	м	м	внеш.	внутр.	внеш.	внутр.
УВ ₀₋₅₀	50	0,33	0,4	0,3	0,12	3,5	0,65	0,12	0,12	10	5	0,12	3,5	121	101	121	101
УВ ₀₋₇₀	70	0,35	0,5	0,4	0,15	3,5	0,8	0,18	0,12	10	5	0,13	3,5	146	126	180	160
УВ ₀₋₁₅₀	150	0,44	0,6	0,5	0,18	3,5	0,85	0,18	0,12	10	7	0,13	3,5	168	143	219	189