

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
КРАСНОАРМЕЙСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ  
ГОСУДАРСТВЕННОГО ВЫСШЕГО УЧЕБНОГО ЗАВЕДЕНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Калиниченко Валерий Викторович

УДК 622.276.5:556

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭРЛИФТА ДИСКРЕТНОЙ  
ПОДАЧЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Специальность 05.05.17 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
проф., д.т.н. А.П. Кононенко

Красноармейск, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	11
1.1. Актуальность научной задачи.....	11
1.2. Анализ состояния научной задачи.....	13
1.2.1. Известные способы повышения энергетической эффективности работы эрлифтов.....	14
1.2.2. Гидродинамические особенности работы эрлифтов со снарядной структурой водовоздушных потоков.....	18
1.3. Цель, задачи и исследований.....	33
1.4. Выводы.....	35
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С РАЗДЕЛЬНОЙ РАЗВИТОЙ СНАРЯДНОЙ СТРУКТУРОЙ ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА.....	36
2.1. Физическая модель рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока.....	36
2.2. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока.....	38
2.3. Решение математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока.....	45
2.3.1. Аналитическое решение математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока.....	45
2.3.2. Численное решение математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока.....	51
2.3.3. Обоснование значений и соотношений длин жидкостных пробок и газовых снарядов в подъемной трубе эрлифта $D=57\text{мм}$ .....	58

2.4. Выводы.....	69
3. ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С РАЗДЕЛЬНОЙ СНАРЯДНОЙ СТРУКТУРОЙ ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА.....	70
3.1. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока.....	70
3.2. Влияние длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока на режимы и энергоэффективность работы эрлифтов.....	78
3.3. Сравнительный анализ гидродинамических параметров эрлифта $D=57$ мм при традиционной работе и дискретной подаче сжатого воздуха.....	92
3.4. Выводы.....	95
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ТРАДИЦИОННО РАБОТАЮЩЕГО ЭРЛИФТА И ЭРЛИФТА С ДИСКРЕТНОЙ ПОДАЧЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА.....	96
4.1. Задачи экспериментальных исследований и обоснование выбора объекта исследования.....	96
4.2. Экспериментальная установка и контрольно-измерительный комплекс.....	99
4.3. Результаты экспериментальных исследований.....	108
4.3.1. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса обычного эрлифта.....	108
4.3.2. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха.....	112
4.4. Исследование закономерностей изменения длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в прозрачной подъемной трубе экспериментального эрлифта.....	115
4.5. Выводы.....	120
5. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ЭРЛИФТА С ДИСКРЕТНОЙ ПОДАЧЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	122

5.1. Инженерная методика расчета общепромышленного эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха.....	122
5.2. Возможные способы и устройства дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта.....	129
5.2.1. Эрлифт с регулируемой задвижками на воздухопроводе и дискретной подачей сжатого воздуха.....	129
5.2.2. Эрлифт с дискретной подачей сжатого воздуха и изменяемым осевое положение воздухораспределителем.....	131
5.3. Реконструкция шламового эрлифта шахты «Стаханова».....	133
5.3.1. Существующая схема зумпфового эрлифтного водоотлива шахты «Стаханова».....	133
5.3.2. Усовершенствование шламовой эрлифтной установки шахты «Стаханова» дискретной подачей сжатого воздуха .....	137
5.4. Эрлифтная установка для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГПУК «Краснолиманская».....	141
5.4.1. Существующая установка для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГПУК «Краснолиманская».....	141
5.4.2. Расчет эрлифтной установки для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГПУК «Краснолиманская».....	143
5.5. Выводы.....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	150
Приложение А .....	152
Приложение Б .....	153
Приложение В.....	175
Приложение Г .....	209
Приложение Д.....	228
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	239

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Энергосбережение за счет повышения КПД, выбора рациональных схемных решений и компоновки является одним из стратегических направлений развития эрлифтных установок, что обеспечивает создание новых энергосберегающих машин с применением энергосберегающих технологий. Эрлифты находят применение в горной, энергетической, строительной и других отраслях промышленности благодаря ряду основных известных преимуществ – значительному сроку службы, возможности перекачки переменных по расходу притоков жидкостей (гидросмесей) без применения средств автоматического регулирования, простоте конструктивного выполнения, не требующего литья и механической обработки при изготовлении. Имеют место и другие положительные качества в устройстве и работе общепромышленных эрлифтных установок, которые проявляются в конкретных технологических условиях применения. Однако расширение области применения эрлифтов чаще всего сдерживается сравнительно низкой энергетической эффективностью при транспортировании жидкостей и гидросмесей.

Известно, что наиболее энергоэффективно работает эрлифт со снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе, характеризующейся периодичностью восходящего движения жидкостных пробок и воздушных снарядов. Различают развитую и развивающуюся снарядные структуры газожидкостных смесей, в первой из которых газовые снаряды имеют относительно строгую цилиндрическую форму и разделяются практически полностью занимающими поперечное сечение подъемной трубы жидкостными пробками. Повышение энергетической эффективности при работе эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе ощутимо уменьшается при переходе развитой снарядной структуры в развивающуюся, что обусловлено потерей периодичности движения газовых снарядов и жидкостных пробок, которые вдобавок разрушаются. Поэтому обеспечение

устойчивой работы эрлифта с высоко энергоэффективной развитой снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе является актуальной научной задачей, решение которой возможно путем разработки и исследования полной математической модели рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.**

Исследования проведены в рамках научно-исследовательской госбюджетной темы №Н-16-12 «Обоснование конструктивных решений и высокоэффективных режимов эксплуатации средств водоотлива угольных шахт» кафедры электромеханики и автоматики Красноармейского индустриального института ГВУЗ «ДонНТУ», работа связана с научным направлением кафедры энергомеханических систем ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» по разработке схем и средств транспортирования жидкостей и гидросмесей, отвечает Государственной целевой экономической программе энергоэффективности на 2010-2015г.г. (Постановление Кабинета Министров Украины №243 от 01.03.2010г.).

**Цель и задачи исследований.** *Цель исследований* – повышение энергетической эффективности рабочего процесса эрлифта за счет получения желательной (рациональной) длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в его подъемной трубе дискретной подачей сжатого воздуха.

*Задачи исследования:*

- установить пути повышения энергетической эффективности работы эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока;
- разработать математическую модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси, на основе которой установить рациональные значения и влияние длин газовых снарядов и жидкостных пробок на подачу газожидкостного подъемника;
- установить рациональные значения длин жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта;

- провести экспериментальные исследования работы эрлифта, подтвердить адекватность математической модели и возможность управления снарядной структурой газожидкостного потока путем дискретной подачи сжатого воздуха;

- разработать методику проектирования и рекомендации по конструктивной разработке общепромышленных эрлифтов с дискретной подачей сжатого воздуха, а также способы и устройства для их реализации.

*Объект исследования* – рабочий процесс эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе.

*Предмет исследования* – взаимосвязь параметров рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой и дискретной подачей сжатого воздуха с его статическими и динамическими характеристиками (энергоэффективностью).

*Методы исследования.* Анализ и научное обобщение данных литературных источников позволили выявить актуальность научной работы и сформулировать задачи исследований; на основе анализа и синтеза гидродинамических процессов в подъемной трубе обоснована физическая модель работы эрлифта; методы и законы механики жидкости и газа, существующие закономерности теории двухфазного потока и гидравлики положены в основу математической модели рабочего процесса газожидкостного подъемника; выполненный аналитический анализ энергетически рациональных значений длин жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в эрлифте; сравнение результатов математической модели рабочего процесса эрлифта и экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной математической модели. Достоверность научных результатов работы обусловлена применением апробированных методов исследований, соответствием принятых предположений характеру решаемых задач, обоснованным выбором контрольно-измерительной аппаратуры и методов обработки

экспериментальных данных с применением математической статистики и теории маленьких выборок.

### **Научная новизна полученных результатов.**

- разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта, которая отличается установлением связи между кинематическими и гидродинамическими параметрами развитой снарядной структуры водовоздушного потока и длинами жидкостных пробок и газовых снарядов в подъемной трубе, что позволило определить направление повышения энергетических характеристик эрлифта путем дискретной подачи сжатого воздуха;

- впервые аналитически установлены предельные энергетически рациональные относительные длины жидкостных пробок снарядного потока в подъемной трубе эрлифта для определенной области применения, которые составляют  $\bar{L}_s = 5 \dots 6$ ;

- впервые экспериментально установлена возможность управления развивающейся снарядной структурой потока в трубе эрлифта путем дискретной подачи сжатого воздуха и определено рациональное соотношение времени влияния на запорно-регулирующий клапан  $t_{\text{відкр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5 \dots 1/2,5$ ;

- получено дальнейшее теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение повышения энергетической эффективности работы эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока, что обеспечивает расчетное увеличение КПД газожидкостных подъемников на 21...22% для определенной области применения.

**Практическое значение полученных результатов** состоит в разработке методики расчета, проектирования и рекомендаций по конструированию элементов энергоэффективных эрлифтов с дискретной подачей сжатого воздуха и устройств, которые обеспечивают данный способ работы газожидкостных подъемников, а также их математическое и программное обеспечения.

Разработаны и переданы шахте «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь» рекомендации по реконструкция шламowego эрлифта переводом на дискретную

подачу сжатого воздуха. Разработка включена в план внедрения на 2014-15 г.г., ожидаемый годовой экономический эффект составляет 17,5 тыс. гривен.

Разработана и передана центральной обогатительной фабрике «Краснолиманская» документация эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха для перемешивания минеральной суспензии на стадии обогащения угля в тяжелых средах. Ожидаемый экономический эффект составляет 443,4 тыс. грн./год.

Результаты исследований использованы в Красноармейском индустриальном институте, ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» в учебном процессе в курсах «Специальные средства и схемы транспортирования жидкостей», «Специальные средства и схемы шахтных водоотливных, вентиляторных установок и гидроподъема», «Гидромеханизация, гидро- и пневмотранспорт», а также при курсовом и дипломном проектировании.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения, которые были получены в процессе выполнения диссертационной работы, приведены в диссертации и опубликованы статьях в соавторстве, принадлежат соискателю: [1] – определена графическая зависимость числа  $Re$  и кинематической вязкости  $\nu$  от относительного расхода воздуха  $q_0$ ; [2] – обоснованы закономерности изменения коэффициента скольжения фаз водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта; [3] – разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с учетом влияния длин жидкостных пробок на газосодержание смеси и касательные напряжения; [4] – разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта, учитывающая длины газовых снарядов и жидкостных пробок развитой снарядной структуры водовоздушного потока; [5] – экспериментальное исследование работы эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель, обосновывающее повышение эффективности газожидкостного подъемника с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси в подъемной трубе в сравнении с развивающейся; [6] – аналитическое решение математической модели рабочего процесса эрлифта с развитой

снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющее теоретически установить влияние длины жидкостных пробок, газовых снарядов на режимы и энергетическую эффективность работы газожидкостного подъемника.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрения на: Научно-практической конференции «Наука-жизнь-производство», Красноармейск, 2001г.; Региональной научно-технической конференции «Наука и техносфера» 2006г.; IV Научно-практической конференции, Красноармейск, 26 мая 2010г.; I Межрегиональной научно-практической конференции «Проблеми та перспективи розвитку вугільної галузі», Селидово, 2010г.; Международной конференции «Вітчизняна та зарубіжна наука на початку другої декади ХХІ століття», Киев, 2 марта 2013г.; XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», Киев, 21-24 мая 2013г. и Кировоград, 21-24 мая 2014г.; XIV, XV Международных научно-технических конференциях АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика», Одесса, 18-20 сентября 2013г. и Мелитополь, 17-19 сентября 2014г.; II Региональной научно-практической конференции КИИ ДонНТУ «Сучасні аспекти механізації та автоматизації енергоємних виробництв», Красноармейск, 2013г.; VI Научно-практической конференции «Геотехнологія і охорона праці у гірничій промисловості», Красноармейск, 14 ноября 2013г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 научных трудов, в том числе 5 статей в изданиях, внесенных в перечень специализированных научных изданий Украины, 1 статья в специализированном издании Польши, 11 тезисов докладов в сборниках материалов научно-технических конференций, получено 2 патента на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 250 страниц, в том числе 161 страница основного машинописного текста, 36 рисунков, 9 таблиц, 5 приложений на 87 страницах и списка литературы из 113 наименований на 12 страницах.

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 1.1. Актуальность научной задачи

Для трубопроводного транспортирования жидкостей и гидросмесей наряду с насосами объемного и гидродинамического принципа действия используются и гидроаппараты – струйные аппараты и эрлифты.

Эрлифты находят применение в горной, энергетической, строительной и других отраслях промышленности [7-25] благодаря ряду основных известных преимуществ [26-27]:

а) значительный срок службы даже при транспортировании высокоабразивных гидросмесей благодаря отсутствию в составе гидравлического подъемника подвижных элементов [12, 13, 15, 17-19, 28-32];

б) возможность перекачки переменных по расходу притоков жидкостей (гидросмесей) без применения средств автоматического регулирования рабочим процессом [26-27, 32-33];

в) простота конструктивного выполнения, не требующая литья и механической обработки при изготовлении [26-27].

Имеют место 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, давление в подъемной трубе эрлифта значительно ниже давления в насосах) [7, 28, 29], удалении золы и шлака на тепловых электростанциях (высокая надежность работы в течение межремонтного срока эксплуатации основного оборудования) [14-16, 18, 19], добыче полезных ископаемых (песок, гравий) со дна рек и озер (минимизация разрабатываемых площадей и экологического ущерба) [20] и др.

Основным недостатком эрлифтной установки является низкая энергетическая эффективность работы [26-27, 34].

Доказано [35, 36], что наиболее энергоэффективная работа эрлифтов имеет место при обеспечении снарядной структуры водовоздушного потока в подъемной трубе. Одним из критериев достижения снарядной структуры газожидкосной смеси в вертикальной подъемной трубе эрлифта является относительное погружение смесителя, значение которого должно составлять  $\alpha \geq 0,4$  [35, 36]. Однако, даже при относительных погружениях смесителя  $\alpha=0,4 \dots 0,5$  КПД эрлифтов не превышают величину порядка  $0,50 \dots 0,55$  [36], а КПД эрлифтных установок с учетом энергоэффективности производства сжатого воздуха источниками пневмоэнергии – величину  $0,25 \dots 0,30$  [26, 27].

Однако следует отметить, что для условий глубоководной разработки месторождений полезных ископаемых в морском горном деле, где эрлифтный вариант гидроподъема в настоящее время рассматривается в качестве основного, принимается, что КПД гидротранспортных систем не является абсолютным показателем эффективности их работы, и она должна оцениваться комплексом критериев [37]:

- надежностью работы установок (величиной коэффициента готовности  $K_T$  – как вероятностью того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается [37]);
- КПД установок;
- 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.

Большинство вышеперечисленных критериев эффективности работы глубоководных гидротранспортных систем являются правомерными и для общепромышленных эрлифтных установок, применяемых в системах водоотлива и гидроподъема ряда отраслей промышленности.

Подтверждением значимости изложенных в [37] критериев эффективности работы эрлифтных гидроподъемных установок являются результаты расчетов коэффициентов готовности для условий угольных шахт. Так, значения коэффициентов готовности составляют: для эрлифтной системы гидроподъема  $K_r \approx 1$ , а для насосной  $K_r \approx 0,4$  [27, 38]. Приведенные данные подтверждают значительно более высокую надежность работы эрлифтных гидроподъемных установок в сравнении с насосными, что особенно важно при применении эрлифтов в условиях непрерывных технологических процессов, например, для гидрозолошлакоудаления на тепловых электростанциях, работающих на твердом топливе [18, 19].

Однако значительным резервом повышения суммарной экономической эффективности использования как водоотливных, так и гидроподъемных эрлифтных установок является увеличение энергетической эффективности работы собственно эрлифтов, то есть повышения их КПД. Поэтому научная задача повышения энергетической эффективности работы эрлифтов является значимой и актуальной.

## 1.2. Анализ состояния научной задачи

Значительный вклад в разработку и совершенствование теоретических основ рабочих процессов эрлифтов 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., Пашенко В.С., Скорынин Н.И., Стегниенко А.П., Стифеев Ф.Ф., Триллер Е.А., Усков Е.В., Шевченко В.Ф. и другие.

Из ученых дальнего зарубежья существенный вклад в исследования рассматриваемых вопросов внесли Баттерворс Д., Безе Х., Берингер Г., Вебер М., Верслуис С., Грабов Г., Клаус Г., Локарт Р., Мартинелли Р., Мойссис Р., Мэрдок Дж., Полярский М., Роуз Р., Уэки-Сиро, Хаббард И., Хазитеодороу, Чен К., Финдлей Д. и другие.

В работах вышеперечисленных и других ученых изложены как основы теории рабочих процессов, так и предлагаемые методики расчета эрлифтов, а также способы повышения энергетической эффективности работы газожидкостных подъемников.

### 1.2.1. Известные способы повышения энергетической эффективности работы эрлифтов

Известными способами повышения энергетической эффективности работы эрлифтов являются:

а) приближение вида процесса изменения состояния газообразного рабочего тела по длине подъемной трубы к изохорному [26, 27, 39, 40];

б) применение поверхностно-активных веществ для поддержания структуры водовоздушного потока в подъемной трубе близкой к пузырьковой [41, 49];

в) обоснование рациональной формы поперечного сечения подъемной трубы для конкретных условий применения эрлифта [42, 47, 80];

г) получение желаемой структуры потока (дробление крупных газовых включений снарядной и кольцевой структур) в подъемной трубе механическими средствами [49];

д) минимизация гидравлических потерь в подающей трубе в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы [33];

е) обеспечение условий для работы эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе [35, 36].

Для большинства общепромышленных эрлифтов рациональным видом процесса изменения состояния газообразного рабочего тела по длине подъемной трубы является изохорный, как обеспечивающий минимизацию гидравлических потерь на трение из-за стабилизации приведенной скорости газожидкостного потока на требуемом для обеспечения транспортирования жидкостей (гидросмесей) уровне [39, 40]. Как известно [26, 27], традиционно применяемый в качестве газообразного рабочего тела сжатый воздух из-за увеличения объемного расхода по длине подъемной трубы при снижении давления от его величины в смесителе до атмосферного в воздухоотделителе приводит, в некоторых случаях, к существенному росту скорости газожидкостной смеси в трубе подъемника и, соответственно, значительным энергетическим потерям на трение.

Известными способами приближения вида процесса изменения состояния газообразного рабочего тела по длине подъемной трубы к изохорному являются: использование ступенчатых подъемных труб с расширяющимся по ходу движения газожидкостной смеси диаметром [26, 27], использование высокотемпературных газообразных рабочих тел [39], а также паровоздушных смесей [40]. Однако использование ступенчатой подъемной трубы только частично решает рассматриваемую задачу [26, 27], а применение высокотемпературных газообразных рабочих тел и паровоздушных смесей в эрлифтах имеет известные ограничения из-за специфики и особенностей методов [39, 40].

Доказана энергетическая эффективность применения в ряде случаев (как правило, для коротких эрлифтов [50] с  $(H + h)/D < 40$ ) подъемных труб с нетрадиционной формой поперечного сечения – квадратной [42]. Обосновано увеличение подачи эрлифтов и при других, некруглых, формах поперечного сечения подъемных труб [80]. Однако применение таких подъемных труб зачастую сдерживается не технологичностью их изготовления и, как следует ожидать, повышенным абразивным износом при транспортировании гидросмесей.

Энергетические потери в эрлифте на скольжение (опережение) газообразной фазы относительно жидкостной, являющиеся одними из определяющих в газожидкостном подъемнике и приводящие к ощутимому снижению истинного газосодержания смеси в сравнении с расходным, наименее значимо влияют на КПД аппарата при пузырьковой структуре водовоздушного потока в подъемной трубе [32, 44 ... 46, 48, 50]. Поддержание пузырьковой структуры газожидкостной смеси при ее движении в вертикальной трубе в более широких, чем обычно, диапазонах значимых факторов возможно использованием поверхностно-активных веществ [41, 49]. Доказано повышение энергетической эффективности работы эрлифта при добавках поверхностно-активных веществ в водовоздушный поток, транспортируемый в подъемной трубе [41, 49]. Однако при экономической целесообразности применения данного метода повышения КПД эрлифта в условиях лифтовой добычи нефти [41, 49], применение поверхностно-активных веществ в общепромышленных эрлифтах имеет существенные ограничения, вызванные как стоимостными факторами, так и экологическими ограничениями.

Известны также работы по обеспечению близкой к пузырьковой структуры водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта механическими средствами – рассекателями (рассеивателями), устанавливаемыми последовательно в подъемной трубе [43]. Однако механическое воздействие на поток позволяет изменять структуру газожидкостного потока на очень незначительном расстоянии после такого влияния на поток, а при транспортировании гидросмесей применение механических рассекателей в подъемной трубе и вовсе недопустимо из-за их значительного тормозящего воздействия на частицы твердого материала.

Повысить энергетическую эффективность работы эрлифта в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) возможно подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы [33]. Такое техническое решение позволяет минимизировать гидравлические потери

в подающей трубе в условиях увеличивающихся притоков, не допустить ощутимого снижения давления в смесителе и сохранить значение динамического относительного погружения на допустимом уровне. Однако использование такого устройства целесообразно при временных увеличениях притоков, составляющих, как правило, не менее 20 ... 25 % от базового [33, 51]. В случае более стабильных притоков жидкостей (гидросмесей), что имеет место в большинстве технологических процессов, использование такой установки не целесообразно.

Доказано, что наиболее энергоэффективно работает эрлифт при снарядной структуре водовоздушного потока [26, 27, 36], которая, согласно [36, 37, 52, 53], имеет место в подъемной трубе при определенных соотношениях одних из определяющих критериев подобия рабочего процесса газожидкостного подъемника – относительного погружения смесителя  $\alpha$  и критерия Фруда  $Fr$  [50]. Снарядный водовоздушный поток подразделяют на развитый и развивающийся [70, 71] и характеризуют значениями длин газовых снарядов и жидкостных пробок и их соотношений [54, 55], величины которых влияют на эффективность работы эрлифта [37, 56]. Однако выполненные исследования не касались вопроса возможности принудительного воздействия на снарядный газожидкостный поток в подъемной трубе эрлифта с целью более существенного акцентирования его основных гидродинамических качеств и геометрических характеристик – длин жидкостных пробок и газовых снарядов.

Таким образом, одним из малоизученных и перспективных способов повышения энергетической эффективности работы эрлифтов является повышение энергетического качества снарядной структуры водовоздушного потока в подъемной трубе, под которым будем понимать возможность придания развивающемуся снарядному потоку свойств развитого с влиянием на длину жидкостных пробок и газовых снарядов, и обоснованием рациональных соотношений этих длин.

## 1.2.2. Гидродинамические особенности работы эрлифтов со снарядной структурой водовоздушных потоков

Исследованию гидродинамики газожидкостных потоков, в том числе и со снарядной структурой, посвятили работы отечественные ученые академики АН СССР Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е., Стырикович М.А., член-корреспондент АН СССР Субботин В.И., доктора технических наук Алексеров А.С., Андриасов Р.А., Аргунов П.П., Арманд А.А., Архангельский В.А., Аузбаев Д.О., Багдасаров В.Г., Газиев Н.Г., Герман А.П., Герсеванов Н.М., Гиматудинов Ш.К., Гриценко А.И., Гужов А.И., Дейч М.Е., Дюнин А.К., Кириченко Е.А., Клапчук О.В., Костерин С.И., Козлов Б.К., Крылов А.П., Кутепов А.М., Лутошкин Г.С., Мамаев В.А., Муравьев И.М., Накорчевский А.И., Невструева Е.И., Нигматулин Б.И., Одишария Г.Э., Пирвердян А.М., Рахматуллин Х.А., Репин Н.Н., Телетов С.Г., Франкль Ф.И., Фидман Б.А. и другие.

Из ученых дальнего зарубежья существенный вклад в исследования рассматриваемых вопросов внесли Акагава К., Берингер Г., Гриффитс П., Даклер А., Делайе Дж., Зуберт Н., Локкарт Р., Мак-Адамс, Маркатерре Дж., Мартин С., Мартинелли Р., Мейер Дж., Мойссис Р., Мэрдок Дж., Роуз Р., Сакагути Т., Свенсон Х., Стеннинг А., Тонг Л., Уоллис Г., Хаббард И., Холл-Тейлор Н., Хьюитт Дж., Хьярмалс С., Чисхолм Д., Финдлей Д. и другие.

Одним из важных вопросов исследования восходящих газожидкостных течений в вертикальных трубах, как и в других условиях, является установление количественных критериев границ существования структур таких течений [57 ... 61]. Важность данного вопроса определяется тем, что в настоящее время не существует универсальных математических моделей газожидкостных течений, которые позволяли бы адекватно описывать эти процессы при любых из возможных структур двухфазных потоков [59 ... 62]. Используются индивидуальные математические модели применительно к

каждой, имеющей место в газожидкостном потоке, структуре смеси газ-жидкость [60 ... 65].

В большинстве случаев структуры водовоздушных потоков в вертикальных трубах подразделяют на следующие – пузырьковая, снарядная, эмульсионная, кольцевая, диспергированная [27, 35, 36, 59 ... 65].

Существует множество научных подходов к разработке критериев границ существования структур водовоздушных потоков в вертикальных трубах [59 ... 62], однако ввиду сложности протекающих в газожидкостных смесях процессов ни одну из известных методик нельзя считать универсальной и достоверной для широкого ряда случаев двухфазных течений.

Анализ существующих эмпирических зависимостей позволил профессору Кириченко Е.А. для идентификации структур течения водовоздушной смеси при исследовании глубоководных эрлифтных гидроподъемов рекомендовать следующие критериальные уравнения устойчивости в виде [37]:

- для границы пузырьковой и снарядной структуры течения

$$Fr_c = \exp(46,7 \cdot \beta - 2,33); \quad (1.1)$$

- для границы снарядной и кольцевой структуры течения

$$Fr_c = \left\{ \left[ 8,2 - 0,017 \cdot \left( \frac{M_z}{M_n} \right)^{-0,6} \right] \cdot \exp \left[ \left( 8 + 62 \cdot \frac{M_z}{M_n} \right) \cdot (1 - \beta) \right] \right\}^3 \cdot \frac{\rho_n - \rho_z}{Re_c \cdot \rho_z}, \quad (1.2)$$

где  $Fr_c$  – критерий Фруда потока смеси;

$\beta$  – объемное расходное газосодержание;

$M_z, M_n$  – приведенная скорость фазовых переходов для газа и пульпы соответственно;

$\rho_z, \rho_n$  – плотность газа и пульпы соответственно;

$Re_c$  – число Рейнольдса потока смеси.

Одним из наиболее научно обоснованных методов определения границ структур газожидкостных потоков в вертикальных трубах является метод Сорокина Ю.Л. и Пушкиной О.Л., разработанный под руководством академика

Кутателадзе С.С. и основанный на критериальной зависимости, описывающей кризисные явления в двухфазном потоке [66 ... 69]

$$k = f \left[ Fr; We; Ga; \frac{\rho' + \rho''}{\rho'}; \frac{\nu'}{\nu''}; \frac{l_1}{l_2} \dots \right], \quad (1.3)$$

где  $k$  – безразмерный параметр, который зачастую называют критерием Кутателадзе и обозначают  $Ku$ ;

$Fr$  – критерий Фруда;

$We$  – критерий Вебера;

$Ga$  – критерий Галилея;

$\rho', \rho''$  – плотность жидкости и газа;

$\nu', \nu''$  – кинематическая вязкость жидкости и газа;

$l_1, l_2$  – характерные линейные размеры аппаратов.

Экспериментальные данные, полученные при исследовании структур газожидкостных потоков, обработаны и представлены в виде карты кризисных состояний и режимов течений двухфазных смесей [66, 67] в системе координат

$$k = f(N), \text{ где } N = Fr \cdot We^{1,25} \left( 1 + \frac{31}{Ga^{0,55}} \right).$$

Основываясь на методе Сорокина Ю.Л. и Пушкиной О.Л. на основе обработки значительного количества экспериментальных данных, полученных учеными Донецкого национального технического университета (Донецкого политехнического института), в [35, 36] разработана карта структур (режимов) вертикальных восходящих водовоздушных потоков в подъемных трубах общепромышленных эрлифтов. Карта структур приведена в системе координат - относительное погружение смесителя  $\alpha$  и критерий Фруда водовоздушной смеси  $Fr_{см}$ . В соответствии с данными этих исследований [35, 36] снарядная структура водовоздушного потока имеет место в вертикальной подъемной трубе общепромышленного эрлифта при следующих значениях критериев подобия:

- в рациональном режиме работы эрлифта - относительное погружение смесителя  $0,4 \leq \alpha < 1$ , критерий Фруда водовоздушной смеси  $0 < Fr_{см} \leq 30$ ;

- в режиме максимальной подачи эрлифта - относительное погружение смесителя  $0,4 \leq \alpha < 1$ , критерий Фруда водовоздушной смеси  $0 < Fr_{см} \leq 20$ .

Как показали исследования [35, 36], в подавляющем большинстве случаев значения критерия Фруда водовоздушной смеси в вертикальных подъемных трубах общепромышленных эрлифтов при относительных погружениях смесителей эрлифтов  $0,4 \leq \alpha < 1$  находятся в диапазонах  $0 < Fr_{см} \leq 30$  – в рациональном режиме работы подъемника и  $0 < Fr_{см} \leq 20$  – в режиме максимальной подачи. Исходя из этого, можно считать, что при значениях относительных погружений смесителей  $0,4 \leq \alpha < 1$  общепромышленных эрлифтов в подъемных трубах имеет место снарядная структура водовоздушного потока как в рациональном режиме работы подъемника, так и в режиме его максимальной подачи. Поэтому данный метод определения границ снарядных структур водовоздушных потоков в вертикальных подъемных трубах общепромышленных эрлифтов в данной работе принят в качестве основного.

Снарядный режим течения вертикальной восходящей газожидкостной смеси в [70, 71] подразделяют на развитый и развивающийся. Развитый снарядный режим характеризуется значительной длиной жидкостных пробок, движущихся между газовыми снарядами, которые при этом имеют гладко скругленную головку и поднимаются с одинаковой скоростью. Если расстояние между газовыми снарядами меньше некоторого критического, стабильный характер течения нарушается, и газовый снаряд испытывает воздействие попутной струи идущего впереди снаряда, скорость его увеличивается, и он может слиться с головным снарядом. Передняя часть газового снаряда разрушается и становится попеременно эксцентричной со смещением от центра. Такой режим течения называют снарядным развивающимся.

Средняя плотность двухфазной восходящей смеси для развитого снарядного режима движения может определяться по выражению [70]

$$\rho_{см} = \rho' \cdot \left( \frac{Q_{жс} + w_{\infty} \cdot \omega}{Q_{жс} + Q_2 + w_{\infty} \cdot \omega} \right) + \rho'' \cdot \left( \frac{Q_2}{Q_{жс} + Q_2 + w_{\infty} \cdot \omega} \right), \quad (1.4)$$

где  $\rho', \rho''$  – плотности жидкости и газа соответственно;

$Q_{жс}, Q_2$  – объемные расходы жидкости и газа соответственно;

$\omega$  – площадь поперечного сечения трубы;

$w_{\infty}$  – скорость подъема бесконечно длинного пузыря в трубе, заполненной неподвижной жидкостью [70],

$$w_{\infty} = 0,350 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot \sqrt{g \cdot D}, \quad (1.5)$$

здесь  $C_1$  – поправочный коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса, вычисленного по скорости газа;

$C_2$  – поправочный коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса, вычисленного по скорости жидкости;

$D$  – диаметр трубы.

Средняя плотность двухфазной восходящей смеси для развивающегося снарядного режима может быть определена, если в выражении (1.4) скорость  $w_{\infty}$  заменить скоростью  $w_b$  газового пузыря снарядного потока (пузыря Тейлора), величина которой, согласно [70], зависит от относительного расстояния между пузырями

$$w_b/w_{\infty} = 1 + 8 \cdot \exp(-1,06 \cdot L_s/D), \quad (1.6)$$

где  $L_s$  – длина жидкостной пробки;

$D$  – диаметр трубы.

Вычисления по выражению (1.6), подтвержденные экспериментальными данными для труб диаметрами 19 ... 50,8 мм, показали, что при  $L_s/D > 5...6$  значение скорости  $w_b$  асимптотически приближается к значению скорости  $w_{\infty}$  [70]. Однако в общепромышленных эрлифтах относительные длины жидкостных пробок снарядного течения в подъемных трубах приведенного значения ( $L_s/D > 5...6$ ), как правило, не достигают [27, 32, 35, 36].

На основе сравнения аналитических и экспериментальных данных установлено [70], что значения градиента давления развивающегося снарядного потока значительно выше градиента давления развитого потока. Это объясняется тем, что в условиях развивающегося снарядного режима каждый газовый снаряд находится под воздействием попутного потока впереди движущихся снарядов и поднимается с большей скоростью, чем в случае развитого снарядного режима. Это и приводит к уменьшению истинного газосодержания, что, применительно к рабочему процессу эрлифта – к снижению его энергоэффективности из-за увеличения потерь на скольжение фаз.

Математическое описание восходящего снарядного потока применительно к определению границ его существования и условий перехода в эмульсионный поток позволило в [71] получить шесть соответствующих уравнений с семью неизвестными, включающими, в том числе, длины жидкостных пробок  $L_s$  и газовых снарядов  $L_b$ , а также толщину стекающей между снарядами и стенкой трубы жидкостной пленки  $\delta$ . Отсутствие достоверного метода определения перечисленных геометрических величин  $L_s$ ,  $L_b$  и  $\delta$  позволяет получать решения в виде диапазона значений при задаваемых уровнях величин одного из этих трех параметров. Так как значения искомым параметров при этом отличаются в 2 ... 3 раза [71], то такой метод моделирования рабочего процесса эрлифта представляется мало приемлемым.

Авторы приведенных в [54, 55, 72, 73] результатов экспериментальных исследований временных и структурных характеристик снарядных газожидкостных потоков обосновали целесообразность представления снарядного режима чередованием пузырьковой и кольцевой структур двухфазной смеси. Пузырьковой структурой характеризуется жидкостная пробка, содержащая газовые пузырьковые включения, а кольцевой – газовый снаряд с кольцевой пленкой вокруг него.

Исходя из такой модели снарядного течения среднее по сечению и времени газосодержание представлено зависимостью

$$\bar{\varphi} = \bar{\varphi}_{np} \cdot (1 - \psi) + \bar{\varphi}_{сн} \cdot \psi, \quad (1.7)$$

где  $\bar{\varphi}_{np}$  – среднее газосодержание жидкостных пробок и их вклад в среднее истинное газосодержание  $\bar{\varphi}_{np} \cdot (1 - \psi)$ ;

$\bar{\varphi}_{сн}$  – газосодержание газовых снарядов и их вклад в среднее истинное газосодержание  $\bar{\varphi}_{сн} \cdot \psi$ ;

$\psi$  – доля времени, в течение которого сечение вертикального канала, по которому движется газожидкостная смесь, занято газовыми снарядами (за контрольное время  $T$ ).

В частном случае, если  $\bar{\varphi}_{np} = 0$  – то есть жидкостная пробка не содержит газовых включений, а  $\bar{\varphi}_{сн} = 1$  – то есть газовый снаряд не содержит жидкостных капель и отсутствует кольцевая пленка вокруг него, справедливо  $\bar{\varphi} = \psi$ . В таком случае газосодержание газожидкостного потока со снарядной структурой равнялось бы доле времени, требующейся для прохождения через выбранное сечение газового снаряда.

В [72 ... 75] приведены результаты экспериментальных исследований характеристик как водовоздушных, так пароводяных вертикальных восходящих потоков со снарядной структурой. Водовоздушные снарядные потоки исследованы при движении в трубе диаметром 21 мм при давлении, близком к атмосферному, скоростях смеси 0,25 ... 2,0 м/с и расходных объемных газосодержаниях 0,4 ... 0,8. Пароводяные потоки исследованы при движении в трубе диаметром 18 мм при давлениях 1 ... 7 МПа, скоростях смеси 0,3 ... 6,0 м/с и расходных объемных паросодержаниях 0 ... 0,99.

В соответствии с приведенными в [72 ... 75] результатами исследований, вклад среднего значения газосодержания жидкостных пробок  $\bar{\varphi}_{np} \cdot (1 - \psi)$  в среднее истинное газосодержание  $\bar{\varphi}$  невелик и составляет не более 10 %. Основным носителем информации об истинном газосодержании  $\bar{\varphi}$  является член  $\bar{\varphi}_{сн} \cdot \psi$ , а важнейшей из всех структурных и временных характеристик является  $\psi$  – доля времени следования газовых снарядов.

Построенные в [72 ... 75] зависимости изменения газосодержания снарядных газожидкостных потоков по сечению каналов  $\varphi(r)$  показали его относительную равномерность в основном ядре потока и стремительное уменьшения в пристенной зоне, что соответствует результатам ранее выполненных экспериментальных исследований [72 ... 75].

Кольцевая пленка вокруг газового снаряда не одинакова по его длине (изменялась от 0,3 до 3,5 мм) и в несколько раз тоньше у его кормовой части по сравнению с носовой. На пленках были обнаружены крупные гребни волн (2 ... 4 мм), по высоте существенно превышающие сплошную часть пленки. Радиус, при котором появляются гребни волн, совпадает с радиусом начала резкого уменьшения локального газосодержания  $\varphi(r)$  [72 ... 75].

Длины жидкостных пробок составили 40 ... 170 мм и уменьшались с ростом расходного газосодержания  $\beta$ , а длины газовых снарядов находились в пределах 100 ... 700 мм и возрастали с увеличением газосодержания  $\beta$ . Зависимости для определения длин жидкостных пробок и газовых снарядов в [72 ... 75] не предложены.

Для парожидкостной смеси получено критериальное уравнение движения в виде [75]

$$\frac{w_0''}{w_{отн}} = 3 \cdot \left( \frac{w_0''}{w_0'} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{w_0' \cdot \mu'}{\sigma} \right)^{0,1} \cdot \left( \frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0,33}, \quad (1.8)$$

Где  $w_{отн}$  – относительная скорость пара (относительно жидкости);

$w_0', w_0''$  – приведенные скорости жидкости и пара соответственно;

$\rho', \rho''$  – плотности жидкости и пара соответственно;

$\mu'$  – динамическая вязкость жидкости;

$\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости.

Экспериментальные исследования были проведены при восходящем движении газожидкостных смесей в вертикальном трубопроводе диаметром 200 мм, а также выполнены единичные проверочные опыты в трубопроводах диаметром 316 мм и 700 мм [75]. Выражение (1.8) правомерно в диапазонах

значений безразмерных комплексов  $2 \leq \frac{w_0''}{w_0'} \leq 175$ ;  $1,05 \cdot 10^{-3} \leq \frac{w_0' \cdot \mu'}{\sigma} \leq 2,9 \cdot 10^{-3}$ ;

$$1 \cdot 10^{-4} \leq \frac{\rho''}{\rho'} \leq 6 \cdot 10^{-4}.$$

Использование критериального уравнения (1.8) может позволить выполнять математическое моделирование процессов движения восходящих газожидкостных потоков с учетом относительной скорости газовой фазы, что существенно повысит точность результатов, однако данное уравнение получено для условий кипения жидкости (воды, 42 % раствора натриевой селитры, конденсата с добавкой 0,8 % органического вещества ОП-7) и, к тому же, без определения и указания вида структура газожидкостного потока в вертикальном трубопроводе. Хотя в [55, 73] показано, что параметры снарядного течения для водовоздушных и пароводяных, но адиабатных, смесей практически не отличаются и слабо зависят от давления в диапазоне 0,2 ... 7 МПа.

Среднюю относительную скорость газа в восходящих вертикальных газожидкостных потоках возможно определять по выражению [43, 76]

$$C_s = C_z - C_{жс} = \frac{1}{f} \cdot \left( \frac{Q_z}{\varphi} - \frac{Q_{жс}}{1 - \varphi} \right), \quad (1.9)$$

где  $C_z, C_{жс}$  – скорости газа и жидкости соответственно;

$f$  – площадь поперечного сечения подъемника;

$Q_z$  – объемный расход газообразной фазы;

$Q_{жс}$  – объемный расход жидкости;

$\varphi$  – истинное объемное газосодержание.

Однако достоверность выражения (1.9) определяется достоверностью выражения для определения истинного объемного газосодержания  $\varphi$ , что не всегда достижимо.

Предложенная в [77] зависимость для определения толщины стекающей по внутренней поверхности подъемной трубы пленки жидкости получена без рассмотрения особенностей структур газожидкостной смеси и, по утверждению

самих авторов, требует опытной проверки. К таким же выводам приходят авторы работы [78, 79], в которой приведен анализ влияния противоточного пленочного движения жидкости по внутренней поверхности подъемной трубы на сопротивление эрлифта.

Одной из научных работ, в том числе экспериментальной, которая наиболее полно соответствует тематике данной диссертационной работы, являются исследования восходящего снарядного течения в подъемной трубе глубоководного гидроподъемного эрлифта для добычи полезных ископаемых со дна Мирового океана, проведенные под руководством профессора Кириченко Е.А. [37].

Ввиду практической сложности и даже невозможности в настоящее время проведения экспериментальных исследований работы как натуральных глубоководных эрлифтов, так и моделей таких эрлифтов с выполнением основных требований теории подобия, в первую очередь геометрического, в качестве экспериментальной была использована эрлифтная установка со следующими основными характеристиками: диаметр подъемной трубы  $D=52$  мм, длина подъемной трубы  $H+h=4,3$  м, возможный диапазон относительных погружений смесителя  $\alpha = 0,40 \dots 0,95$ , диаметр подающей трубы  $d=52$  мм, длина подающей трубы  $l=2,5$  м [37]. В подъемную трубу эрлифта была вмонтирована вставка диаметром  $D_n = 56$  мм из прозрачного пластика длиной 2,4 м. В качестве источника пневмоэнергии использовалась компрессорная установка СО-7Б, содержащая поршневой компрессор производительностью не менее  $0,5 \text{ м}^3/\text{мин}$  и давлением до 0,6 МПа.

В верхней части прозрачной вставки в подъемную трубу были закреплены источник лазерного излучения и фоторезистор, подключенный к ПЭВМ. Целью эксперимента, наряду с изучением особенностей транспортирования твердых частиц снарядной водовоздушной смесью, было исследование морфологии восходящего водовоздушного снарядного потока, то есть размеров воздушных снарядов и жидкостных пробок по длине снарядной структуры течения.

В объеме экспериментальных исследований, кроме измерения расхода воздуха и подачи эрлифта, выполнялось фотографирование газожидкостных образований снарядной структуры течения в пластиковой трубе на фоне измерительной линейки, а также время прохождения воздушных снарядов через сечение, на уровне которого были смонтированы источник лазерного излучения и фоторезистор. Формирование в подъемной трубе изучаемой снарядной структуры течения обеспечивалось подбором соответственного расхода подаваемого в смеситель воздуха при визуальном контроле структуры течения водовоздушной смеси в прозрачной пластиковой трубе.

В результате обработки экспериментальных данных в [37] приведены осциллограммы, характеризующие параметры пузырьковой и снарядной структур восходящих водовоздушных потоков, расходные характеристики эрлифта при относительных погружениях смесителя  $\alpha = 0,4$  и  $\alpha = 0,95$ , а также зависимости изменения объемного газосодержания, длин и отношения длин воздушных снарядов и водяных пробок, скорости воздушных снарядов в выбранном сечении прозрачной пластиковой трубы от расхода воздуха при относительном погружении смесителя  $\alpha = 0,95$ . Снарядная структура течения в прозрачной трубе наблюдалась в диапазоне изменения объемного газосодержания смеси  $0,365 \dots 0,731$ .

На графической зависимости длины воздушных снарядов от расхода воздуха выделено три характерные области (рис. 1.1): *I* – интенсивный, *II* – умеренный и *III* – незначительный рост длин газовых снарядов  $L_b$ . При этом установлено, что в начале снарядного потока длина газовых снарядов может быть принята равной диаметру трубопровода.

Полученная на основе экспериментальных данных зависимость длин жидкостных пробок  $L_s$  и связок  $L_{ce}$  от объемного расхода воздуха  $Q_{z.0}$  показывает (рис. 1.2), что увеличение расхода воздуха приводит к увеличению длин связок  $L_{ce}$  и уменьшению длин жидкостных пробок  $L_s$ . Увеличение объемного расхода воздуха сопровождается ростом объемного газосодержания

смеси, а также увеличением длин связок и уменьшением длин жидкостных пробок (рис. 1.2).

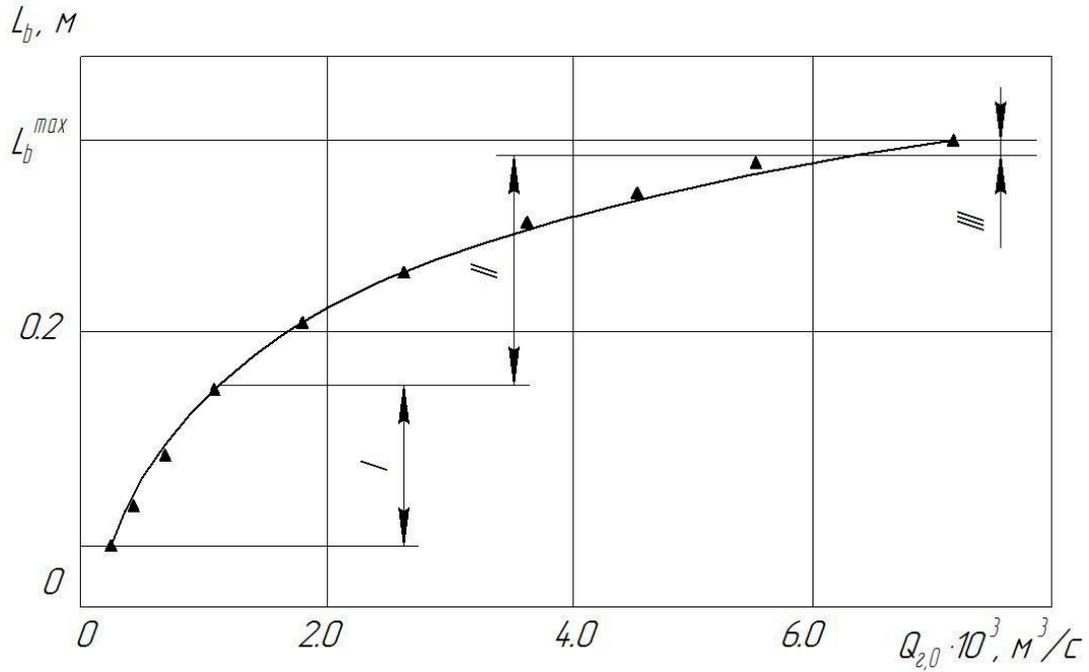


Рис. 1.1 – Зависимости длины воздушных снарядов  $L_b$  от расхода воздуха  $Q_{2,0}$  [37]

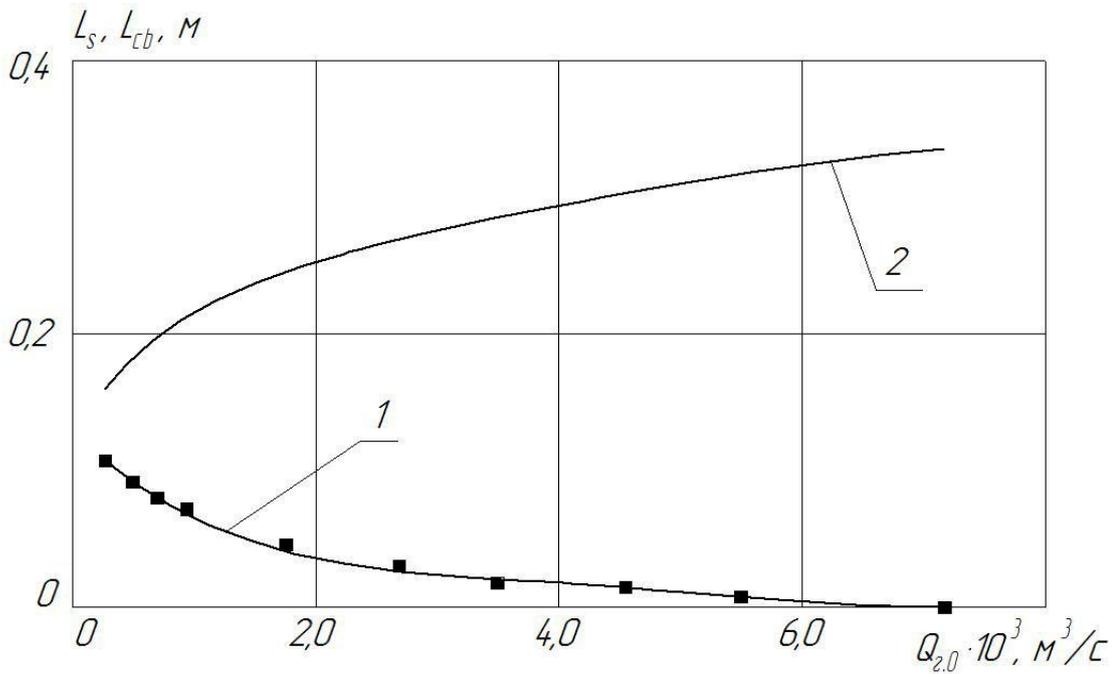


Рис. 1.2 – Зависимости длин жидкостных пробок  $L_s$  (кривая 1) и связок  $L_{cb}$  (кривая 2) от расхода воздуха  $Q_{2,0}$  [37]

Разность скоростей газовой и жидкой фаз в восходящем снаряжном потоке приводит к частичному противоточному перемещению жидкости из жидкостных пробок через ниже образующиеся кольцевые сечения между боковыми стенками газовых снарядов и внутренними стенками трубопроводов. Происходит противоточное обтекание газовых снарядов жидкостью и уменьшение длин жидкостных пробок.

В начальном участке восходящей снаряжной структуры воздушные снаряды содержат капли воды, а жидкостные пробки – воздушные пузыри. Выведение из воздушных снарядов водяных капель происходит быстрее, чем воздушных пузырей из водяных пробок.

Происходящее возрастание длин связок  $L_{cb}$  по высоте снаряжного течения происходит за счет увеличения объема снарядов сжатого воздуха из-за снижения давления по высоте подъемной трубы. После возрастания отношения длины газового снаряда к длине расположенной за ним жидкостной пробки более чем в 1,62...1,66 раза, приращение длин воздушных снарядов уменьшаться вследствие замедления оттока воды из жидкостных пробок.

Увеличение расхода воздуха  $Q_{z.0}$  в подъемной трубе исследуемого эрлифта приводит к росту отношения длин воздушных снарядов к длинам движущихся непосредственно за ними водяных пробок  $L_b/L_s$  (рис. 1.3).

На рис. 1.4 приведены зависимости изменения скорости движения снарядов сжатого воздуха  $V_{z.c}$  на уровне установки источника лазерного излучения от объемного расхода воздуха  $Q_{z.0}$ . Скорость движения воздушных снарядов  $V_{z.c}$  изменяется прямо пропорционально расходу воздуха  $Q_{z.0}$ , характер зависимостей, полученных на основании теоретических исследований и экспериментальных данных, близкий к линейному (рис. 1.4).

Таким образом, результаты исследований параметров восходящих водовоздушных потоков со снаряжной структурой в подъемной трубе эрлифта, изложенные в [37], подтверждают, что увеличение расхода воздуха, подаваемого в смеситель, приводит к уменьшению длины жидкостных пробок и увеличению длины связок за счет увеличения длины газовых снарядов.

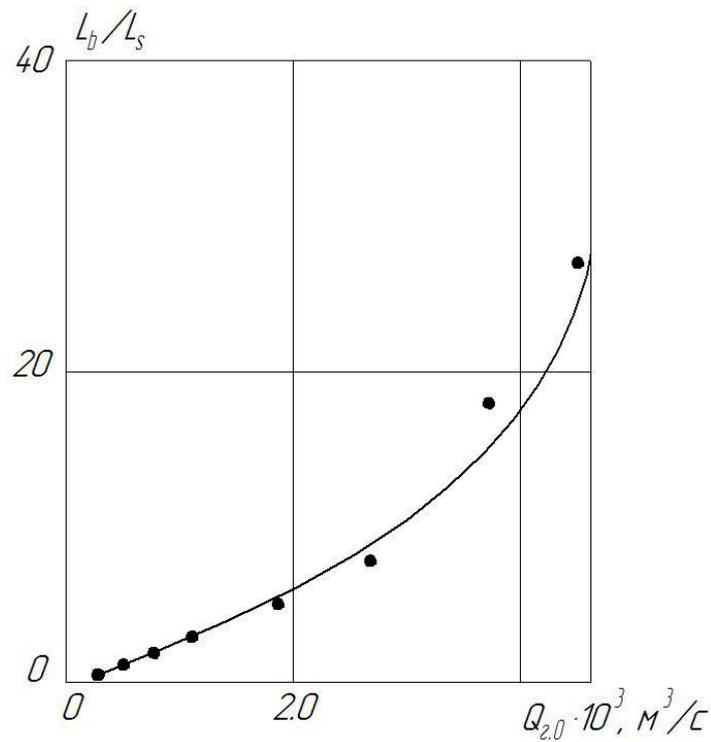


Рис. 1.3 – Зависимость изменения отношения длин воздушных снарядов к длинам водяных пробок  $L_b/L_s$  от расхода воздуха  $Q_{2.0}$  [37]

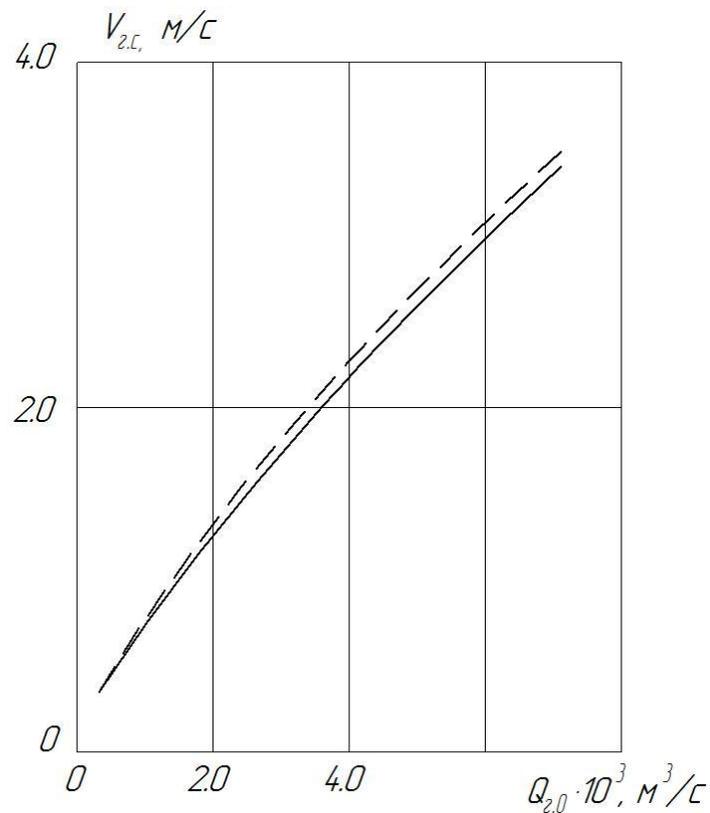


Рис. 1.4 – Зависимости изменения скорости воздушных снарядов  $V_{2.c}$  от расхода воздуха  $Q_{2.0}$ : сплошная кривая – экспериментальные данные; пунктирная кривая – результаты расчета [37]

В свою очередь, уменьшение длины жидкостных пробок при прочих равных условиях приводит к снижению подачи эрлифта как объема воды, проходящего через верхний торец подъемной трубы в единицу времени, то есть к снижению энергоэффективности его работы.

Сопоставление известных исследований восходящих газожидкостных потоков в вертикальных трубах, анализ которых приведен в настоящем разделе, в том числе в подъемных трубах эрлифтов, позволило установить, что развивающиеся снарядные потоки в сравнении с развитыми, характеризуются воздействием образующихся за впереди движущимися газовыми снарядами «хвостовых» потоков на поднимающиеся следом за ними снаряды. Это приводит к нарушению целостности и равномерной периодичности движения газовых снарядов и жидкостных пробок, потере снарядами правильной цилиндрической формы, их частичному разрушению и увеличению относительной скорости движения с взаимным слиянием. Нарушается также целостность жидкостных пробок с уменьшением их длины по ходу движения развивающейся снарядной смеси. Увеличение относительной скорости газовых снарядов развивающегося снарядного потока приводит к уменьшению истинного газосодержания, увеличению плотности газожидкостной смеси, что применительно к работе эрлифтов влечет увеличение потерь на скольжение фаз, уменьшение подачи и, в итоге, снижение энергоэффективности.

Научной концепцией, положенной в основу настоящей диссертационной работы, является обеспечение, в более широком диапазоне значимых факторов, работы эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси, преобразуя в нее развивающийся снарядный поток за счет дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель газожидкостного подъемника. При этом обеспечивается во времени два цикла пневмоснабжения эрлифта: один цикл – подвод сжатого воздуха в смеситель эрлифта с требуемым для данного режима работы расходом  $Q_e$  на протяжении времени  $t_{откр}$ , второй цикл – прекращение подвода сжатого воздуха в смеситель на протяжении времени  $t_{закр}$ . На протяжении времени  $t_{откр}$  на начальном участке снарядного течения

формируется преимущественно газовый снаряд, протяжении времени  $t_{закр}$  – преимущественно жидкостная пробка.

Дискретный метод пневмоснабжения эрлифта позволит упорядочить восходящий развивающийся снарядный поток и сообщить ему гидродинамические качества развитого с увеличением длины жидкостных пробок в подъемной трубе, а следовательно – повысить энергоэффективность работы данного гидроаппарата.

Кроме указанного, дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта позволит уменьшить возможность закупорки подводящего трубопровода эрлифтной установки при транспортировании гидросмеси за счет пульсирующего характера ее движения.

Вышеизложенный анализ состояния научной задачи повышения энергетической эффективности работы общепромышленных эрлифтов показывает, что в ряде практических условий применения эрлифтных установок целесообразно обеспечение дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта, что требует теоретических исследований и экспериментального подтверждения.

Совокупность необходимых комплексных исследований рабочего процесса эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха определяет задачи, решаемые в диссертационной работе.

### 1.3. Цель и задачи исследований

Целью работы является снижение энергоемкости эрлифта за счет принудительного упорядочения развивающегося снарядного водовоздушного потока с увеличением длин жидкостных пробок в подъемной трубе дискретной подачей сжатого воздуха.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие основные задачи:

1. разработать математическую модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси на основе дифференциального уравнения движения жидкостной пробки, сопоставление решения которой с экспериментальными данными позволит определить длины жидкостных пробок и газовых снарядов в подъемной трубе;

2. усовершенствовать математическую модель рабочего процесса эрлифта на основе дифференциального уравнения движения снарядного водовоздушного потока, что позволит установить влияние и рациональные значения длин жидкостных пробок, обеспечивающие повышение энергоэффективности работы эрлифта;

3. провести экспериментальные исследования работы эрлифта с целью подтверждения повышения энергоэффективности его рабочего процесса при дискретной подаче сжатого воздуха в сравнении с традиционным способом пневмоснабжения;

4. обосновать рекомендации по разработке общепромышленного эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха и предложить способы и устройства для ее реализации;

5. обеспечить использование результатов диссертационных исследований в промышленности и учебном процессе технической высшей школы.

Для решения указанных задач в работе применен аналитико-экспериментальный метод, суть которого состоит в разработке математических моделей рабочего процесса эрлифта и экспериментальной проверке результатов, полученных с использованием этих моделей. Аналитические исследования в работе выполнены на основе уравнений сохранения массы и импульса, закономерностей теории двухфазного потока и гидравлики.

Экспериментальные исследования работы эрлифтов проведены на опытной установке с выполнением требований теории моделирования, подобия и положений статистической обработки опытных данных.

#### 1.4. Выводы

1. Выполнен анализ возможных способов повышения энергетической эффективности работы эрлифтов, на основании которых сформулированы перспективы развития газожидкостных подъемников.

2. Анализ литературных источников и тенденции развития эрлифтных установок показал, что развитая снарядная структура водовоздушного потока в подъемной трубе, в сравнении с другими возможными структурами (эмульсионной, кольцевой, диспергированной), обеспечивает наиболее энергоэффективную работу.

3. Определены критерии подобия, при которых снарядная структура водовоздушного потока имеет место в вертикальной подъемной трубе общепромышленного эрлифта.

4. Сформулированная актуальная научно-практическая задача – повышение энергоэффективности рабочего процесса эрлифта за счет получения рациональной длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в его подъемной трубе дискретной подачей сжатого воздуха.

5. Предложен алгоритм решения поставленной задачи, которая разрешает выполнить весь комплекс исследований, начиная от разработки способов и устройств дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта, описания их математических моделей, проверки адекватности моделей реальным объектам, получения научных результатов и заканчивая их практическим использованием.

## РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С  
РАЗДЕЛЬНОЙ РАЗВИТОЙ СНАРЯДНОЙ СТРУКТУРОЙ  
ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА

2.1. Физическая модель рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой  
снарядной структурой водовоздушного потока

Развитая снарядная структура водовоздушного потока в эрлифте характеризуется очередностью прохождения в подъемной трубе жидкостных пробок длиной  $L_S$  и газовых пузырей (снарядов) длиной  $L_b$  (рис. 2.1). Между

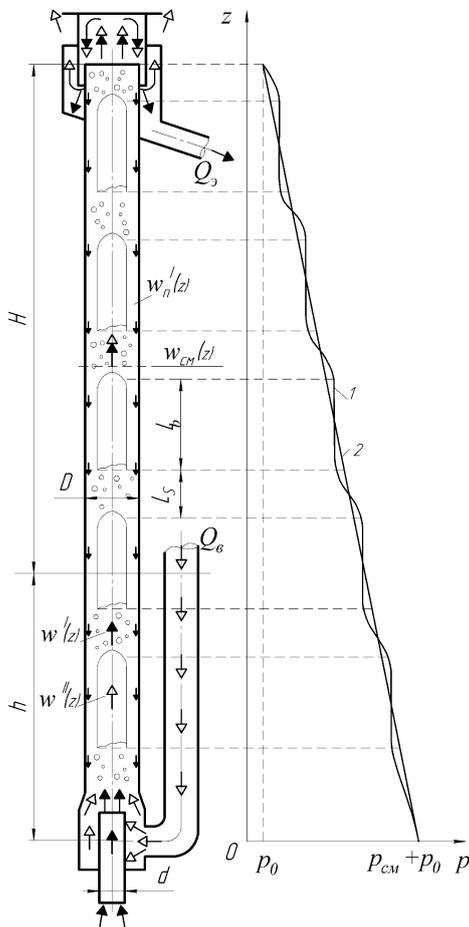


Рис. 2.1 – Схема эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока: истинная 1 и усредненная 2 эпюры давления в подъемной трубе ( $D$  и  $d$  – диаметры подъемной и подающей труб,  $H$  – высота подъема,  $h$  – геометрическое погружение смесителя,  $L_S$  – длина жидкостной пробки,  $L_b$  – длина газового пузыря)

газовыми пузырями и стенкой трубы имеет место нисходящее движение жидкостной пленки [59, 62, 80, 81]. Истинная скорость жидкостных пробок -  $w'(z)$ , газовых пузырей -  $w''(z)$ , приведенная скорость водовоздушной смеси -  $w_{cm}(z)$ , скорость нисходящего движения жидкостной пленки  $w'_n(z)$ .

Развитая снарядная структура водовоздушного потока характеризуется наличием достаточно больших газовых пузырей (пузырей Тейлора) [70], разделяемых жидкостными пробками. Пробки могут содержать в себе мелкие пузыри газа. В развитой снарядной структуре расстояние между газовыми снарядами достаточно велико, они имеют гладко скругленную головку и поднимаются с одинаковой скоростью.

Развивающийся снарядный режим возникает при расстоянии между газовыми пузырями меньше некоторого критического значения. Тогда пузырь Тейлора испытывает воздействие попутной струи впереди движущегося пузыря, что приводит к нарушению стабильности течения. Передняя часть пузыря разрушается с попеременным смещением от центра – то есть становится эксцентричной [70]. Развивающийся снарядный режим характеризуется как слиянием малых сферических пузырей пузырьковой структуры с образованием пузырей Тейлора, так и слиянием нескольких пузырей Тейлора вследствие взаимного воздействия пузырей, движущихся друг за другом.

Как известно, в двухфазном потоке границы фаз определяются не только геометрией стенок канала, что характерно для однофазного потока, но и распределением этих фаз в объеме, ограниченном данным каналом [82]. Взаимное распределение фаз нестабильно в пространстве и во времени, зависит от множества факторов (преимущественно объемных концентраций и скоростей фаз) и формирует ряд режимов течения (структур потоков), которые, как правило, подразделяют на пузырьковый, снарядный, эмульсионный и кольцевой [36, 59, 62, 80, 81].

В настоящее время разрабатывают математические модели для каждой из имеющих место структур двухфазных потоков [62]. Эмульсионная структура описывается гомогенной моделью газожидкостного потока, снарядная – двухкомпонентной, а кольцевая – раздельной. Существующие математические описания рабочего процесса эрлифта с вертикальным восходящим газожидкостным снарядным потоком [83] основываются на двухкомпонентной модели водовоздушной смеси, особенностью которой является учет газосодержания через его истинное значение  $\varphi(z)$  и оценка гидравлических потерь в водовоздушном потоке с использованием значения касательного напряжения  $\tau_w(z)$  гомогенной смеси. Однако двухкомпонентная модель не позволяет в полной мере выявить влияние абсолютных длин газовых снарядов и жидкостных пробок, а также их соотношений на эффективность работы

газожидкостных подъемников, что достижимо при использовании отдельной модели.

Учитывая сложность происходящих в подъемной трубе эрлифта гидродинамических процессов, снарядную структуру водовоздушного потока считаем развитой, так как адекватное моделирование развивающейся снарядной структуры в настоящее время практически недостижимо.

Для описания рабочего процесса газожидкостного подъемника с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси на основе отдельной модели рассмотрим эрлифт с подъемной трубой длиной  $H + h$ , диаметром  $D$  и площадью поперечного сечения  $\omega = \pi D^2/4$ . Предположим, что в трубе находится  $n$  пробок воды и  $n$  снарядов воздуха, причем длины пробок воды  $L_s$  одинаковы. Нумерация пробок воды начинается с нижнего слоя  $i = 1$  и заканчивается верхним слоем  $i = n$  ( $1 \leq i \leq n$ ). Номер снаряда воздуха соответствует номеру нижележащей пробки воды, длина снаряда воздуха  $L_{bi}$ , причем  $L_{b1} = L_s \cdot k_{L_{b1}}$  ( $k_{L_{b1}}$  – относительная длина первого газового снаряда). На нижнем торце трубы (на входе в подъемную трубу – в смесителе эрлифта) абсолютное давление  $p_{a\text{ см}} = p_0 + \rho' \cdot g \cdot h$  ( $\rho'$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения), на верхнем –  $p_0$  (атмосферное давление). Движение водовоздушной смеси будем считать одномерным восходящим установившемся по направлению оси  $Oz$ .

## 2.2. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока

Целью математического моделирования рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока является аналитическое определение длин газовых снарядов и жидкостных пробок и их соотношений в натуральных эрлифтах путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных.

Математическая модель рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока разработана на основе фундаментального дифференциального уравнения движения.

Исходя из представленной физической модели рабочего процесса эрлифта для разработки его математической модели с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока приняты следующие допущения:

а) водяные пробки не содержат газовых включений, а воздушные снаряды – соответственно жидкостных;

б) жидкостная нисходящая пристенная пленка воды в вертикальной подъемной трубе отсутствует (данное допущение принято исходя из отсутствия на настоящее время достоверных аналитических методов определения толщин таких пленок [37, 71, 77, 79]);

в) силой трения воздушных снарядов о внутренние стенки подъемной трубы пренебрегаем ввиду ее малости по сравнению с другими внешними силами;

г) процесс изменения состояния сжатого воздуха по длине подъемной трубы изотермический;

д) режим движения водяных пробок в вертикальной подъемной трубе турбулентный;

е) абсолютное давление в  $i$ -ом газовом снаряде равно абсолютному давлению на верхнем торце  $i$ -ой жидкостной пробки;

ж) длины всех жидкостных пробок в подъемной трубе равны между собой, а площади их поперечного сечения равняются площади поперечного сечения подъемной трубы;

з) изменением давления по высоте газового снаряда пренебрегаем ввиду относительной малости плотности газа в сравнении с плотностью жидкости.

Уравнение движения для  $i$  – ой пробки воды в вертикальной подъемной трубе эрлифта

$$m' \cdot \frac{dw'(z)}{dt} = F_p(z) - F_g' - F_\tau'(z) - F_g'(n-i)(z), \quad (2.1)$$

где  $m'$  – масса  $i$ -ой пробки воды;

$w'(z)$  – скорость  $i$ -ой пробки воды;

$t$  – время;

$F_p(z)$  – сила давления, обусловленная разницей давлений на нижнем  $p(z)$  торце  $i$ -ой пробки воды и на выходе из подъемной трубы  $p_0$  (такое определение силы давления предполагает учет влияния веса и сил трения верхних  $n-i$  пробок воды);

$F'_g$  – вес пробки воды;

$F'_\tau(z)$  – сумма сил трения  $i$ -ой и выше находящихся пробок воды о стенки подъемной трубы;

$F'_{g(n-i)}(z)$  – вес верхних  $(n-i)$  пробок воды;

$n$  – общее число пробок воды в подъемной трубе.

Масса каждой из  $i$ -ых пробок воды равны между собой:

$$m' = \rho' \cdot \omega \cdot L_s, \quad (2.2)$$

где  $\rho'$  – плотность воды;

$\omega$  – площадь поперечного сечения подъемной трубы;

$L_s$  – длина пробки воды.

Сила давления, обусловленная разницей давлений на нижнем  $p(z)$  торце  $i$ -ой пробки воды и на выходе из подъемной,

$$\begin{aligned} F_p(z) &= [p(z) - p_0] \cdot \omega = \left[ p_0 + p_{см} \cdot \left( 1 - \frac{z}{H+h} \right) - p_0 \right] \cdot \omega = \\ &= p_{см} \cdot \left( 1 - \frac{z}{H+h} \right) \cdot \omega, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где  $p_{см}$  – избыточное давление в смесителе

$$p_{см} = \rho' \cdot g \cdot h. \quad (2.4)$$

Вес пробки воды

$$F'_g = m' \cdot g. \quad (2.5)$$

Сумма сил трения  $i$ -ой и выше находящихся жидкостных пробок о стенки подъемной трубы

$$F'_t(z) = \tau'_w(z) \cdot \pi \cdot D \cdot \sum L_s(z), \quad (2.6)$$

где  $\tau'_w(z)$  – касательное напряжение;

$\sum L_s(z)$  – часть длины подъемной трубы выше сечения  $z$ , занятая жидкостными пробками.

Касательное напряжение

$$\tau'_w(z) = \lambda' \cdot \frac{\rho' \cdot [w'(z)]^2}{8}, \quad (2.7)$$

где  $\lambda'$  – коэффициент гидравлического трения.

В соответствии с принятым допущением о турбулентности движения водяных пробок, что подтверждено результатами решения математической модели рабочего процесса эрлифта (табл. Б.2.1 – Б.2.8), коэффициент гидравлического трения  $\lambda'$  определен по формуле Шифринсона [84]:

$$\lambda' = 0,11 \left( \frac{\Delta_э}{D} \right)^{0,25}, \quad (2.8)$$

где  $\Delta_э$  – эквивалентная шероховатость внутренней поверхности подъемной трубы.

Часть длины подъемной трубы выше сечения  $z$ , занятая жидкостными пробками, силы трения которых необходимо учитывать

$$\sum L_s(z) = (H + h - z) \cdot [1 - \varphi_{cp}(z)], \quad (2.9)$$

где  $\varphi_{cp}(z)$  – среднее объемное истинное газосодержание водовоздушного потока на участке подъемной трубы длиной  $(H+h-z)$ , определяется:

$$\varphi_{cp}(z) = \frac{\varphi(z) + \varphi_{вых}}{2}, \quad (2.10)$$

где  $\varphi(z)$  – объемное истинное газосодержание водовоздушного потока в сечении, отстоящем на расстоянии  $z$  от входа в подъемную трубу;

$\varphi_{вых}$  – объемное истинное газосодержание водовоздушного потока на выходе из подъемной трубы.

В соответствии с [85, 86] правомерно принять:

$$\varphi(z) = 0,833 \cdot \beta(z), \quad (2.11)$$

где  $\beta(z)$  – объемное расходное газосодержание водовоздушного потока в сечении, отстоящем на расстоянии  $z$  от входа в подъемную трубу.

Объемное расходное газосодержание [62, 82]

$$\beta(z) = \frac{Q_g(z)}{Q_3 + Q_g(z)} = \frac{1}{\frac{Q_3 + Q_g(z)}{Q_g(z)}} = \frac{1}{\frac{1}{q(z)} + 1}, \quad (2.12)$$

где  $Q_g(z)$  – объемный расход воздуха в сечении, отстоящем на расстоянии  $z$  от входа в подъемную трубу;

$Q_3$  – подача эрлифта;

$q(z)$  – удельный расход воздуха в сечении, отстоящем на расстоянии  $z$  от входа в подъемную трубу [87, 88], определяется:

$$q(z) = \frac{Q_g(z)}{Q_3}. \quad (2.13)$$

В соответствии с [87]

$$q(z) = q \cdot \frac{p_0}{p(z)} = q \cdot \frac{p_0}{p_0 + p_{cm} \left(1 - \frac{z}{H+h}\right)}, \quad (2.14)$$

где  $q$  – удельный расход воздуха при нормальных технических условиях.

Подставив (2.12) и (2.14) в (2.11), получим:

$$\varphi(z) = 0,833 \cdot \beta(z) = 0,833 \cdot \frac{1}{\frac{1}{q(z)} + 1} = 0,833 \cdot \frac{q}{(1+q) + \frac{p_{cm}}{p_0} \cdot \frac{H+h-z}{H+h}}. \quad (2.15)$$

Объемное истинное газосодержание на выходе из подъемной трубы по аналогии с (2.15)

$$\varphi_{вых} = 0,833 \cdot \beta_{вых} = 0,833 \cdot \frac{Q_g}{Q_3 + Q_g} = 0,833 \cdot \frac{1}{\frac{1}{q} + 1}, \quad (2.16)$$

где  $\beta_{вых}$  – объемное расходное газосодержание на выходе из подъемной трубы;

$Q_g$  – объемный расход воздуха при нормальных технических условиях.

Тогда из (2.10) с учетом (2.15) и (2.16):

$$\varphi_{cp}(z) = \frac{\varphi(z) + \varphi_{былх}}{2} = 0,4165 \cdot \frac{q}{1+q} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1+q} \cdot \frac{p_{cm}}{p_0} \cdot \frac{H+h-z}{H+h}} \right]. \quad (2.17)$$

Вес верхних  $(n-i)$  жидкостных пробок определяется исходя из следующей пропорции:

$$F'_{g(n-i)}(z) = m' \cdot g \cdot \frac{n}{H+h} \cdot (H+h-z) = m' \cdot g \cdot n \cdot \left( 1 - \frac{z}{H+h} \right). \quad (2.18)$$

Для определения количества  $n$  жидкостных пробок в подъемной трубе длиной  $H+h$  в соответствии с принятыми допущениями принимаем, что абсолютное давление в  $i$ -ом газовом снаряде  $p_i''$  равно давлению  $p_i'$  на верхнем торце  $i$ -ой жидкостной пробки  $p_i'' = p_i'$ :

$$p_i'' = p_0 + p_{cm} \cdot \left( 1 - \frac{i \cdot L_s}{n \cdot L_s} \right) = p_0 + p_{cm} \cdot \left( 1 - \frac{i}{n} \right), \quad (2.19)$$

где  $L_s$  – длина жидкостной пробки, которая определяется:

$$L_s = \bar{L}_s \cdot D, \quad (2.20)$$

здесь  $\bar{L}_s$  – относительная длина жидкостной пробки.

При  $i=1$  абсолютное давление в 1-ом газовом снаряде, равное давлению на верхнем торце 1-ой жидкостной пробки  $p_1'' = p_1'$ ,

$$p_1'' = p_0 + p_{cm} \cdot \left( 1 - \frac{1}{n} \right). \quad (2.21)$$

Длина первого газового снаряда

$$L_{b1} = L_s \cdot k_{L_{b1}}, \quad (2.22)$$

где  $k_{L_{b1}}$  – приведенная длина первого газового снаряда.

Объем первого газового снаряда

$$V_1'' = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_{b1}. \quad (2.23)$$

Объем  $i$ -го газового снаряда для  $2 \leq i \leq n$

$$V_i'' = V_1'' \cdot \frac{p_1''}{p_i''}. \quad (2.24)$$

Длина  $i$ -го газового снаряда для  $2 \leq i \leq n$

$$L_{bi} = \frac{4 \cdot V_i''}{\pi \cdot D^2}. \quad (2.25)$$

Расчетная длина подъемной трубы при  $n$  жидкостных пробок в ней

$$(H + h)_{расч} = L_s \cdot n + L_{b1} + \sum_{i=2}^n L_{bi}. \quad (2.26)$$

Вычисленное по (2.26) значение  $(H+h)_{расч}$  должно соответствовать условию  $(H + h)_{расч} \leq H + h$ .

Период движения жидкостных пробок в сечении, отстоящем на расстоянии  $z_k$  от нижнего торца подъемной трубы,

$$t_{sm} = \frac{L_s + L_{bm}}{w'_m}, \quad (2.27)$$

где  $L_{bm}$  – длина  $m$ -го ( $i = m$ ) газового снаряда при давлении, равном давлению в сечении  $z_k$  подъемной трубы;

$w'_m$  – скорость жидкостной пробки в сечении  $z_k$  подъемной трубы;

$m$  – число жидкостных пробок ( $i = m$ ) на участке подъемной трубы длиной от ее нижнего торца до сечения  $z_k$ .

Объем жидкостной пробки

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_s. \quad (2.28)$$

Подача эрлифта

$$Q_э = \frac{V_s}{t_{sm}}. \quad (2.29)$$

Расход воздуха

$$Q_в = \frac{V_m''}{t_{sm}}, \quad (2.30)$$

где  $V_m''$  – объем газового снаряда при  $i = m$ .

В настоящее время не известны достоверные зависимости (даже эмпирические) для определения длин жидкостных пробок  $L_s$  и газовых снарядов  $L_b$  восходящего развитого снарядного водовоздушного потока [70, 71,

73 и др.]. Предлагаемая в [56] зависимость для большинства практически используемых диаметров подъемных труб определяет длину жидкостных пробок, равной  $100 \cdot D$ , что зачастую не соответствует действительности.

Исходя из выше изложенного разработанная в данном разделе математическая модель рабочего процесса эрлифта предполагает, что при ее решении необходимо задаваться значениями относительной длины жидкостной пробки  $\bar{L}_s$  и приведенной длины первого газового снаряда  $k_{L_{b1}}$ .

### 2.3. Решение математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока

#### 2.3.1. Аналитическое решение математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока

Решение математической модели рабочего процесса эрлифта преследовало цель определения гидродинамических параметров работы газожидкостного подъемника, в первую очередь его подачи и расхода воздуха, при заданных длинах жидкостных пробок  $L_s$  и газовых снарядов  $L_b$  и сравнение этих параметров с полученными при экспериментальных исследованиях традиционных подъемников. Имеются основания утверждать, что режимы работы традиционного эрлифта с удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментально полученных гидродинамических параметров соответствуют заданным значениям длин жидкостных пробок  $L_s$  и газовых снарядов  $L_b$ .

Решение математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока выполнено как аналитически (с некоторым допущением), так и численно (с исключением этого допущения) с использованием компьютерной программы Mathcad.

Аналитическое решение математической модели (2.1) рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока получено при условии использования в уравнении (2.9) для определения части длины подъемной трубы выше сечения  $z$ , занятой жидкостными пробками, допущения  $\varphi_{cp}(z) = \bar{\varphi}$ . Исходя из данного допущения, среднее объемное истинное газосодержание водовоздушного потока на участке подъемной трубы длиной  $(H+h-z)$  не зависит от координаты  $z$ .

Для нахождения аналитического решения разработанной математической модели выполнены следующие преобразования уравнения (2.1).

Подставив в (2.6) значения переменных из (2.7), (2.8) и (2.9) с учетом  $\varphi_{cp}(z) = \bar{\varphi}$  получим:

$$\begin{aligned} F'_\tau(z) &= 0,11 \cdot \left(\frac{A_9}{D}\right)^{0,25} \cdot \frac{\rho' \cdot [w'(z)]^2}{8} \cdot \pi \cdot D \cdot (H+h-z) \cdot (1-\bar{\varphi}) = \\ &= A \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h-z), \end{aligned} \quad (2.31)$$

где

$$A = 0,11 \cdot \left(\frac{A_9}{D}\right)^{0,25} \cdot \frac{\rho' \cdot \pi \cdot D}{8} \cdot (1-\bar{\varphi}). \quad (2.32)$$

Уравнение (2.1) с учетом (2.3), (2.5), (2.31) и (2.18) примет вид:

$$\begin{aligned} m' \cdot \frac{dw'(z)}{dt} &= p_{cm} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right) \cdot \omega - m' \cdot g - \\ &- A \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h-z) - m' \cdot g \cdot n \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Преобразуем часть правой части выражения (2.33)

$$\frac{dw'(z)}{dt} = \frac{dw'(z)}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = w'(z) \cdot \frac{dw'(z)}{dz} = \frac{d[w'(z)]^2}{2 \cdot dz}, \quad (2.34)$$

с учетом чего уравнение (2.33) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} m' \cdot \frac{d[w'(z)]^2}{2 \cdot dz} &= p_{cm} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right) \cdot \omega - m' \cdot g - \\ &- A \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h-z) - m' \cdot g \cdot n \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right), \end{aligned} \quad (2.35)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d[w'(z)]^2}{dz} &= \frac{2 \cdot p_{cm}}{m'} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right) \cdot \omega - 2 \cdot g - \\ &- \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h-z) - 2 \cdot g \cdot n \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right). \end{aligned} \quad (2.36)$$

Выполнив алгебраические преобразования (2.36), получим:

$$\begin{aligned} \frac{d[w'(z)]^2}{dz} &= \frac{2 \cdot p_{cm} \cdot \omega}{m'} - \frac{2 \cdot p_{cm} \cdot \omega}{m'} \cdot \frac{z}{H+h} - 2 \cdot g - \\ &- \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h) + \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot z - 2 \cdot g \cdot n + 2 \cdot g \cdot n \cdot \frac{z}{H+h}, \end{aligned} \quad (2.37)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d[w'(z)]^2}{dz} &= \frac{2 \cdot p_{cm} \cdot \omega}{m'} - 2 \cdot g - 2 \cdot g \cdot n + 2 \cdot g \cdot n \cdot \frac{z}{H+h} - \\ &- \frac{2 \cdot p_{cm} \cdot \omega}{m'} \cdot \frac{z}{H+h} - \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h) + \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot z. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Дальнейшие преобразования (2.38) приводят к следующему:

$$\begin{aligned} \frac{d[w'(z)]^2}{dz} &= \frac{2 \cdot p_{cm} \cdot \omega}{m'} - 2 \cdot g \cdot (1+n) + \left(2 \cdot g \cdot n - \frac{2 \cdot p_{cm} \cdot \omega}{m'}\right) \cdot \frac{z}{H+h} - \\ &- \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot (H+h) + \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot z, \end{aligned} \quad (2.39)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{d[w'(z)]^2}{dz} &= 2 \cdot \left[ \frac{p_{cm} \cdot \omega}{m'} - g \cdot (1+n) \right] + \left( g \cdot n - \frac{p_{cm} \cdot \omega}{m'} \right) \cdot \frac{2 \cdot z}{H+h} - \\ &- \frac{2 \cdot A \cdot (H+h)}{m'} \cdot [w'(z)]^2 + \frac{2 \cdot A}{m'} \cdot [w'(z)]^2 \cdot z. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Обозначив

$$\begin{aligned} B &= 2 \cdot \left[ \frac{p_{cm} \cdot \omega}{m'} - g \cdot (1+n) \right]; \quad C = \left( g \cdot n - \frac{p_{cm} \cdot \omega}{m'} \right) \cdot \frac{2}{H+h}; \\ D' &= \frac{2 \cdot A \cdot (H+h)}{m'}; \quad E' = \frac{2 \cdot A}{m'}, \end{aligned} \quad (2.41)$$

уравнение (2.40) приведем к виду:

$$\frac{d[w'(z)]^2}{dz} = B + C \cdot z - D' \cdot [w'(z)]^2 + E' \cdot [w'(z)]^2 \cdot z. \quad (2.42)$$

Обозначив

$$[w'(z)]^2 \equiv W(z), \quad (2.43)$$

представим (2.42) в виде:

$$\frac{dW(z)}{dz} = B + C \cdot z - D' \cdot W(z) + E' \cdot W(z) \cdot z. \quad (2.44)$$

Преобразуем (2.44)

$$\frac{dW(z)}{dz} + (D' - E' \cdot z) \cdot W(z) = B + C \cdot z. \quad (2.45)$$

Выполним замену в (2.45)

$$D' - E' \cdot z = \xi. \quad (2.46)$$

Откуда

$$z = \frac{D' - \xi}{E'}, \quad (2.47)$$

а также

$$\frac{d\xi}{dz} = -E'. \quad (2.48)$$

Можно записать

$$\frac{dW(z)}{dz} = \frac{dW(z)}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dz} = -E' \cdot \frac{dW(z)}{d\xi}. \quad (2.49)$$

Тогда (2.45) можно преобразовать:

$$-E' \cdot \frac{dW(z)}{d\xi} + \xi \cdot W(z) = B + C \cdot \frac{D' - \xi}{E'}, \quad (2.50)$$

или

$$-E' \cdot \frac{dW(z)}{d\xi} + \xi \cdot W(z) = B + \frac{C \cdot D'}{E'} - \frac{C}{E'} \cdot \xi \quad (2.51)$$

и

$$\frac{dW(z)}{d\xi} - \frac{\xi}{E'} \cdot W(z) = -\frac{B}{E'} - \frac{C \cdot D'}{E'^2} + \frac{C}{E'^2} \cdot \xi. \quad (2.52)$$

Обозначим

$$a = -\frac{B}{E'} - \frac{C \cdot D'}{E'^2} \quad (2.53)$$

и (2.52) преобразуем к виду:

$$\frac{dW(z)}{d\xi} - \frac{\xi}{E'} \cdot W(z) = a + \frac{C}{E'^2} \cdot \xi. \quad (2.54)$$

Обозначим  $W(z) = u \cdot v$  и преобразуем (2.54):

$$u'_\xi \cdot v + u \cdot v'_\xi - \frac{\xi}{E'} \cdot u \cdot v = a + \frac{C}{E'^2} \cdot \xi, \quad (2.55)$$

или

$$u'_\xi \cdot v + u \cdot \left( v'_\xi - \frac{\xi}{E'} \cdot v \right) = a + \frac{C}{E'^2} \cdot \xi. \quad (2.56)$$

Из (2.56) следует:

$$\frac{dv}{d\xi} = \frac{\xi}{E'} \cdot v. \quad (2.57)$$

Тогда из (2.57) получаем:

$$\frac{dv}{v} = \frac{\xi}{E'} \cdot d\xi \text{ и } \ln v = \frac{\xi^2}{2E'}, \text{ откуда } v = e^{\frac{\xi^2}{2E'}}. \quad (2.58)$$

С учетом (2.58) выражение (2.56) примет вид:

$$u'_\xi \cdot e^{\frac{\xi^2}{2E'}} = a + \frac{C}{E'^2} \cdot \xi, \text{ или } u'_\xi = e^{-\frac{\xi^2}{2E'}} \cdot \left( a + \frac{C}{E'^2} \cdot \xi \right). \quad (2.59)$$

Воспользуемся начальными условиями

$$W(0) = W_0, \text{ так как } W(\xi), \text{ то } W(D) = W_0. \quad (2.60)$$

$$u(\xi) = a \cdot \int_D^\xi e^{-\frac{\xi^2}{2E'}} \cdot d\xi + \frac{C}{E'^2} \cdot \int_D^\xi \xi \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2E'}} \cdot d\xi + \bar{C}, \quad (2.61)$$

где  $\bar{C} = const$  - определяется из условия  $W(D) = W_0$ .

Из  $W = u \cdot v$  с учетом (2.61)

$$W = u \cdot v = a \cdot e^{\frac{\xi^2}{2E'}} \cdot \int_D^\xi e^{-\frac{\xi^2}{2E'}} \cdot d\xi - \frac{C}{E'} + \bar{C} \cdot e^{\frac{\xi^2}{2E'}} + \frac{C}{E'} \cdot e^{\frac{\xi^2}{2E'}} \cdot e^{-\frac{D^2}{2E'}}. \quad (2.62)$$

Выражение (2.62) преобразовано с учетом

$$\int_D^{\xi} \xi \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2E}} \cdot d\xi = -E \cdot e^{-\frac{\xi^2}{2E}} \Big|_D^{\xi}. \quad (2.63)$$

Определим  $\bar{C}$ , подставив (2.56)  $\xi = D$ ,

$$W_0 = \bar{C} \cdot e^{\frac{D^2}{2E}}, \quad (2.64)$$

откуда

$$\bar{C} = W_0 \cdot e^{-\frac{D^2}{2E}}. \quad (2.65)$$

Выражение (2.62) примет вид:

$$W = a \cdot e^{\frac{\xi^2}{2E}} \cdot \int_D^{\xi} e^{-\frac{\xi^2}{2E}} \cdot d\xi + \frac{C}{E} \cdot \left( e^{\frac{\xi^2 - D^2}{2E}} - 1 \right) + W_0 \cdot e^{\frac{\xi^2 - D^2}{2E}}. \quad (2.66)$$

Введем функцию Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz. \quad (2.67)$$

Тогда (2.66) примет вид:

$$W(\xi) = a \cdot \sqrt{2\pi \cdot E} \cdot e^{\frac{\xi^2}{2E}} \left[ \Phi\left(\frac{\xi}{\sqrt{E}}\right) - \Phi\left(\frac{D}{\sqrt{E}}\right) \right] + \frac{C}{E} \cdot \left( e^{\frac{\xi^2 - D^2}{2E}} - 1 \right) + W_0 \cdot e^{\frac{\xi^2 - D^2}{2E}}, \quad (2.68)$$

где  $\xi = D - E \cdot z$ ,  $a = -\frac{B}{E} - \frac{C \cdot D}{E^2}$ .

Функция Лапласа [82]

$$\int_D^{\xi} e^{-\frac{\xi^2}{2E}} \cdot d\xi = \sqrt{2\pi} \cdot \frac{\sqrt{E}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{\frac{D}{\sqrt{E}}}^{\frac{\xi}{\sqrt{E}}} e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz = \sqrt{2\pi \cdot E} \cdot \left[ \Phi\left(\frac{\xi}{\sqrt{E}}\right) - \Phi\left(\frac{D}{\sqrt{E}}\right) \right], \quad (2.69)$$

где  $\frac{\xi}{\sqrt{E}} = z$ ,  $d\xi = \sqrt{E} \cdot dz$ .

Табличные значения функции Лапласа определяются по [82].

Аналитическое решение уравнения (2.68) с учетом принятого допущения  $\varphi_{cp}(z) = \bar{\varphi}$  в уравнении (2.9) приводит к результатам, на 12÷15% отличающихся от численного решения уравнения (2.1) с помощью компьютерной программы Mathcad при вычислении  $\varphi_{cp}(z)$  по уравнению (2.17). Поэтому для анализа рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока приняты результаты, полученные в результате численного решения дифференциального уравнения (2.1).

### 2.3.2. Численное решение математической модели рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока

Численное решение математической модели рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока с использованием компьютерной программы Mathcad выполняется в следующей последовательности (Приложение Б.1).

Задаются исходные данные:

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| - диаметр подъемной трубы                    | $D$ , м;                         |
| - длина подъемной трубы                      | $H+h$ , м;                       |
| - геометрическое погружение смесителя        | $h$ , м;                         |
| - плотность воды                             | $\rho'$ , кг/м <sup>3</sup> ;    |
| - плотность воздуха при нормальных условиях  | $\rho''_0$ , кг/м <sup>3</sup> ; |
| - атмосферное давление                       | $p_0$ , Па;                      |
| - относительная длина жидкостных пробок      | $\bar{L}_s$ ;                    |
| - ускорение свободного падения               | $g$ , м/с <sup>2</sup> ;         |
| - эквивалентная шероховатость трубы          | $\Delta_s$ , м;                  |
| - приведенная длина первого газового снаряда | $k_{L_{b1}}$ .                   |

Расчет выполняется методом последовательного приближения со следующими этапами:

а) задаются ожидаемым числом  $n$  жидкостных пробок в подъемной трубе длиной  $H+h$  и вычисляют его расчетное значение по уравнению (2.26) с уточнением до выполнения условия  $(H+h)_{расч} \leq H+h$ ;

б) задаются ожидаемым значением удельного расхода воздуха  $q$ , решается дифференциальное уравнение (2.1) и определяется скорость  $w'_m$  жидкостной пробки в выбранном сечении  $z_k$  подъемной трубы;

в) для выбранного сечения  $z_k$  подъемной трубы задаются ожидаемым числом  $m$  жидкостных пробок в подъемной трубе длиной, равной длине ее участка от нижнего торца до сечения  $z_k$ ; число  $m$  ( $i = m$ ) жидкостных пробок уточняется до выполнения условия  $z_{k\ расч} \leq z_k$  при вычислении значения  $z_{k\ расч}$  по выражению, аналогичному выражению (2.26)

$$z_{k\ расч} = L_s \cdot m + L_{b1} + \sum_{i=2}^m L_{bi}; \quad (2.70)$$

г) по вычисленным значениям подачи эрлифта  $Q_э$  (2.29) и расхода воздуха  $Q_в$  (2.30) по выражению (2.13) определяют расчетное значение удельного расхода воздуха  $q_{расч}$ ; в случае необходимости расчет повторяют с пункта б) до достижения (с требуемой точностью) условия  $q = q_{расч}$ .

Решения математической модели рабочего процесса эрлифта выполнены для газожидкостных подъемников, экспериментальные исследования которых были выполнены ранее сотрудниками Донецкого национального технического университета (Донецкого политехнического института) (табл. 2.1).

В результате решения математической модели рабочего процесса эрлифтов, технические характеристики которых приведены в табл. 2.1, как конечные, получены значения подач  $Q_э$  и расходов воздуха  $Q_в$  газожидкостных подъемников при заданных значениях и соотношениях длин жидкостных пробок  $L_s$  и газовых снарядов  $L_b$ .

Результаты численного решения математической модели рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой

водовоздушного потока с использованием компьютерной программы Mathcad приведены в табл. Б.2.1 ... Б.2.7.

Таблица 2.1

Технические характеристики газожидкостных подъемников, используемых для численного решения математической модели рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока

Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Длина подъемной трубы $H+h$ , м	Относительная длина подъемной трубы $(H+h)/D$	Геометрическое погружение смесителя $h$ , м	Относительное погружение смесителя $\alpha$	Источник экспериментальных данных
25	14,0	560,0	5,5	0,393	[31]
50	14,0	280,0	5,5	0,393	
60	16,0	266,7	8,0	0,500	[50]
100	17,5	175,0	8,75	0,500	[32]
150	115,0	766,7	72,0	0,625	
150	63,7	424,7	59,3	0,931	[87]
250	16,0	64,0	8,0	0,500	[88]

Значения вычисленных подач  $Q_3$  эрлифта и расходов воздуха  $Q_6$  в виде зависимости  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  при неизменной величине высоты первого газового снаряда ( $i = 1$ )  $L_{b1} = \text{idem}$ , нанесены на экспериментально полученные расходные характеристики эрлифтов  $Q_3 = f(Q_6)$ , технические данные которых приведены в табл. 2.1 (рис. 2.2 ... 2.8). Длина первого газового снаряда  $L_{b1}$  на рис. 2.2 ... 2.8 выражена значением относительной длины первого газового снаряда  $\bar{L}_{b1} = \frac{L_{b1}}{D} = k_{L_{b1}} \cdot \bar{L}_s$ . На этих же рисунках (рис. 2.2 ... 2.8) приведены графические зависимости  $\bar{L}_s = f(Q_6)$  и  $q = f(Q_6)$  при  $\bar{L}_{b1} = \text{const}$ .

Сравнение расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученных  $Q_3 = f(Q_6)$  зависимостей дает основание утверждать, что точка пересечения этих кривых (рис. 2.2 и рис. Б.3.1 ... Б.3.6) определяет относительную длину жидкостной пробки  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе данного эрлифта, а также значение

удельного расхода воздуха  $q$  в этом режиме работы газожидкостного подъемника.

Так, для эрлифта с диаметром  $D=25$ мм и длиной  $H+h=14,0$ м подъемной трубы, геометрическим погружением смесителя  $h=5,5$ м и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,393$  (рис. 2.2) в точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_6)$  кривых значения расхода воздуха составляет  $Q_6 \approx 0,112$ м<sup>3</sup>/мин ( $1,87 \cdot 10^{-3}$ м<sup>3</sup>/с) и подачи эрлифта  $Q_3 \approx 0,805$ м<sup>3</sup>/ч ( $2,24 \cdot 10^{-4}$ м<sup>3</sup>/с) практически при всех анализируемых значениях относительной длины первого газового снаряда  $\bar{L}_{b1} = 3...7$  [кривые  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  при значениях  $\bar{L}_{b1} = 3, 4, 5$  и  $7$  визуально «наложились» друг на друга]. Допущение о равенстве расхода воздуха  $Q_6$  и подачи эрлифта  $Q_3$  в точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_6)$  кривых при всех анализируемых значениях  $\bar{L}_{b1} = 3, 4, 5$  и  $7$  при принятой методике аналитически-экспериментального исследования приемлемо, и не вносит существенной погрешности в конечные результаты, так как искомые относительные длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  характеризуются определенным диапазоном значений. Более точное определение относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в настоящее время не представляется возможным.

Принятый диапазон значений относительной длины первого газового снаряда  $\bar{L}_{b1} = 3...7$  при анализе режимов работы эрлифта  $D=25$ мм,  $H+h=14,0$ м,  $h=5,5$ м,  $\alpha=0,393$  обосновывается тем, что при значениях  $\bar{L}_{b1}$  меньших, либо больших принятого диапазона или отсутствуют численные решения дифференциального уравнения (2.1) на всем диапазоне длины подъемной трубы  $H+h$ , или решения лишены физического смысла (по значениям относительных расходов воздуха  $q$ , газосодержания  $\varphi$ , скоростей жидкостной пробки в подъемной трубе  $w'$  и др.). Такие варианты решения дифференциального уравнения (2.1) из числа анализируемых исключались.

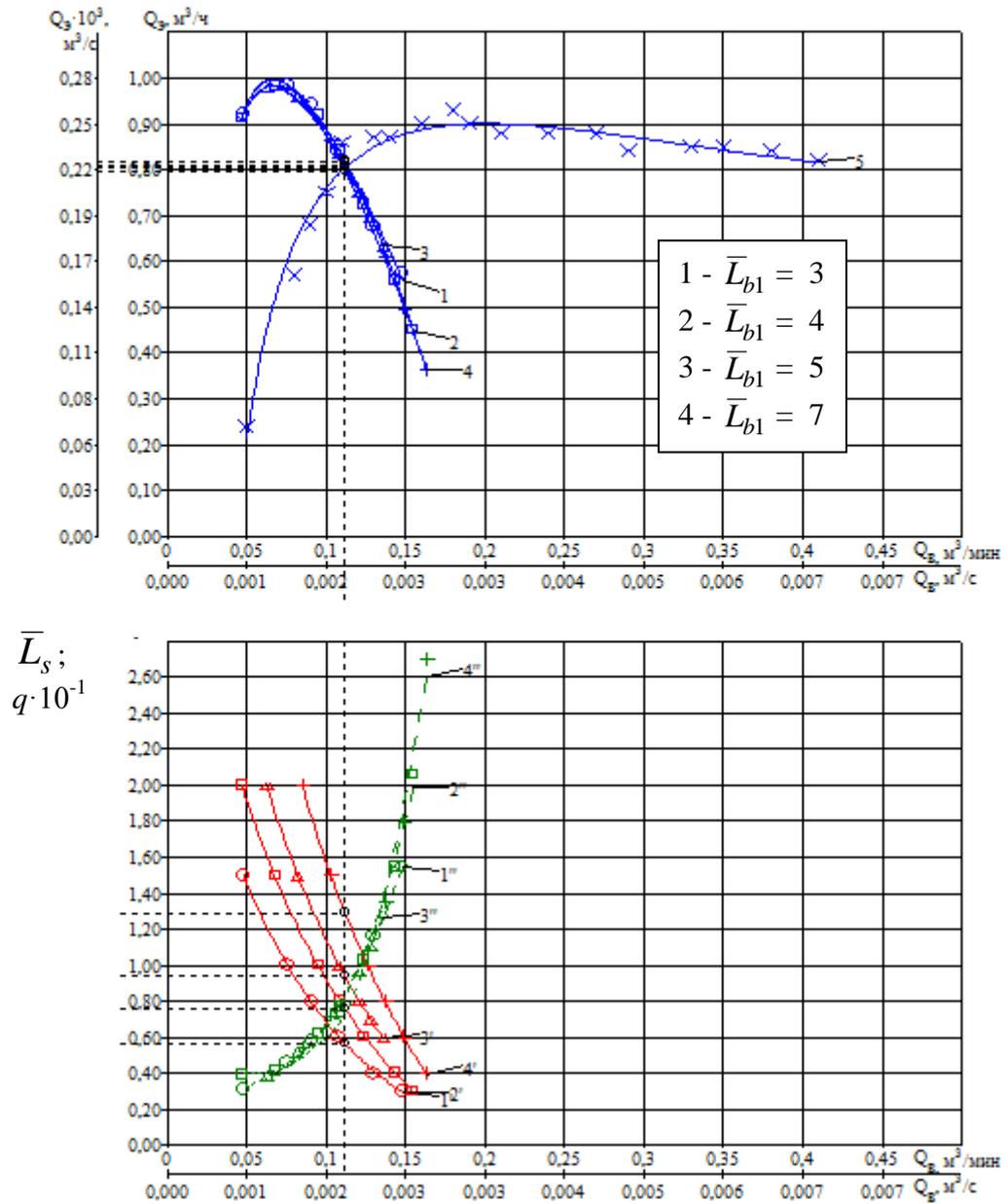


Рис. 2.2 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 25\text{ м}$ ,  $H+h = 14,0\text{ м}$ ,  $h = 5,5\text{ м}$ ,  $\alpha = 0,393$ :

$$1 \div 4 - Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s); 5 - Q_g = f(Q_g); 1' \div 4' - \bar{L}_s = f(Q_g); 1'' \div 4'' - q = f(Q_g)$$

Перечисленные выше допущения [о равенстве расхода воздуха  $Q_e$  и подачи эрлифта  $Q_3$  в точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_e)$  кривых при всех анализируемых значениях  $\bar{L}_{b1}$ , и о принимаемых диапазонах значений относительной длины первого газового снаряда  $\bar{L}_{b1}$ ] принимались и для ряда ниже анализируемых режимов работы эрлифтов.

Значения относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  при расходе воздуха  $Q_e \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ), соответствующем точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_e)$  кривых, составляют (рис. 2.2): при  $\bar{L}_{b1}=3 - \bar{L}_s=0,564$ ; при  $\bar{L}_{b1}=4 - \bar{L}_s=0,757$ ; при  $\bar{L}_{b1}=5 - \bar{L}_s=0,940$ ; при  $\bar{L}_{b1}=7 - \bar{L}_s=1,292$ .

Таким образом, имеются основания утверждать, что для эрлифта  $D=25 \text{ мм}$ ,  $H+h=14,0 \text{ м}$ ,  $h=5,5 \text{ м}$ ,  $\alpha=0,393$  относительная длина жидкостных пробок в подъемной трубе составляет  $\bar{L}_s \approx 0,8 \dots 0,9$  (рис. 2.2). Удельный расход воздуха  $q$  при расходе воздуха  $Q_e \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ), соответствующем точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_e)$  кривых, составляет (рис. 2.2): при  $\bar{L}_{b1} = 3 - q = 8,31$ ; при  $\bar{L}_{b1} = 4 - q = 8,20$ ; при  $\bar{L}_{b1} = 5 - q = 8,37$ ; при  $\bar{L}_{b1} = 7 - q = 7,34$ . Полученный диапазон значений удельного расхода воздуха  $q = 7,34 \dots 8,37$  при относительном погружении смесителя  $\alpha=0,393$  соответствует множественным экспериментальным данным ученых ДонНТУ (ДПИ) [26, 27], что также косвенно подтверждает достоверность результатов проведенных исследований по определению относительной длины жидкостных пробок в подъемной трубе эрлифта.

Результаты анализа гидродинамических параметров рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока рассмотренного выше и аналогично исследованных эрлифтов приведены в таблице 2.2.

Как следует из результатов аналитически-экспериментального исследования эрлифтов с диапазонами диаметров подъемных труб  $D=25 \dots 250$ мм, длин подъемных труб  $H+h=14 \dots 115$ м, относительных погружений смесителя  $\alpha = 0,393 \dots 0,931$  увеличение относительного погружения  $\alpha$  сопровождается ростом относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  (табл. 2.2). Так, при  $\alpha = 0,393$  относительные длины жидкостных пробок составляют  $\bar{L}_s = 0,8 \dots 0,9$  (при  $D=25$ мм) и  $\bar{L}_s = 0,8 \dots 1,0$  (при  $D=50$ мм). При  $\alpha = 0,500$  относительные длины жидкостных пробок составляют  $\bar{L}_s=1,1 \dots 1,3$  (при  $D=60$ мм) и  $\bar{L}_s =1,6 \dots 1,7$  (при  $D=100$ мм), при  $\alpha = 0,625 - \bar{L}_s=14,0 \dots 15,0$  (при  $D=150$ мм), а при  $\alpha = 0,931 - \bar{L}_s = 34,0 \dots 35,0$  (при  $D=150$ мм). Существенно более значительные длины жидкостных пробок при  $D=150$ мм ( $\bar{L}_s=14,0 \dots 15,0$  и  $\bar{L}_s=34,0 \dots 35,0$ ) в сравнении с эрлифтами с другими значениями  $D$  можно объяснить ощутимо большими абсолютными длинами подъемных труб ( $H+h=115$ м и  $H+h=63,7$ м соответственно) при значениях относительных длин подъемных труб  $(H+h)/D = 175,0 \dots 766,7$  для анализируемых эрлифтов с  $D = 25 \dots 150$ мм. Такие результаты не противоречат известным данным многих исследователей [59, 62, 70, 71, 73, 80, 81]. Изложенным известным [59, 62, 70, 71, 73, 80, 81] и полученным в данной работе закономерностям соответствует и значение относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 5,7 \dots 5,8$  для эрлифта с  $D=250$ мм,  $H+h=16,0$ м,  $(H+h)/D=64,0$ м,  $\alpha = 0,500$  (табл. 2.2), хотя и значительно отличается от значений  $\bar{L}_s$  для других эрлифтов с  $\alpha = 0,500$ , что может быть объяснено существенно большим абсолютным значением диаметра подъемной трубы ( $D=250$ мм в сравнении с  $D = 60$ мм и  $100$ мм).

### 2.3.3. Обоснование значений и соотношений длин жидкостных пробок и газовых снарядов в подъемной трубе эрлифта $D = 57\text{мм}$

Как и в разделе 2.3.2, обоснование значений и соотношений длин жидкостных пробок и газовых снарядов в подъемной трубе выполнено аналитически-экспериментальным методом с использованием математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока (разделы 2.2 и 2.3.2) и результатов экспериментальных исследований эрлифта с диаметром  $D = 57\text{мм}$  и длиной  $H+h=2,57\text{м}$  подъемной трубы, геометрическим погружением смесителя  $h=0,93\text{м}$  и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,362$  (раздел 4).

Экспериментальные расходные характеристики эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при его традиционном способе работы (рис. 2.9, кривая 1) и при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1$  ( $t_{откр}$  – время, в течение которого регулирующий клапан на воздухопроводе эрлифтной установки открыт;  $t_{закр}$  – время, в течение которого регулирующий клапан на воздухопроводе эрлифтной установки закрыт, раздел 4) (рис. 2.9, кривая 2) практически неотличимы («наложение характеристик»). В связи с визуальной количественной незначительностью расхождений расходных характеристик 1 и 2 (рис. 2.9) статистическое исследование этих расхождений не выполнялось, а для дальнейшего анализа параметров рабочего процесса экспериментально исследуемого эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  в качестве расходной характеристики традиционно работающего газожидкостного подъемника использована экспериментальная зависимость 2 (рис. 2.9).

Таблица 2.2

Значения гидродинамических параметров эрлифтов в точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученных  $Q_3 = f(Q_6)$  кривых

Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Длина подъемной трубы $H+h$ , м	Относительная длина подъемной трубы $(H+h)/D$	Геометрическое погружение смесителя $h$ , м	Относительное погружение смесителя $\alpha$	Расход воздуха $Q_6$ , м <sup>3</sup> /мин (м <sup>3</sup> /с)	Подача эрлифта $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч (м <sup>3</sup> /с)	Относительная длина первого газового снаряда $\bar{L}_{bl}$	Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Осредненное значение $\bar{L}_s$	Удельный расход воздуха $q$	Графическая зависимость (№ рис.)	Источник экспериментальных данных
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	14,0	560,0	5,5	0,393	0,112 ( $1,87 \cdot 10^{-3}$ )	0,805 ( $2,24 \cdot 10^{-4}$ )	3	0,564	0,8÷0,9	8,31	рис.2.2	[31]
							4	0,757		8,20		
							5	0,940		8,37		
							7	1,29		7,34		
50	14,0	280,0	5,5	0,393	0,730 (0,0122)	4,650 ( $1,29 \cdot 10^{-3}$ )	3	0,496	0,8÷1,0	9,37	рис.2.3	[31]
							4	0,655		9,44		
							5	0,818		9,36		
							7	1,11		9,37		
							9	1,42		8,81		

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
60	16,0	266,7	8,0	0,500	1,300 (0,0217)	9,828 (0,00273)	3	0,677	1,1÷1,3	7,98	рис.2.4	[50]
							4	0,888		8,04		
							5	1,10		8,11		
							7	1,50		7,95		
							9	1,90		7,98		
100	17,5	175,0	8,75	0,500	4,600 (0,0767)	46,20 (0,0128)	3	0,949	1,6÷1,7	5,71	рис.2.5	[32]
							4	1,24		5,89		
							5	1,54		6,00		
							7	2,09		6,11		
							9	2,59		6,26		
150	115,0	766,7	72,0	0,625	7,150 (0,119)	116,5 (0,0324)	4	9,01	14,0÷15,0	3,56	рис.2.6	
							6	12,9		3,73		
							8	15,9		3,96		
							10	19,0		4,07		
150	63,7	424,7	59,3	0,931	3,750 (0,0625)	191,4 (0,0532)	4	23,8	34,0÷35,0	1,09	рис.2.7	[87]
							6	32,0		1,18		
							8	38,2		1,27		
							10	43,7		1,36		
250	16,0	64,0	8,0	0,500	8,50 (0,142)	140,1 (0,0389)	12	5,72	5,7÷5,8	3,22	рис.2.8	[88]
							14	5,78		3,72		
							16	5,83		4,21		

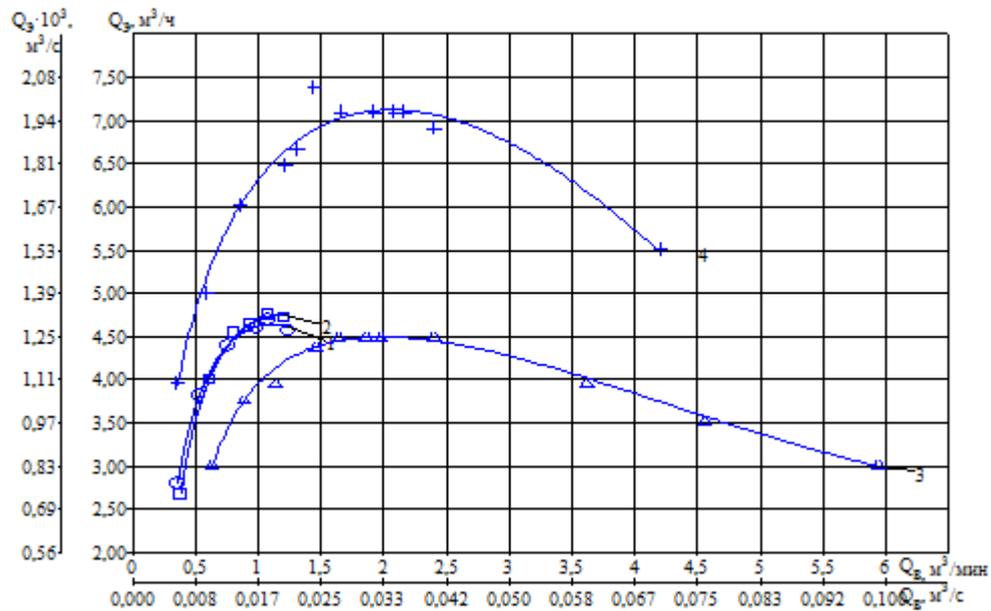


Рис. 2.3 – Экспериментальные расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6, \alpha)$  эрлифтов: традиционно работающих **1** –  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha = 0,362$ ; **3** и **4** –  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,310$  (кривая 3) и  $\alpha=0,400$  (кривая 4) ( $h=4,96\text{м}$  и  $h=6,40\text{м}$  соответственно) [50]; при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/1$  **2** –  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$ .

Для подтверждения достоверности экспериментальных расходных характеристик эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  (кривые 1, 2, рис. 2.3) на этом же графическом поле приведены ранее полученные в ДонНТУ (ДПИ) экспериментальные расходные характеристики эрлифта с близким к исследуемому диаметром подъемной трубы  $D=60\text{мм}$  и относительными погружениями смесителя  $\alpha=0,310$  (кривая 3) и  $\alpha=0,400$  (кривая 4) ( $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=4,96\text{м}$  и  $h=6,40\text{м}$  соответственно) [50]. Даже при существенном отличии в длине подъемных труб эрлифтов с диаметрами  $D=57\text{мм}$  ( $H+h=2,57\text{м}$ ) и  $D=60\text{мм}$  ( $H+h=16,0\text{м}$ ), графические расходные характеристики этих эрлифтов (кривые 1 ... 4, рис. 2.3) располагаются на координатном поле  $Q_6 - Q_3$  пропорционально относительным погружениям  $\alpha$  их смесителей. Это является одним из доказательств достоверности результатов экспериментальных исследований, проведенных в объеме данной диссертационной работы.

Для большей наглядности графического отображения (укрупнения масштаба графических зависимостей) проводимого в данном разделе анализа рабочего процесса эрлифта с целью обоснования значений и соотношений длин жидкостных пробок и газовых снарядов в подъемной трубе  $D=57\text{мм}$  на последующих используемых рисунках (рис. 2.4 ... 2.7) приведены начальные (по расходам воздуха и подачам) фрагменты расходных характеристик  $Q_3 = f(Q_6, \alpha)$  эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,310$  и  $\alpha=0,400$ .

Для аналитико-экспериментального определения значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  выполнено численное решение математической модели рабочего процесса эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока с использованием компьютерной программы Mathcad, результаты которого приведены в табл. Б.2.8.

Как и в разделе 2.3.2, значения вычисленных подач  $Q_3$  эрлифта и расходов воздуха  $Q_6$  в виде зависимости  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  при неизменной величине высоты первого газового снаряда ( $i=1$ )  $L_{b1}=\text{idem}$ , нанесены на экспериментально полученные расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6)$  эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  (рис. 2.4). Причем, на рис. 2.4 кроме расходной характеристики  $Q_3 = f(Q_6)$  традиционно работающего эрлифта (кривая 1), приведены расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6)$  эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха (кривые 2 ... 4; кривая 2 – дискретная подача сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5$ ; кривая 3 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2$ ; кривая 4 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2,5$ ). На этом же рисунке (рис. 2.4) приведены графические зависимости  $\bar{L}_s = f(Q_6)$  и  $q = f(Q_6)$  при  $\bar{L}_{b1} = \text{const}$ .

По аналогии с методикой, обоснованной в разделе 2.3.2, правомерно утверждать, что точка пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученных  $Q_3 = f(Q_6)$  кривых эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  определяет относительную длину жидкостной

пробки  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе данного эрлифта, а также значение удельного расхода воздуха  $q$  в этом режиме работы газожидкостного подъемника.

Для наглядности графической иллюстрации полученных результатов (укрупнения масштаба изображения) графические зависимости на рис. 2.5 и рис. 2.6 по сравнению с графическими зависимостями на рис. 2.4 приведены без кривых  $q = f(Q_g)$ . Для традиционно работающего эрлифта с диаметром  $D=57$ мм и длиной  $H+h=2,57$ м подъемной трубы, геометрическим погружением смесителя  $h=0,93$ м и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,362$  (рис. 2.5) в точке пересечения расчетных  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_g = f(Q_g)$  кривых осредненные значения расхода воздуха составляет  $Q_g \approx 0,950$ м<sup>3</sup>/мин ( $1,58 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с) и подачи эрлифта  $Q_g \approx 4,659$ м<sup>3</sup>/ч ( $1,29 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с) при значениях относительной длины первого газового снаряда  $\bar{L}_{b1} = 2 \dots 15$  (табл. 2.3).

Осредненное значение относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  при расходе воздуха  $Q_g \approx 0,950$ м<sup>3</sup>/мин ( $1,58 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с), соответствующем точке пересечения расчетных  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_g = f(Q_g)$  кривых традиционно работающего эрлифта, составляет 0,65 ... 0,75 (рис. 2.5, табл. 2.3).

По аналогии для эрлифта с диаметром  $D=57$ мм и длиной  $H+h=2,57$ м подъемной трубы, геометрическим погружением смесителя  $h=0,93$ м и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,362$  при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$  (рис. 2.6) в точке пересечения расчетных  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученных  $Q_g = f(Q_g)$  кривых осредненные значения расхода воздуха составляет  $\bar{Q}_g \approx 0,840$ м<sup>3</sup>/мин ( $1,40 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с) и подачи эрлифта  $\bar{Q}_g \approx 5,433$ м<sup>3</sup>/ч ( $1,51 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с) при значениях относительной длины первого газового снаряда  $\bar{L}_{b1} = 2 \dots 15$  (табл. 2.4).

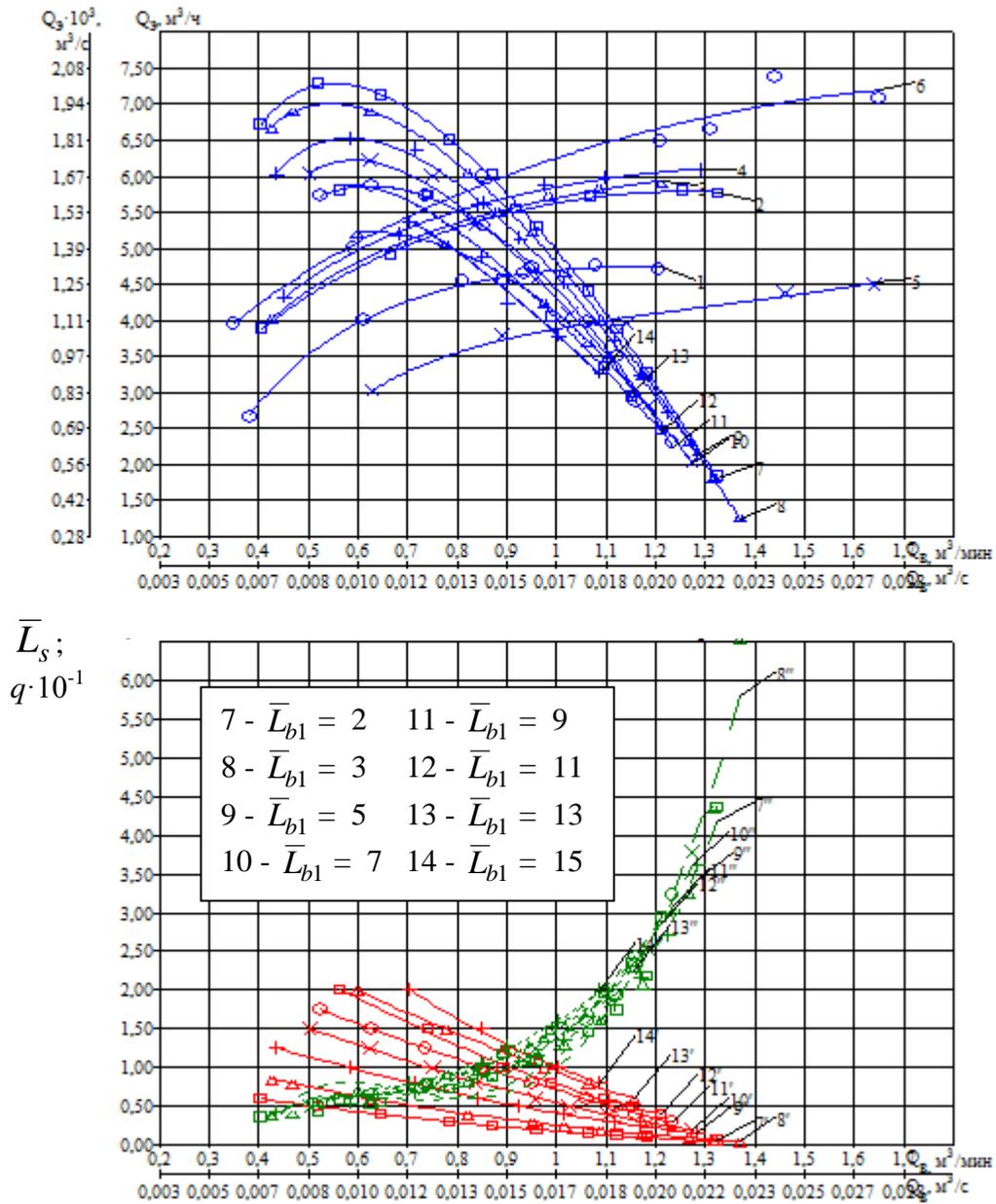


Рис. 2.4 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$ :

- 1÷4 –  $Q_3 = f(Q_6)$  эрлифта  $D=57\text{мм}$  (1 – традиционно работающий эрлифт; 2 – дискретная подача сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5$ ; 3 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2$ ; 4 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2,5$ ); 5 ... 6 – фрагмент характеристик  $Q_3 = f(Q_6)$  эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,310$  (кривая 5) и  $\alpha=0,400$  (кривая 6) ( $h=4,96\text{м}$  и  $h=6,40\text{м}$  соответственно) [50]; 7 ... 14 –  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ ; 7' ... 14' –  $\bar{L}_s = f(Q_6)$ ; 7'' ... 14'' –  $q = f(Q_6)$

Следует отметить, что экспериментально полученные расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6)$  эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при дискретной подаче сжатого воздуха в диапазоне периодов  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}}=1/1,5 \dots 1/2,5$  (кривые 2 ... 4, рис. 2.6) характеризуются, для проводимого вида исследования, незначительным отличием величин подач  $Q_3$  при одних и тех же расходах воздуха  $Q_6$ . Поэтому для рассматриваемого случая анализ по определению осредненного значения относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в эрлифте  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при дискретной подаче сжатого воздуха в диапазоне периодов  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}}=1/1,5 \dots 1/2,5$  выполнен исходя из осредненного значения подачи  $\bar{Q}_3 \approx 5,433\text{м}^3/\text{ч}$  ( $1,51 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) для всех трех характеристик (кривые 2 ... 4, рис. 2.6).

Исходя из изложенного, осредненное значение относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта при расходе воздуха  $\bar{Q}_6 \approx 0,840\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ), соответствующем точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученных  $Q_3 = f(Q_6)$  кривых при дискретной подаче сжатого воздуха в диапазоне периодов  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}}=1/1,5 \dots 1/2,5$ , составляет 0,85 ... 0,95 (рис. 2.6, табл. 2.4).

Удельные расходы воздуха в исследованных режимах работы эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  составляют (рис. 2.4, табл. 2.3, 2.4): при традиционной работе  $q=10 \dots 12$ , при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}}=1/1,5 \dots 1/2,5$   $q = 8 \dots 10$ .

Адекватность разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта подтверждается результатами экспериментальных исследований (раздел 4) с точностью 35 ... 40%, что является приемлемым результатом для рассматриваемых процессов.

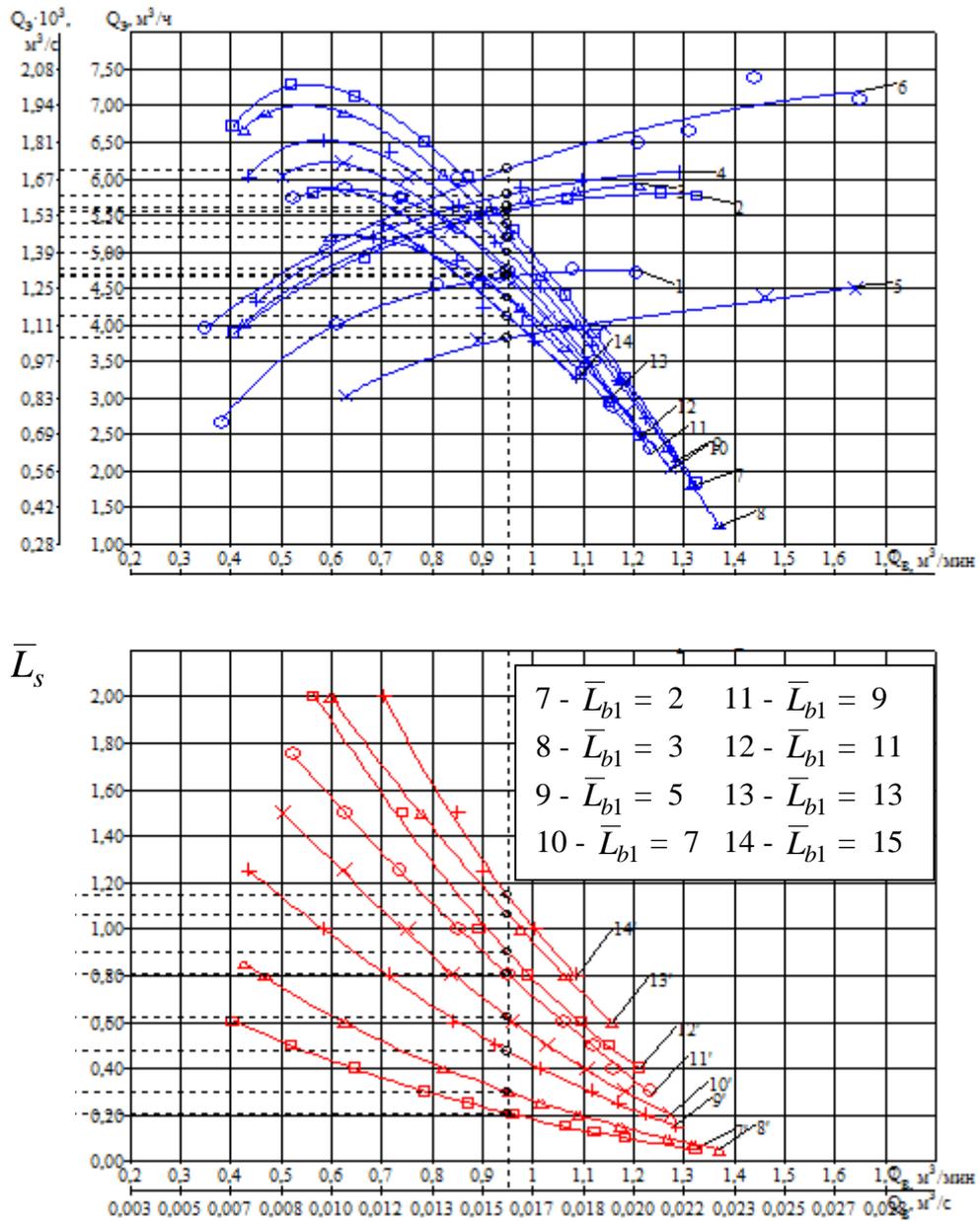


Рис. 2.5 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$

и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  для традиционно работающего эрлифта

$$D=57\text{мм}, H+h=2,57\text{м}, h=0,93\text{м}, \alpha=0,362:$$

- 1 ... 4 –  $Q_9 = f(Q_8)$  эрлифта  $D=57\text{мм}$  (1 – традиционно работающий эрлифт;  
 2 – дискретная подача сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5$ ;  
 3 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2$ ; 4 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2,5$ ); 5 ... 6 – фрагмент характеристик  $Q_9 = f(Q_8)$   
 эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,310$  (кривая 5) и  $\alpha=0,400$  (кривая 6) ( $h=4,96\text{м}$   
 и  $h=6,40\text{м}$  соответственно) [50]; 7 ... 14 –  $Q_9 = f(Q_8, \bar{L}_s)$ ; 7' ... 14' –  $\bar{L}_s = f(Q_8)$

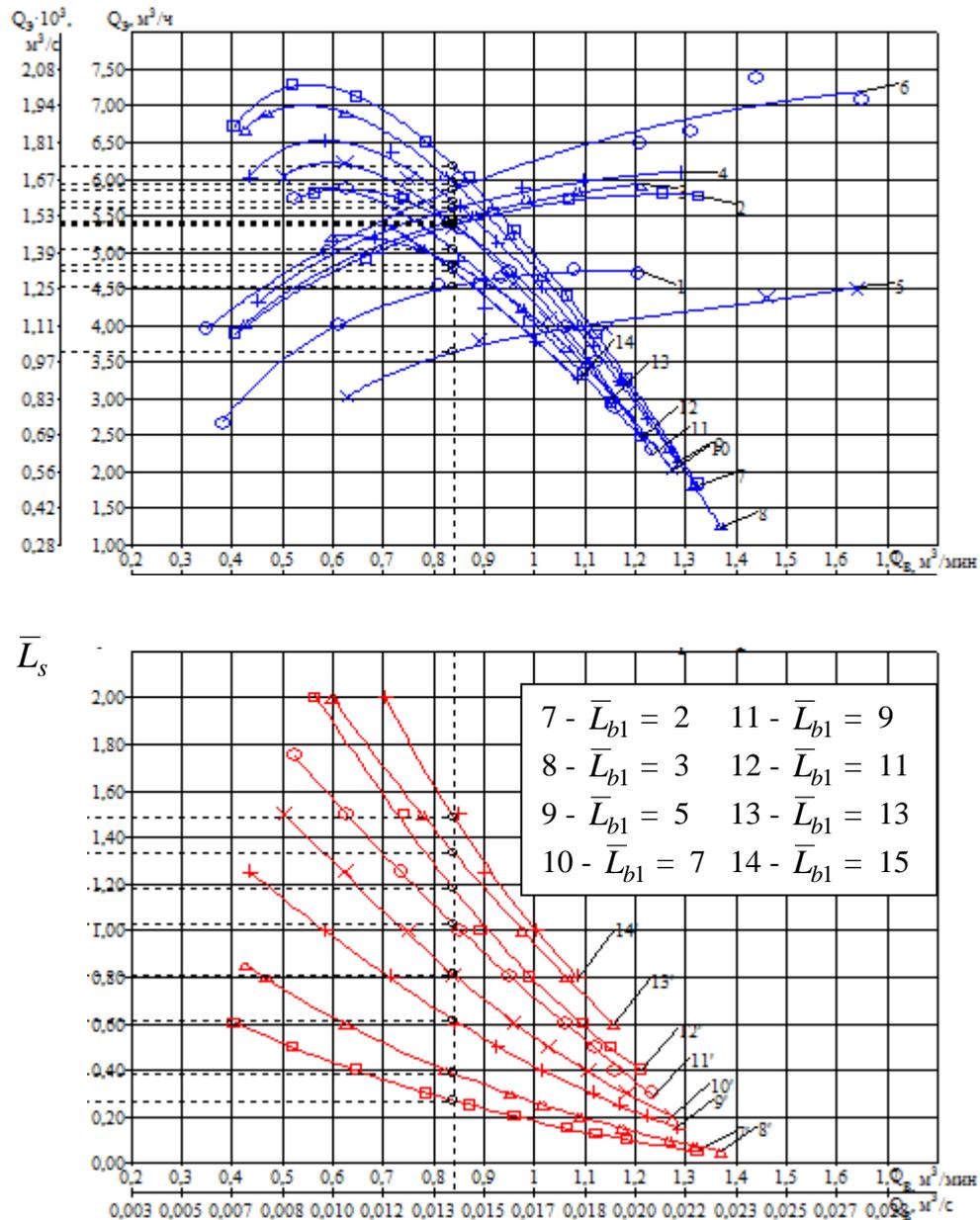


Рис. 2.6 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5 \dots 1/2,5$ :  
 1 ... 4 –  $Q_g = f(Q_g)$  эрлифта  $D=57\text{мм}$  (1 – традиционно работающий эрлифт;  
 2 – дискретная подача сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5$ ;  
 3 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2$ ; 4 –  $t_{откр}/t_{закр}=1/2,5$ ); 5 ... 6 – фрагмент характеристик  $Q_g = f(Q_g)$   
 эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,310$  (кривая 5) и  $\alpha=0,400$  (кривая 6)  
 ( $h=4,96\text{м}$  и  $h=6,40\text{м}$  соответственно) [50]; 7 ... 14 –  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ ;  
 7' ... 14' –  $\bar{L}_s = f(Q_g)$

Таблица 2.3

Значения гидродинамических параметров традиционно работающего эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  в точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_6)$  кривой (рис. 2.5)

Расход воздуха $\bar{Q}_6, \text{м}^3/\text{мин} (\text{м}^3/\text{с})$	Подача эрлифта $\bar{Q}_3, \text{м}^3/\text{ч} (\text{м}^3/\text{с})$	Относительная длина первого газового снаряда $\bar{L}_{bl}$	Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Осредненное значение $\bar{L}_s$	Удельный расход воздуха $q$
0,950 (0,0158)	4,659 (0,00129)	2	0,207	0,65÷0,75	10÷12
		3	0,299		
		5	0,474		
		7	0,621		
		9	0,807		
		11	0,901		
		13	1,065		
		15	1,146		

Таблица 2.4

Значения гидродинамических параметров эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  в точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_6)$  кривой при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5 \dots 1/2,5$  (рис. 2.6)

Расход воздуха $\bar{Q}_6, \text{м}^3/\text{мин} (\text{м}^3/\text{с})$	Подача эрлифта $\bar{Q}_3, \text{м}^3/\text{ч} (\text{м}^3/\text{с})$	Относительная длина первого газового снаряда $\bar{L}_{bl}$	Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Осредненное значение $\bar{L}_s$	Удельный расход воздуха $q$
0,840 (0,0140)	5,433 (0,00151)	2	0,269	0,85÷0,95	8÷10
		3	0,387		
		5	0,614		
		7	0,811		
		9	1,028		
		11	1,180		
		13	1,336		
		15	1,489		

## 2.4. Выводы

1. Разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющая учитывать влияние длины жидкостных пробок  $L_s$  и газовых снарядов  $L_b$  в подъемной трубе на режимы работы газожидкостного подъемника.

2. Предложен аналитико-экспериментальный метод определения значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_b$  путем сравнения расчетных  $Q_9 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученных  $Q_9 = f(Q_6)$  зависимостей.

3. Установлено для эрлифтов с диапазонами диаметров подъемных труб  $D=25 \dots 250$ мм, длин подъемных труб  $H+h=14 \dots 115$ м, относительных погружений смесителя  $\alpha = 0,393 \dots 0,931$  значения относительных длин жидкостных пробок:  $\bar{L}_s=0,8 \dots 0,9$  при  $\alpha = 0,393$  и  $D=25$ мм;  $\bar{L}_s=0,8 \dots 1,0$  при  $\alpha = 0,393$  и  $D=50$ мм;  $\bar{L}_s=1,1 \dots 1,3$  при  $\alpha = 0,500$  и  $D=60$ мм;  $\bar{L}_s=1,6 \dots 1,7$  при  $\alpha = 0,500$  и  $D=100$ мм;  $\bar{L}_s=14,0 \dots 15,0$  при  $\alpha = 0,625$  и  $D=150$ мм;  $\bar{L}_s=34,0 \dots 35,0$  при  $\alpha = 0,931$  и  $D=150$ мм;  $\bar{L}_s=5,7 \dots 5,8$  при  $\alpha = 0,500$  и  $D=250$ мм.

4. Определено, что для традиционно работающего эрлифта  $D=57$ мм,  $H+h=2,57$ м,  $h=0,93$ м,  $\alpha=0,362$  осредненное значение относительной длины жидкостных пробок составляет  $\bar{L}_s = 0,65 \dots 0,75$ . Для этого же эрлифта при дискретной подаче сжатого воздуха в диапазоне периодов  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5 \dots 1/2,5$  осредненное значение относительной длины жидкостных пробок составляет  $\bar{L}_s = 0,85 \dots 0,95$ . Адекватность математической модели рабочего процесса эрлифта с раздельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока подтверждена результатами экспериментальных исследований. Расхождение аналитических и экспериментальных данных составляет  $35 \dots 40\%$ , что приемлемо для рассматриваемых процессов.

## РАЗДЕЛ 3

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С РАЗДЕЛЬНОЙ  
СНАРЯДНОЙ СТРУКТУРОЙ ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА

## 3.1. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры

## газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока

Аналитическое исследование гидродинамических параметров, в том числе количественно характеризующих энергетическое совершенство рабочего процесса эрлифта со снарядным водовоздушным потоком требует математической модели, позволяющей учесть влияние, в первую очередь, длины жидкостных пробок в подъемной трубе на эффективность работы газожидкостного подъемника.

Математическое моделирование рабочих процессов гидропневматических машин и аппаратов, к которым относится и эрлифт, базируется на использовании фундаментальных уравнений сохранения - массы и количества движения [59, 62, 80, 81, 93].

Применительно к вертикальному восходящему газожидкостному снарядному потоку двухкомпонентной модели (при известных допущениях) уравнения сохранения могут быть представлены в следующем виде [36, 93]:

- уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_1\rho_1 + R_2\rho_2) + \frac{\partial}{\partial z}(R_1\rho_1w_1 + R_2\rho_2w_2) = 0, \quad (3.1)$$

где  $R_k$  – относительная часть площади поперечного сечения вертикальной трубы  $\omega$ , занимаемая фазой  $k$ ;  $w_k$  – компонента вектора скорости  $\mathbf{v}_k$  по вертикальной оси  $z$ ;  $\rho_k$  и  $\mathbf{v}_k$  – плотность и вектор скорости фаз  $k$  ( $k = 1; 2$ );  $t$  – время;

- уравнение сохранения количества движения

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (R_1 \rho_1 w_1 + R_2 \rho_2 w_2) + \frac{\partial}{\partial z} (R_1 \rho_1 w_1^2 + R_2 \rho_2 w_2^2) - (R_1 \rho_1 + R_2 \rho_2) F_z + \frac{\partial p}{\partial z} = \\ & = \frac{1}{\omega} \sum_{k=1,2} \int_{c_k(z,t)} \overline{\mathbf{n}_z \cdot (\mathbf{n}_k \cdot \boldsymbol{\tau}_k) \frac{dc}{\mathbf{n}_k \cdot \mathbf{n}_{kc}}}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где  $F_z$  – проекция единичной массовой силы на ось  $z$ ;  $p$  – давление;  $\omega$  – площадь поперечного сечения трубы;  $\mathbf{n}_z$  – единичный вектор по направлению оси  $z$ ;  $\mathbf{n}_k$  – единичный вектор нормали в заданной точке поверхности;  $\mathbf{n}_{kc}$  – единичный вектор, расположенный в плоскости поперечного сечения  $\omega_k(z,t)$  и направленный от фазы  $k$  в точке пересечения поверхности раздела  $\omega_i(z,t)$  и плоскости поперечного сечения  $\omega_k(z,t)$ ;  $\omega_k(z,t)$  – занимаемая фазой  $k$  часть площади поперечного сечения трубы  $\omega$ ;  $\omega_i(z,t)$  – поверхность раздела фаз;  $\boldsymbol{\tau}_k$  – тензор вязкостных напряжений;  $c(z,t)$  – граница между фазами в поперечном сечении трубы  $\omega$ ;  $c_k(z,t)$  – границы между фазами и стенкой трубы в поперечном сечении  $\omega$ .

Горизонтальная линия над членами правой части уравнения (3.2) означает оператор осреднения по времени.

Двухкомпонентная модель снарядного газожидкостного потока предполагает количественную оценку газосодержания через его истинное значение  $\varphi$ , а потерь на трение – через касательное напряжение на внутренней стенке подъемной трубы  $\tau_w$ .

Упрощенные уравнения сохранения для двухкомпонентной модели получим из уравнений для двухфазной смеси (3.1) и (3.2) [36, 93]. Для этого примем  $R_1 \equiv 1 - \varphi$ ,  $R_2 \equiv \varphi$  (индекс 1 относится к жидкой фазе, индекс 2 – к газообразной). Единичная массовая сила в рассматриваемых условиях  $F_z \equiv -g$ , где  $g$  – ускорение свободного падения. Член правой части уравнения (3.2), выражающий потери давления не преодоление сил трения, обозначим через  $(-\chi \cdot \tau_w / \omega)$ , где  $\chi$  – периметр поперечного сечения трубы.

Тогда уравнение неразрывности движения для снарядной структуры

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1 - \varphi) \rho_1 + \varphi \rho_2] + \frac{\partial}{\partial z} [(1 - \varphi) \rho_1 w_1 + \varphi \rho_2 w_2] = 0, \quad (3.3)$$

Уравнение неразрывности движения для снарядной структуры установившегося потока

$$(1 - \varphi)\rho_1 w_1 + \varphi\rho_2 w_2 = G = const, \quad (3.4)$$

где  $G$  – приведенная массовая скорость водовоздушной смеси.

Уравнение количества движения для смеси в установившихся условиях

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d}{dz} \left[ (1 - \varphi)\rho_1 w_1^2 + \varphi\rho_2 w_2^2 \right] - [(1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2]g. \quad (3.5)$$

Из (3.5) видно, что полные потери давления  $dp/dz$  складываются из составляющих потерь на трение  $(dp/dz)_{mp}$ , инерционной  $(dp/dz)_{уск}$  и гидростатической  $(dp/dz)_g$  составляющей, т.е. уравнение (3.5) можно представить в виде

$$\frac{dp}{dz} = \left( \frac{dp}{dz} \right)_{mp} + \left( \frac{dp}{dz} \right)_{уск} + \left( \frac{dp}{dz} \right)_g, \quad (3.6)$$

Интегрирование уравнения (3.6) выполняется в пределах длины подъемной трубы эрлифта  $0 \leq z \leq H+h$ .

Используя уравнение неразрывности (3.3) или (3.4) [в рассматриваемом случае – (3.4)] и количества движения (3.5) можно получить уравнение стационарного восходящего движения водовоздушной смеси в вертикальной трубе для двухкомпонентного течения в виде [59, 62, 80]

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4 \cdot \tau_w(z)}{D} + \frac{d}{dz} \{G''(z) \cdot w''(z) \cdot \varphi(z) + G'(z) \cdot w'(z) \cdot [1 - \varphi(z)]\} + \rho_{см}(z) \cdot g, \quad (3.7)$$

где  $D$  – диаметр подъемной трубы;  $G'(z)$  и  $G''(z)$  – массовые скорости соответственно жидкости и газа;  $\rho_{см}(z)$  – плотность водовоздушной смеси.

С учетом известных зависимостей [83], описывающих:

- массовые скорости газообразной  $G''(z)$  и жидкостной  $G'(z)$  фаз

$$G''(z) = \frac{Q_g \cdot \rho_0''}{\omega \cdot \varphi(z)} = \frac{G \cdot x}{\varphi(z)}, \quad G'(z) = \frac{Q_g \cdot \rho'}{\omega \cdot [1 - \varphi(z)]} = \frac{G \cdot (1 - x)}{1 - \varphi(z)}, \quad (3.8)$$

где  $Q_в$  – объемный расход воздуха при нормальных условиях;  $Q_э$  – объемная подача эрлифта;  $\rho_0''$  – плотность воздуха при нормальных условиях;  $\rho'$  – плотность воды;  $x$  – массовое расходное газосодержание;

- плотность водовоздушной смеси

$$\rho_{см}(z) = \varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho', \quad (3.9)$$

где  $\rho''(z)$  - плотность воздуха в сечении  $z$ ;

- действительные скорости фаз в подъемной трубе:

воды

$$w'(z) = \frac{Q_э}{\omega \cdot [1 - \varphi(z)]}; \quad (3.10)$$

воздуха

$$w''(z) = \frac{Q_в(z)}{\omega \cdot \varphi(z)}; \quad (3.11)$$

- абсолютное давление в сечении  $z$  подъемной трубы (при допущении линейности изменения давления по высоте трубы)

$$p_a(z) = p_0 + p_{см} \cdot \left(1 - \frac{z}{H + h}\right), \quad (3.12)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление;  $p_{см}$  – избыточное давление в смесителе (при  $z = 0$  абсолютное давление в смесителе  $p_{a см} = p_0 + p_{см}$ );

- объемный расход воздуха в  $z$ -ом сечении подъемной трубы при изотермическом процессе изменения состояния газовой фазы

$$Q_в(z) = Q_в \cdot \frac{p_0}{p_a(z)}, \quad (3.13)$$

после интегрирования (3.7) можно получить

$$\begin{aligned} p_{см} \frac{z_i}{H + h} = & \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_{см}(z) dz + G \cdot [x \cdot w''(z) + (1 - x) \cdot w'(z)]_0^{z_i} + \\ & + g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz \end{aligned} \quad (3.14)$$

Из ряда зависимостей для определения истинного газосодержания  $\varphi(z)$  [61, 62, 64, 81, 86], для решаемой задачи его целесообразно определить по выражению [62]

$$\varphi(z) = \frac{Q_g(z)}{C_1 \cdot [Q_g(z) + Q_3] + C_2 \cdot \omega \cdot w_{\infty}''(z)}, \quad (3.15)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  коэффициенты;  $C_1 = 1,2$ ,  $C_2 = 1 + 8e^{-1,06L_s/D}$  при  $Re_{см} > 8000$ ;  $L_s/D$  – относительная длина жидкостной пробки.

Выражение для касательного напряжения на внутренней стенке подъемной трубы [62] в качестве одного из аргументов содержит истинное газосодержание  $\varphi(z)$ , определяемое с учетом взаимовлияния газожидкостных образований снарядной структуры водовоздушного потока

$$\tau_w(z) = [1 - \varphi(z)] \cdot \lambda(z) \cdot \frac{\rho' \cdot [w_{см}(z)]^2}{8}, \quad (3.16)$$

где  $\lambda(z)$  – коэффициент гидравлического трения [84],

$$\lambda(z) = 0,11 \left( \frac{\Delta_3}{D} + \frac{68}{Re_{см}(z)} \right)^{0,25}, \quad (3.17)$$

здесь  $\Delta_3$  – эквивалентная шероховатость;

$Re$  – критерий Рейнольдса двухфазной смеси,

$$Re_{см}(z) = \frac{w_{см}(z) \cdot D \cdot \rho_{см}(z)}{\mu_{см}}, \quad (3.18)$$

$w_{см}(z)$  – приведенная скорость водовоздушной смеси,

$$w_{см}(z) = \frac{Q_3 + Q_g(z)}{\omega}; \quad (3.19)$$

$\mu_{см}$  – динамическая вязкость двухфазной смеси,

$$\frac{1}{\mu_{см}} = \frac{1}{\mu''} + \frac{1-x}{\mu'}, \quad (3.20)$$

здесь  $\mu'$  – динамическая вязкость воды;

$\mu''$  – динамическая вязкость воздуха.

Таким образом, вычисленные по (3.15) истинное газосодержание  $\varphi(z)$  и по (3.16) касательное напряжение  $\tau_w(z)$  зависят, в том числе, и от относительной длины жидкостной пробки  $L_s/D$ . Это позволит установить влияние параметра  $L_s/D$  на эффективность работы эрлифта и определить рациональный диапазон значений  $L_s/D$  для исследуемого класса газожидкостных подъемников (диаметров  $D$  и  $H+h$  длин подъемных труб, погружений смесителей  $h$ ).

Для возможности анализа энергетической эффективности работы эрлифта необходимо знать затратные составляющие давлений и мощностей газожидкостного потока в подъемной трубе, для чего воспользуемся зависимостями [83]:

- суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ ,

$$p_{\Sigma i} = p_{a\text{см}} - p_a(z_i) = p_{\text{см}} \frac{z_i}{H+h}, \quad (3.21)$$

или

$$p_{\Sigma i} = p_{\text{тп}i} + p_{\text{уск}i} + p_{\text{г}i}, \quad (3.22)$$

где  $p_{\text{тп}i}$  – перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленный трением,

$$p_{\text{тп}i} = \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz; \quad (3.23)$$

$p_{\text{уск}i}$  – перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленный ускорением,

$$p_{\text{уск}i} = G \cdot [x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z)]_0^{z_i}; \quad (3.24)$$

$p_{\text{г}i}$  – перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленный силой тяжести

$$p_{\text{г}i} = g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz; \quad (3.25)$$

$Q_{\text{ср}i}$  – средний объемный расход водовоздушной смеси на участке подъемной трубы длиной  $z_i$

$$Q_{cpi} = \frac{1}{z_i} \cdot \int_0^{z_i} Q(z) dz = \frac{1}{z_i} \cdot \int_0^{z_i} \frac{G \cdot \omega}{\rho_{cm}(z)} dz = \frac{G \cdot \omega}{z_i} \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{cm}(z)}; \quad (3.26)$$

$N_{\Sigma i}$  – суммарная мощность, необходимая для компенсации потерь на трение, ускорение (инерционная составляющая) и гравитационной составляющей при движении водовоздушного потока со средним объемным расходом  $Q_{cpi}$  по участку вертикальной подъемной трубы длиной  $z_i$

$$N_{\Sigma i} = p_{\Sigma i} \cdot Q_{cpi} = p_{cm} \cdot \frac{G \cdot \omega}{H + h} \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{cm}(z)}, \quad (3.27)$$

или

$$N_{\Sigma i} = N_{mpi} + N_{уски} + N_{gi}; \quad (3.28)$$

здесь  $N_{mpi}$  – мощность, необходимая для компенсации потерь на трение на участке подъемной трубы длиной  $z_i$

$$N_{mpi} = p_{mpi} \cdot Q_{cpi} = \frac{4 \cdot G \cdot \omega}{D \cdot z_i} \cdot \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{cm}(z)}; \quad (3.29)$$

$N_{уски}$  – мощность, необходимая для компенсации потерь на ускорение на участке подъемной трубы длиной  $z_i$

$$N_{уски} = p_{уски} \cdot Q_{cpi} = [x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z)] \Big|_0^{z_i} \cdot \frac{G^2 \cdot \omega}{z_i} \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{cm}(z)}; \quad (3.30)$$

$N_{gi}$  – мощность, необходимая для преодоления силы тяжести при движении водовоздушного потока со средним объемным расходом  $Q_{cpi}$  на участке подъемной трубы длиной  $z_i$

$$N_{gi} = p_{gi} \cdot Q_{cpi} = g \cdot \frac{G \cdot \omega}{z_i} \cdot \int_0^{z_i} \rho_{cm}(z) dz \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{cm}(z)}; \quad (3.31)$$

$N_i''$  – мощность, подведенная на участке трубы длиной  $z_i$  потоком сжатого воздуха

$$N_i'' = p_0 \cdot Q_0 \cdot \ln \frac{p_{\Sigma i} + p_0}{p_0}; \quad (3.32)$$

$N'$  – мощность, подведенная к подъемной трубе потоком воды

$$N' = \rho' \cdot g \cdot h \cdot Q_3; \quad (3.33)$$

$N_{nodi}$  – мощность, подведенная на участке подъемной трубы длиной  $z_i$  водовоздушным потоком

$$N_{nodi} = N_i'' + N'; \quad (3.34)$$

$N_{cki}$  – мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение фаз при движении водовоздушного потока на участке трубы длиной  $z_i$

$$N_{cki} = N_{nodi} - N_{\Sigma i}. \quad (3.35)$$

Как следует из (3.35), к потерям на скольжение отнесены все потери, которые не отнесены к потерям на трение и ускорение, а также к энергетическим затратам на преодоление силы тяжести при движении водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта.

В [36] доказана правомерность определения коэффициента полезной деятельности (КПД) эрлифта по зависимости

$$\eta_3 = \frac{N_g - N'}{N''}, \quad (3.36)$$

где  $N_g$  и  $N''$  – значения соответственно  $N_{gi}$  (3.31) и  $N_i''$  (3.32) при  $z_i = H+h$ .

В соответствии с зависимостью (3.36) в разделах 3.2 и 3.3 выполнен анализ энергоэффективности работы эрлифта.

Решение разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта (уравнения 3.14, 3.22, 3.28, 3.35) численным методом с использованием ПК позволяет определять, в том числе, подачу эрлифта  $Q_3$ , давления  $p_{\Sigma i}$ ,  $p_{mpi}$ ,  $p_{ускi}$ ,  $p_{gi}$ , и мощности  $N_{\Sigma i}$ ,  $N_{mpi}$ ,  $N_{ускi}$ ,  $N_{gi}$ ,  $N_{cki}$ ,  $N'$ ,  $N_i''$ ,  $N_{nodi}$  в зависимости от относительной длины жидкостной пробки  $L_s/D$  в подъемной трубе, то есть установить влияние структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока на эффективность работы газожидкостного подъемника.

### 3.2. Влияние длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока на режимы и энергоэффективность работы эрлифтов

Разработанные математическая модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока (раздел 3.1) и компьютерная программа для ее численного решения (приложение В.1) позволили выполнить аналитические исследования влияния длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе на режимы работы эрлифта.

Расчеты выполнены для эрлифтов с конструктивными и технологическими параметрами, которые использованы для аналитически-экспериментального определения значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  (разделы 2.3.2, 2.3.3, табл. 2.1 ... 2.4).

Основными гидродинамическими параметрами, которые вычислялись для эрлифтов с выбранными геометрическими параметрами (табл. 2.1 ... 2.4) при заданном постоянном расходе воздуха  $Q_в$  и задаваемых значениях относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  являются: подача  $Q_э$  и мощности – суммарная  $N_{\Sigma i}$  (3.28); необходимая для преодоления силы тяжести  $N_g$  (3.31); необходимая для компенсации потерь на трение  $N_{тр}$  (3.29); необходимая для компенсации потерь на ускорение  $N_{уск}$  (3.30); необходимая для компенсации потерь на скольжение фаз  $N_{ск}$  (3.35) и подведенная  $N_{под}$  (3.34), в том числе подведенная потоком воды  $N'$  (3.33) и потоком сжатого воздуха  $N''$  (3.32) в подъемной трубе длиной  $H+h$ , а также КПД подъемника  $\eta_э$  (3.36). Кроме перечисленных, разработанная компьютерная программа позволяет определять ряд других гидродинамических параметров водовоздушного потока в эрлифте, в том числе их изменение по высоте подъемной трубы (приложение В).

Методику определения искомых гидродинамических параметров снарядной водовоздушной смеси в подъемной трубе рассмотрим на примере эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=25$ мм и длиной  $H+h=14,0$ м,

геометрическим погружением смесителя  $h=5,5\text{м}$  и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_6=0,112\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Значение расхода воздуха  $Q_6=0,112\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) для рассматриваемого эрлифта ( $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,393$ ) соответствует точке пересечения расчетных  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  и экспериментально полученной  $Q_3 = f(Q_6)$  кривых при определении значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  в подъемной трубе газожидкостного подъемника (раздел 2.3.2, рис. 2.2, табл. 2.2). При указанном расходе воздуха подача эрлифта составляет  $Q_3=0,805\text{м}^3/\text{ч}$  ( $2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) при осредненном значении относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,8 \dots 0,9$  (табл. 2.2).

Как абсолютные, так и относительные [при базисных значениях  $Q_{3\text{ баз}}=0,805\text{м}^3/\text{ч}$  ( $2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ),  $N_{\text{баз}}=0,092\text{кВт}$ ] значения выше перечисленных подачи и мощностей вычислены для эрлифта  $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$  и  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_6=0,112\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,25 \dots 10$  (табл. 3.1). Принятое базисное значение мощности  $N_{\text{баз}} = 0,092 \text{ кВт}$  соответствует значению подведенной мощности  $N_{\text{под}}$  при подаче эрлифта  $Q_3 = Q_{3\text{ баз}} = 0,805\text{м}^3/\text{ч}$  ( $2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Построенные по полученным расчетным данным (табл. 3.1) графические зависимости относительной подачи  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$  и относительных мощностей ( $\bar{N}_{\text{под}}$  – подведенной,  $\bar{N}_\Sigma$  – суммарной, необходимых для компенсации потерь на трение  $\bar{N}_{\text{тр}}$ , ускорение  $\bar{N}_{\text{уск}}$  и скольжение фаз  $\bar{N}_{\text{ск}}$ , а также необходимой для преодоления силы тяжести  $\bar{N}_g$ )  $\bar{N}_i = f(\bar{L}_s)$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  позволили установить три характерных режима работы эрлифта  $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$  и  $\alpha=0,393$  (рис. 3.1):

Таблица 3.1

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$  и  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_в=0,112\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,25 \dots 10$  (базисные значения  $Q_в=0,805\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=0,092\text{кВт}$ )

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_\Sigma$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_в$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_в$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
0,25	0,168	0,209	0,007	0,007	0,000	0,000	0,076	0,003	0,080	0,083
0,50	0,358	0,445	0,015	0,014	0,001	0,000	0,071	0,005	0,080	0,086
0,75	0,491	0,610	0,021	0,019	0,001	0,000	0,067	0,007	0,080	0,088
0,85	0,532	0,661	0,022	0,021	0,002	0,000	0,066	0,008	0,080	0,088
1,0	0,584	0,725	0,025	0,023	0,002	0,000	0,064	0,009	0,080	0,089
1,5	0,697	0,866	0,031	0,027	0,004	0,000	0,059	0,010	0,080	0,091
2,0	0,753	0,935	0,035	0,029	0,006	0,000	0,057	0,011	0,080	0,092
3,0	0,800	0,994	0,039	0,031	0,008	0,000	0,054	0,012	0,080	0,092
4,0	0,815	1,012	0,040	0,031	0,008	0,000	0,053	0,012	0,080	0,092
5,0	0,820	1,019	0,040	0,032	0,008	0,000	0,052	0,012	0,080	0,093
7,5	0,823	1,022	0,040	0,032	0,009	0,000	0,052	0,012	0,080	0,093
10,0	0,823	1,022	0,040	0,032	0,009	0,000	0,052	0,012	0,080	0,093

Продолжение таблицы 3.1

Относительная длина жидкостной пробки $\check{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\check{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\varepsilon$
		силы тяжести $\check{N}_g$	потерь на трение $\check{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\check{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\check{N}_{ск}$	потоком воды $\check{N}'$	воздушным потоком $\check{N}''$	полная $\check{N}_{под}$	
0,25	0,076	0,076	0,000	0,000	0,826	0,033	0,870	0,902	0,050
0,50	0,163	0,152	0,011	0,000	0,772	0,054	0,870	0,935	0,113
0,75	0,228	0,207	0,011	0,000	0,728	0,076	0,870	0,957	0,150
0,85	0,239	0,228	0,022	0,000	0,717	0,087	0,870	0,957	0,163
1,0	0,272	0,250	0,022	0,000	0,696	0,098	0,870	0,967	0,175
1,5	0,337	0,293	0,043	0,000	0,641	0,109	0,870	0,989	0,213
2,0	0,380	0,315	0,065	0,000	0,620	0,120	0,870	1,000	0,225
3,0	0,424	0,337	0,087	0,000	0,587	0,130	0,870	1,000	0,238
4,0	0,435	0,337	0,087	0,000	0,576	0,130	0,870	1,000	0,238
5,0	0,435	0,348	0,087	0,000	0,565	0,130	0,870	1,011	0,250
7,5	0,435	0,348	0,098	0,000	0,565	0,130	0,870	1,011	0,250
10,0	0,435	0,348	0,098	0,000	0,565	0,130	0,870	1,011	0,250

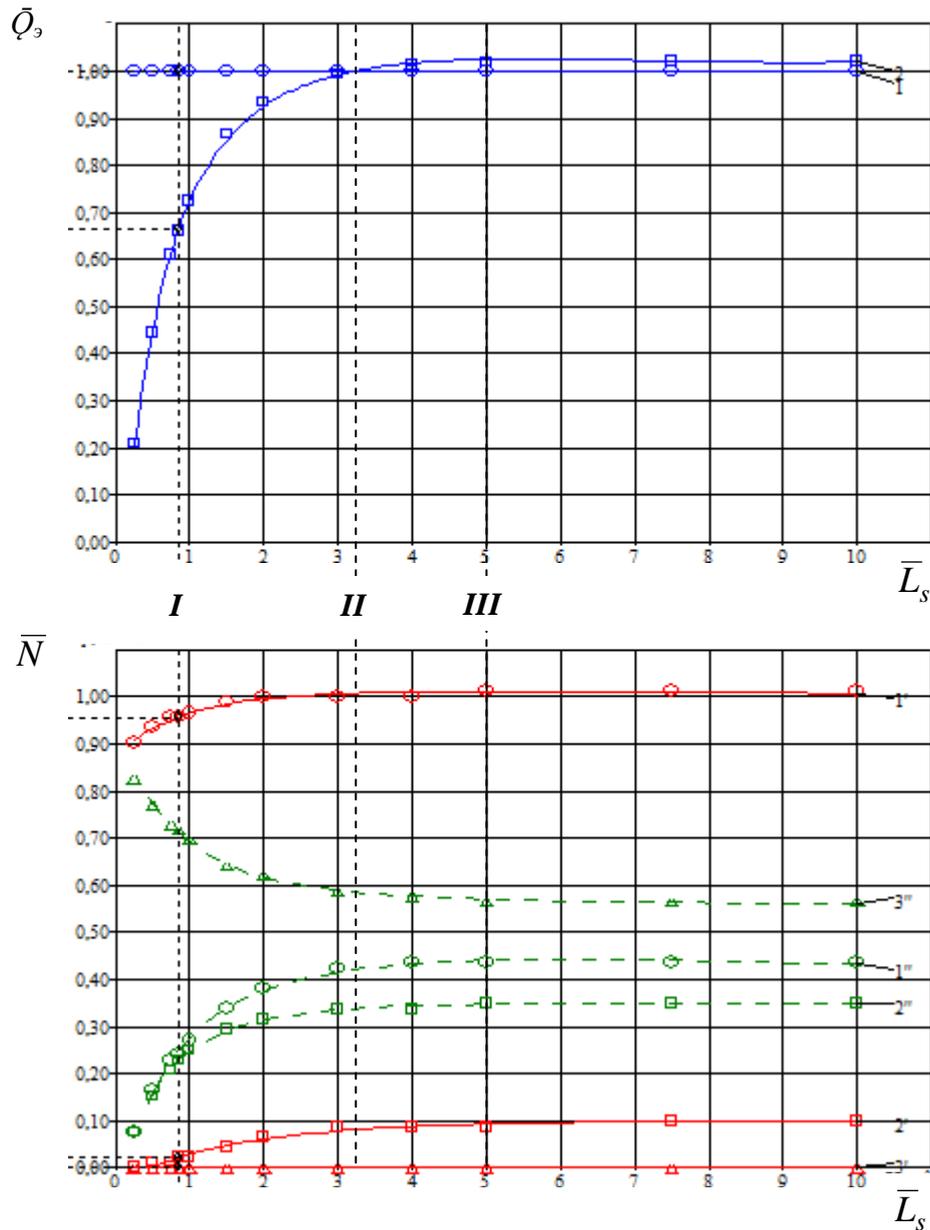


Рис. 3.1 – Зависимости относительной подачи  $\bar{Q}_3$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D = 25$  мм,  $H+h = 14,0$  м,  $h = 5,5$  м,  $\alpha = 0,393$  при расходе воздуха  $Q_e = 0,112$  м<sup>3</sup>/мин ( $1,87 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с) (базисные значения  $Q_3 = 0,805$  м<sup>3</sup>/ч,  $N = 0,092$  кВт):  
 1 –  $\bar{Q}_3 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{под} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{mp} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{yck} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{ck} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

- режим 1 – при среднеосредненном значении относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,85$ , определенном аналитически-экспериментальным способом для данного эрлифта (раздел 2.3.2, рис. 2.2, табл. 2.2);

- режим 2 – при значении относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s=3,21$ , соответствующем точке пересечения прямой  $\bar{Q}_9=1$  и расчетной кривой  $\bar{Q}_9 = f(\bar{L}_s)$ ;

- режим 3 – при значении относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s \approx 5$ , после достижения которого увеличение подачи не наблюдается.

Следует отметить, что прямая  $\bar{Q}_9 = 1$  (рис. 3.1) соответствует значению абсолютной подачи  $Q_9 = 0,805 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) эрлифта  $D=25 \text{ мм}$ ,  $H+h=14,0 \text{ м}$ ,  $h=5,5 \text{ м}$  и  $\alpha=0,393$ , которую он в соответствии аналитически-экспериментальным методом анализа режимов работы (раздел 2.3.2) должен обеспечивать при осредненном значении относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,8 \dots 0,9$  (табл. 2.2).

Сравнение значений относительных подач  $\bar{Q}_9$  эрлифта в режимах работы 1 и 2 позволяет установить расхождение в результатах решения математических моделей рабочего процесса газожидкостного подъемника, приведенных в разделах 2.2 и 3.1. Так, если в соответствии с решением математической модели, приведенной в разделе 2.2, для эрлифта  $D = 25 \text{ мм}$ ,  $H+h = 14,0 \text{ м}$ ,  $h = 5,5 \text{ м}$  и  $\alpha = 0,393$  при расходе воздуха  $Q_6 = 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и осредненном значении относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,8 \dots 0,9$  подача эрлифта составляет  $Q_9 = 0,805 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (что и принято в качестве базисного значения и при котором относительная подача  $\bar{Q}_9 = 1$ , табл. 3.1, рис. 3.1), то в соответствии с решением математической модели рабочего процесса, приведенной в разделе 3.1, для рассматриваемого эрлифта при тех же расходе воздуха  $Q_6$  и среднеосредненной относительной длине жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,85$  относительная подача

подъемника составляет  $\bar{Q}_g = 0,666^1$  [абсолютное значение  $Q_g = 0,536 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $1,49 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ )] (рис. 3.1). То есть расхождение в результатах решения двух выше упомянутых математических моделей рабочего процесса эрлифта  $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$  и  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_g=0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и осредненном значении относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,8 \dots 0,9$  составляет 33,4%, что для рассматриваемых условий следует считать приемлемым результатом.

Анализ гидродинамических параметров водовоздушного потока в подъемной трубе в режиме 3 работы эрлифта позволяет установить предельно максимальное значение относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$ , являющееся границей асимптотического роста показателей энергетической эффективности работы газожидкостного подъемника. Так, если для эрлифта  $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$  и  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_g=0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в режиме 1 ( $\bar{L}_s=0,85$ ) КПД (3.36) составляет  $\eta_g=0,164$ , в режиме 2 ( $\bar{L}_s=3,21$ ) –  $\eta_g=0,240$ , то в режиме 3 ( $\bar{L}_s=5,0$ ) коэффициент полезного действия газожидкостного подъемника равняется  $\eta_g=0,247$  (рис. 3.2). Объясняется это уменьшением мощностных затрат, необходимых для компенсации потерь на скольжение фаз при движении водовоздушной смеси  $N_{ск}$  (3.35), при увеличении относительной длины жидкостных пробок от минимально возможной до  $\bar{L}_s=5$  (рис. 3.1). Перераспределение подведенной мощности  $N_{под}$  (3.34) при уменьшении значения  $N_{ск}$  обеспечивает рост мощности  $N_g$  (3.31), затрачиваемой на преодоление силы тяжести, а, следовательно, увеличение подачи эрлифта  $Q_g$  и его КПД, при сравнительно незначительном росте потерь на трение  $N_{тр}$  (3.29) и ускорение  $N_{уск}$  (3.30) (рис. 3.1). Дальнейшее увеличение относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  (сверх значения  $\bar{L}_s=5$  в режиме 3) не приводит к росту КПД эрлифта (рис. 3.2). Следовательно, для эрлифта  $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$  и  $\alpha=0,393$

<sup>1</sup> Здесь и ниже значения относительных подач, мощностей и КПД эрлифтов приведены по результатам обработки данных вычислений (табл. 3.1) методом наименьших квадратов и графических построений (рис. 3.1, 3.2)

предельно рациональной относительной длиной жидкостных пробок является значение  $\bar{L}_s = 5$ .

Аналогичные вычисления подач  $Q_9$  ( $\bar{Q}_9$ ), мощностей  $N_\Sigma, N_g, N_{mp}, N_{yck}, N_{ck}, N', N'', N_{под}$  ( $\bar{N}_\Sigma, \bar{N}_g, \bar{N}_{mp}, \bar{N}_{yck}, \bar{N}_{ck}, \bar{N}', \bar{N}'', \bar{N}_{под}$ ) и КПД  $\eta_9$  в зависимости от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  при прочих равных условиях (табл. В.1 ... В.8) с графическими построениями (рис. В.1 ... В.16) выполнены для эрлифтов с диаметрами подъемных труб  $D = 50 \dots 250$  мм при относительных погружениях смесителей  $\alpha = 0,362 \dots 0,931$  (табл. 2.1).

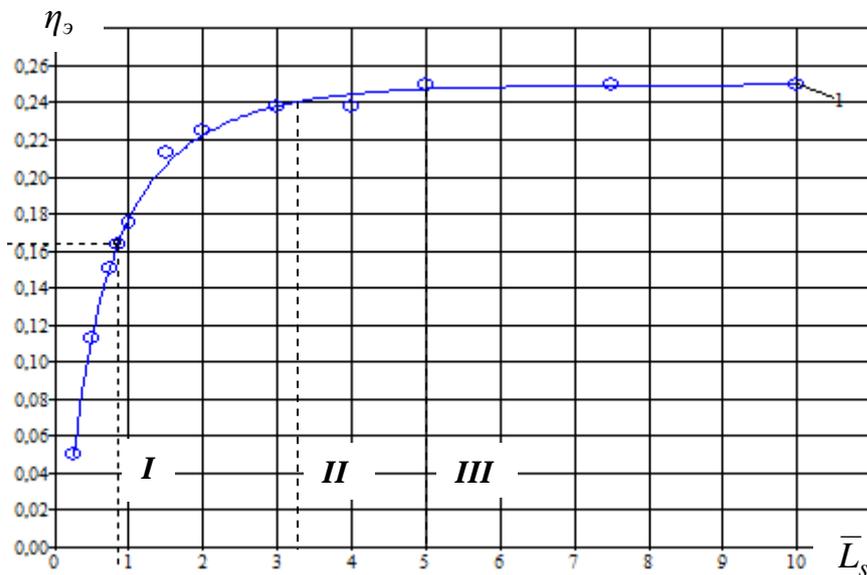


Рис. 3.2 – Зависимость КПД  $\eta_9$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=25$  мм,  $H+h=14,0$  м,  $h=5,5$  м,  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_8=0,112$  м<sup>3</sup>/мин: 1 –  $\eta_9 = f(\bar{L}_s)$ ; **I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

Значения относительных параметров (подач  $\bar{Q}_9$ , мощностей  $\bar{N}_i$  и КПД  $\eta_9$ ) позволяют утверждать об увеличении энергоэффективности работы эрлифта как с увеличением до предела, являющегося значением в режиме 3, относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$ , так и относительного погружения эрлифта  $\alpha$  (табл. 3.2).

Степень увеличения КПД эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D=25 \dots 250$  мм в диапазоне относительных погружений  $\alpha=0,362 \dots 0,931$  составляет: в режиме 3 в сравнении с режимом 1 – 1,0 ... 1,6 раза, в режиме 3 в

сравнении с режимом 2 – 1,01 ... 1,48 раза, то есть обеспечение относительных длин жидкостных пробок в подъемных трубах анализируемых эрлифтов, равных  $\bar{L}_s=5 \dots 6$ , обеспечит повышение КПД на величину в 1,6 раза большую в сравнении с традиционно работающими газожидкостными подъемниками (табл. 3.2).

Увеличение КПД эрлифтов  $\eta_e$  при всех анализируемых режимах работы (режимы 1, 2 и 3) с ростом относительного погружения  $\alpha$  объясняется соответствующим уменьшением мощности  $N_{ск}$ , необходимой для компенсации потерь, отнесенных к потерям на скольжение фаз (3.35), и, следовательно, высвобождением мощности для ее полезного использования для преодоления силы тяжести  $N_g$  при движении водовоздушного потока в подъемной трубе (рис. 3.3 ... 3.5).

Расхождение в результатах решения математических моделей рабочего процесса газожидкостного подъемника, приведенных в разделах 2.2 и 3.1, для эрлифтов с диаметрами подъемных труб  $D=50 \dots 250$ мм при относительных погружениях смесителей  $\alpha=0,362 \dots 0,931$  находится в пределах 0,5 ... 33,4% (табл. 3.2), что является приемлемым результатом для рассматриваемой задачи установления влияния длин жидкостных пробок в подъемных трубах на энергоэффективность работы подъемников.

Таблица 3.2

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемных трубах эрлифта  $D=25 \dots 250$ мм

Параметр		Режим работы <sup>2</sup>	Значения параметров <sup>3</sup>								
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Диаметр подъемной трубы $D$ , мм			25	50	57	57	60	100	150	150	250
Длина подъемной трубы $H+h$ , м			14,0	14,0	2,57	2,57	16,0	17,5	115	63,7	16,0
Погружение смесителя:	геометрическое $h$ , м		5,5	5,5	0,93	0,93	8,0	8,75	72	59,3	8,0
	относительное $\alpha$		0,393	0,393	0,362	0,362	0,500	0,500	0,625	0,931	0,500
Вид работы эрлифта <sup>4</sup> :			град.	град.	град.	дискр.	град.	град.	град.	град.	град.
Расход воздуха $Q_{в}$ , м <sup>3</sup> /мин			0,112	0,730	0,950	0,840	1,300	4,600	7,15	3,75	8,50
Подача эрлифта базисная $Q_{э баз}$ , м <sup>3</sup> /ч			0,805	4,650	4,659	5,433	9,828	46,20	116,5	191,4	140,1
Мощность базисная $N_{баз}$ , кВт			0,092	0,593	0,150	0,136	1,376	5,830	42,209	41,8	11,22
Относительные:	длина жидкостных пробок $\bar{L}_s$	1	0,85	0,90	0,70	0,90	1,20	1,65	14,5	34,5	5,75
		2	3,21	1,465	0,82	1,61	0,745	1,48	-	3,9	4,87
		3	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,0	5,0	6,0
	подача $\bar{Q}_э$	1	0,666	0,857	0,92	0,769	1,072	1,01	0,767	1,005	1,019
		2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0	1,0
		3	1,026	1,162	1,459	1,205	1,18	1,065	0,722	1,006	1,022
	мощность подведенная $\bar{N}_{под}$	1	0,957	0,978	0,989	0,98	1,007	1,001	0,998	1,008	1,006
		2	1,008	0,997	0,995	0,999	0,996	0,998	-	1,001	1,002
		3	1,011	1,021	1,038	1,020	1,026	1,013	1,004	1,006	1,007

<sup>2</sup> Режим работы: 1 - расчетное значение  $\bar{L}_s$ ; 2 - равенство  $\bar{Q}_э = 1$  и  $\bar{Q}_э = f(\bar{L}_s)$ ; 3 - предел увеличения  $\bar{Q}_э = f(\bar{L}_s)$ .

<sup>3</sup> Значения относительных подач, мощностей и КПД эрлифтов приведены по результатам обработки данных вычислений (табл. 3.1, В.1÷В.8) методом наименьших квадратов и графических построений (рис. 3.1; 3.2; В.1÷В.16).

<sup>4</sup> Вид работы эрлифта: град. - традиционная работа эрлифта; дискр. - с дискретной подачей сжатого воздуха.

Продолжение таблицы 3.2.

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Относительная суммарная мощность $\bar{N}_\Sigma$		1	0,248	0,294	0,221	0,238	0,426	0,509	0,729	0,921	0,581
		2	0,42	0,361	0,245	0,330	0,378	0,497	-	0,916	0,570
		3	0,44	0,451	0,408	0,419	0,518	0,570	0,732	0,923	0,582
Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:	силы тяжести $\bar{N}_g$	1	0,227	0,261	0,203	0,220	0,338	0,387	0,694	0,809	0,560
		2	0,338	0,303	0,220	0,282	0,316	0,383	-	0,805	0,549
		3	0,347	0,352	0,322	0,340	0,372	0,407	0,699	0,810	0,561
	потерь на трение $\bar{N}_{тр}$	1	0,021	0,031	0,017	0,018	0,088	0,110	0,030	0,103	0,019
		2	0,080	0,055	0,023	0,040	0,062	0,105	-	0,103	0,018
		3	0,093	0,097	0,087	0,078	0,143	0,146	0,030	0,104	0,019
	потерь на ускорение $\bar{N}_{уск}$	1	0,0	0,001	0,0	0,0	0,004	0,012	0,003	0,009	0,002
		2	0,0	0,002	0,0	0,0	0,003	0,011	-	0,009	0,002
		3	0,0	0,003	0,0	0,0	0,007	0,015	0,003	0,009	0,002
	потерь на скольжение $\bar{N}_{ск}$	1	0,711	0,688	0,772	0,736	0,577	0,489	0,268	0,086	0,429
		2	0,586	0,636	0,755	0,668	0,617	0,497	-	0,092	0,436
		3	0,571	0,573	0,632	0,608	0,510	0,449	0,271	0,088	0,428
Расхождение в результатах решения математических моделей рабочего процесса эрлифта, % <sup>5</sup>			33,4	14,3	8,0	23,1	7,2	1,0	-	0,5	1,9
КПД эрлифта $\eta_e$		1	0,164	0,182	0,141	0,158	0,215	0,241	0,479	0,296	0,386
		2	0,240	0,211	0,153	0,203	0,201	0,239	-	0,294	0,379
		3	0,247	0,244	0,226	0,244	0,235	0,254	0,482	0,296	0,387
Возможная степень увеличения КПД - отношение КПД в режимах:		3/1	1,51	1,34	1,60	1,54	1,09	1,05	1,01	1,0	1,0
		3/2	1,03	1,16	1,48	1,20	1,17	1,06	-	1,01	1,02

<sup>5</sup> Выполнено сравнение результатов решения математических моделей рабочего процесса эрлифта, приведенных в разделах 2.2 и 3.1.

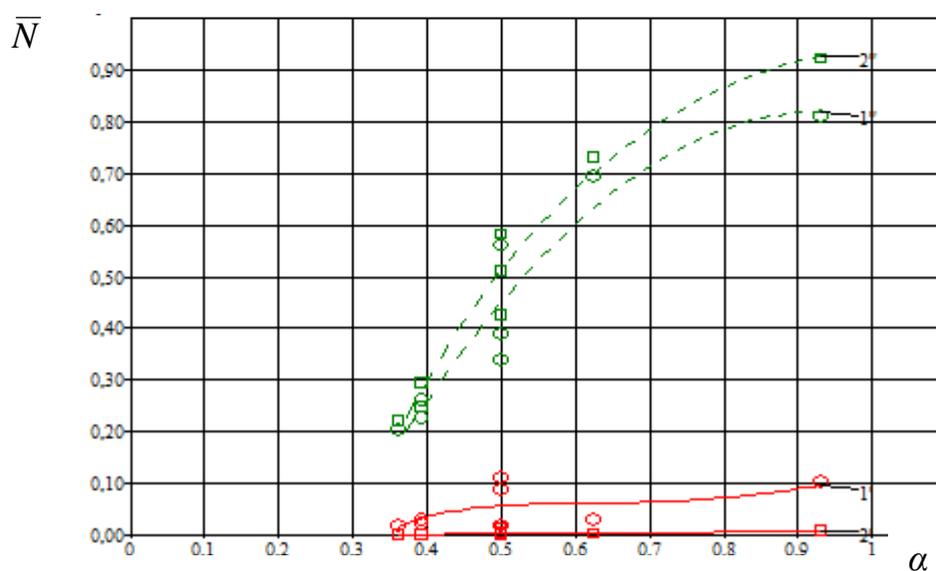
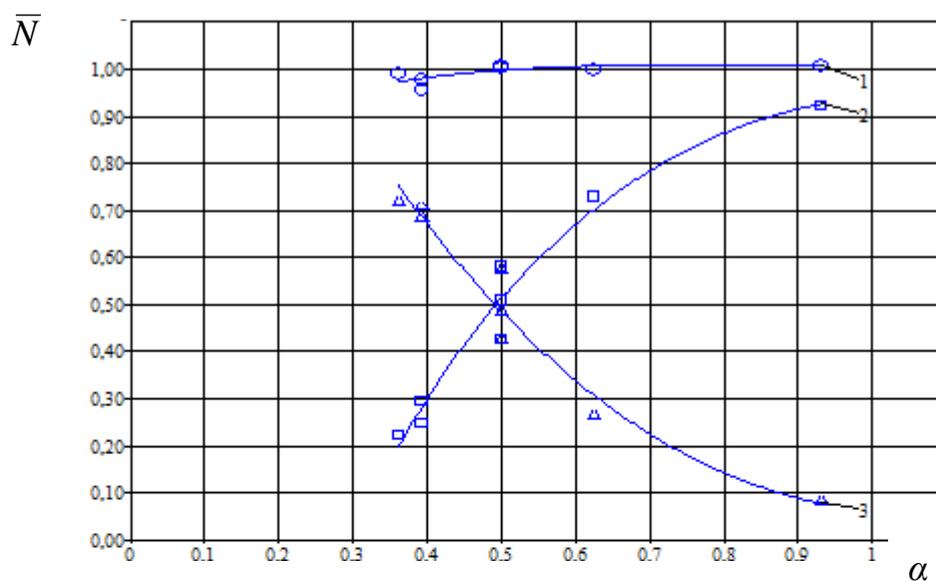


Рис. 3.3 – Зависимость относительных мощностей  $\bar{N}$  водовоздушного потока от относительного погружения смесителя  $\alpha$  (режим 1 – расчетное значение  $\bar{L}_s$ ):

$$1 - \bar{N}_{под} = f(\alpha); 2 \text{ и } 2'' - \bar{N}_{\Sigma} = f(\alpha); 3 - \bar{N}_{ск} = f(\alpha); 1' - \bar{N}_{пр} = f(\alpha);$$

$$1'' - \bar{N}_g = f(\alpha); 2' - \bar{N}_{уск} = f(\alpha)$$

(в качестве базисных приняты значения  $N_{под}$  в режиме 2)

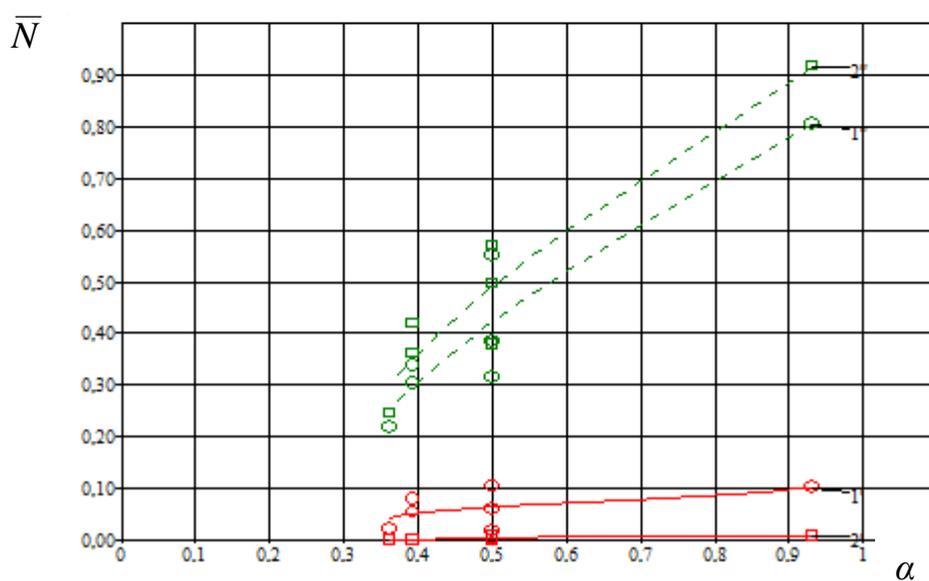
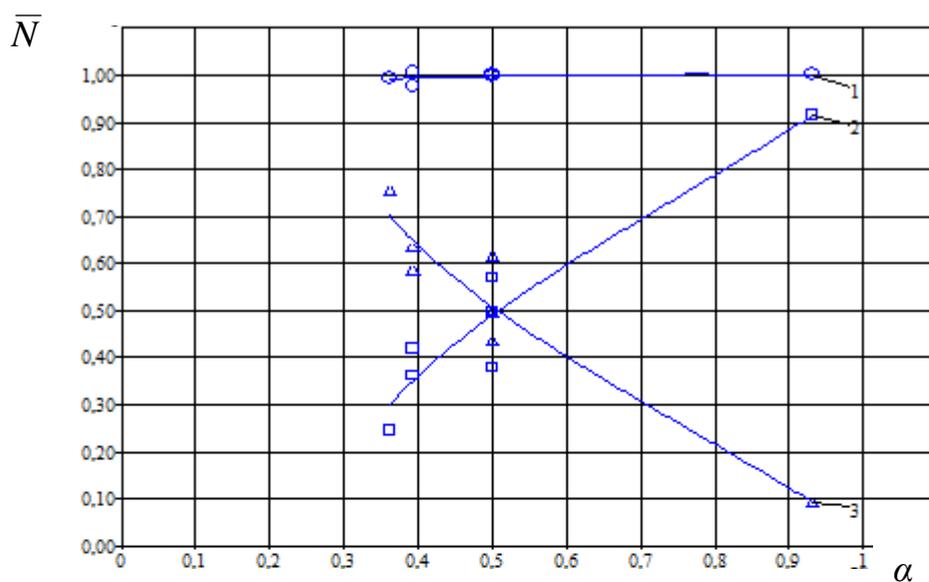


Рис. 3.4 – Зависимость относительных мощностей  $\bar{N}$  водовоздушного потока от относительного погружения смесителя  $\alpha$  (режим 2 – равенство  $\bar{Q}_3 = 1$  и  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ ):  
 1 –  $\bar{N}_{nod} = f(\alpha)$ ; 2 и 2' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\alpha)$ ; 3 –  $\bar{N}_{ск} = f(\alpha)$ ; 1' –  $\bar{N}_{mp} = f(\alpha)$ ;  
 1'' –  $\bar{N}_g = f(\alpha)$ ; 2' –  $\bar{N}_{уск} = f(\alpha)$   
 (в качестве базисных приняты значения  $N_{nod}$  в режиме 2)

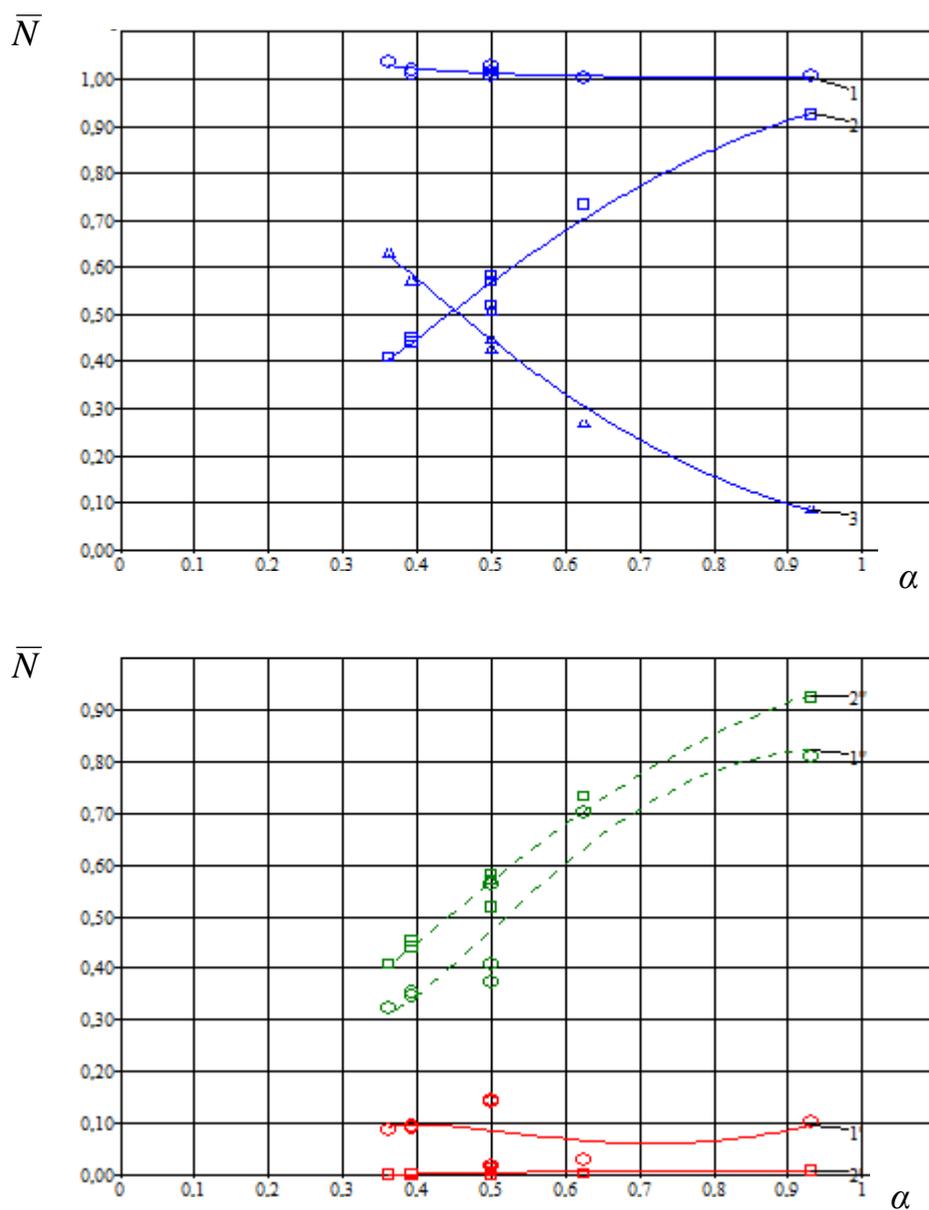


Рис. 3.5 – Зависимость относительных мощностей  $\bar{N}$  водовоздушного потока от относительного погружения смесителя  $\alpha$  (режим 3 – предел увеличения  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ ):  
 1 –  $\bar{N}_{нод} = f(\alpha)$ ; 2 и 2'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\alpha)$ ; 3 –  $\bar{N}_{ск} = f(\alpha)$ ; 1' –  $\bar{N}_{мп} = f(\alpha)$ ;  
 1'' –  $\bar{N}_g = f(\alpha)$ ; 2' –  $\bar{N}_{уск} = f(\alpha)$   
 (в качестве базисных приняты значения  $N_{нод}$  в режиме 2)

### 3.3. Сравнительный анализ гидродинамических параметров эрлифта

$D = 57$  мм при традиционной работе и дискретной подаче сжатого воздуха

Для экспериментально полученных характеристик эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D = 57$  мм и длиной  $H+h = 2,57$  м, геометрическим погружением смесителя  $h = 0,93$  м и относительным погружением смесителя  $\alpha = 0,362$  (раздел 4, рис. 4.3) аналитически-экспериментальным методом (раздел 2.3.3) установлены длины жидкостных пробок для определенных режимов работы (при традиционной работе – табл. 2.3, при дискретной подаче сжатого воздуха – табл. 2.4). Так, при традиционной работе указанного эрлифта при расходе воздуха  $Q_6 = 0,950 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и подаче эрлифта  $Q_3 = 4,659 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $1,29 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) осредненное значение относительной длины жидкостных пробок составляет  $\bar{L}_s = 0,65 \dots 0,75$  (табл. 2.3). При дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5 \dots 1/2,5$  при расходе воздуха  $Q_6 = 0,840 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и подаче эрлифта  $Q_3 = 5,433 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $1,51 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) осредненное значение относительной длины жидкостных пробок составляет  $\bar{L}_s = 0,85 \dots 0,95$  (табл. 2.4).

Как и в разделе 2.3.3, в связи с незначительными отличиями считаем характеристики 1 и 2 (рис. 3.6) относящимися к традиционной работе эрлифта, а характеристики 3, 4 и 5 (рис. 3.6) – к работе с дискретной подачей сжатого воздуха. Примем также допущение, что по всей длине расходных характеристик  $Q_3 = f(Q_6)$  рассматриваемого эрлифта в соответствии с данными таблиц 2.3 и 2.4 относительные длины жидкостных пробок в подъемной трубе составляют: для характеристик 1 и 2 при традиционной работе подъемника –  $\bar{L}_s = 0,7$ ; для характеристик 3, 4 и 5 при дискретной подачей сжатого воздуха –  $\bar{L}_s = 0,9$ .

Согласно экспериментальных данных (рис. 3.6) степень увеличения подачи эрлифта  $k_Q$  при увеличении относительной длины жидкостных пробок

от  $\bar{L}_s = 0,7$  до  $\bar{L}_s = 0,9$  как при расходе воздуха  $Q_e = 0,840 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ), так и при расходе воздуха  $Q_e = 0,950 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) находится в пределах  $k_Q = 1,21 \dots 1,22$  (табл. 3.3). Степень увеличения подачи  $k_Q$  определена (табл. 3.3) как отношение подачи эрлифта  $Q_s$  при  $\bar{L}_s = 0,9$  к подаче эрлифта  $Q_s$  при  $\bar{L}_s = 0,7$  при прочих равных условиях.

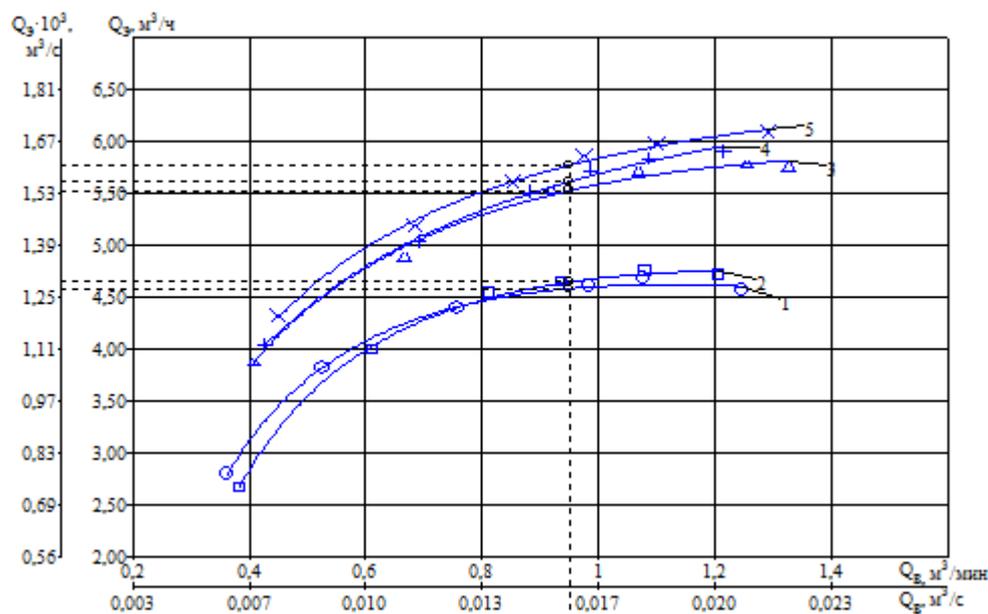


Рис. 3.6 – Экспериментальные расходные характеристики  $Q_s = f(Q_e)$  эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$ : 1 – традиционная работа эрлифта; 2÷5 – дискретная подача сжатого воздуха с периодичностью: 2 – 1/1; 3 – 1/1,5; 4 – 1/2; 5 – 1/2,5 (в приведенных обозначениях, например 1/2 – на протяжении 1с воздух подается в смеситель эрлифта и на протяжении 2с воздухопровод перекрывается регулирующим клапаном)

Значения степени увеличения подачи в рассматриваемых условиях, вычисленное по данным решения математической модели рабочего процесса традиционно работающего эрлифта (табл. В.2, рис. В.3) составляет  $k_Q = 1,13$  (табл. 3.3), а вычисленное по данным решения математической модели рабочего процесса эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха (табл. В.3, рис. В.5) –  $k_Q = 1,18$  (табл. 3.3). То есть, погрешность в определении степени увеличения подачи  $k_Q$  на основе решения разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта находится в пределах 3,28 ... 7,38%

(табл. 3.3), что является приемлемым результатом. При этом погрешность в определении подачи эрлифта при изменении длины жидкостных пробок  $L_s$  составляет 7,15 ... 23,5% (табл. 3.3), что также считаем допустимым с учетом сложности и малоизученности протекающих в подъемной трубе гидродинамических процессов.

Таблица 3.3

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$

Параметр		Относительные длины жидкостных пробок $\bar{L}_s$ :				Степень увеличения подачи $k_Q$
		0,70	0,90	0,70	0,90	
Расход воздуха $Q_a$ , м <sup>3</sup> /мин		0,840		0,950		
Подача $Q_s$ , м <sup>3</sup> /ч, согласно:	экспериментальных данных (осредненных, рис.3.6)	4,519	5,461	4,616	5,641	1,21÷1,22
	вычислений для традиционно работающего эрлифта (рис. В.3)	-	-	4,286	4,864	1,13
	вычислений для эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха (рис. В.5)	3,537	4,177	-	-	1,18
Погрешность определения подачи (степени увеличения подачи), %		21,7	23,5	7,15	13,8	3,28÷7,38

Учитывая, что согласно экспериментальных данных при увеличении относительной длины жидкостных пробок от  $\bar{L}_s = 0,7$  до  $\bar{L}_s = 0,9$  и прочих равных условиях в эрлифте  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  его подача увеличивается в  $k_Q=1,21 \dots 1,22$  раза (табл. 3.3), в таком же диапазоне значений увеличится и КПД рассматриваемого эрлифта  $\eta_s$ . То есть, энергоэффективность работы эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при увеличении относительной длины жидкостных пробок от  $\bar{L}_s = 0,7$  до  $\bar{L}_s = 0,9$  увеличивается на 21 ... 22%.

### 3.4. Выводы

1. Впервые установлены структуры снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе, использование которых в математических моделях рабочего процесса эрлифта позволяет повысить их адекватность реальному процессу. Расхождение в результатах решения математических моделей рабочего процесса газожидкостного подъемника для эрлифтов с диаметрами подъемных труб  $D=50 \dots 250$ мм при относительных погружениях смесителей  $\alpha=0,362 \dots 0,931$  находится в пределах  $0,5 \dots 33,4\%$ , что является приемлемым результатом для рассматриваемой задачи установления влияния длин жидкостных пробок в подъемных трубах на энергоэффективность работы подъемников.

2. Установлено, что для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D=25 \dots 250$ мм в диапазоне относительных погружений  $\alpha=0,362 \dots 0,931$  обеспечение относительных длин жидкостных пробок в подъемных трубах, равных  $\bar{L}_s=5 \dots 6$ , повысит КПД на величину в 1,6 раза большую в сравнении с традиционно работающими газожидкостными подъемниками.

3. Подтверждено, что при прочих равных условиях в эрлифте  $D=57$ мм,  $H+h=2,57$ м,  $h=0,93$ м,  $\alpha=0,362$  при увеличении относительной длины жидкостных пробок от  $\bar{L}_s=0,7$  до  $\bar{L}_s=0,9$  увеличивается КПД на  $21 \dots 22 \%$ . Это подтверждает правомерность концепции, положенной в основу диссертационной работы, о влиянии длин жидкостных пробок в подъемных трубах на энергоэффективность работы эрлифтов.

4. Установлено, что погрешность в определении степени увеличения подачи  $k_Q$  при увеличении относительной длины жидкостных пробок и прочих равных условиях на основе решения разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта находится в пределах  $3,28 \dots 7,38\%$ , что является допустимыми погрешностями стандартных методик исследования эрлифтов.

## РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ  
ТРАДИЦИОННО РАБОТАЮЩЕГО ЭРЛИФТА И ЭРЛИФТА С ДИСКРЕТНОЙ  
ПОДАЧЕЙ СЖАТОГО ВОЗДУХА4.1. Задачи экспериментальных исследований и обоснование выбора  
объекта исследования

Задачи экспериментальных исследований работы эрлифтов:

- исследование работы эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57\text{мм}$  и длиной  $H+h=2,57\text{м}$ , геометрическим погружением смесителя  $h=0,93\text{м}$  и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,362$  с непрерывной (традиционно работающего) и дискретной подачей сжатого воздуха для подтверждения адекватности математической модели рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока;
- доказательство возможности изменения длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта дискретной подачей сжатого воздуха и повышение при этом энергоэффективности его рабочего процесса.

При разработке экспериментальной эрлифтной установки приоритетными решаемыми вопросами были минимизация влияния масштабного эффекта на работу эрлифта, обеспечение снарядной структуры водовоздушного потока в подъемной трубе и правомерность использования результатов эксперимента при прогнозировании режимов работы газожидкостных подъемников с другими геометрическими и технологическими параметрами (моделирование рабочего процесса эрлифта).

К основным геометрическим параметрам, оказывающим масштабный эффект на рабочий процесс эрлифта, относятся диаметр подъемной трубы  $D$  и отношение длины подъемной трубы к ее диаметру  $(H+h)/D$  [26, 27, 94 ... 96]. Так, в эрлифтах с диаметрами подъемных труб  $D < 30\text{мм}$  существенное влияние на рабочий процесс оказывают силы поверхностного натяжения [94,

97], что вносит дополнительную погрешность при использовании результатов их исследований при анализе работы подъемников с  $D > 30$  мм. Критерий  $(H+h)/D$ , в том числе, является определяющим при классификации эрлифтов – короткий  $[(H+h)/D < 200]$  или длинный  $[(H+h)/D > 200]$ , расчетные зависимости для которых при определении основных проектируемых параметров – диаметр подъемной трубы и расход воздуха, значительно отличаются [26, 27, 50]. 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  $(H+h)/D < 200$ . Исходя из изложенного, а также лабораторных технических возможностей, в экспериментальной установке принят эрлифт с подъемной трубой диаметром  $D=57$  мм и длиной  $H+h=2,57$  м  $[(H+h)/D = 45]$ .

Доказано [35, 36], что в общем случае вид структуры газожидкостного потока в подъемной трубе эрлифта определяется значениями критериев Фруда  $Fr_{см}$  и относительного погружения смесителя  $\alpha$ . И если для обеспечения снарядной структуры водовоздушной смеси диапазон значений критериев Фруда ограничивается величинами  $Fr_{см} \leq 20 \dots 30$ , что в подавляющем большинстве случаев соответствует имеющим место в эрлифтных установка, то для эрлифтов с диаметрами подъемных труб  $D < 600$  мм относительное погружение смесителя рекомендуется ограничивать величиной  $\alpha \geq 0,4$  [35, 36]. Однако для диаметров труб  $D < 60$  мм устойчивая снарядная структура водовоздушного потока имеет место и при меньших значениях относительных погружений (давлений на входе в подъемную трубу при прочих равных условиях) [36, 56, 98 ... 104]. Исходя из приведенного, а также предельно развиваемого избыточного давления, используемого в составе экспериментальной установки источника сжатого воздуха, значение геометрического погружения смесителя испытываемого эрлифта было принято равным  $h=0,93$  м, что обеспечило относительное погружение смесителя  $\alpha=0,362$ .

Известно [105 ... 107], что в общем случае критериальное уравнение подобия гидродинамических процессов имеет вид

$$Eu = f(Sh, Fr, Re), \quad (4.1)$$

где  $Eu = \Delta p / \rho \cdot u^2$  – число Эйлера (отношение сил давления к силам инерции);

$Sh = L/t \cdot u$  – число подобия Струхала (критерий гомохронности);

$Fr = u^2/g \cdot L$  – число Фруда (отношение сил инерции к силам тяжести);

$Re = u \cdot L/\nu$  – число Рейнольдса (отношение сил инерции к силам вязкого трения),

здесь  $\Delta p$  – перепад давления;

$u$  – скорость;

$L$  – характерный линейный размер;

$t$  – время;

$\nu$  – кинематическая вязкость.

Для большинства гидродинамических процессов, тем более таких сложных, какие имеют место в подъемной трубе эрлифта, соблюсти равенство всех приведенных в (3.1) критериев подобия (полное подобие) достаточно сложно, а иногда и просто невозможно. Поэтому для числа Рейнольдса принимаем условия автомодельности, доказанные, в частности, в [32, 50],  $Re_m = Re_n$  ( $Re_m$  – число Рейнольдса модельной установки,  $Re_n$  – число Рейнольдса натурной установки), а произведение чисел Эйлера и Фруда представим как относительное погружение смесителя  $\alpha$  [32]. Приведенное позволяет утверждать, что подобие протекающих в исследуемом эрлифте гидродинамических процессов с учетом минимизации масштабных эффектов будут определяться: при традиционной работе газожидкостного подъемника (с постоянной подачей сжатого воздуха) – относительным погружением смесителя  $\alpha$ ; при работе газожидкостного подъемника с дискретной подачей сжатого воздуха учитывая нестационарность процессов – относительным погружением смесителя  $\alpha$  и критерием гомохронности  $Sh$ .

## 4.2. Экспериментальная установка и контрольно-измерительный комплекс

Экспериментальная эрлифтная установка (рис. 4.1, 4.2) была построена в лаборатории кафедры «Электромеханика и автоматика» Красноармейского индустриального института Донецкого национального технического университета. В состав экспериментальной эрлифтной установки входил эрлифт с подъемной трубой диаметром  $\varnothing 67 \times 5$  мм ( $D = 57$  мм) длиной  $H+h = 2,57$  м и подающей трубой диаметром  $\varnothing 67 \times 5$  мм ( $d = 57$  мм) длиной  $l = 0,695$  м (рис. 4.3). Подъемная 1 и подающие 9 трубы были изготовлены из прозрачного органического стекла, что позволяло визуальное контролировать структуру водовоздушного потока в подъемной трубе и особенности течения жидкости в подающей трубе (рис. 4.1).

В качестве источника сжатого воздуха использовался двухступенчатый центробежный нагнетатель лабораторного типа 12 с диаметром рабочих колес 100 мм, который прозрачным трубопроводом  $\varnothing 40 \times 2$  мм был подключен к смесителю 10 эрлифта. На воздухопроводе  $\varnothing 40 \times 2$  мм был смонтирован измерительный узел для измерения расхода сжатого воздуха, состоящий из металлической трубы  $\varnothing 57 \times 2,5$  мм длиной 2,0 м и измерительной диафрагмы 16 с угловым способом отбора перепада давления.

При неизменном внутреннем диаметре трубопровода перед диафрагмой  $D_{20} = 52$  мм в процессе проведения экспериментальных исследований использовались две измерительных диафрагмы – первая с диаметром отверстия диафрагмы  $d_{20} = 22,0$  мм (относительная площадь сужающего устройства  $m=0,1790$ ) и вторая с диаметром отверстия диафрагмы  $d_{20} = 30,7$  мм (относительная площадь сужающего устройства  $m = 0,3486$ ). Измерительные диафрагмы были изготовлены из стали СХ17Т.

Применение измерительных диафрагм разных диаметров  $d_{20}$  и относительных площадей сужающих устройств  $m$  позволило расширить количественный диапазон измерений и повысить их точность.

Погружение смесителя эрлифта под уровень перекачиваемой воды осуществлялось при помощи вертикальной емкости 5, состоящей из труб: в нижней части – диаметром  $\varnothing 108 \times 4$ , в верхней части –  $\varnothing 219 \times 6$ . Подающая труба 9 эрлифта соединялась с вертикальной емкостью 5 буферной емкостью 7.

На расстоянии  $h = 0,93$  м выше горизонтальной оси подключения воздухопровода к смесителю 10 в вертикальную емкость 5 врезан переливной трубопровод 6 диаметром  $\varnothing 57 \times 3,5$  мм, что обеспечивало постоянство геометрического погружения смесителя при работе эрлифта за счет подвода по гибкому шлангу 4 дополнительного расхода сетевой воды в емкость 5 и перелива ее избыточного количества по трубопроводу 6 в канализационную систему.

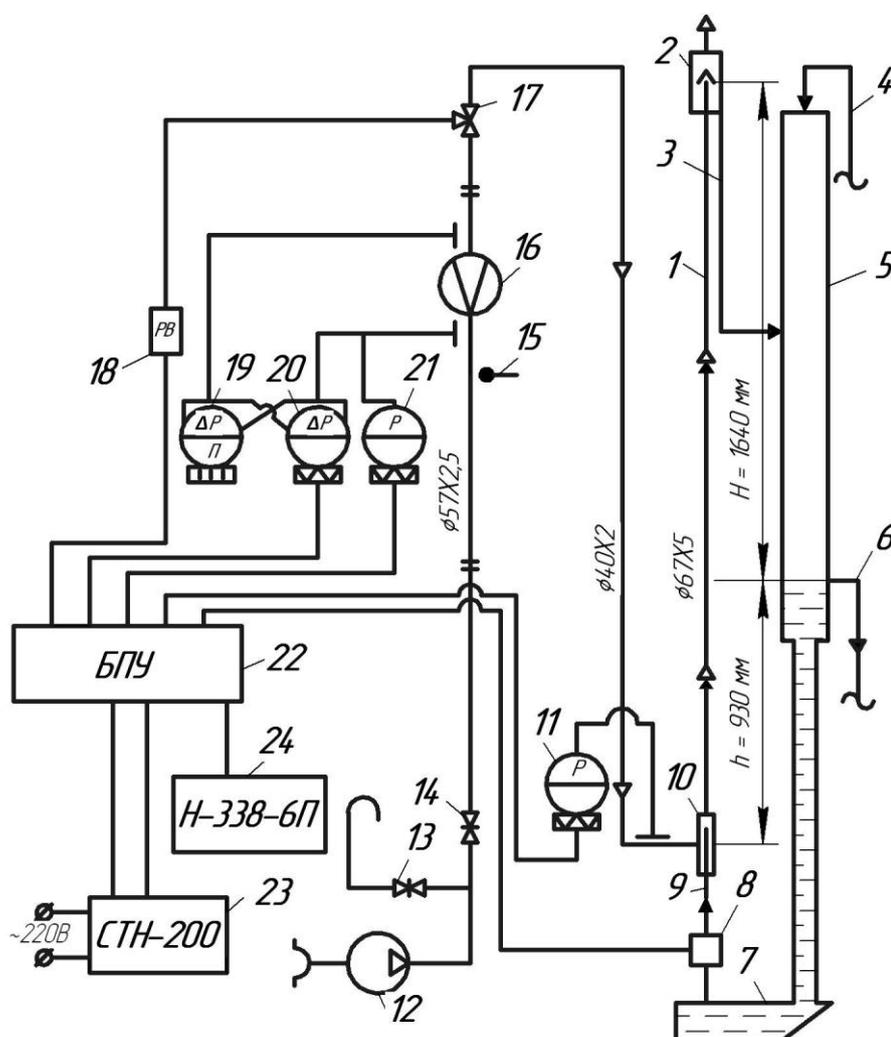
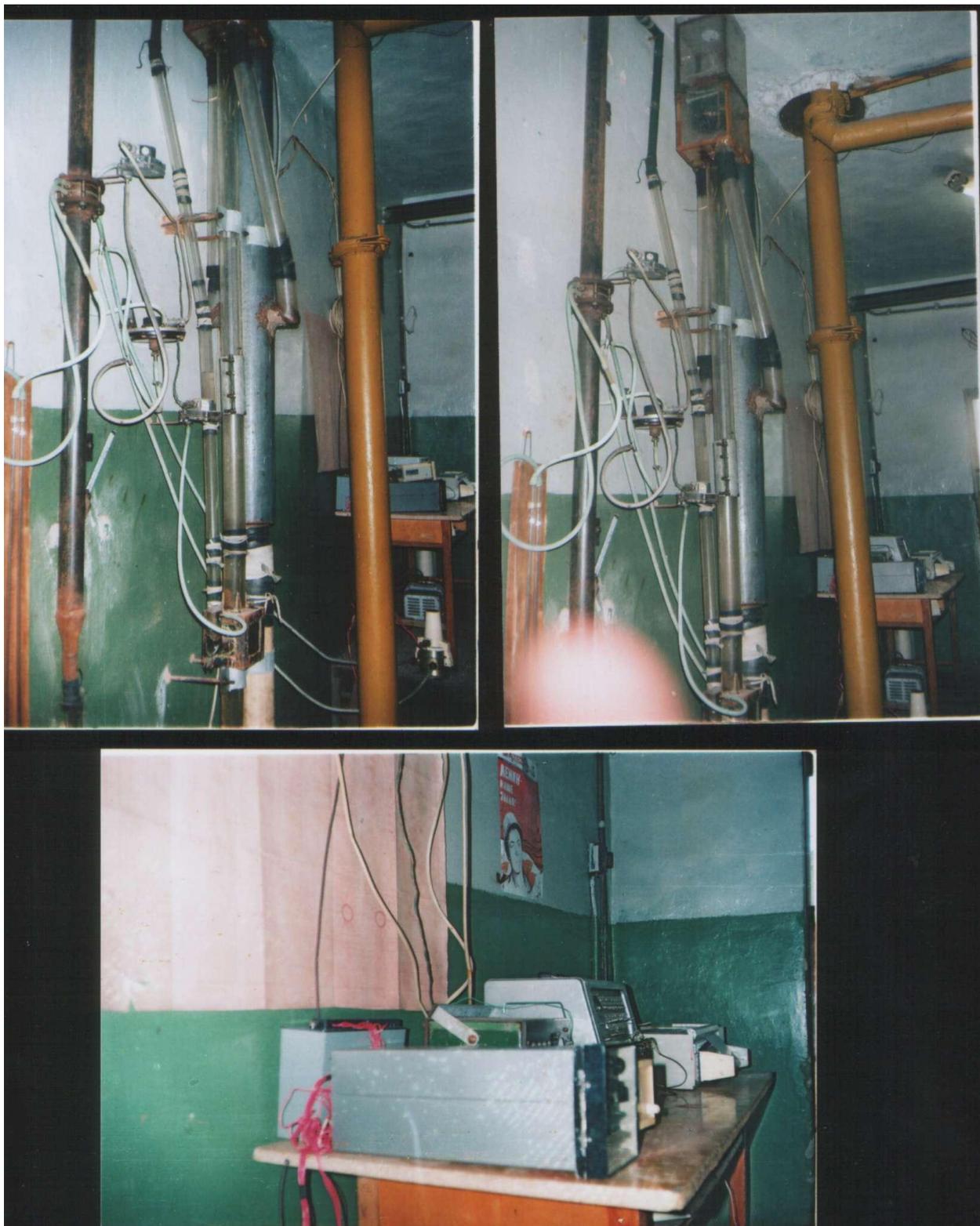


Рис. 4.1 – Схема экспериментальной эрлифтной установки



Рис. 4.2 – Экспериментальная эрлифтная установка



Продолжение рис. 4.2

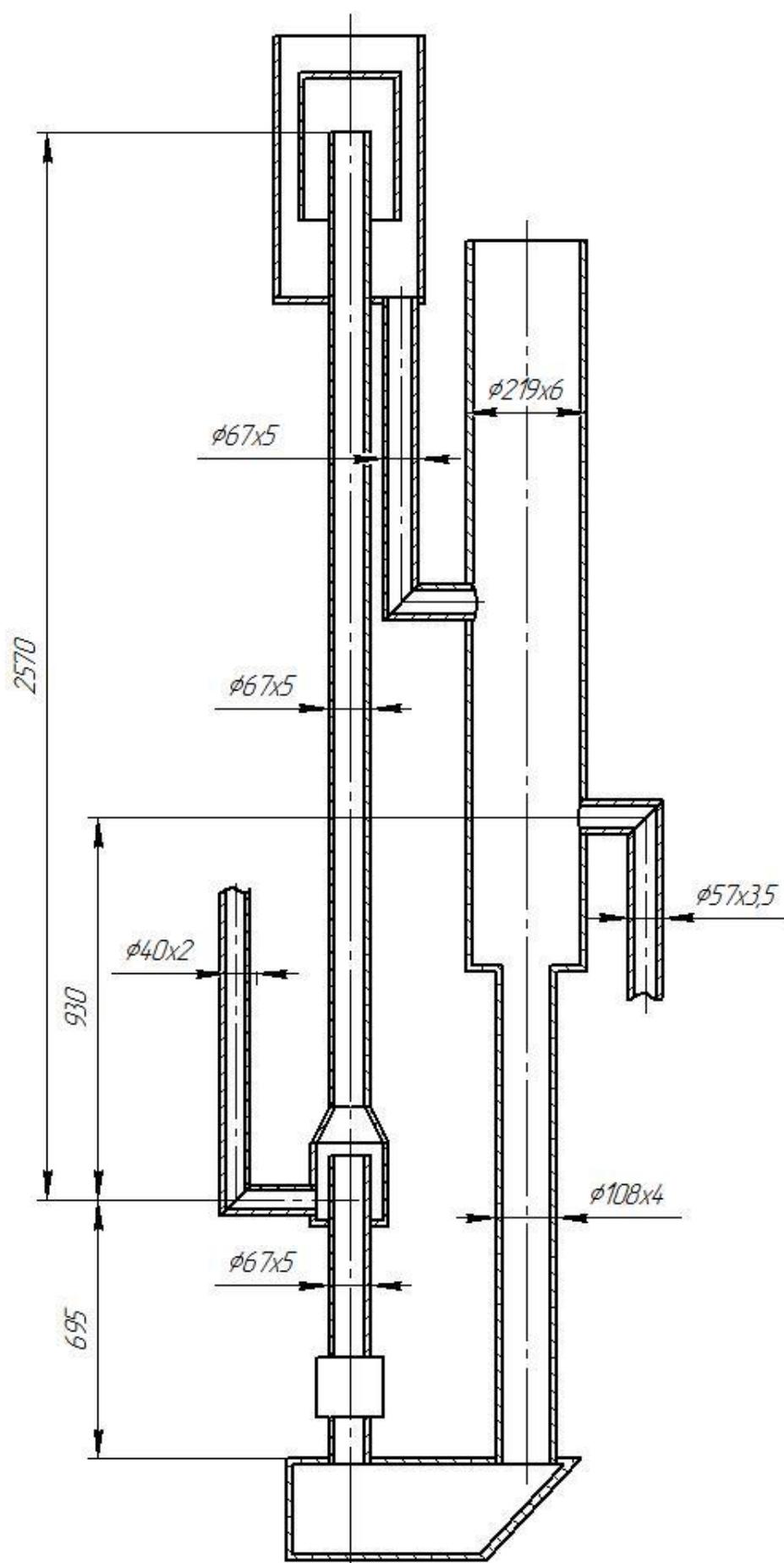


Рис. 4.3 – Экспериментальный эрлифт с подъемной трубой  $D = 57\text{мм}$

На воздухопроводе  $\varnothing 40 \times 2$  мм после измерительного узла установлен запорно-регулирующий клапан 17 для обеспечения дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта. Нормальное положение регулирующего клапана 17 – закрытое. Открытие его осуществляется с помощью электромагнита ЭМ, который управляется реле времени РВ (рис. 4.4, а).

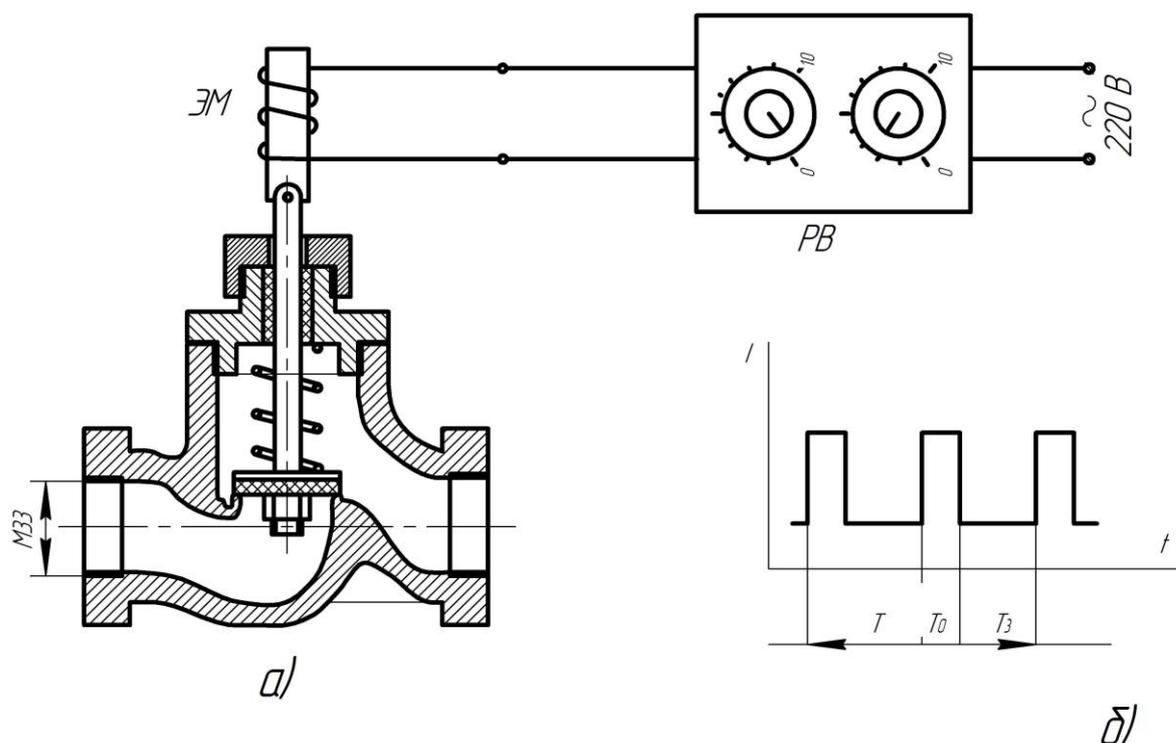


Рис. 4.4 – Схема воздушного запорно-регулирующего клапана для экспериментальной эрлифтной установки

С помощью реле времени РВ задается продолжительность импульсов  $T$  тока, которые поступают на электромагнит ЭМ клапана 17, который и обеспечивает дискретную подачу сжатого воздуха. Продолжительность импульсов тока, поступающих на электромагнит ЭМ, а, следовательно, и время открытия  $T_0$  и закрытия  $T_3$  проходного сечения регулирующего клапана (рис. 4.4, б) могло изменяться в достаточно широком диапазоне (от 0 до нескольких минут).

Узел для измерения расхода воздуха кроме измерительной диафрагмы 16, был оснащен датчиком давления 21, датчиком перепада давлений 20, водяным дифференциальным манометром 19 и ртутным термометром 15.

Измерение давления в смесителе осуществлялось с помощью датчика давления 11 (табл. Г.1). Все датчики давления потенциометрические с упругими элементами. Жесткие упругие элементы используемых авиационных датчиков давления были заменены на мягкие, что позволило расширить диапазон измеряемых давлений (табл. Г.1). Датчики тарировались в лабораторных условиях с помощью водного  $U$ -образного манометра (поз. 19, рис. 4.1, табл. Г.1).

Требования к конструкции измерительной диафрагмы, дифференциальному манометру, приборам для измерения параметров среды, соединительным линиям и прямым участкам трубопроводов до и после сужающего устройства были выполнены в соответствии с [108].

Подача эрлифта измерялась расходомером – электротурбогенератором 8. Корпус датчика расхода жидкости 8 был изготовлен из дюралюминия, турбина – шестилопастная и выполнена из пластмассы. В лопадки турбины вклеены магнитопроводные элементы, а в корпус датчика расхода жидкости на эпоксидной смоле вмонтированы индуктивность с омическим сопротивлением 2200 Ом. При вращении турбины периодически замыкается магнитное поле индуктивности и с ее обмотки снимается напряжение переменного тока, которое не превышает 0,6 В.

Тарировочные характеристики датчиков 8, 11, 20, 21 приведены на рис. Г.1 ... Г.3.

Питание и калибровка датчиков 8, 11, 20 и 21 осуществляется блоком БПУ (блок питания и управления, позиция 22, рис. 4.1). Сигналы датчиков 8, 11, 20 и 21 из блока БПУ поступают на самописец Н-338-6П (позиция 24, рис. 4.1), на лентах которого регистрировались показания датчиков и калибровка по минимуму и максимуму их показаний. Питание системы измерения выполнялось через феррорезонансный стабилизатор напряжения СТН-200 (позиция 23, рис. 4.1). На выходе из стабилизатора параллельно цепи электропитания была подключена электролампа на 100 Вт с целью обеспечения его нормальной электрической нагрузки.

Блок БПУ был разработан для питания, управления и калибровки датчиков, используемых при экспериментальных исследованиях эрлифта. Блок БПУ питается от феррорезонансного стабилизатора СТН-200 (рис. 4.5). Стабилизированная нагрузка подается на выпрямитель блока БПУ и на самописец Н-338-6П. Выпрямитель блока БПУ, выполненный на диодах  $D_1 \dots D_4$  (Д204) напряжением 20 В, служит для питания реле  $P_1$  и  $P_2$ . Второй выпрямитель на диодах  $D_5 \dots D_8$  (Д204) напряжением 8 В служит для электропитания и калибровки датчика расхода жидкости. Емкость фильтра в обоих выпрямителях  $C_1$  и  $C_3$  равняется 2000 мкФ. Тумблер Т нейтрального положения в реле  $P_1$  и  $P_2$  (РЕС-9) служит для периодической калибровки всех датчиков. В нейтральном положении тумблера Т, реле  $P_1$  и  $P_2$  не запитаны, и сигналы из датчиков подаются через нормально запертые контакты на самописец. В случае включения тумблера Т на самописец подается максимальное или минимальное показания датчиков, которые и являются их калибровкой. Предлагаемая внешняя калибровка удобна тем, что при изменении усиления на самописце калибровка учитывает этот фактор в любой период записи сигналов на самописец.

Датчик расхода жидкости (ДРЖ) выдает сигнал переменного тока напряжением не больше 0,6 В. С целью устранения влияния диодной характеристики на показания датчика расхода жидкости использовался линейный детектор слабых сигналов (ЛДСС), выполненный на 4 транзисторах с N-P-N и N-P-N-переходами.

На электрической схеме показаны подключения только одного датчика давления, а два других подключаются аналогично. Все датчики к блоку БПУ и самописца подключаются гибкими кабелями с разъемными соединениями.

Перечень и характеристики контрольно-измерительных приборов, которые применялись при проведении экспериментальных исследований работы эрлифта, приведены в таблице Г.1.

Погрешности измерений расходов сжатого воздуха и подачи эрлифта не превышали 2% (приложение Г.1).

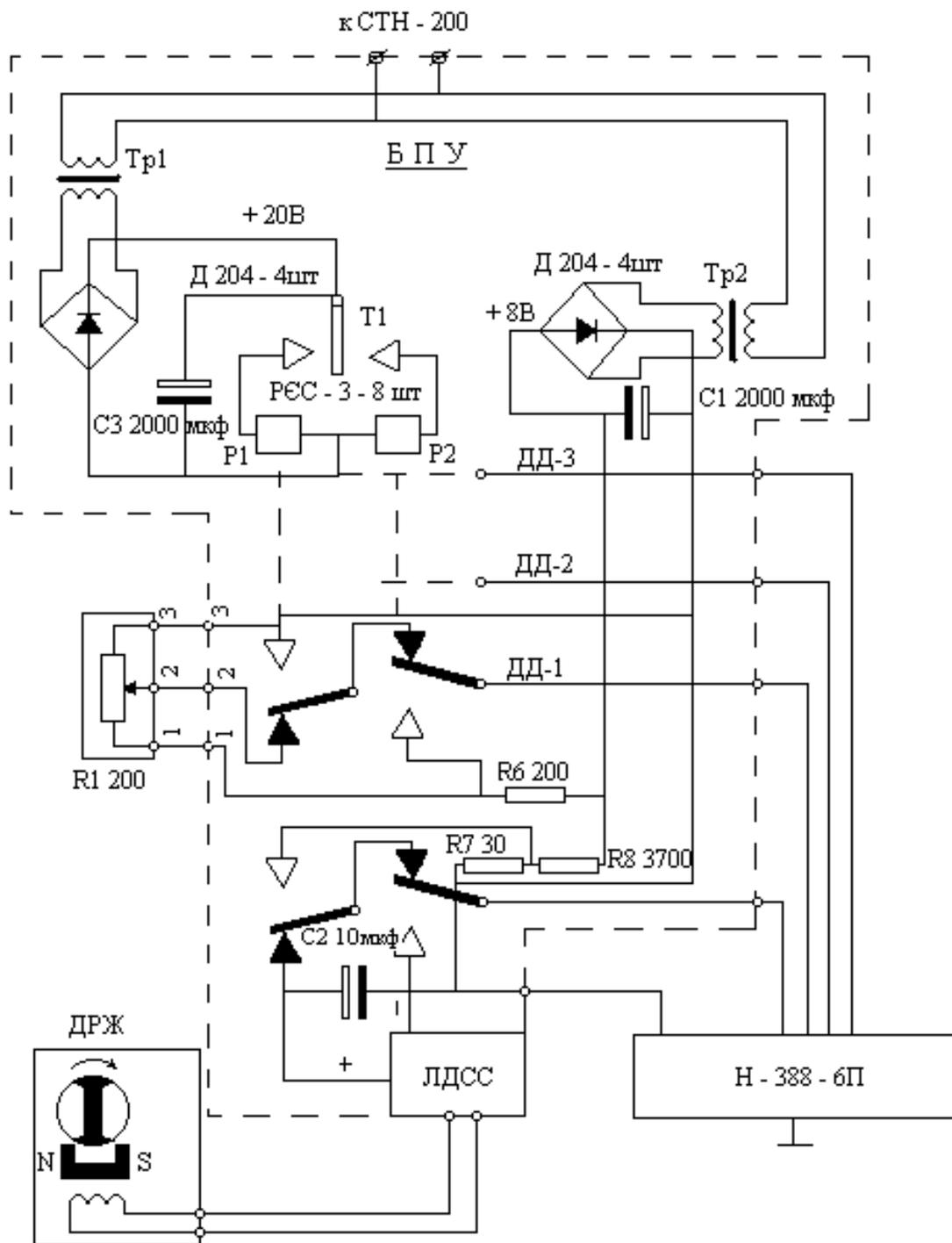


Рис. 4.5 – Электрическая схема питания, управления и калибровки датчиков

### 4.3. Результаты экспериментальных исследований

#### 4.3.1. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса обычного эрлифта

С использованием разработанной и построенной установки были выполнены экспериментальные исследования эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D = 57$  мм и длиной  $H+h = 2,57$  м, геометрическим погружением смесителя  $h = 0,93$  м и относительным погружением смесителя  $\alpha = 0,362$  с непрерывной (традиционно работающего) и дискретной подачей сжатого воздуха.

Последовательность проведения испытаний традиционно работающего эрлифта следующая. Нижняя часть эрлифта и вертикальной емкости 5 по гибкому шлангу 4 заполнялась водой (рис. 4.1). При открытом вентиле 13 сброса воздуха в атмосферу включался центробежный нагнетатель 12 и обеспечивался его выход на рабочий режим. По истечении непродолжительного времени вентиль 13 прикрывался, а вентиль 14 открывался до установления минимально допустимого расхода воздуха ( $0,00603$  м<sup>3</sup>/с, протокол № 1, табл. Г.2), при котором имела место устойчивая подача эрлифта. Постоянство геометрического погружения смесителя  $h = 0,93$  м обеспечивалось подпиткой системы водой из шланга 4 в количестве, при котором имел место ее постоянный перелив через трубопровод 6. После проверки устойчивости режима работы эрлифта (в течение 5 ... 10 мин.) и получасового прогрева самопишущего прибора Н-338-6П проводилась запись показаний датчиков давления, перепада давлений и расхода жидкости на ленту самописца. Продолжительность записи показаний приборов составляла 1 ... 3 мин. Температура воздуха измерялась термометром 15 и записывается на ленту самописца.

Расход воздуха увеличивался, что оценочно визуально контролировалось U-образным водяным дифманометром 19, и замеры повторялись до его значения, равного  $0,02077 \text{ м}^3/\text{с}$  (протокол №1, табл. Г.2).

После пяти измерений параметров режимов работы эрлифта выполнялась калибровка датчиков 11, 20, 21 с помощью прибора БПУ 22.

Атмосферные условия (давление, температура и влажность) на момент проведения эксперимента устанавливались в гидрометеоцентре.

Показания датчиков 8, 11, 20, 21 регистрировались на ленте самопишущего прибора 24 в криволинейных координатах (рис. 4.6). Для обработки экспериментальных данных с диаграмм регистрируемых величин снимались средние значения показаний датчиков в процентах. Среднее значение показания датчика определялось как отношение площади, находящейся под кривой диаграммы, к длине записи. По средним показаниям датчиков по их тарировочным характеристикам (рис. Г.1 ... Г.3) данные в процентах переводились в значения соответствующих параметров в физических единицах (табл. Г.2).

Экспериментальные данные обработаны на ПК методом наименьших квадратов, полученные уравнения регрессии (4.2 ... 4.4) описывают опытные точки со среднеквадратической погрешностью, не превышающей  $S \leq 0,25 \%$ :

$$Q_3 = 6,056 - 0,26587 \cdot Q_6^3 - \frac{1,171}{Q_6}, \quad (4.2)$$

здесь  $Q_3$  –  $\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $Q_6$  –  $\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $S = 0,25 \%$ , диапазон изменения аргумента  $0,362 \leq Q_6 \leq 1,246$ ;

$$p_{см} = 0,09302 + \frac{0,00004623}{Q_6}, \quad (4.3)$$

здесь  $p_{см}$  –  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ,  $Q_6$  –  $\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $S = 0,03 \%$ , диапазон изменения аргумента  $0,362 \leq Q_6 \leq 1,246$ ;

$$p_{nc} = 0,093, \quad (4.4)$$

здесь  $p_{nc}$  –  $\text{кгс}/\text{см}^2$ ,  $S = 0\%$ .

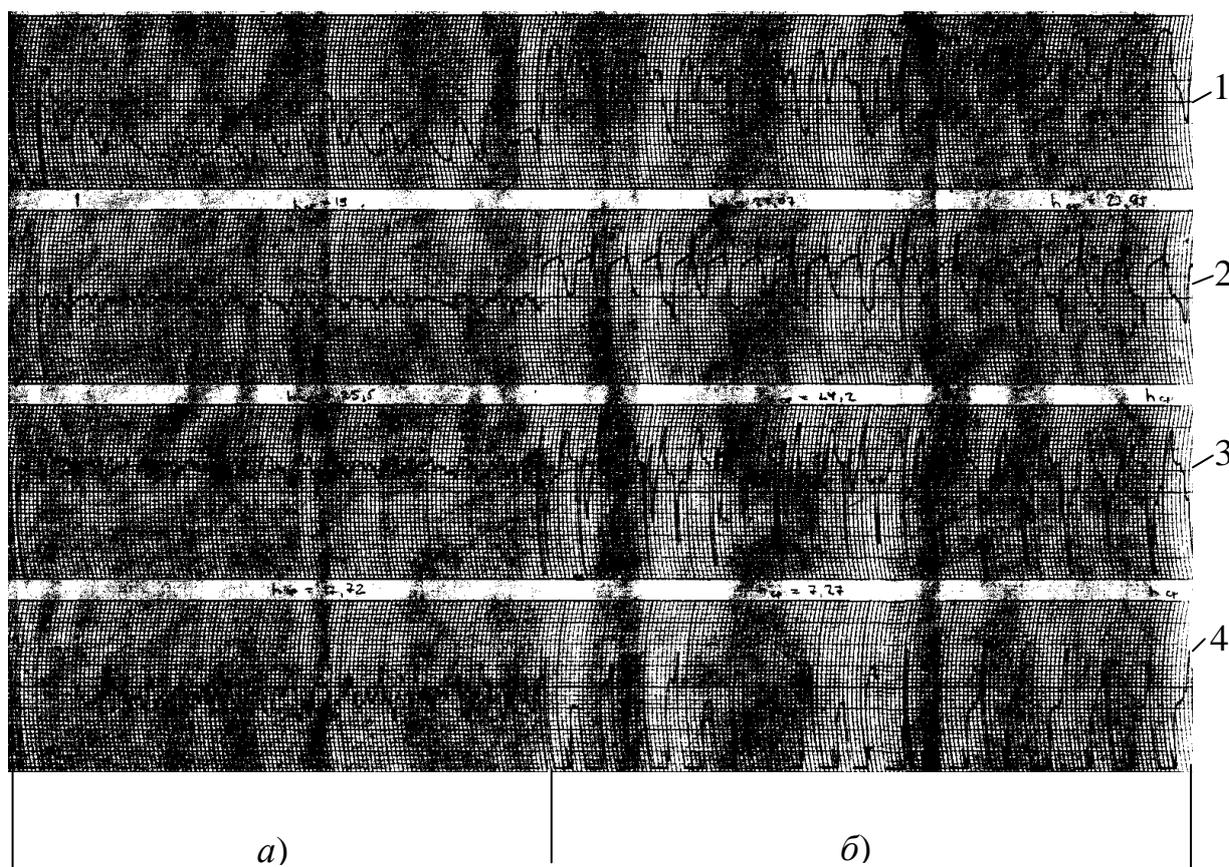


Рис. 4.6 – Фрагмент диаграммы самопишущего прибора Н-338-6П:  
 а) – при традиционной работе эрлифта; б) – при дискретной подаче воздуха при соотношениях периодов времени, характеризующих положение запорно-регулирующего элемента воздушного клапана  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5$ ; 1 – датчик расхода жидкости (подача эрлифта); 2 – давление воздуха перед измерительной диафрагмой; 3 – давление в смесителе; 4 – перепад давлений на измерительной диафрагме

По результатам экспериментальных данных была построена расходная характеристика  $Q_3 = f(Q_6)$  традиционно работающего эрлифта с диаметром подъемной трубы  $D = 57$  мм (кривая 1, рис. 4.7) при уровне воды в вертикальной емкости выше уровня врезки воздухопровода в смеситель, составляющем 0,93 м. Были получены также зависимости изменения давления в смесителе  $p_{см} = f(Q_6)$  (кривая 1', рис. 4.7) и гидростатического давления геометрического погружения смесителя  $p_{н.с} = f(Q_6)$  (кривая 1'', рис. 4.7) от расхода воздуха. Отличие давления в смесителе  $p_{см}$  от гидростатического

давления геометрического погружения смесителя  $p_{n.c}$  не превышало 1 %, что указывает на обоснованность пренебрежения, в данном случае, влияния гидравлических потерь в подающей трубе [36] на работу эрлифта на всех экспериментально исследованных режимах.

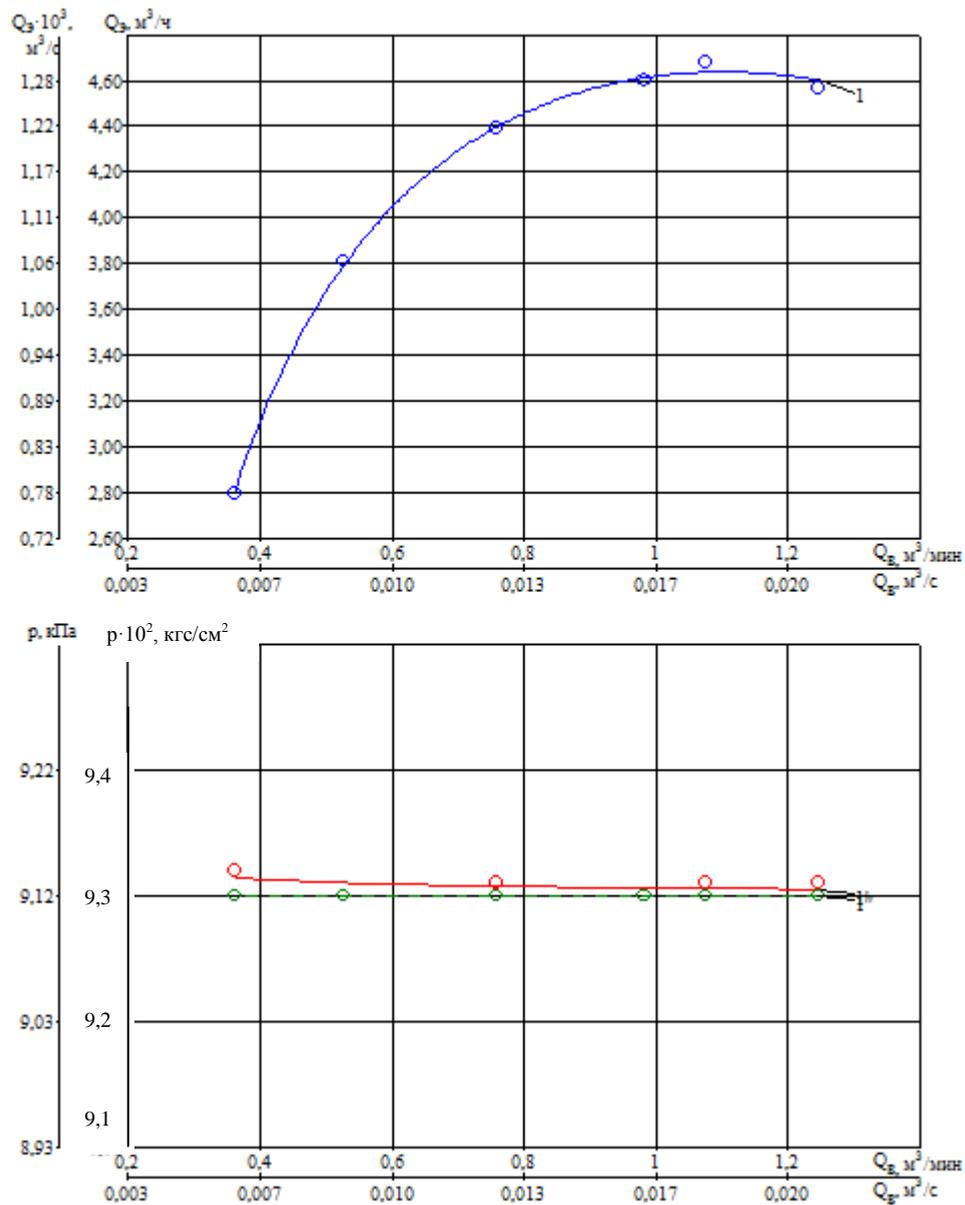


Рис. 4.7 – Характеристики традиционно работающего эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57\text{мм}$ , длиной  $H+h=2,57\text{м}$ , геометрическим погружением смесителя  $h=0,93\text{м}$ : 1 –  $Q_3 = f(Q_6)$ ; 1' –  $p_{cm} = f(Q_6)$ ; 1'' –  $p_{n.c} = f(Q_6)$

#### 4.3.2. Результаты экспериментальных исследований рабочего процесса эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха

Отличие методики проведения экспериментальных исследований эрлифта на данном этапе от методики экспериментальных исследований традиционно работающего эрлифта (раздел 4.3.1) заключалось в дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель эрлифта при помощи регулирующего клапана 17 и реле времени 18 (рис. 4.1). Были получены характеристики эрлифта при четырех соотношениях периодов времени, характеризующих положение запорно-регулирующего элемента клапана 17 ( $t_{откр}$  – запорно-регулирующий элемент клапана 17 открыт,  $t_{закр}$  – запорно-регулирующий элемент клапана 17 закрыт):  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1$  (табл. Г.2, протокол 2),  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5$  (табл. Г.2, протокол 3),  $t_{откр}/t_{закр} = 1/2$  (табл. Г.2, протокол 4),  $t_{откр}/t_{закр} = 1/2,5$  (табл. Г.2, протокол 5). Для других соотношений периодов времени  $t_{откр}/t_{закр}$ , задаваемых во время экспериментальных исследований работы эрлифта, положительных результатов получено не было – либо режимы работы эрлифта не отличались от традиционных режимов, либо работа эрлифта становилась неустойчивой, вплоть до срыва подачи и прекращения его работы. В остальном объем и методика экспериментальных исследований эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха не отличалась от экспериментальных исследований традиционно работающего эрлифта.

Как и в случае экспериментальных исследований традиционно работающего эрлифта (раздел 4.3.1), экспериментальные данные, полученные при исследовании эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха, обработаны на ПК методом наименьших квадратов, полученные уравнения регрессии (4.2 ... 4.4) описывают опытные точки со среднеквадратической погрешностью, не превышающей  $S \leq 0,26$  %:

$$- t_{откр}/t_{закр} = 1/1 \text{ (табл. Г.2, протокол 2)}$$

$$Q_3 = 6,359 - 0,25991 \cdot Q_6^3 - \frac{1,403}{Q_6}, \quad (4.5)$$

здесь  $Q_3$  – м<sup>3</sup>/ч,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,24$  %, диапазон изменения аргумента  $0,384 \leq Q_6 \leq 1,206$ ;

$$p_{см} = 0,0931 - \frac{0,00007008}{Q_6}, \quad (4.6)$$

здесь  $p_{см}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,02$  %, диапазон изменения аргумента  $0,384 \leq Q_6 \leq 1,206$ ;

$$p_{нс} = 0,093, \quad (4.7)$$

здесь  $p_{нс}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $S = 0$  %;

–  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5$  (табл. Г.2, протокол 3)

$$Q_3 = 4,593 + 2,141 \cdot Q_6 - 0,5482 \cdot Q_6^3 - \frac{0,6353}{Q_6} + 0,05638 \cdot \ln Q_6 + 0,07909 \cdot \sqrt{Q_6}, \quad (4.8)$$

здесь  $Q_3$  – м<sup>3</sup>/ч,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,21$  %, диапазон изменения аргумента  $0,408 \leq Q_6 \leq 1,326$ ;

$$p_{см} = 0,09304 + 0,00004684 \cdot \ln Q_6, \quad (4.9)$$

здесь  $p_{см}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,02$  %, диапазон изменения аргумента  $0,408 \leq Q_6 \leq 1,326$ ;

$$p_{нс} = 0,093, \quad (4.10)$$

здесь  $p_{нс}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $S = 0$  %;

–  $t_{откр}/t_{закр} = 1/2$  (табл. Г.2, протокол 4)

$$Q_3 = 6,101 + 0,6974 \cdot Q_6 + 0,04016 \cdot Q_6^2 - 0,12787 \cdot Q_6^3 - \frac{1,014}{Q_6}, \quad (4.11)$$

здесь  $Q_3$  – м<sup>3</sup>/ч,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,26$  %, диапазон изменения аргумента  $0,426 \leq Q_6 \leq 1,212$ ;

$$p_{см} = 0,09294 + 0,00003511 \cdot Q_6^3, \quad (4.12)$$

здесь  $p_{см}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,02$  %, диапазон изменения аргумента  $0,426 \leq Q_6 \leq 1,212$ ;

$$p_{nc} = 0,093, \quad (4.13)$$

здесь  $p_{nc}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $S = 0$  %;

–  $t_{откр}/t_{закр} = 1/2,5$  (табл. Г.2, протокол 5)

$$Q_3 = 6,123 + 0,9259 \cdot Q_6 - 0,21104 \cdot Q_6^3 - \frac{1,004}{Q_6} + 0,018573 \cdot \sqrt{Q_6}, \quad (4.14)$$

здесь  $Q_3$  – м<sup>3</sup>/ч,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,24$  %, диапазон изменения аргумента  $0,450 \leq Q_6 \leq 1,290$ ;

$$p_{см} = 0,09301 - 0,00024262 \cdot \ln Q_6, \quad (4.15)$$

здесь  $p_{см}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $Q_6$  – м<sup>3</sup>/мин,  $S = 0,02$  %, диапазон изменения аргумента  $0,450 \leq Q_6 \leq 1,290$ ;

$$p_{nc} = 0,093, \quad (4.16)$$

здесь  $p_{nc}$  – кгс/см<sup>2</sup>,  $S = 0$  %.

Построенные по результатам обработки экспериментальных данных расходные характеристики эрлифта  $Q_3 = f(Q_6)$ , а также зависимости изменения давления в смесителе  $p_{см} = f(Q_6)$  и гидростатического давления геометрического погружения смесителя  $p_{n.c} = f(Q_6)$  от расхода воздуха при его дискретной подаче приведены на рис. 4.8 ... 4.11. Для работы эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха отличие давления в смесителе  $p_{см}$  от гидростатического давления геометрического погружения смесителя  $p_{n.c}$  не превышало 1 %, что также, как и при традиционной работе подъемника (раздел 4.3.1), позволяет пренебречь влиянием гидравлических потерь в подающей трубе на режимы работы эрлифта [36].

#### 4.4. Исследование закономерностей изменения длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в прозрачной подъемной трубе экспериментального эрлифта

Визуальное наблюдение за водовоздушным потоком в прозрачной подъемной трубе эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м и  $\alpha = 0,362$  дает основание утверждать, что на всех экспериментально исследованных режимах при традиционной работе подъемника структура водовоздушной смеси относится к снарядной развивающейся. При этом между газовыми пузырями и жидкостными пробками нет строго очерченных границ, в водяных пробках имеют место мелкие воздушные пузыри, по ходу движения смеси в подъемной трубе наблюдалось как слияние, так и деление крупных пузырей. При этом визуально очевидно уменьшение длины жидкостных пробок по высоте подъемной трубы.

Дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта обеспечивала визуально заметное упорядочивание структуры водовоздушного потока с появлением достаточно очерченных границ между жидкостными пробками и газовыми снарядами. Проявлялись внешние признаки развитой снарядной структуры. Однако и в этом случае зачастую имели место, хотя и не такие интенсивные, как при традиционной работе эрлифта, слияния воздушных пузырей и насыщение жидкостных пробок газовыми включениями.

При такой нестабильной снарядной структуре установить и обосновать абсолютное значение длины жидкостных пробок было достаточно проблематично. Для выявления закономерностей изменения в процессе исследований длины жидкостных пробок как развивающейся, так и приближающейся к развитой снарядной структуре, по высоте прозрачной подъемной трубы наносились риски, расстояния между которыми с известной мерой допущений соответствовали искомым длинам. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

При традиционной работе эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м и  $\alpha = 0,362$  в диапазоне расходов сжатого воздуха  $0,008 \dots 0,015$  м<sup>3</sup>/с длины жидкостных пробок в нижней части подъемной трубы составляли  $(0,7 \dots 1,0) \cdot D$ , в верхней части –  $(0,5 \dots 0,8) \cdot D$ . Близкие к приведенным были получены результаты при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами времени, характеризующими положение запорно-регулирующего элемента воздушного клапана, соответствующими  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1$ .

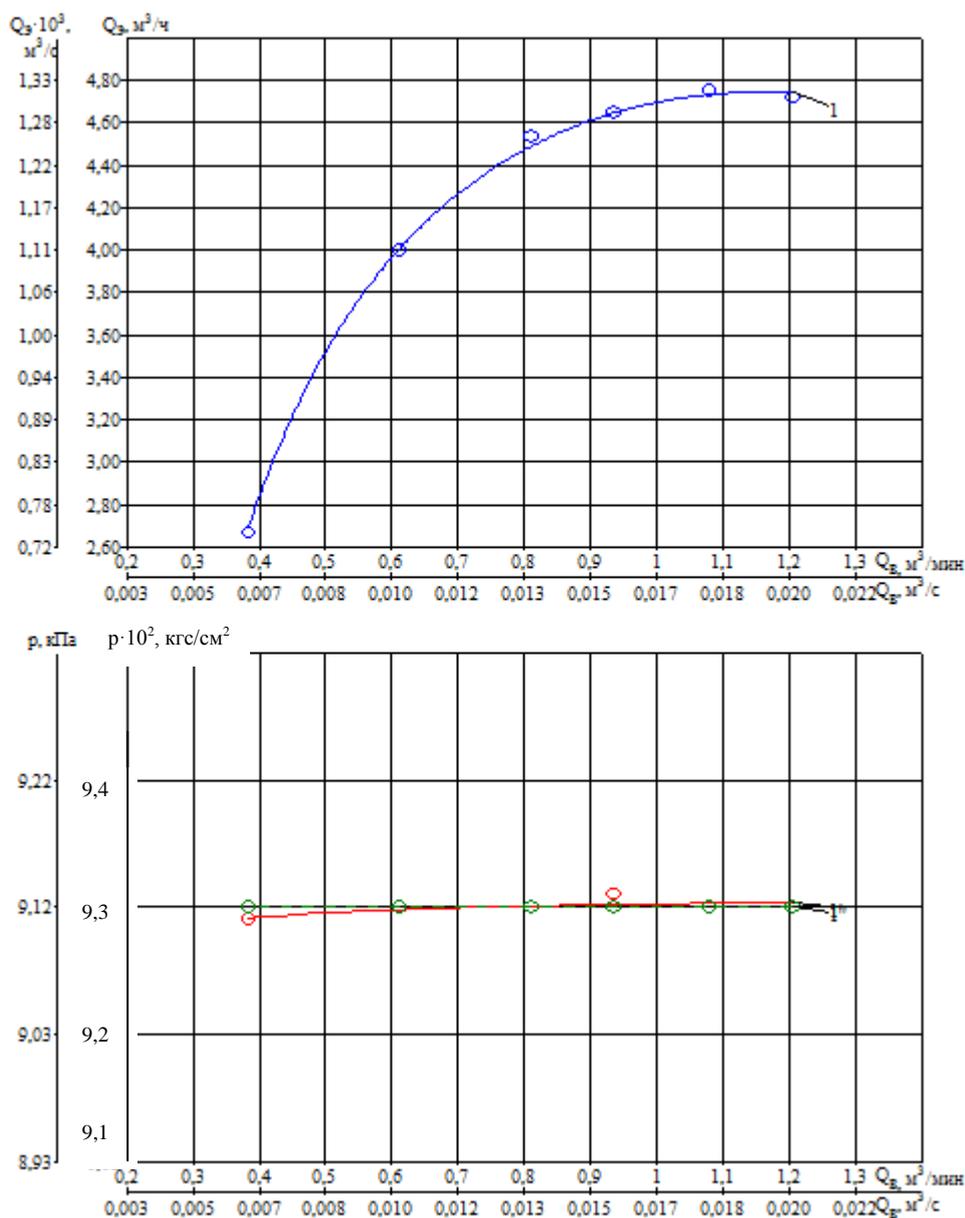


Рис. 4.8 – Характеристики эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57$  мм, длиной  $H+h=2,57$  м, геометрическим погружением смесителя  $h=0,93$  м с дискретной подачей сжатого воздуха  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1$ : 1 –  $Q_3 = f(Q_8)$ ; 1' –  $p_{см} = f(Q_8)$ ; 1'' –  $p_{н.с} = f(Q_8)$

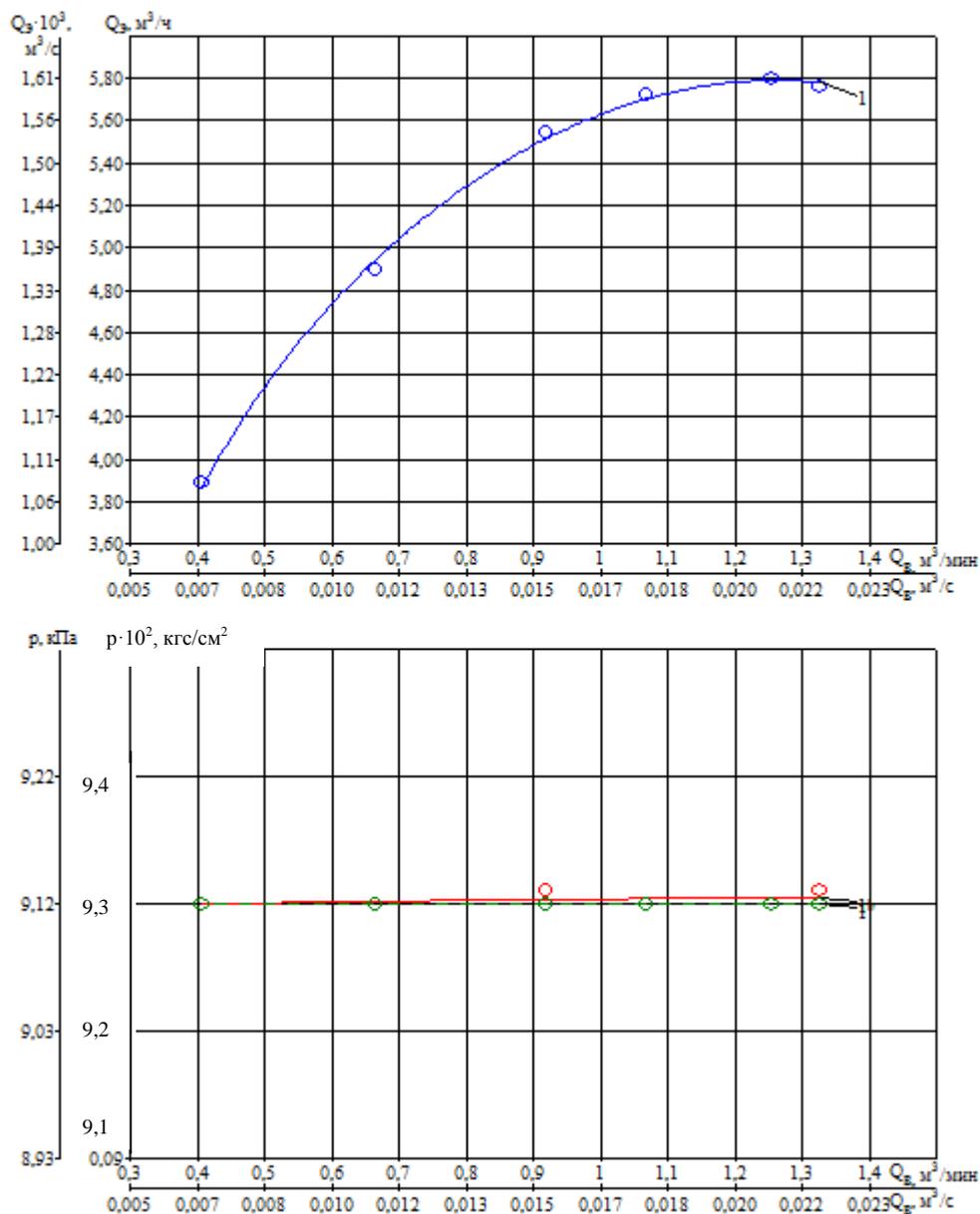


Рис. 4.9 – Характеристики эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57\text{мм}$ , длиной  $H+h=2,57\text{м}$ , геометрическим погружением смесителя  $h=0,93\text{м}$  с дискретной подачей сжатого воздуха  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5$ : 1 –  $Q_{\text{с}} = f(Q_{\text{в}})$ ; 1' –  $p_{\text{см}} = f(Q_{\text{в}})$ ; 1'' –  $p_{\text{н.с}} = f(Q_{\text{в}})$

При дискретной подаче сжатого воздуха с периодами времени  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5 \dots 1/2,5$  длины жидкостных пробок снарядной водовоздушной структуры увеличились. Количественно это составило: в нижней части подъемной трубы –  $(1,0 \dots 1,2) \cdot D$ , в верхней части –  $(0,8 \dots 1,0) \cdot D$ .

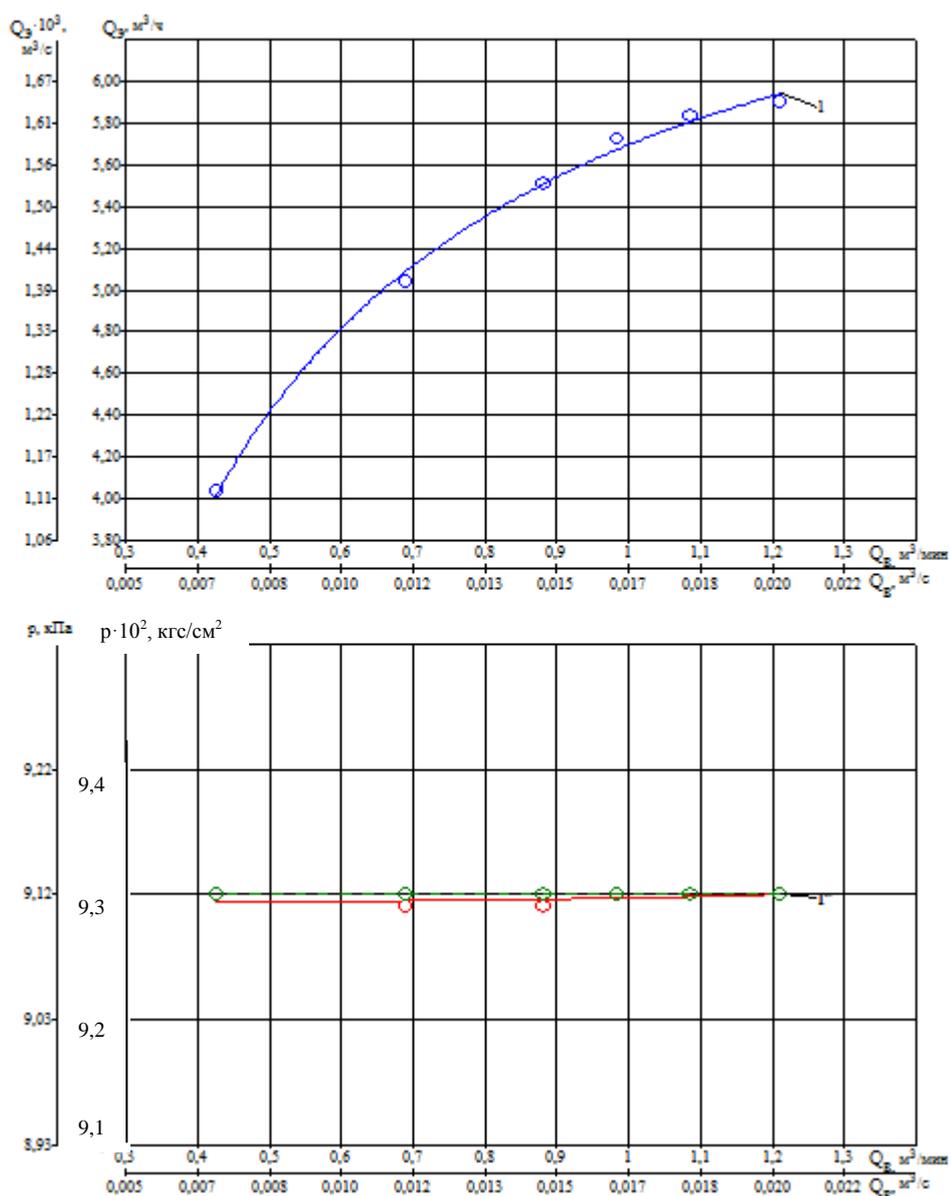


Рис. 4.10 – Характеристики эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57\text{мм}$ , длиной  $H+h=2,57\text{м}$ , геометрическим погружением смесителя  $h=0,93\text{м}$  с дискретной подачей сжатого воздуха  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/2$ : 1 –  $Q_3 = f(Q_{в})$ ; 1' –  $p_{см} = f(Q_{в})$ ; 1'' –  $p_{н.с} = f(Q_{в})$

Результаты визуальных наблюдений, при бесспорно большой вероятности использованного метода, позволяют утверждать об увеличении длины жидкостных пробок на 30 ... 40% при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами времени  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5 \dots 1/2,5$  в сравнении с традиционной работой эрлифта.

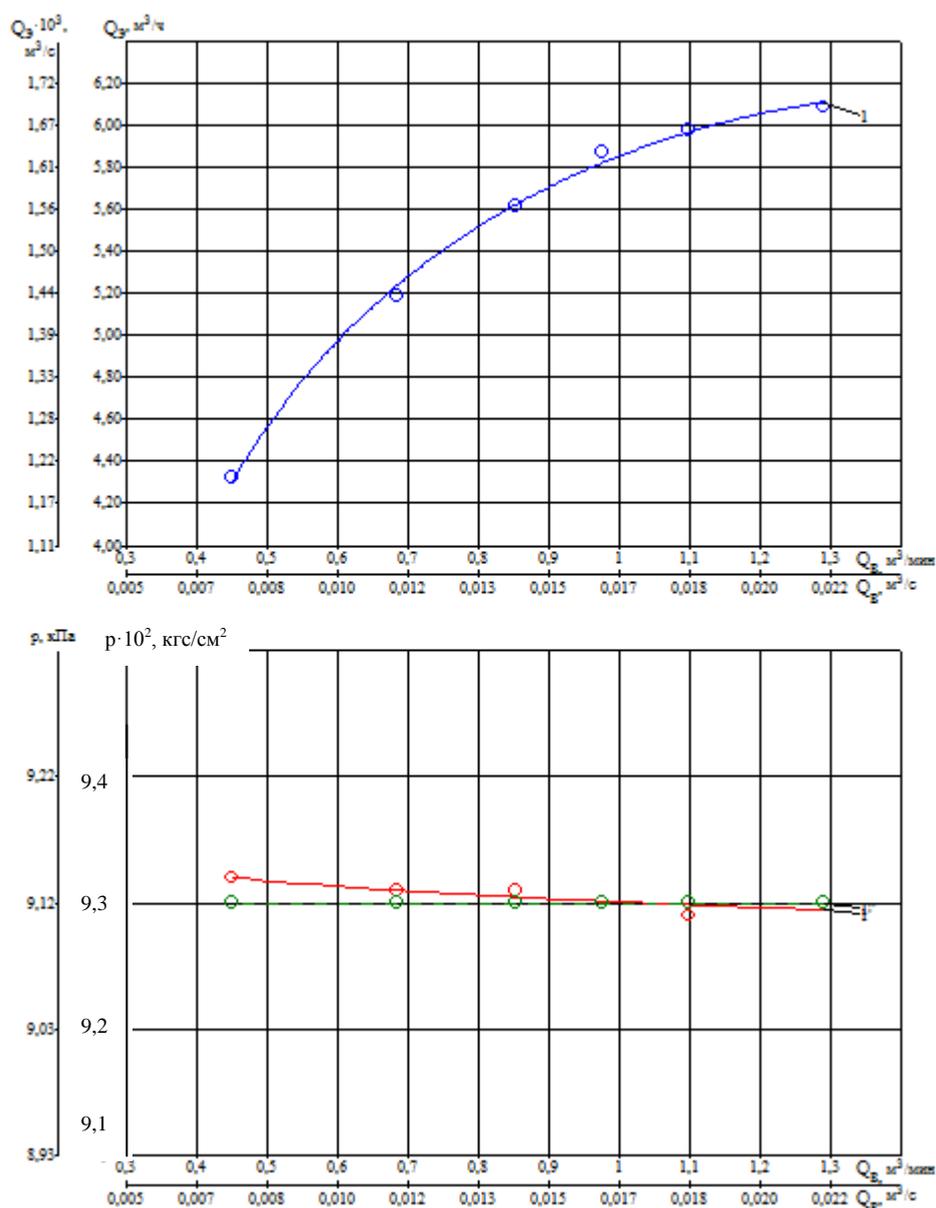


Рис. 4.11 – Характеристики эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57\text{мм}$ , длиной  $H+h=2,57\text{м}$ , геометрическим погружением смесителя  $h=0,93\text{м}$  с дискретной подачей сжатого воздуха  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/2,5$ : 1 –  $Q_3 = f(Q_{в})$ ; 1' –  $p_{\text{см}} = f(Q_{в})$ ; 1'' –  $p_{\text{н.с}} = f(Q_{в})$

Полученные экспериментальные данные работы эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха в соответствии с положениями теории подобия и моделирования правомерно относить к газожидкостным подъемникам с относительными погружениями смесителей  $\alpha \geq 0,362$ , относительными длинами подъемных труб  $(H+h)/D \leq 45$  [для исследуемого эрлифта

$(H+h)/D = 2,57/0,057 = 45]$ , значениями чисел Струхаля (критерий гомохронности)  $Sh = 0,123 \dots 0,992$  (приложение Г.2) при соответствии числа Рейнольдса  $Re$  водовоздушного потока автомоделной зоне.

#### 4.5. Выводы

1. Разработана экспериментальная эрлифтная установка, содержащая эрлифт с подъемной трубой диаметром  $D = 57$  мм и длиной  $H+h = 2,57$  м, геометрическим погружением смесителя  $h = 0,93$  м и относительным погружением смесителя  $\alpha = 0,362$  с возможностью непрерывной (традиционная работа эрлифта) и дискретной подачи сжатого воздуха.

2. В состав контрольно-измерительного комплекса экспериментальной эрлифтной установки входил разработанный электронный блок питания и управления, предназначенный для питания, управления и калибровки используемых датчиков давления, перепада давления, а также разработанного датчика расхода жидкости. Показания датчиков давления, перепада давления и расхода жидкости регистрировались самопишущим прибором, для анализа режимов работы эрлифта использовались осредненные значения показаний указанных датчиков. Погрешности измерений расходов сжатого воздуха и подачи эрлифта не превышали 2 %.

3. Экспериментальные данные обработаны методом наименьших квадратов, полученные уравнения регрессии описывают опытные точки со среднеквадратической погрешностью, не превышающей 1 %. По результатам обработанных экспериментальных данных построены расходные характеристики эрлифта  $Q_s = f(Q_e)$ , а также зависимости изменения давления в смесителе  $p_{см} = f(Q_e)$  и гидростатического давления геометрического погружения смесителя  $p_{н.с} = f(Q_e)$  от расхода воздуха при традиционной работе подъемника и при дискретной подаче сжатого воздуха при четырех соотношениях периодов времени, характеризующих положение запорно-

регулирующего элемента воздушного клапана:  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1; 1/1,5; 1/2; 1/2,5$  ( $t_{откр}$  – запорно-регулирующий элемент клапана открыт,  $t_{закр}$  – запорно-регулирующий элемент клапана закрыт).

4. Выполнены визуальные наблюдения структуры и оценочные измерения длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в прозрачной подъемной трубе эрлифта. Снарядный водовоздушный поток в подъемной трубе традиционно работающего эрлифта следует относить к развивающемуся, а при дискретной подаче сжатого воздуха в смеситель – приближающемуся к развитому. Длина жидкостных пробок при дискретной подаче сжатого воздуха в эрлифт на 30 ... 40% превышает длину жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в прозрачной подъемной трубе традиционно работающего эрлифта.

5. В соответствии с положениями теории подобия и моделирования результаты экспериментальных исследований эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха возможно относить к газожидкостным подъемникам с относительными погружениями смесителей  $\alpha \geq 0,362$ , относительными длинами подъемных труб  $(H+h)/D \leq 45$ , значениями чисел Струхала (критерий гомохронности)  $Sh = 0,123 \dots 0,992$  при соответствии числа Рейнольдса  $Re$  водовоздушного потока автомоделльной зоне.

## РАЗДЕЛ 5

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ  
 ОБЩЕПРОМЫШЛЕННОГО ЭРЛИФТА С ДИСКРЕТНОЙ ПОДАЧЕЙ  
 СЖАТОГО ВОЗДУХА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ  
 ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Инженерная методика расчета общепромышленного эрлифта с  
 дискретной подачей сжатого воздуха

Общепромышленным эрлифтом принято считать эрлифт, как правило, с длиной подъемной трубы  $H+h \leq 30 \dots 50$  м и диаметром  $D \leq 300 \dots 400$  мм [36]. При таких основных геометрических параметрах эрлифта и относительных погружениях смесителя  $\alpha \geq 0,4$  дискретная подача сжатого воздуха в смеситель подъемника позволит повысить энергетическую эффективность его работы, что подтверждено выполненными в данной диссертации исследованиями.

При разработке эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха, как и традиционно работающего эрлифта, потребными исходными данными для расчета основных геометрических и технологических параметров являются:

- требуемая подача  $Q_э$ ;
- высота подъема жидкости (гидросмеси) относительно ее исходного уровня  $H$ ;
- плотность перекачиваемой жидкости  $\rho'$  или гидросмеси (или ее консистенция);
- плотность транспортируемого твердого материала  $\rho_m$ ;
- средневзвешенная и максимальная крупность твердых частиц  $d_k$ ;
- возможный источник пневмоэнергии.

Искомые величины:

- диаметр подъемной  $D$  и подающей  $d$  труб;
- давление (абсолютное)  $p_e$  и расход  $Q_e$  воздуха как при традиционной работе эрлифта, так и при дискретной подаче сжатого воздуха.

Рациональные соотношения периодов времени  $t_{откр}/t_{закр}$ , характеризующих положение запорно-регулирующего элемента воздушного клапана на воздухопроводе, при дискретной подаче сжатого воздуха в смеситель эрлифта, определяется опытным путем в процессе выполнения пусконаладочных работ внедряемой эрлифтной установки исходя из минимально возможного значения этого соотношения. Как теоретически, так и экспериментально в данной работе подтверждена тенденция повышения экономической эффективности работы эрлифта при уменьшении соотношения  $t_{откр}/t_{закр}$ , пределом чего является потеря устойчивости транспортирования (лифтирования) жидкости (гидросмеси). Аналитическое определение значения соотношения  $t_{откр}/t_{закр}$  для каждого из проектируемых эрлифтов с заданными геометрическими и технологическими параметрами в настоящее время не представляется возможным.

Расчет конструктивных и технологических параметров эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель газожидкостного подъемника выполняется в два этапа: предварительный – для традиционной работы подъемника и уточненный – с учетом дискретной подачи сжатого воздуха.

В объем предварительного расчета эрлифтной установки входит вычисление его основных конструктивных и технологических параметров при традиционной работе. Исходя из характеристик возможного источника пневмоэнергии, определяется допустимое значение геометрического погружения смесителя  $h$ . При этом потребное максимальное абсолютное давление сжатого воздуха источника пневмоэнергии составляет

$$p_e = k_3 \cdot (p_0 + p_{см} + \Delta p_e) = k_3 \cdot (p_0 + \rho' \cdot g \cdot h + \Delta p_e), \quad (5.1)$$

где  $k_3$  – коэффициент, определяемый необходимостью обеспечения более высокого пускового давления сжатого воздуха в сравнении с эксплуатационным,  $k_3 = 1,05 \dots 1,1$ ;

$\Delta p_e$  – потери давления в воздухопроводе.

Относительное погружение смесителя эрлифта

$$\alpha = \frac{h}{H + h}. \quad (5.2)$$

Для обеспечения энергетически эффективной для эрлифта снарядной структуры водовоздушного потока необходимо выполнение условия  $\alpha \geq 0,4$  [35, 36].

Диаметр подъемной трубы в первом приближении определяется по зависимости [26, 27]

$$D = 5 \sqrt{\frac{Q_s^2}{k_Q^2 \cdot g}}, \quad (5.3)$$

где  $k_Q$  – коэффициент подачи.

Коэффициент подачи [26, 27, 50]:

- для длинных эрлифтов  $\left( \frac{H + h}{D} > 200, \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_0} > 2 \right)$

$$k_Q = 5 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \frac{\sqrt{q_n + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}}{1 + q_n}, \quad (5.4)$$

где  $q_n$  – удельный расход воздуха, приведенный к давлению в середине подъемной трубы; для диапазонов  $h = 40 \dots 120$  м и  $\alpha = 0,15 \dots 0,50$  правомерно:

$$q_n = 60 \cdot e^{-9\alpha}; \quad (5.5)$$

- для коротких эрлифтов  $\left( \frac{H + h}{D} < 200, \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_0} < 2 \right)$

$$k_Q = 3,68 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \frac{\sqrt{q + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}}{1 + q}, \quad (5.6)$$

где  $q$  – удельный расход воздуха; для диапазонов  $h = 4 \dots 10$  м и  $\alpha = 0,15 \dots 0,50$  правомерно

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}. \quad (5.7)$$

Расход воздуха при традиционной работе эрлифта [26, 27, 50]:

- для длинных эрлифтов  $\left( \frac{H+h}{D} > 200, \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_0} > 2 \right)$

$$Q_6^{тради} = q_n \cdot \frac{p_0 + (\rho \cdot g \cdot h)/2}{p_0} \cdot Q_3, \quad (5.8)$$

- для коротких эрлифтов  $\left( \frac{H+h}{D} < 200, \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_0} < 2 \right)$

$$Q_6^{тради} = q \cdot Q_3. \quad (5.9)$$

Диаметр подающей трубы

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_3}{\pi \cdot v_n}}. \quad (5.10)$$

где  $v_n$  – скорость жидкости (гидросмеси) в подающей трубе.

При транспортировании эрлифтом жидкости (водоотлив, удаление дренажных вод и др.) рекомендуемая, как правило, скорость в подающей трубе  $v_n = 2,0 \dots 2,5$  м/с.

При транспортировании эрлифтом гидросмеси потребную скорость в подающей трубе можно определять согласно методики [110]

$$v_n = k \cdot v_{кр}, \quad (5.11)$$

где  $v_{кр}$  – критическая скорость при транспортировании твердого материала по вертикальному трубопроводу;

$k$  – коэффициент запаса,  $k = 1,1 \dots 1,2$ .

Критическая скорость

$$v_{кр} = v_p'' + K \cdot \sqrt{a \cdot S \cdot g \cdot d}, \quad (5.12)$$

где  $v_p''$  – скорость сжатого падения частиц в жидкости;

$K$  – константа, определяемая размером твердых частиц  $d_k$ ; при  $0 < d_k < 3$  мм  $K=2,5$ ; при  $3 \leq d_k < 10$  мм  $K=2,5 \dots 3,0$ ; при  $10 \leq d_k < 18$  мм  $K=3,0 \dots 3,5$ ;

$a$  – дифференциальная относительная плотность гидросмеси,

$$a = \frac{\rho_m}{\rho} - 1; \quad (5.13)$$

$S$  – объемная концентрация твердого материала в гидросмеси,

$$S = \frac{Q_m}{Q_m + Q_g}, \quad (5.14)$$

здесь  $Q_m$  – объемный расход твердого материала;

$Q_g$  – объемный расход несущего потока (воды).

Скорость сжатого падения частиц в жидкости

$$v_p'' = v_p \cdot (1 - S)^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_k}{d} \right)^2 \right], \quad (5.15)$$

где  $v_p$  – скорость свободного падения частиц в жидкости,

$$v_p = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{d_k}{C_0} \cdot a}, \quad (5.16)$$

здесь  $C_0$  – коэффициент сопротивления движения твердых частиц в воде,  $C_0 = 0,64$ .

После определения основных геометрических и технологических параметров традиционно работающей эрлифтной установки –  $H+h$ ,  $h$ ,  $\alpha$ ,  $Q_g$ ,  $Q_g^{тради}$ ,  $D$ ,  $d$  – с использованием разработанной компьютерной программы, в основу которой положено решение математической модели рабочего процесса эрлифта (раздел 3), строятся расходные характеристики эрлифта  $Q_g = f(Q_g)$  для каждого из значений относительных длин жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе в диапазоне  $\bar{L}_s = 0,25 \dots 10$ . По данным построенных расходных характеристик определяется зависимость расхода воздуха от относительной длины жидкостных пробок  $Q_g = f(\bar{L}_s)$  при заданной потребной подаче эрлифта  $Q_g$ .

Из зависимости  $Q_e = f(\bar{L}_s)$  принимается, что относительная длина жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  при расходе воздуха  $Q_e^{тради}$ , вычисленному по выражениям (5.8) или (5.9), соответствует относительной длине  $\bar{L}_s^{тради}$  для традиционной работы эрлифта.

В соответствии с результатами выполненных в данной работе исследований, дискретная подача в смеситель эрлифта сжатого воздуха с соотношениями периодов времени, характеризующих положение запорно-регулирующего элемента воздушного клапана, в диапазоне  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$  обеспечивает на 30 ... 40% увеличение длины жидкостных пробок  $L_s$  в сравнении с традиционной работой эрлифта. Тогда относительная длина жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха

$$\bar{L}_s^{дискр} = (1,3 \dots 1,4) \cdot \bar{L}_s^{тради} . \quad (5.17)$$

По значению  $\bar{L}_s^{дискр}$  из построенной для данного эрлифта зависимости  $Q_e = f(\bar{L}_s)$  определяется расход воздуха эрлифтом при его дискретной подаче  $Q_e^{дискр}$ , который меньше расхода воздуха  $Q_e^{тради}$  при традиционной работе газожидкостного подъемника.

Последовательность расчета основных геометрических и технологических параметров определяется алгоритмом инженерного расчета эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель эрлифта (рис. 5.1).

Рациональное значение соотношений периодов времени, характеризующих положение запорно-регулирующего элемента воздушного клапана  $t_{откр}/t_{закр}$  при дискретной подаче сжатого воздуха в смеситель эрлифта, устанавливается во время пуско-наладочных работ как минимально возможное исходя из обеспечения максимального сокращения расхода воздуха в сравнении с традиционной работой эрлифта и обеспечения устойчивой его работы.

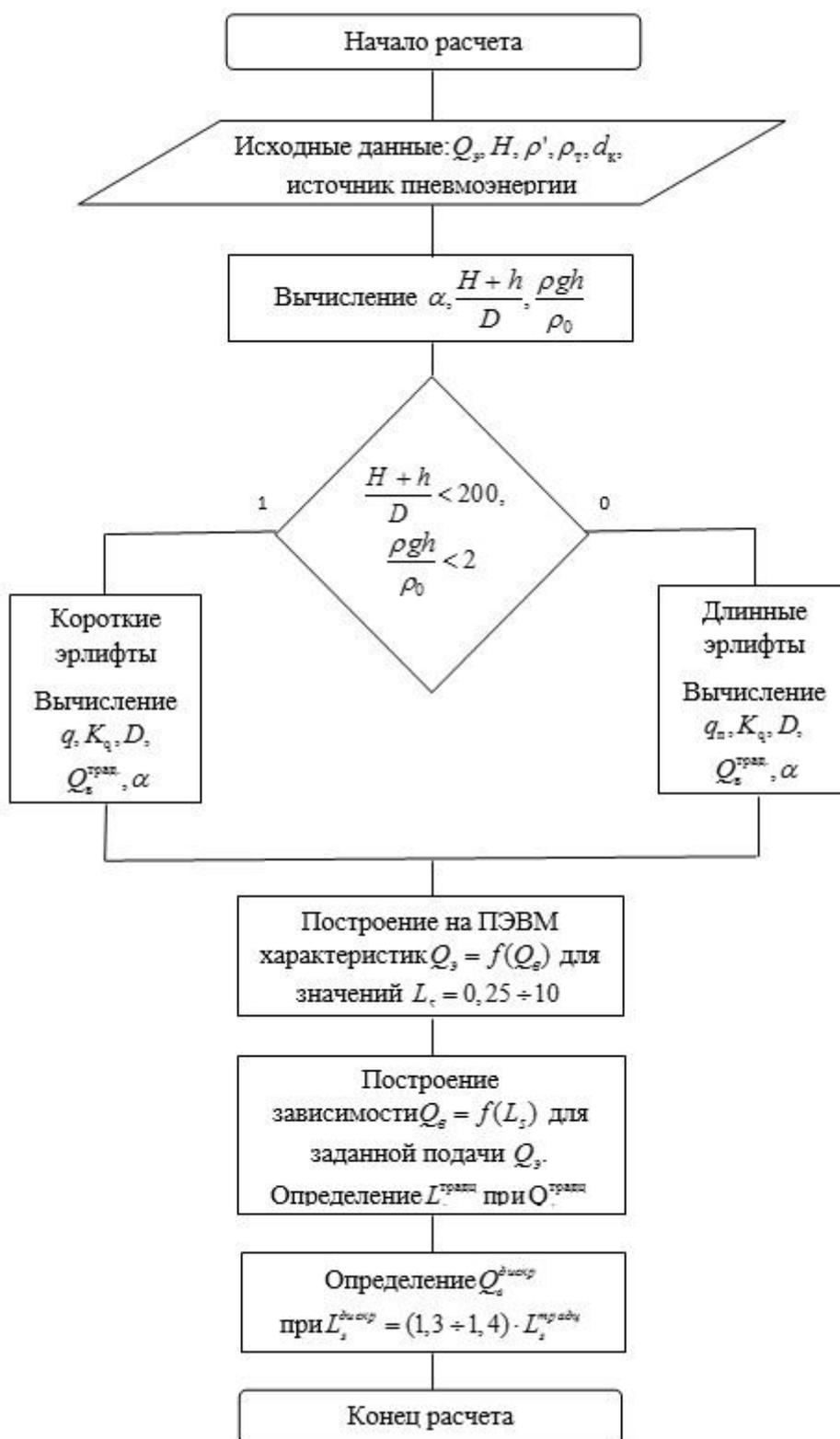


Рис. 5.1 – Алгоритм инженерного расчета эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель эрлифта

## 5.2. Возможные способы и устройства дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта

Разработанные способы и устройства дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта защищены патентами на полезные модели:

а) эрлифт, оборудованный установленными на одинаковом расстоянии от смесителя задвижками на основном и дополнительном воздухопроводах с возможностью регулирования расхода воздуха, причем отношение времени закрытия к времени открытия задвижек составляет 0,5 ... 2,5 [111];

б) газлифт, между соосно расположенными подающей и подъемной трубами которого расположен воздухораспределитель с открытой снизу внешней оболочкой, который может перемещаться в осевом (вертикальном) направлении при помощи лебедки [112].

### 5.2.1. Эрлифт с регулируемой задвижками на воздухопроводе и дискретной подачей сжатого воздуха

Эрлифт [111] состоит из подъемной трубы 1, смесителя 2, присоединенных к нему основного 3 и дополнительного 4, подключенного напротив и соосно основному, газопроводов, задвижек 5 и 6 с исполнительными электромагнитными элементами (рис. 5.2). Задвижки 5 и 6 расположены соответственно на основном 3 и дополнительном 4 газопроводах с равным удалением от смесителя 2. Время закрытия и открытия задвижек 5 и 6 задается реле времени 7, газообразное рабочее тело генерируется источником сжатого газа 8. Транспортируемая жидкость (гидросмесь) подводится в смеситель 2 по подающей трубе 9. Аэрогидросмесь разделяется после транспортирования по подъемной трубе 1 в воздухоотделителе 10.

Эрлифт работает следующим образом. Рабочее тело от источника сжатого газа 8 по основному 3 и дополнительному 4 газопроводах поступает в смеситель 2. В смесителе 2 происходит смешивание рабочего газа и

транспортируемой среды, поступающей через подающую трубу 9. За счет встречного и соосного расположения основного 3 и дополнительного 4 газопроводов повышается степень полноты передачи энергии рабочего газа среде, транспортируемой по подъемной трубе 1, а также уменьшается проскальзывание рабочего газа. При этом рабочий газ подается в смеситель 2 импульсно (дискретно) с помощью задвижек 5 и 6, имеющих нормальное закрытое положение.

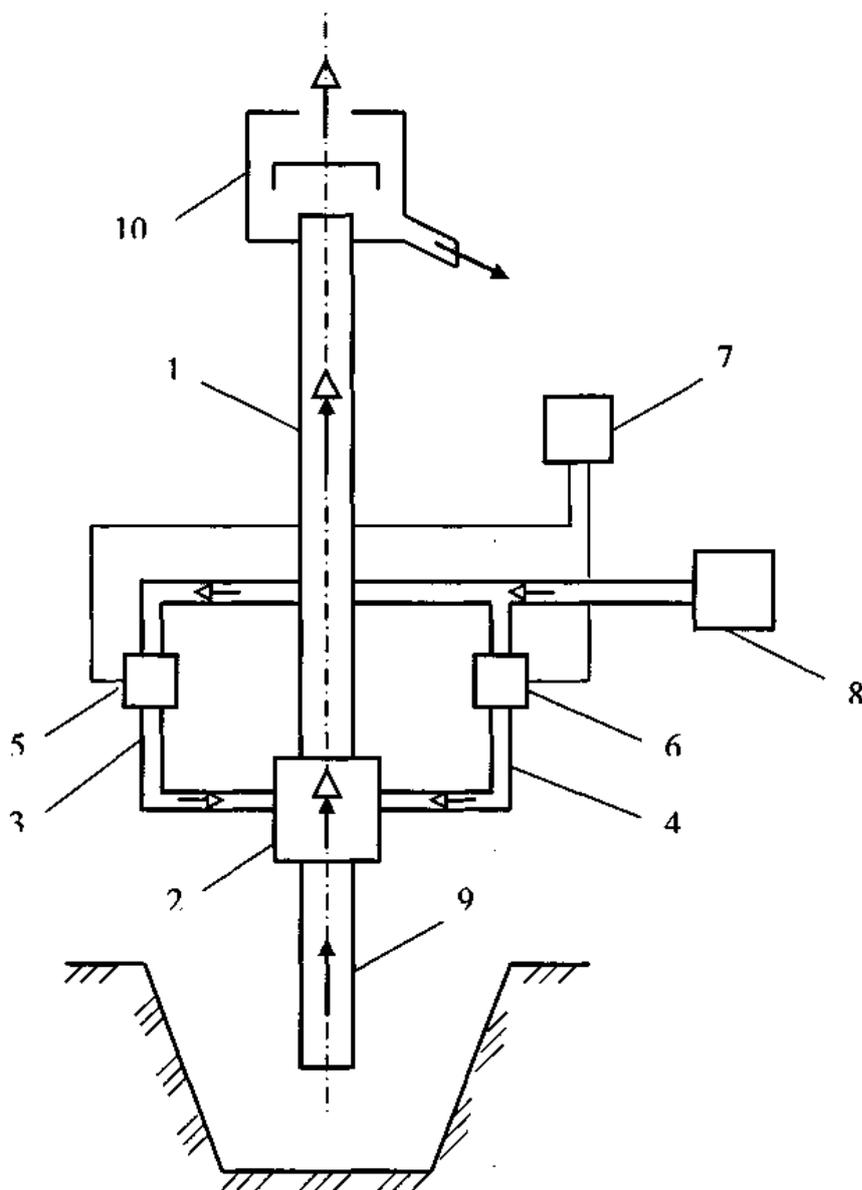


Рис. 5.2 – Эрлифт [111].

Открытие задвижек 5 и 6 осуществляется с помощью электромагнитов, управляемых реле времени 7. Реле 7 регулируется длительность импульсов

подачи рабочего газа, причем можно устанавливать продолжительность открытия и закрытия задвижек 5 и 6. Это в свою очередь изменяет размер и частоту прохождения четок (жидкостных пробок) снарядного водовоздушного потока. Рациональное отношение продолжительности закрытия задвижек до времени открытия составляет 0,5 ... 2,5 [111]. Уменьшение данного отношения приводит к снижению подачи эрлифта, а увеличение – к нестабильной работе эрлифта и даже его остановки.

Применение предлагаемого эрлифта позволяет повысить его подачу при прочих равных условиях, уменьшить удельный расход воздуха, а, следовательно, повысить энергоэффективность работы, осуществить эффективный размыв верхнего слоя твердого материала во всасывающей трубе и облегчить запуск газожидкостного подъемника при работе на гидросмеси.

Предлагаемый эрлифт может быть использован для подъема гидросмеси с большим содержанием твердого материала при переменных параметрах работы (преимущественно переменной глубине геометрического погружения смесителя).

#### 5.2.2. Эрлифт с дискретной подачей сжатого воздуха и изменяемым осевое положение воздухораспределителем

Эрлифт [112] содержит соосно расположенные подающую 1 и подъемную 2 трубы, смонтированный между ними воздухораспределитель 3 с подключенным к нему воздуховодом 4 (рис. 5.3). Воздухораспределитель 3 с открытой снизу внешней оболочкой с помощью троса 5 связан с лебедкой 6. В верхней части к подъемной трубе 2 присоединен воздухоотделитель 7.

Эрлифтная установка работает следующим образом. При подаче сжатого воздуха по воздуховоду 4 в воздухораспределитель 3 уровень жидкости оттесняется от входа в подъемную трубу 1 и порция воздуха подается в нее. Жидкостная пробка (чётка) вытесняется из подъемной трубы 1 в воздухоотделитель 7, после чего давление в воздушной полости

воздухораспределителя 3 снижается и уровень жидкости поднимается выше входа в подъемную трубу 1. Порция жидкости заполняет подъемную трубу 1 на глубину погружения ее нижней части. Расход воздуха через подъемную трубу 1 прекращается, и в воздушной полости воздухораспределителя 3 давление снова повышается, оттесняя уровень жидкости ниже входа в подъемную трубу 1. Процесс образования и вытеснения жидкостных пробок (чётков) в воздухоотделитель 7 повторяется.

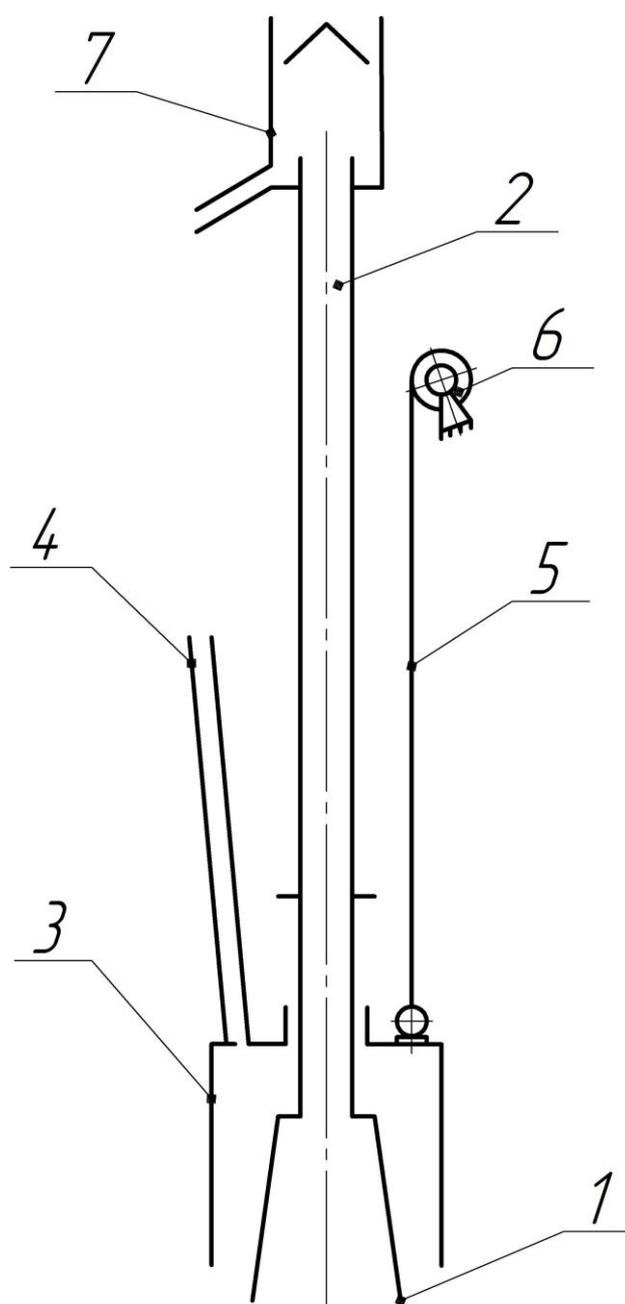


Рис. 5.3 – Эрлифт с изменяемым осевым положением воздухораспределителя [112].

Глубина погружения подъемной трубы 1 эрлифта влияет на массу жидкости в пробке (чётке). Масса жидкости в пробке (чётке), объем воздуха и масса жидкости в воздухораспределителе 3, расход воздуха влияют на частоту автоколебаний в эрлифте. При определенном соотношении этих параметров размер жидкостных пробок (чётков) будет иметь максимальное значение, которое будет соответствовать энергетически рациональному режиму работы эрлифта при максимально возможном КПД.

Настройка эрлифта на энергетически рациональный режим работы при заданном расходе воздуха 1 и геометрической глубине погружения осуществляется изменением соотношения объема жидкости и воздуха в воздухораспределителе 3. Это достигается перемещением воздухораспределителя 3 вверх или вниз относительно подъемной трубе 1 с помощью троса 5 и лебедки 6.

Предлагаемый способ работы и устройство эрлифта обеспечивает стабильность и надежность эксплуатации, повышает коэффициент полезного действия газожидкостного подъемника при упрощении его конструкции. Особо эффективна работа предлагаемого эрлифта при подъеме гидросмесей значительных консистенций.

### 5.3. Реконструкция шламового эрлифта шахты «Стаханова»

#### 5.3.1. Существующая схема зумпфового эрлифтного водоотлива шахты «Стаханова»

Шламовый эрлифт для чистки зумпфа скипового ствола шахты «Стаханова» был сдан в эксплуатацию сотрудниками Донецкого политехнического института в 1982 году (приложение Д.1) [12].

Очистка зумпфа с применением шламовой эрлифтной установки осуществляется следующим образом. Эрлифт 1 перекачивает гидросмесь из водоотливной емкости 2 (зумпф) в улавливающий бункер 3, сооруженный в горизонтальной выработке, примыкающей к стволу (рис. 5.4, а). В бункере

шлам складывается, а вода через систему отверстий возвращается обратно. Боковые стенки бункера выполнены с уклоном, по его дну проложен скребковый конвейер (СП202). Борта конвейера подняты на 0,6м, чтобы гидросмесь при открытии разгрузочного отверстия 4 не могла переливаться через края. Емкость бункера рассчитана на суточный объем просыпавшегося материала. Очисткой бункера управляют двое рабочих. Они открывают разгрузочное отверстие 4, включают конвейер 5 для загрузки скипа 6 наклонного ходка, смывают оставшийся материал на дне бункера, а в конце выгрузки закрывают отверстие 4.

Шламовый эрлифт состоит из подъемной трубы 2, смесителя 5, подводящего устройства 6, трубы подпитки 3, воздухопровода 4, воздухоотделителя 1 (рис. 5.4, б).

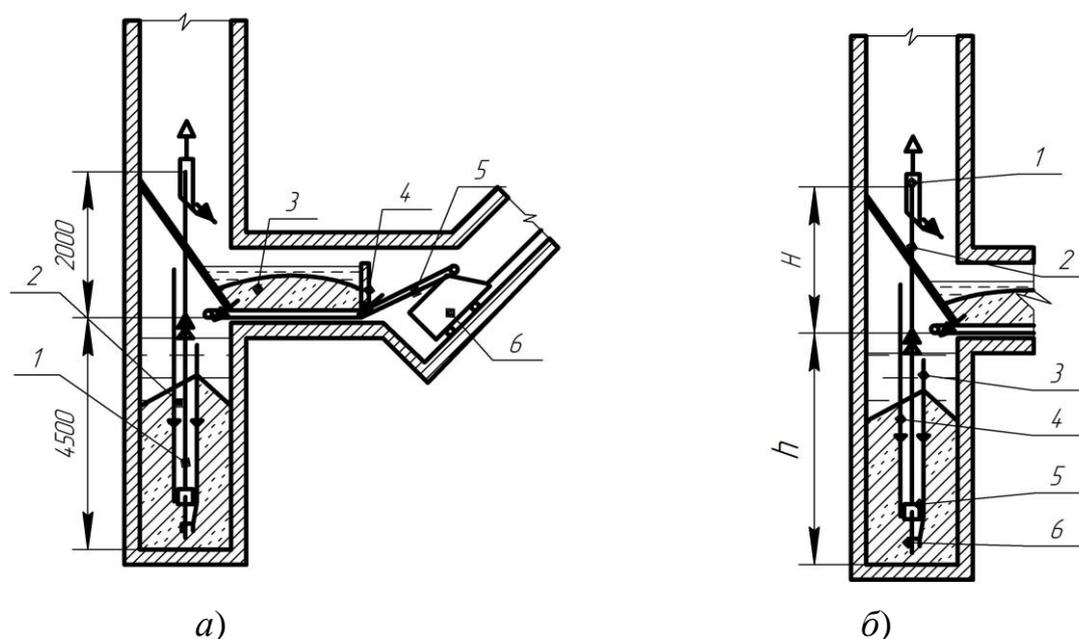


Рис. 5.4 – Схема шламовой эрлифтной установки (а) и эрлифта (б) для очистки зумпфа скипового ствола шахты «Стаханова»

Для запуска эрлифта открывается задвижка на воздухопроводе 4, по которому сжатый воздух из пневматической сети поступает в смеситель 5. Так как входное отверстие трубы подпитки 3 располагается ниже уровня воды в зумпфе скипового ствола и выше возможного уровня удаляемого твердого материала, то вода по ней беспрепятственно и непрерывно поступает в

подводящее устройство 6 и размывает возможно слежавшийся твердый материал. Образовавшаяся гидросмесь в смесителе 5 смешивается со сжатым воздухом и трехфазный поток (вода – твердый материала – воздух) поднимается по подъемной трубе длиной  $H+h$  в воздухоотделитель 1. В воздухоотделителе 1 воздух выходит в атмосферу, а гидросмесь отводится в улавливающий бункер.

Подводящее устройство состоит из цилиндрического корпуса 3 и труб: подающей 2, пусковой 1, подъемной 5, подпиточной 6, воздухопровода 4 (рис. 5.5). Смеситель 7 образован кольцевой щелью между подъемной 5 и подающей трубами.

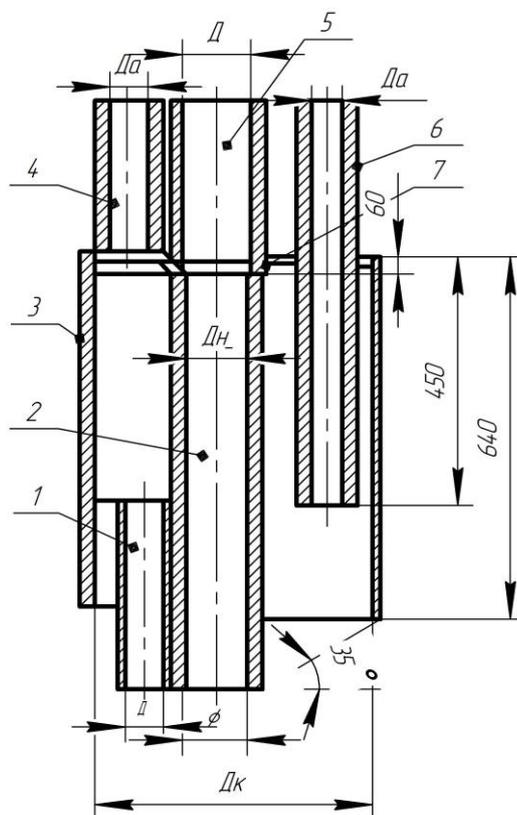


Рис. 5.5 – Подводящее устройство шламового эрлифта

Шламная эрлифтная установка очистки зумпфа скипового ствола шахты «Стаханова» характеризуется следующими параметрами (приложение Д.1):

- глубина зумпфового водосборника 4,5 м;
- требуемая высота подъема эрлифта  $H = 2,0$  м;
- геометрическое погружение смесителя  $h = 3,5$  м;

- относительное погружение смесителя  $\alpha = 0,64$ ;
- диаметр подающей трубы  $\varnothing 273 \times 11$  мм ( $d = 251$  мм);
- диаметр подъемной трубы  $\varnothing 325 \times 9$  мм ( $D = 307$  мм);
- подача эрлифта  $Q_э = 450$  м<sup>3</sup>/ч;
- расход воздуха  $Q_в = 21$  м<sup>3</sup>/мин;
- диаметр  $D_к$  корпуса подводящего устройства  $\varnothing 920 \times 8$  мм;
- диаметр  $d_{nc}$  пусковой трубы  $\varnothing 168 \times 8$  мм;
- диаметр  $d_в$  воздухоподводящего трубопровода  $\varnothing 168 \times 8$  мм;
- диаметр  $D_n$  трубы подпитки  $\varnothing 194 \times 8$  мм;
- диаметр  $D_{см}$  камеры смесителя 287 мм;
- максимальная крупность кусков транспортируемого материала  $d_m = 100$  мм;
- плотность транспортируемого материала  $\rho_m = 2500$  кг/м<sup>3</sup>.

Три десятилетия успешной эксплуатации шламового эрлифта для чистки зумпфа скипового ствола шахты «Стаханова» подтвердили правомерность принятых технических решений, работоспособность и эффективность установки. Однако энергетическая эффективность работы эрлифта, которая характеризуется значением КПД

$$\eta_э = \frac{\rho g H Q_э}{Q_в p_0 \ln \frac{p_{см} + p_0}{p_0}} =$$

$$= \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 450}{60 \cdot 21 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \cdot \ln \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5 + 9,81 \cdot 10^4}{9,81 \cdot 10^4}} = 0,24, \quad (5.18)$$

может быть повышена.

Одним из способов повышения энергетической эффективности работы шламового эрлифта для чистки скипового ствола шахты «Стаханова» может быть дискретная подача сжатого воздуха в смеситель газожидкостного подъемника.

### 5.3.2. Усовершенствование шламовой эрлифтной установки шахты «Стаханова» дискретной подачей сжатого воздуха

В разделах 2, 3 было доказано и подтверждено экспериментально в разделе 4, увеличение (до определенного предела в зависимости от геометрических параметров эрлифтов – табл. 3.2, 3.3) относительной длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе, что, в известной степени (разделы 4.3, 4.4) может быть обеспечено дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель подъемника. Это дает более энергетически эффективную работу эрлифта в сравнении с традиционной.

Для определения возможной степени повышения энергетической эффективности работы шламового эрлифта шахты «Стаханова», с использованием результатов численного решения математической модели рабочего процесса газожидкостного подъемника (раздел 3.1), построены расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6)$  (пример – рис. 5.6) этого эрлифта для значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,25 \dots 10$  и вычислены для каждого значения  $\bar{L}_s$  потребные расходы воздуха  $Q_6$  для обеспечения подачи  $Q_3 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$  (табл. 5.1). Значение подачи  $Q_3 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$  является расчетным необходимым (приложение Д.1) для устойчивого транспортирования гидросмеси шламовым эрлифтом (раздел 5.3.1).

Учитывая возможные колебания уровня жидкости в зумпфе скипового ствола шахты «Стаханова» при работе шламового эрлифта, расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6)$  построены как при расчетном геометрическом погружении смесителя  $h = 3,5 \text{ м}$ , так и при возможном геометрическом погружении смесителя  $h = 3,0 \text{ м}$ .

В соответствии с методикой расчета, использовавшейся при проектировании шламового эрлифта шахты «Стаханова»  $D = 307 \text{ мм}$ ,  $H+h = 5,5 \text{ м}$  (приложение Д.1), при геометрическом погружении смесителя  $h = 3,0 \text{ м}$ , что обеспечивает относительное погружение смесителя  $\alpha = 0,55$  и

удельный расход воздуха  $q = 4,0$  (рис. Д.1), потребный для обеспечения подачи  $Q_3 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$  расход воздуха составляет

$$Q_8 = q \cdot Q_3 = 4,0 \cdot 450 = 1800 \text{ м}^3/\text{ч} = 30 \text{ м}^3/\text{мин}. \quad (5.19)$$

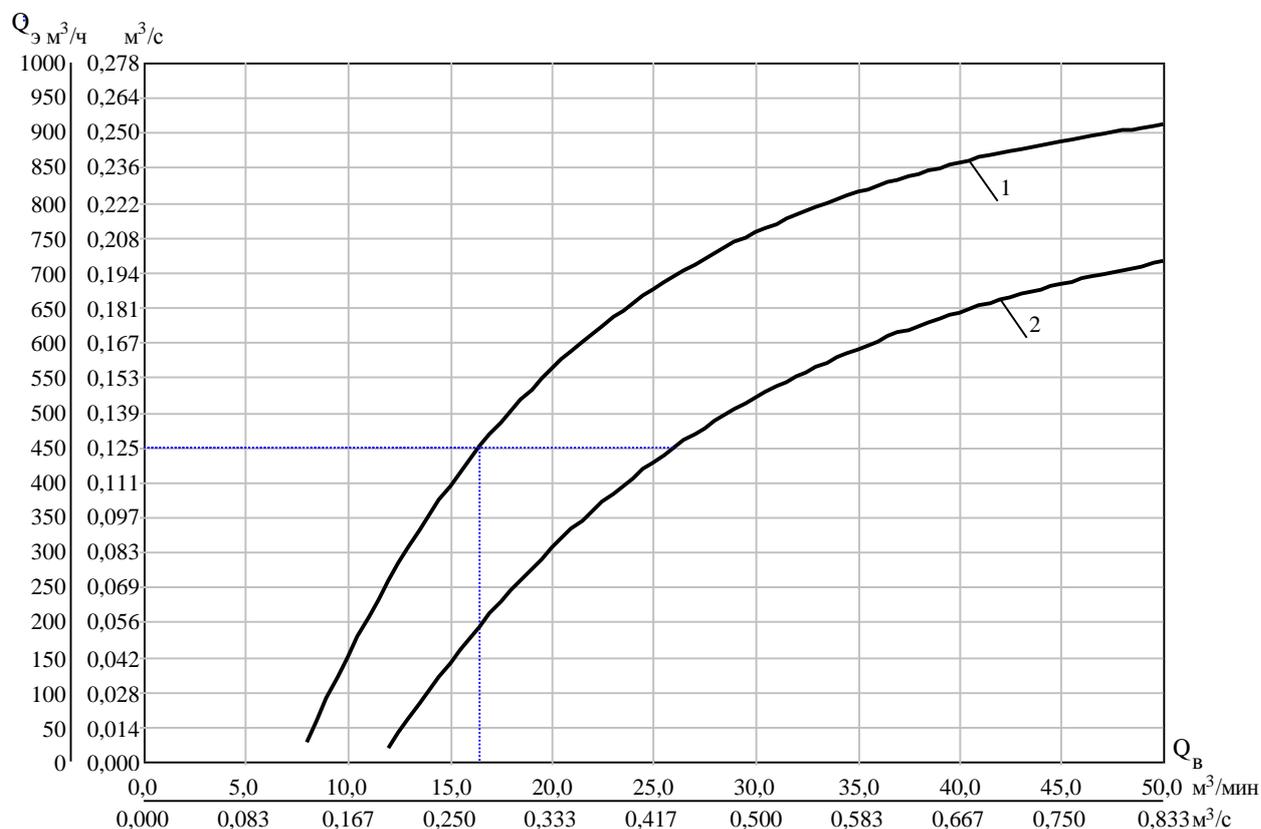


Рис. 5.6 – Расходные характеристики шламowego эрлифта шахты «Стаханова»  $D=307\text{мм}$ ,  $H+h=5,5\text{м}$  при относительной длине жидкостных пробок снаряженного водовоздушного потока  $\bar{L}_s=1$ : 1 –  $h=3,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,64$ ; 2 –  $h=3,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,55$ ; при  $Q_3=450\text{м}^3/\text{ч} \rightarrow Q_{81}=16,5\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $Q_{82}=26,1\text{м}^3/\text{мин}$

Результаты вычисленных требуемых расходов воздуха шламowym эрлифтом для обеспечения подачи  $Q_3 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$  (табл. 5.1) и построенная по этим данным графическая зависимость расхода воздуха от относительной длины жидкостных пробок  $Q_8 = f(\bar{L}_s)$  (рис. 5.7) позволили установить, что в эрлифте  $D = 307 \text{ мм}$ ,  $H+h = 5,5 \text{ м}$  при геометрических погружениях  $h = 3,0 \dots 3,5 \text{ м}$  (относительные погружения  $\alpha = 0,55 \dots 0,64$ ) и расходах воздуха  $Q_8 = 21 \dots 30 \text{ м}^3/\text{мин}$  относительные длины жидкостных пробок снаряженного водовоздушного потока составляют  $\bar{L}_s = 0,5 \dots 0,7$ .

Таблица 5.1

Требуемый расход воздуха для обеспечения подачи  $Q_3 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$  шламового эрлифта шахты «Стаханова»  $D = 307 \text{ мм}$ ,  $H+h = 5,5 \text{ м}$  при изменении относительной длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока  $\bar{L}_s$

Относительная длина жидкостных пробок $\bar{L}_s$	Требуемый расход воздуха $Q_6$ , $\text{м}^3/\text{мин}$ , при погружении смесителя:	
	$h=3,5\text{м}, \alpha=0,64$	$h=3,0\text{м}, \alpha=0,55$
0,25	24,2	38,4
0,50	20,9	33,1
0,75	18,4	29,1
1,00	16,5	26,1
1,25	15,0	23,7
1,50	13,8	21,9
1,75	13,0	20,5
2,00	12,3	19,5
2,5	11,4	18,0
3,0	10,9	17,2
4,0	10,4	16,4
5,0	10,2	16,1
6,0	10,1	16,0
7,0	10,1	16,0
8,0	10,1	16,0
9,0	10,1	16,0
10,0	10,1	16,0

Полученные значения относительных длин жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока  $\bar{L}_s = 0,5 \dots 0,7$  для эрлифта  $D = 307 \text{ мм}$ ,  $H+h = 5,5 \text{ м}$  при относительных погружениях  $\alpha = 0,55 \dots 0,64$  и расходах воздуха  $Q_6 = 21 \dots 30 \text{ м}^3/\text{мин}$  при подаче  $Q_3 = 450 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответствуют результатам выполненных в диссертационной работе исследований (разделы 2, 3, 4).

Согласно результатам экспериментальных исследований работы эрлифта (раздел 4), дискретная подача сжатого воздуха с максимально возможным соотношением периодов времени, характеризующих положение запорно-регулирующего элемента воздушного клапана  $t_{откр}/t_{закр}$ , что определяется в процессе пуско-наладочных работ, позволяет на 30 ... 40% увеличить длину жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе.

Следовательно, для шламового эрлифта  $D = 307$  мм,  $H+h = 5,5$  м,  $\alpha = 0,55 \dots 0,64$ , дискретная подача сжатого воздуха в смеситель позволит достичь значения относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s = (0,5 \dots 0,7) \cdot 1,35 = 0,7 \dots 0,9$ .

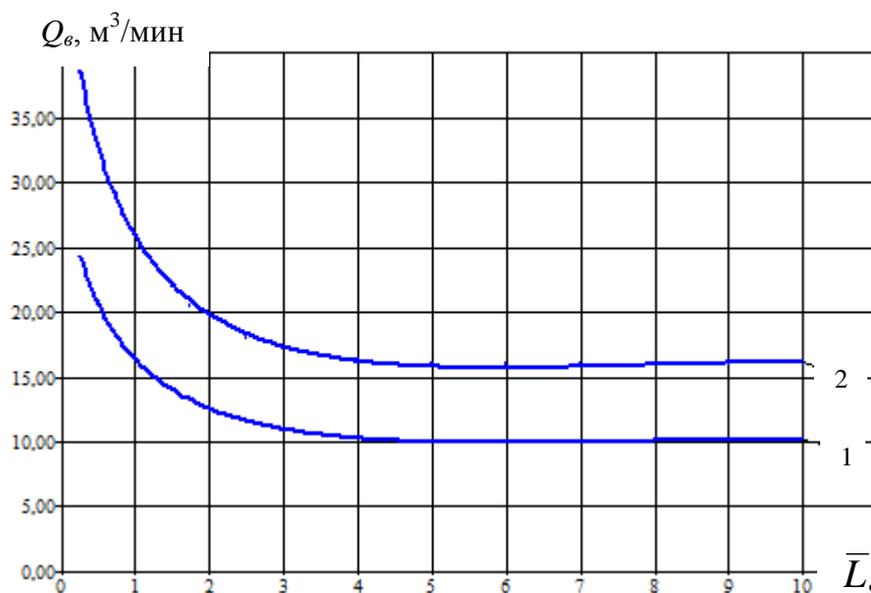


Рис. 5.7 – Зависимость потребного расхода воздуха шламовым эрлифтом шахты «Стаханова»  $D = 307$  мм,  $H+h = 5,5$  м от относительной длины жидкостных пробок снаряженного водовоздушного потока  $Q_в = f(\bar{L}_s)$ :  
1 –  $h = 3,5$  м,  $\alpha = 0,64$ ; 2 –  $h = 3,0$  м,  $\alpha = 0,55$

В соответствии с зависимостью  $Q_в = f(\bar{L}_s)$  (рис. 5.7), при относительных длинах жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,7 \dots 0,9$  расход воздуха шламовым эрлифтом  $D = 307$  мм,  $H+h = 5,5$  м,  $\alpha = 0,55 \dots 0,64$  при подаче  $Q_с = 450$  м³/ч составит  $Q_в = 18,5 \dots 27$  м³/мин.

Таким образом, дискретная подача сжатого воздуха в смеситель шламового эрлифта шахты «Стаханова»  $D = 307$  мм,  $H+h = 5,5$  м,  $\alpha = 0,55 \dots 0,64$  в сравнении с традиционной работой подъемника позволит сократить расход воздуха на 10 ... 12 %, что обеспечит годовой экономический эффект в размере 17,5 тыс. грн. (приложение Д.2).

#### 5.4. Эрлифтная установка для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГП УК «Краснолиманская»

##### 5.4.1. Существующая установка для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГП УК «Краснолиманская»

Обогащение полезных ископаемых на участке обогащения ГП УК «Краснолиманская» происходит в 3 стадии: I стадия – обогащение в тяжелых средах, где происходит осадка породы и грохочение угля крупностью 6,0 ... 13,0 мм, II стадия – осадка угля размером 0,5 ... 6,0 мм и транспортировки багер-элеваторами; III стадия – флотация для выделения размеров угля 0,1 ... 0,2 мм.

При обогащении угля на I стадии используют минеральные суспензии двух удельных весов, в которые последовательно подается уголь: одну с относительным удельным весом 1,4 ... 1,5 для отделения от рядового угля концентрата (часть, которая всплыла), вторую с относительным удельным весом 1,8 ... 2,0 для отделения промпродукта (часть, которая всплыла) от породы (утопленная часть).

Минеральные суспензии представляют собой механические смеси воды с твердыми тонкоизмельченными минералами с большими удельными весами (магнетиты). Вода является дисперсионной средой, а минералы-утяжелители – дисперсной фазой.

Суспензия должна иметь устойчивость и низкую вязкость. Под устойчивостью суспензии понимают ее способность сохранять в течение сравнительно длительного периода времени свой удельный вес, который будет постоянным в том случае, если тонкие частицы утяжелителя устойчиво находятся во взвешенном состоянии.

Устойчивость суспензии может быть достигнута путем: повышения дисперсности утяжелителя, увеличения концентрации утяжелителя, увеличения вязкости суспензии, создания восходящих и горизонтальных

потоков суспензии, механического перемешивания суспензии. Последний способ обеспечения устойчивости суспензии применяют наиболее часто.

Для механического перемешивания минеральной суспензии на участке обогащения ГП УК «Краснолиманская» в настоящее время применяют шламовый насос ШН250-34. Высота подъема суспензии составляет 21 м. Параметры шламового насоса ШН250-34 при работе на чистой воде и КПД – 50 %: напор – 34 м, подача – 250 м<sup>3</sup>/ч, кавитационный запас – 5 м, мощность привода – 110 кВт.

Недостатки применения шламового насоса в рассматриваемых условиях: интенсивный износ лопаток рабочих колес из-за значительных радиальных скоростей суспензии в них; при низких температурах в зимнее время (-10<sup>0</sup> и ниже) наблюдается замерзания перемешиваемой суспензии на отметке 6 м, где расположен насос; тяжелый запуск насоса после длительной его остановки; затратность необходимого технического обслуживания насоса.

Замена шламовых насосов эрлифтными установками, при качественном механическом перемешивании минеральной суспензии, обеспечивает ряд преимуществ: в эрлифте отсутствуют подвижные быстроизнашиваемые элементы, простота конструкции и доступность изготовления, дешевизна технического обслуживания.

Приемлемая энергетическая эффективность работы эрлифтной установки обеспечивается дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель эрлифта. Дискретная подача сжатого воздуха и гарантированная снаряженная структура водовоздушного потока в подъемной трубе подъемника обеспечивает также эффективный размыв верхнего слоя твердого материала в подводящей трубе эрлифтной установки и, следовательно, недопущения закупорки твердым материалом этой трубы.

#### 5.4.2. Расчет эрлифтной установки для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГП УК «Краснолиманская»

Исходные данные для расчета эрлифтной установки:

- требуемая подача  $Q_э = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;
- высота подъема минеральной суспензии относительно ее исходного уровня  $H = 1,35 \text{ м}$ ;
- плотность перекачиваемой минеральной суспензии  $\rho' = 1500 \text{ кг/м}^3$ ;
- максимальная крупность твердых частиц (магнетита)  $d_k < 0,1 \text{ мм}$ ;
- возможный источник пневмоэнергии – индивидуальная воздуходувка (компрессор).

Определение основных конструктивных и технологических параметров эрлифтной установки при традиционной работе подъемника (предварительный расчет). Исходя из конструктивных особенностей и возможностей места расположения эрлифтной установки принимаем значение геометрического погружения смесителя эрлифта равным  $h = 2,5 \text{ м}$ . Тогда относительное погружение смесителя согласно (5.2) составит

$$\alpha = \frac{h}{H + h} = \frac{2,5}{1,35 + 2,5} = 0,65.$$

Таким образом, выполняется условие  $\alpha \geq 0,4$ , необходимое для обеспечения условий для снарядной структуры в вертикальной подъемной трубе эрлифта [35, 36].

Абсолютное давление в смесителе эрлифта

$$p_{сма} = p_0 + \rho' \cdot g \cdot h, \quad (5.20)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $p_0 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ .

Тогда

$$p_{сма} = 9,81 \cdot 10^4 + 1500 \cdot 9,81 \cdot 2,5 = 1,35 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Принимаем в первом приближении, что эрлифт короткий  $\left(\frac{H+h}{D} < 200, \frac{\rho \cdot g \cdot h}{p_0} < 2\right)$  [26, 27]. Тогда удельный расход воздуха с известными допущениями (5.7)

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2} = 0,767 \cdot 0,65^{-2,2} = 2,0.$$

Так как эмпирическая зависимость (5.7) правомерна для диапазонов  $h = 4 \dots 10$  м и  $\alpha = 0,15 \dots 0,50$  [26, 27], учтем результаты экспериментальных исследований, проведенные для эрлифтов с относительными погружениями  $\alpha = 0,66 \dots 0,81$  [13, 50, 113], согласно которых удельный расход воздуха при этом составляет  $q = 1,8 \dots 2,2$ . Для дальнейших расчетов принимаем значение удельного расхода воздуха разрабатываемой традиционно работающей установкой  $q = 2,0$ .

Расход воздуха при традиционной работе эрлифта (5.9)

$$Q_v^{традиц} = q \cdot Q_3 = 2,0 \cdot 250/60 = 8,33 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Коэффициент подачи (5.6)

$$\begin{aligned} k_Q &= 3,68 \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \frac{\sqrt{q + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)}}{1 + q} = \\ &= 3,68 \cdot \sqrt{0,714} \cdot \frac{\sqrt{2,0 + \left(1 - \frac{1}{0,714}\right)}}{1 + 2,0} = 1,20. \end{aligned}$$

Диаметр подъемной трубы (5.3)

$$D = \sqrt[5]{\frac{Q_3^2}{k_Q^2 \cdot g}} = \sqrt[5]{\frac{\left(\frac{250}{3600}\right)^2}{1,20^2 \cdot 9,81}} = 0,203 \text{ м.}$$

Принимаем в качестве подъемной трубу по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 219 \times 8$  мм, то есть внутренний диаметр подъемной трубы составит  $D = 203$  мм.

Диаметр подающей трубы при скорости перекачиваемой минеральной суспензии  $v_n = 2,5$  м/с (5.10)

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_3}{\pi \cdot v_n}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 250}{3,14 \cdot 2,5 \cdot 3600}} = 0,188 \text{ м.}$$

Принимаем в качестве подающей трубу по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 194 \times 5$  мм, то есть внутренний диаметр подъемной трубы составит  $d = 184$  мм, а действительная скорость в ней  $v_n = 2,6$  м/с.

Диаметр воздухопровода для подвода сжатого воздуха от воздуходувки до эрлифтной установки

$$D_6 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_6 \cdot p_0}{\pi \cdot v_6 \cdot p_{сма}}},$$

где  $v_6$  – скорость воздуха в воздухопроводе, принимаем  $v_6 = 15$  м/с.

Тогда

$$D_6 = \sqrt{\frac{4 \cdot 8,33 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{60 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 1,35 \cdot 10^5}} = 0,093 \text{ м.}$$

Принимаем в качестве воздухопровода для подвода сжатого воздуха от воздуходувки до эрлифтной установки трубу по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 108 \times 4$  мм.

Диаметр каждого из двух воздухопроводов для подвода сжатого воздуха к смесителю эрлифта

$$D_6 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_6 \cdot p_0}{2 \cdot \pi \cdot v_6 \cdot p_{сма}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8,33 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{2 \cdot 3,14 \cdot 15 \cdot 1,35 \cdot 10^5}} = 0,065 \text{ м.}$$

Принимаем в качестве каждого из двух воздухопроводов для подвода сжатого воздуха к смесителю эрлифта трубу по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 76 \times 3,5$  мм.

Для уточнения параметров эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха с использованием разработанной компьютерной программы, в основу которой положено решение математической модели рабочего процесса эрлифта (раздел 3), построены расходные характеристики эрлифта

$Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  для значений относительных длин жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока в подъемной трубе в диапазоне  $\bar{L}_s = 1,0 \dots 1,45$  (рис. 5.8). Принятый диапазон относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 1,0 \dots 1,45$  обосновывается тем, что согласно результатам проведенных исследований (разделы 2, 3, 4) при традиционной работе эрлифтов с относительными погружениями смесителей  $\alpha = 0,40 \dots 0,65$  и относительными длинами подъемной трубы  $(H+h)/D < 200$ , значения относительных длин жидкостных пробок можно принять равными  $\bar{L}_s = 1,0 \dots 1,1$ . Дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта позволяет увеличить длины жидкостных пробок на 30 ... 40 %, то есть до значений  $\bar{L}_s = 1,3 \dots 1,5$ .

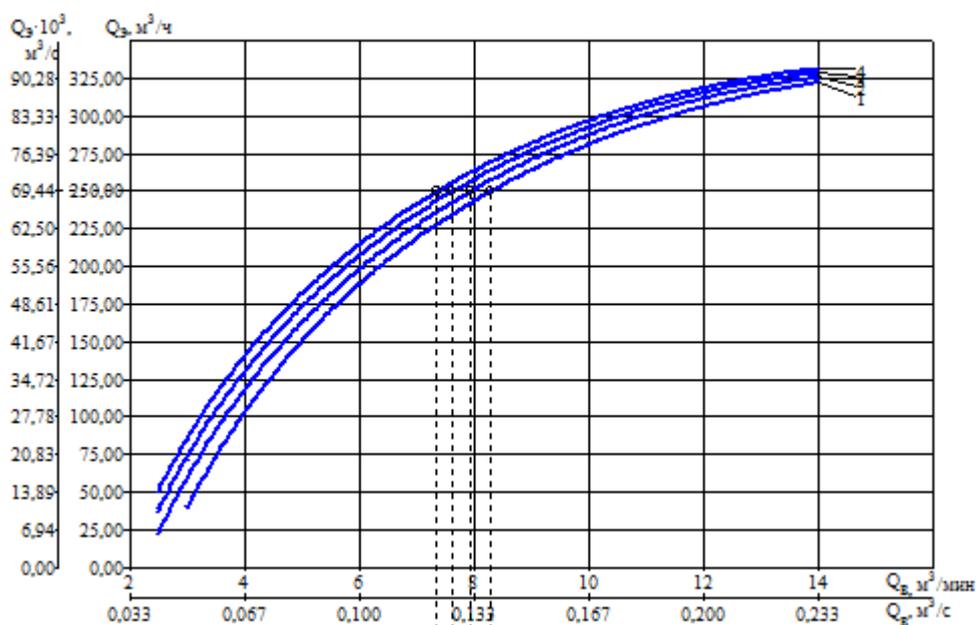


Рис. 5.8 – Расходные характеристики  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  эрлифта службы обогащения ГП УК «Краснолиманская»  $D=203\text{мм}$ ,  $H+h=3,85\text{м}$ ,  $h=2,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,65$ :  
 1 –  $\bar{L}_s=1,0$ ; 2 –  $\bar{L}_s=1,15$ ; 3 –  $\bar{L}_s=1,30$ ; 4 –  $\bar{L}_s=1,45$ ; при  $Q_3=250\text{м}^3/\text{ч}$  –  
 $Q_{61}=8,25\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $Q_{62}=7,87\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $Q_{63}=7,56\text{м}^3/\text{мин}$ ,  $Q_{64}=7,29\text{м}^3/\text{мин}$

Согласно данным, полученных из расчетных расходных характеристик  $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$  эрлифта  $D = 203$  мм,  $H+h = 3,85$  м,  $h = 2,5$  м,  $\alpha = 0,65$  (рис. 5.8), для обеспечения требуемой подачи  $Q_3=250\text{м}^3/\text{ч}$  при относительных длинах жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 1,0 \dots 1,15$  расход воздуха составит

$Q_g = 7,87 \dots 8,25 \text{ м}^3/\text{мин}$  (среднее значение  $8,06 \text{ м}^3/\text{мин}$ ), а при  $\bar{L}_s = 1,3 \dots 1,45$  –  $Q_g = 7,29 \dots 7,56 \text{ м}^3/\text{мин}$  (среднее значение  $7,43 \text{ м}^3/\text{мин}$ ). Таким образом, дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта  $D = 203 \text{ мм}$ ,  $H+h = 3,85 \text{ м}$ ,  $h = 2,5 \text{ м}$ ,  $\alpha = 0,65$  позволяет уменьшить расход сжатого воздуха на  $8 \dots 13 \%$  в сравнении с традиционной работой подъемника.

В качестве источника сжатого воздуха при его дискретной подаче в смеситель эрлифта целесообразно использовать винтовой безмасляный компрессор низкого давления ВС30-1,5 (производитель – ЗАО «РЕМЕЗА», Республика Беларусь, г. Рогачев) с параметрами: давление избыточное  $1,5 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ; производительность  $7,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ ; мощность  $22 \text{ кВт}$ . Между компрессором низкого давления ВС30-1,5 и эрлифтом с дискретной подачей сжатого воздуха целесообразно установить ресивер РВ500.11 объемом  $500 \text{ л}$  (производитель – ЗАО «РЕМЕЗА», Республика Беларусь, г. Рогачев).

Таблица 5.2

Зависимость расхода воздуха от длины жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока  $Q_g = f(\bar{L}_s)$  для обеспечения подачи  $Q_s = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$  эрлифтом службы обогащения ГП УК «Краснолиманская»  $D = 203 \text{ мм}$ ,  $H+h = 3,85 \text{ м}$ ,  $h = 2,5 \text{ м}$ ,  $\alpha = 0,65$

$Q_g, \text{ м}^3/\text{мин}, \text{ при:}$			
$\bar{L}_s = 1,0$	$\bar{L}_s = 1,15$	$\bar{L}_s = 1,30$	$\bar{L}_s = 1,45$
8,25	7,87	7,56	7,29

При традиционной работе эрлифта потребовался бы компрессор ВС40-1,5 (производитель тот же – ЗАО «РЕМЕЗА»), характеризующийся параметрами: давление избыточное  $1,5 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ; производительность  $9,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ ; мощность  $30 \text{ кВт}$ .

Таким образом, установленная мощность электропривода в компрессоре ВС40-1,5, который может быть использован в составе традиционной работающей эрлифтной установки, более чем на  $25 \%$  превышает установленную мощность компрессора ВС30-1,5, который рекомендуется к использованию в составе эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха.

Для обеспечения дискретной подачи сжатого воздуха в эрлифт на каждом из двух воздухопроводов для подвода воздуха к смесителю эрлифта устанавливаются запорно-регулирующие клапана с электромагнитным управлением от реле времени.

Изготовление и монтаж эрлифтной установки (рис. 5.9) может быть выполнен службой обогащения ГП УК «Краснолиманская» без привлечения подрядных организаций по разработанной рабочей документации основных конструктивных узлов эрлифта (приложение Д.3). Ожидаемый годовой экономический эффект от применения эрлифтной установки для перемешивания минеральной суспензии в условиях участка обогащения ГП УК «Краснолиманская» составляет 443,4 тыс. грн. (приложение Д.3).

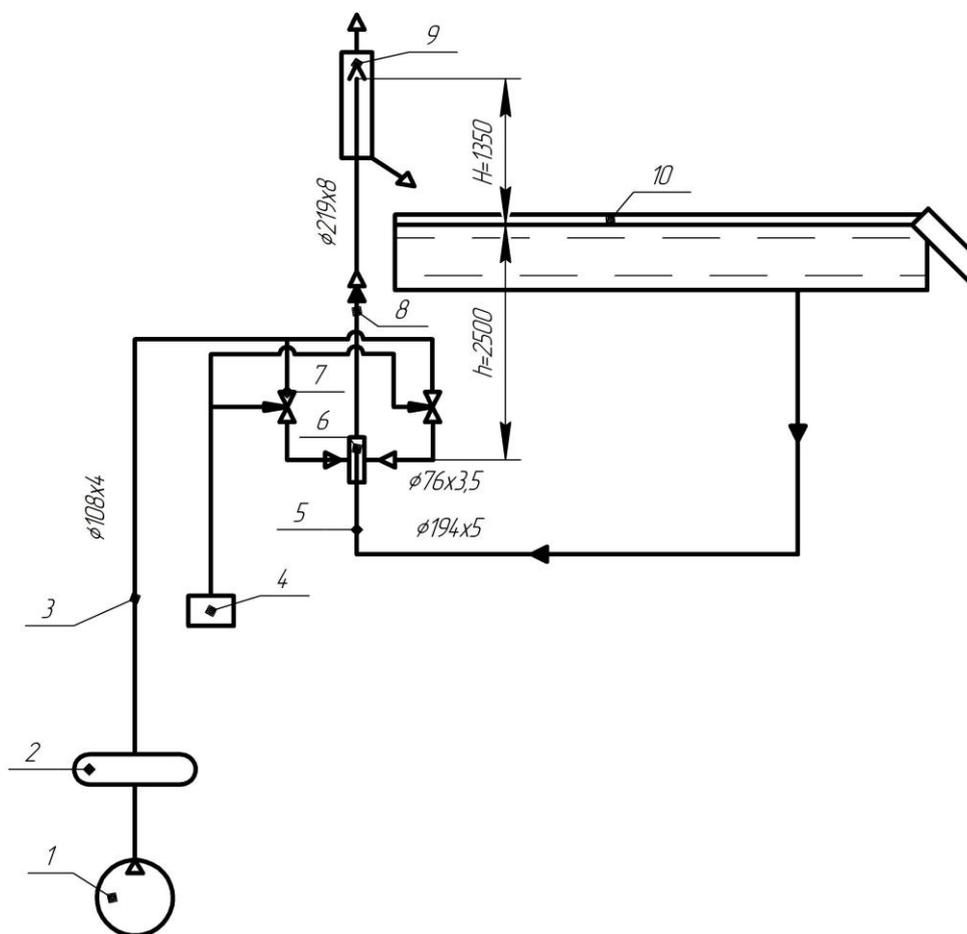


Рис. 5.9 – Эрлифтная установка для перемешивания минеральной суспензии в условиях участка обогащения ГП УК «Краснолиманская»: 1 – компрессор низкого давления ВС30-1,5; 2 – ресивер РВ500.11; 3 – воздухопровод; 4 – реле времени; 5 – подающая труба; 6 – смеситель; 7 – запорно-регулирующий клапан; 8 – подъемная труба; 9 – воздухоотделитель; 10 – ванна

## 5.5. Выводы

1. Разработана инженерная методика расчета общепромышленного эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха, включающая определение основных конструктивных и технологических параметров установки по существующим зависимостям, и уточнение дискретно подаваемого в подъемник расхода воздуха по зависимостям, полученным в результате выполненных диссертационных исследований. Разработанные рекомендации позволят в дальнейшем определять рациональные конструктивные и рабочие параметры эрлифтных установок, сокращая время их проектирования.

2. Предложены способы и устройства дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта, защищенные патентами на полезные модели [111, 112], что повышает энергоэффективность работы газожидкостных подъемников.

3. Разработаны рекомендации по реконструкции шламового традиционно работающего эрлифта шахты «Стаханова» переводом на дискретную подачу сжатого воздуха. Дискретная подача сжатого воздуха в смеситель шламового эрлифта  $D = 307$  мм,  $H+h = 5,5$  м,  $\alpha = 0,55 \dots 0,64$  в сравнении с традиционной работой подъемника позволит сократить расход воздуха на 10 ... 12 %, что обеспечит годовой экономический эффект в размере 17,5 тыс. грн.

4. Разработана эрлифтная установка для перемешивания минеральной суспензии участка обогащения ГП УК «Краснолиманская». Внедрение вместо используемого в настоящее время шламового насоса ШН250-34 разработанной эрлифтной установки с производительностью  $Q_0 = 250$  м<sup>3</sup>/ч при дискретной подаче сжатого воздуха в количестве  $Q_0 = 7,29 \dots 7,56$  м<sup>3</sup>/мин в смеситель эрлифта  $D = 203$  мм,  $H+h = 3,85$  м,  $h = 2,5$  м,  $\alpha = 0,65$  обеспечит, за счет снижения эксплуатационных расходов на ремонт, поддержание в работоспособном состоянии и уменьшения энергозатрат, экономический эффект в размере 443,4 тыс. грн.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения энергетической эффективности работы эрлифтов за счет преобразования развивающегося снарядного водовоздушного потока в близкий к развитому с увеличением длин жидкостных пробок в подъемных трубах дискретной подачей сжатого воздуха, что обеспечивает снижение энергоемкости газожидкостных подъемников до 21 ... 22 % в сравнении с традиционно работающими.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа литературных данных установлено, что восходящий вертикальный газожидкостный поток с развитой снарядной структурой в сравнении с развивающейся характеризуется уменьшением относительной скорости газовой фазы с увеличением истинного газосодержания и длин жидкостных пробок, что, применительно к эрлифту, обеспечивает снижение потерь на скольжение фаз, повышение подачи и, следовательно, более высокую энергетическую эффективность работы газожидкостного подъемника.

2. Разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющая определять влияние длин газовых снарядов и жидкостных пробок на гидродинамические параметры процесса лифтирования жидкости, а также, на основе аналитико-экспериментального метода, определять длины снарядов и пробок в подъемной трубе гидроаппарата. Среднее отклонение значений относительных длин жидкостных пробок, вычисленных аналитически, от экспериментальных данных составляет 30 ... 35 %, что подтверждает адекватность математической модели.

3. Аналитически установлено, на основе решения уточненного уравнения восходящего движения снарядной газожидкостной смеси, что для эрлифтов с подъемными трубами длиной  $H+h \leq 115$  м, диаметрами  $D$  до 250 мм, в

диапазоне относительных погружений смесителей  $\alpha = 0,362 \dots 0,931$  предельные энергетически целесообразные значения относительных длин жидкостных пробок снарядного водовоздушного потока составляет  $\bar{L}_s = 5 \dots 6$ , при которых обеспечивается повышение КПД до величины в 1,6 раза большей в сравнении с традиционно работающими газожидкостными подъемниками.

4. Проведенными экспериментальными исследованиями эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м,  $\alpha = 0,362$  доказана возможность упорядочения развивающейся снарядной структуры традиционно работающего эрлифта в близкую к развитой с увеличением длин жидкостных пробок на 30 ... 40% и повышением КПД на 21 ... 22 % при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами времени воздействия на запорно-регулирующий клапан  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5 \dots 1/2,5$ .

5. Разработаны рекомендации и инженерный метод расчета эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха, правомерность которых ограничивается значениями относительных погружений смесителей  $\alpha \geq 0,4$ , относительных длин подъемных труб  $(H+h)/D \leq 45$ , чисел Струхаля  $Sh = 0,123 \dots 0,992$  при соответствии числа Рейнольдса  $Re$  водовоздушной смеси автомоделной зоне. Разработанные способы и устройства дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель эрлифта защищены патентами на полезные модели.

6. Разработаны и переданы для внедрения: шахте «Стаханова» ГП «Красноармейсуголь» – рекомендации по реконструкция шламового традиционно работающего эрлифта переводом на дискретную подачу сжатого воздуха (ожидаемый годовой экономический эффект 17,5 тыс. грн.); ГП УК «Краснолиманская», службе обогащения – рабочая документация на эрлифтную установку с дискретной подачей сжатого воздуха для перемешивания минеральной суспензии (ожидаемый годовой экономический эффект 443,4 тыс. грн.).

Результаты исследований использованы в учебном процессе Красноармейского индустриального института ГВУЗ «ДонНТУ» и ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

## Приложение А

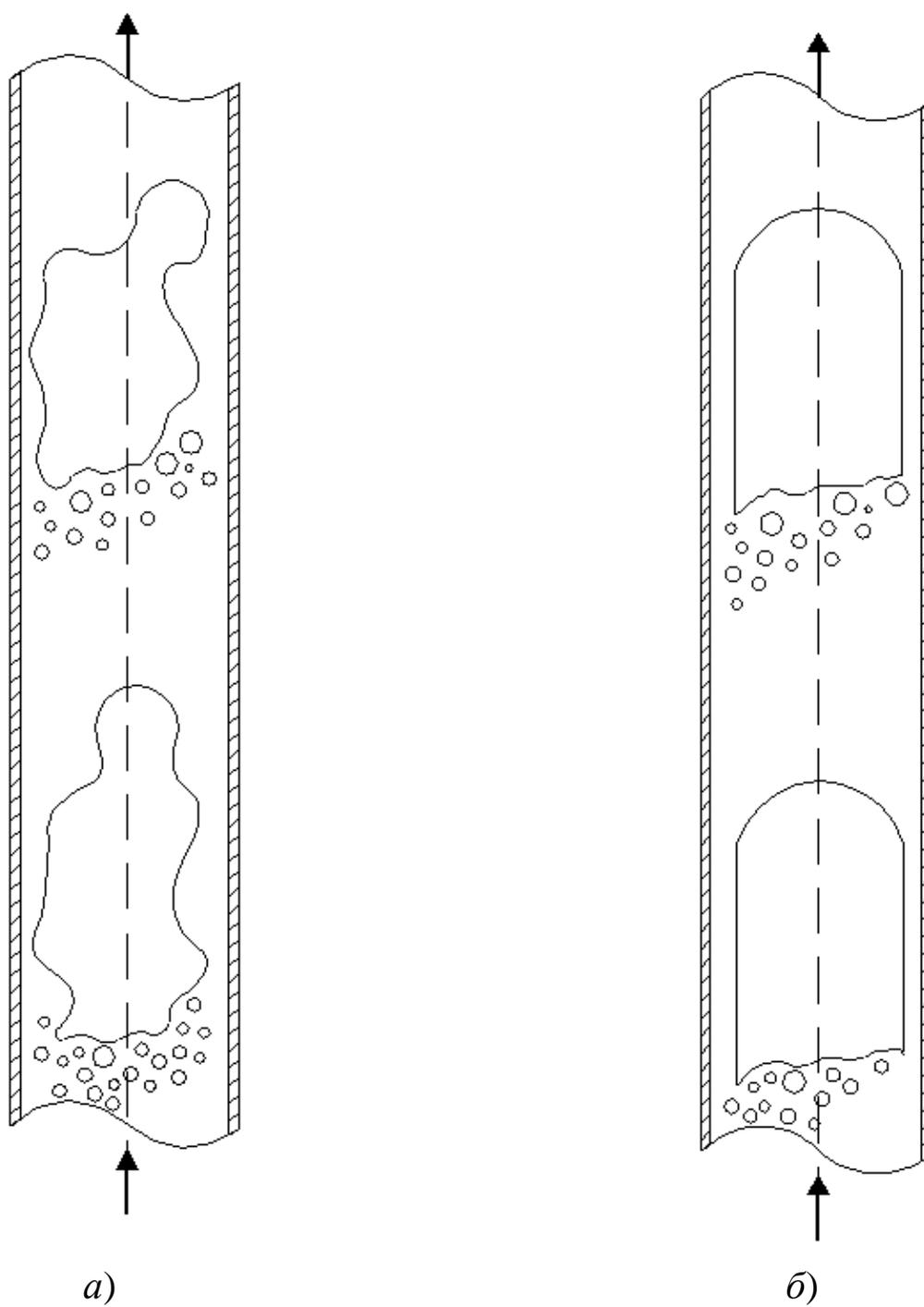


Рис. А – Снарядная структура водовоздушного потока:  
а) – развивающаяся, б) – развитая

## Приложение Б

### Б.1. Решение математической модели рабочего процесса эрлифта с использованием ПК

Qv = 35,000: Qe = 0,004217 (15,182)					
-----					
Значения z:	0,000	7,500	15,000	22,500	30,000
Давление в сечении z:	1,800	1,600	1,400	1,200	1,000
Плотность воздуха:	2,160	1,920	1,680	1,440	1,200
Плотность смеси:	257,874	248,728	239,356	229,750	219,901
Объемное расходное воздуходоержание:	0,987	0,989	0,990	0,991	0,993
Массовое расходное воздуходоержание:	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142
Динамическая вязкость смеси · 1000:	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113
Площадь сечения трубы:	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Приведенная скорость смеси:	4,644	5,217	5,954	6,937	8,312
Приведенная скорость воды:	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
Приведенная скорость воздуха:	4,585	5,158	5,895	6,877	8,252
Истинная скорость воды:	0,233	0,241	0,251	0,261	0,272
Истинная скорость воздуха:	6,164	6,852	7,737	8,915	10,566
Число Рейнольдса смеси / 1000:	3165,680	3430,175	3767,100	4212,533	4831,406
Приведенная массовая скорость смеси:	69,563	69,563	69,563	69,563	69,563
Давление, обусл. трением · 1000:	0,000	13,836	30,921	52,745	81,933
Давление, обусл. ускорением · 1000:	0,000	0,075	0,170	0,295	0,468
Давление, обусл. силой тяжести · 1000:	0,000	189,989	373,035	548,964	717,599
Давление (сумма) · 1000:	0,000	203,900	404,126	602,004	800,000
Геометрическое погружение смесителя:	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Относительное геометр. погруж. смес.:	0,267	0,267	0,267	0,267	0,267
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения:	12,310	14,982	18,774	24,453	33,601
w'':	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
Истинное газодоержание:	0,744	0,753	0,762	0,771	0,781
w'':	0,591	0,591	0,591	0,591	0,591
Суммарный перепад давления:	0,000	0,200	0,400	0,600	0,800
Средний расход водовозд. смеси · 1000:	-----	19,413	19,781	20,176	20,600
Суммарная мощность, кВт:	-----	0,381	0,776	1,188	1,617
Мощность комп. потерь на трение, кВт:	-----	0,026	0,060	0,104	0,166
Мощность комп. потерь на ускор., кВт:	-----	0,000	0,000	0,001	0,001
Мощность преод. силы тяжести, кВт:	-----	0,362	0,724	1,087	1,450
Мощность потока сжатого воздуха, кВт:	0,000	6,740	14,381	23,203	33,636
Мощность потока воды, кВт:	0,331	0,331	0,331	0,331	0,331
Мощность, подведенная к трубе, кВт:	0,331	7,071	14,712	23,534	33,967
Мощность комп. потерь на скольж., кВт:	0,332	6,690	13,936	22,346	32,350
Ср. плотность по расх. воздуходоерж.:	-----	14,156	13,332	12,507	11,680
Ср. плотность по ист. воздуходоерж.:	-----	253,319	248,690	243,984	239,200
Ср. плотность по среднему давлению:	14,978	14,156	13,333	12,508	11,683
Объемный расход воздуха при ср. давл.:	19,444	20,588	21,875	23,333	25,000
-----					
Qv = 45,000: Qe = 0,004075 (14,672)					
-----					
Значения z:	0,000	7,500	15,000	22,500	30,000
Давление в сечении z:	1,800	1,600	1,400	1,200	1,000
Плотность воздуха:	2,160	1,920	1,680	1,440	1,200
Плотность смеси:	239,471	232,008	224,399	216,640	208,726
Объемное расходное воздуходоержание:	0,990	0,991	0,992	0,994	0,995
Массовое расходное воздуходоержание:	0,181	0,181	0,181	0,181	0,181
Динамическая вязкость смеси · 1000:	0,092	0,092	0,092	0,092	0,092
Площадь сечения трубы:	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Приведенная скорость смеси:	5,952	6,689	7,636	8,900	10,668
Приведенная скорость воды:	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
Приведенная скорость воздуха:	5,895	6,631	7,579	8,842	10,610
Истинная скорость воды:	0,242	0,250	0,258	0,268	0,277
Истинная скорость воздуха:	7,734	8,618	9,755	11,271	13,393
Число Рейнольдса смеси / 1000:	4671,585	5086,263	5616,174	6318,821	7297,705
Приведенная массовая скорость смеси:	70,388	70,388	70,388	70,388	70,388
Давление, обусл. трением · 1000:	0,000	21,096	47,294	80,975	126,348
Давление, обусл. ускорением · 1000:	0,000	0,119	0,272	0,474	0,755
Давление, обусл. силой тяжести · 1000:	0,000	176,814	347,975	513,375	672,896
Давление (сумма) · 1000:	0,000	198,029	395,542	594,823	800,000
Геометрическое погружение смесителя:	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000

Б.2. Результаты решения математической модели рабочего процесса эрлифта с отдельной развитой снарядной структурой водовоздушного потока

Таблица Б.2.1

Результаты решения математической модели рабочего процесса эрлифта

$$D = 25 \text{ мм}, H+h = 14,0 \text{ м}, h = 5,5 \text{ м}, \alpha = 0,393$$

Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Длина подъемной трубы $H+h$ , м	Геометрическое погружение смесителя $h$ , м	Относительное погружение смесителя $\alpha$	Относительная длина жидкостной пробки $L_s$	Приведенная длина первого газового снаряда $K_{Lb1}$	Относительная длина первого газового снаряда $L_{b1}$	Число жидкостных пробок в подъемной трубе $n$ , шт.	Удельный расход воздуха $q$	Скорость $w'_m$ жидкостной пробки в сечении $z_k$ , м/с	Расстояние до сечения $z_k$ , м	Число $m$ жидкостных пробок до сечения $z_k$ , шт.	Подача эрлифта $Q_э$ , м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха $Q_в$ , м <sup>3</sup> /мин
25	14,0	5,5	0,393	2,0	1,5	3	98	2,32	1,03	10	73	0,600	0,023
				1,5	2,0	3	107	3,09	1,94	10	80	0,923	0,048
				1,0	3,0	3	119	4,64	2,83	10	89	0,986	0,076
				0,8	3,75	3	124	5,80	3,25	10	93	0,942	0,091
				0,6	5,0	3	130	7,73	3,72	10	98	0,842	0,108
				0,4	7,5	3	136	11,6	4,29	10	103	0,675	0,130
				0,3	10	3	140	15,5	4,61	10	96	0,574	0,148
				2,0	2,0	4	80	3,09	1,92	10	60	0,914	0,047
				1,5	2,67	4	87	4,12	2,57	10	65	0,983	0,068
				1,0	4,0	4	94	6,18	3,35	10	71	0,919	0,095
				0,8	5,0	4	97	7,72	3,72	10	73	0,843	0,109
				0,6	6,67	4	101	10,3	4,13	10	76	0,725	0,124
				0,4	10,0	4	105	15,5	4,61	10	79	0,558	0,144
				0,3	13,33	4	107	20,6	4,89	10	81	0,451	0,155
				2,0	2,5	5	68	3,86	2,43	10	51	0,978	0,063
				1,5	3,33	5	73	5,14	3,00	10	55	0,960	0,082
				1,0	5,0	5	78	7,72	3,70	10	59	0,838	0,108
				0,8	6,25	5	80	9,65	4,03	10	60	0,751	0,121
				0,7	7,14	5	81	11,0	4,21	10	61	0,695	0,128
				0,6	8,33	5	83	12,9	4,40	10	62	0,633	0,136
				1,0	7,0	7	58	11,8	4,17	10	44	0,700	0,126
				2,0	3,5	7	52	5,39	3,08	10	39	0,949	0,085
				1,5	4,67	7	55	7,19	3,57	10	41	0,863	0,103
				0,8	8,75	7	59	13,5	4,45	10	45	0,608	0,137
				0,6	11,67	7	60	18,0	4,76	10	46	0,497	0,149
				0,4	17,5	7	62	26,9	5,09	10	47	0,363	0,163

Таблица Б.2.2

Результаты решения математической модели рабочего процесса эрлифта

$$D = 50 \text{ мм}, H+h = 14,0 \text{ м}, h = 5,5 \text{ м}, \alpha = 0,393$$

Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Длина подъемной трубы $H+h$ , м	Геометрическое погружение смесителя $h$ , м	Относительное погружение смесителя $\alpha$	Относительная длина жидкостной пробки $L_s$	Приведенная длина первого газового снаряда $k_{Lb1}$	Относительная длина первого газового снаряда $L_{b1}$	Число жидкостных пробок в подъемной трубе $n$ , шт.	Удельный расход воздуха $q$	Скорость $w'_m$ жидкостной пробки в сечении $z_k$ , м/с	Расстояние до сечения $z_k$ , м	Число $m$ жидкостных пробок до сечения $z_k$ , шт.	Подача эрлифта $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха $Q_6$ , м <sup>3</sup> /мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
50	14,0	5,5	0,393	2,0	1,5	3	49	2,31	1,59	5	19	4,122	0,159
				1,5	2,0	3	53	3,08	2,90	10	40	5,521	0,283
				1,25	2,4	3	56	3,70	3,57	10	42	5,938	0,366
				1,0	3,0	3	59	4,62	4,31	10	44	6,027	0,464
				0,8	3,75	3	62	5,78	4,95	10	47	5,735	0,552
				0,6	5,0	3	65	7,71	5,69	10	49	5,164	0,663
				0,5	6,0	3	66	9,25	6,13	10	50	4,729	0,729
				0,4	7,5	3	68	11,6	6,58	10	51	4,165	0,803
				0,3	10,0	3	70	15,4	7,09	10	53	3,432	0,882
				2,0	2,0	4	40	3,07	2,77	10	30	5,290	0,271
				1,5	2,67	4	43	4,10	3,87	10	32	5,949	0,407
				1,25	3,2	4	45	4,92	4,45	10	34	5,893	0,483
				1,0	4,0	4	47	6,15	5,09	10	35	5,626	0,577
				0,8	5,0	4	49	7,69	5,65	10	37	5,133	0,658
				0,6	6,67	4	50	10,3	6,33	10	38	4,444	0,760
				0,5	8,0	4	51	12,3	6,69	10	39	3,973	0,815
				0,4	10,0	4	52	15,4	7,08	10	40	3,414	0,876
				0,7	5,71	4	50	8,79	5,97	10	37	4,857	0,711
				2,0	2,5	5	34	3,84	3,57	10	26	5,741	0,367
				1,5	3,33	5	36	5,11	4,54	10	27	5,842	0,498
				1,0	5,0	5	39	7,68	5,63	10	29	5,148	0,659
				0,8	6,25	5	40	9,60	6,16	10	30	4,612	0,738
				0,7	7,14	5	41	11,0	6,43	10	31	4,258	0,779
				0,6	8,33	5	41	12,8	6,75	10	31	3,884	0,828
				0,5	10,0	5	42	15,4	7,06	10	32	3,421	0,876
				0,4	12,5	5	43	19,2	7,40	10	32	2,931	0,939



Таблица Б.2.3

Результаты решения математической модели рабочего процесса эрлифта

$$D = 60 \text{ мм}, H+h = 16,0 \text{ м}, h = 8,0 \text{ м}, \alpha = 0,500$$

Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Длина подъемной трубы $H+h$ , м	Геометрическое погружение смесителя $h$ , м	Относительное погружение смесителя $\alpha$	Относительная длина жидкостной пробки $L_s$	Приведенная длина первого газового снаряда $k_{Lb1}$	Относительная длина первого газового снаряда $L_{b1}$	Число жидкостных пробок в подъемной трубе $n$ , шт.	Удельный расход воздуха $q$	Скорость $w'_m$ жидкостной пробки в сечении $z_k$ , м/с	Расстояние до сечения $z_k$ , м	Число $m$ жидкостных пробок до сечения $z_k$ , шт.	Подача эрлифта $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха $Q_6$ , м <sup>3</sup> /мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
60	16,0	8,0	0,500	2,0	1,5	3	45	2,67	3,81	12	35	11,860	0,528
				1,5	2,0	3	49	3,57	4,98	12	38	12,596	0,749
				1,0	3,0	3	54	5,36	6,39	12	43	11,604	1,036
				0,8	3,75	3	56	6,70	7,08	12	44	10,730	1,198
				0,6	5,0	3	58	8,93	7,88	12	46	9,259	1,378
				0,5	6,0	3	60	10,7	8,32	12	48	8,269	1,477
				0,4	7,5	3	61	13,4	8,83	12	49	7,145	1,596
				2,5	1,2	3	41	2,14	2,81	12	32	10,152	0,362
				2,5	1,6	4	34	2,84	4,01	12	27	11,864	0,562
				2,0	2,0	4	36	3,56	4,96	12	29	12,384	0,734
				1,5	2,67	4	39	4,75	5,97	12	31	11,959	0,947
				1,0	4,0	4	42	7,12	7,24	12	34	10,261	1,218
				0,8	5,0	4	44	8,91	7,83	12	35	9,207	1,367
				0,6	6,67	4	45	11,9	8,55	12	36	7,737	1,533
				0,5	8,0	4	46	14,3	8,94	12	37	6,826	1,622
				2,5	2,0	5	29	3,55	4,85	12	23	12,215	0,722
				2,0	2,5	5	31	4,44	5,65	12	25	11,880	0,878
				1,5	3,33	5	33	5,91	6,61	12	26	11,111	1,095
				1,0	5,0	5	35	8,89	7,81	12	28	9,180	1,359
				1,25	4,0	5	34	7,11	7,18	12	27	10,292	1,219
				0,8	6,25	5	36	11,1	8,36	12	29	8,016	1,484
				0,6	8,33	5	37	14,8	8,99	12	30	6,599	1,629
				0,5	10,0	5	38	17,8	9,33	12	30	5,853	1,735













Продолжение таблицы Б.2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
150	63,7	59,3	0,931	34	0,294	10	7	1,79	6,42	40	5	245,48	7,317
				36	0,278	10	7	1,69	5,50	40	5	214,97	6,059
				38	0,263	10	6	1,56	6,31	40	5	224,77	5,854
				40	0,250	10	6	1,49	5,52	40	4	234,27	5,800
				42	0,238	10	6	1,41	4,62	40	4	199,25	4,696
				44	0,227	10	6	1,35	3,55	40	4	155,42	3,494
				46	0,217	10	6	1,29	2,01	40	4	89,224	1,917
				45	0,282	10	6	1,32	2,88	40	4	126,96	2,791

Таблица Б.2.7

Результаты решения математической модели рабочего процесса эрлифта

$$D = 250 \text{ мм}, H+h = 16,0 \text{ м}, h = 8,0 \text{ м}, \alpha = 0,500$$

Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Длина подъемной трубы $H+h$ , м	Геометрическое погружение смесителя $h$ , м	Относительное погружение смесителя $\alpha$	Относительная длина жидкостной пробки $L_s$	Приведенная длина первого газового снаряда $k_{Lb1}$	Относительная длина первого газового снаряда $L_{b1}$	Число жидкостных пробок в подъемной трубе $n$ , шт.	Удельный расход воздуха $q$	Скорость $w'_m$ жидкостной пробки в сечении $z_k$ , м/с	Расстояние до сечения $z_k$ , м	Число $m$ жидкостных пробок до сечения $z_k$ , шт.	Подача эрлифта $Q_e$ , м <sup>3</sup> /ч	Расход воздуха $Q_e$ , м <sup>3</sup> /мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
250	16,0	8,0	0,500	5	2,4	12	3	3,68	6,95	14	3	262,43	16,096
				3	4,0	12	3	6,13	14,12	14	3	349,80	35,757
				5,5	2,182	12	3	3,35	4,54	14	2	220,33	12,286
				5,7	2,105	12	3	3,23	3,22	14	2	160,37	8,627
				5,25	2,286	12	3	3,51	5,84	14	2	273,94	16,004
				5,9	2,034	12	3	3,12	0,69	14	2	35,22	1,831
				5,8	2,069	12	3	3,17	2,31	14	2	116,48	6,159
				5,9	2,373	14	3	3,64	1,71	14	2	78,03	4,732
				5,8	2,414	14	3	3,70	2,84	14	2	127,96	7,894
				5,7	2,456	14	3	3,77	3,65	14	2	162,35	10,190
				5,6	2,500	14	3	3,83	4,31	14	2	189,17	12,086
				5,5	2,545	14	3	3,90	4,91	14	2	212,62	13,829
				5,4	2,593	14	3	3,98	5,45	14	2	232,69	15,420
				5,3	2,642	14	3	4,05	5,95	14	2	250,45	16,910
				5,2	2,692	14	3	4,13	6,42	14	2	266,40	18,327
				5,9	2,712	16	3	4,16	2,26	14	2	93,25	6,463
				5,7	2,807	16	3	4,30	3,98	14	2	159,92	11,472
				5,8	2,759	16	3	4,23	3,23	14	2	131,52	9,273
				5,5	2,909	16	3	4,46	5,21	14	2	203,59	15,135
				5,6	2,857	16	3	4,38	4,63	14	2	183,51	13,399
				5,4	2,963	16	3	4,54	5,74	14	2	221,14	16,745
				5,3	3,019	16	3	4,63	6,23	14	2	236,53	18,249
				5,2	3,077	16	3	4,72	6,70	14	2	250,59	19,705



## Продолжение таблицы Б.2.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
57	2,57	0,93	0,362	1,5	3,33	5	7	3,60	2,22	2	5	4,530	0,271
				1,0	5,0	5	7	5,40	4,49	2	6	6,518	0,586
				0,8	6,25	5	7	6,75	5,31	2	6	6,368	0,716
				0,6	8,33	5	8	9,01	5,98	2	6	5,604	0,841
				0,5	10,0	5	8	10,81	6,46	2	6	5,130	0,925
				0,4	12,5	5	8	13,52	6,97	2	6	4,506	1,015
				0,3	16,67	5	8	18,03	7,52	2	6	3,711	1,115
				0,25	20,0	5	8	21,63	7,81	2	6	3,241	1,168
				0,20	25,0	5	8	27,03	8,11	2	6	2,717	1,224
				0,15	33,33	5	8	36,04	8,43	2	6	2,138	1,284
				1,25	4,0	5	7	4,32	3,45	2	6	6,023	0,434
				1,5	4,67	7	5	5,02	3,88	2	4	6,016	0,503
				1,0	7,0	7	5	7,52	5,47	2	4	5,994	0,751
				0,8	8,75	7	6	9,43	5,88	2	4	5,325	0,837
				0,6	11,67	7	6	12,57	6,65	2	5	4,565	0,957
				0,4	17,5	7	6	18,86	7,48	2	5	3,511	1,104
				0,5	14,0	7	6	15,09	7,05	2	5	4,085	1,027
				0,3	23,33	7	6	25,14	7,93	2	5	2,829	1,185
				0,2	35,0	7	6	37,71	8,41	2	5	2,026	1,273
				1,25	5,6	7	5	6,02	4,67	2	4	6,211	0,623
				2,9	4,5	9	4	4,81	3,24	2	3	5,218	0,419
				1,5	6,0	9	4	6,42	4,65	2	3	5,874	0,628
				1,0	9,0	9	4	9,63	6,02	2	3	5,313	0,853
				1,25	7,2	9	4	7,70	5,32	2	3	5,731	0,736
				1,75	5,14	9	4	5,50	3,97	2	3	5,722	0,524
				0,8	11,25	9	4	12,04	6,59	2	3	4,744	0,952
				0,6	15,0	9	4	16,05	7,21	2	3	3,970	1,062
				0,5	18,0	9	4	19,26	7,54	2	3	3,495	1,122
				0,4	22,5	9	5	24,17	7,76	2	4	2,882	1,161
				0,3	30,0	9	5	32,23	8,16	2	4	2,296	1,234
				2,0	5,5	11	3	5,84	4,21	2	2	5,802	0,565
				1,5	7,33	11	3	7,78	5,33	2	2	5,726	0,743
				1,0	11,0	11	4	11,77	6,20	2	3	4,556	0,894
				0,8	13,75	11	4	14,71	6,76	2	3	4,039	0,990
				0,6	18,33	11	4	19,61	7,36	2	3	3,353	1,096
				0,4	27,5	11	4	29,42	8,00	2	3	2,470	1,211
				0,5	22,0	11	4	23,53	7,67	2	3	2,936	1,152



Б.3. Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  для разных эрлифтов

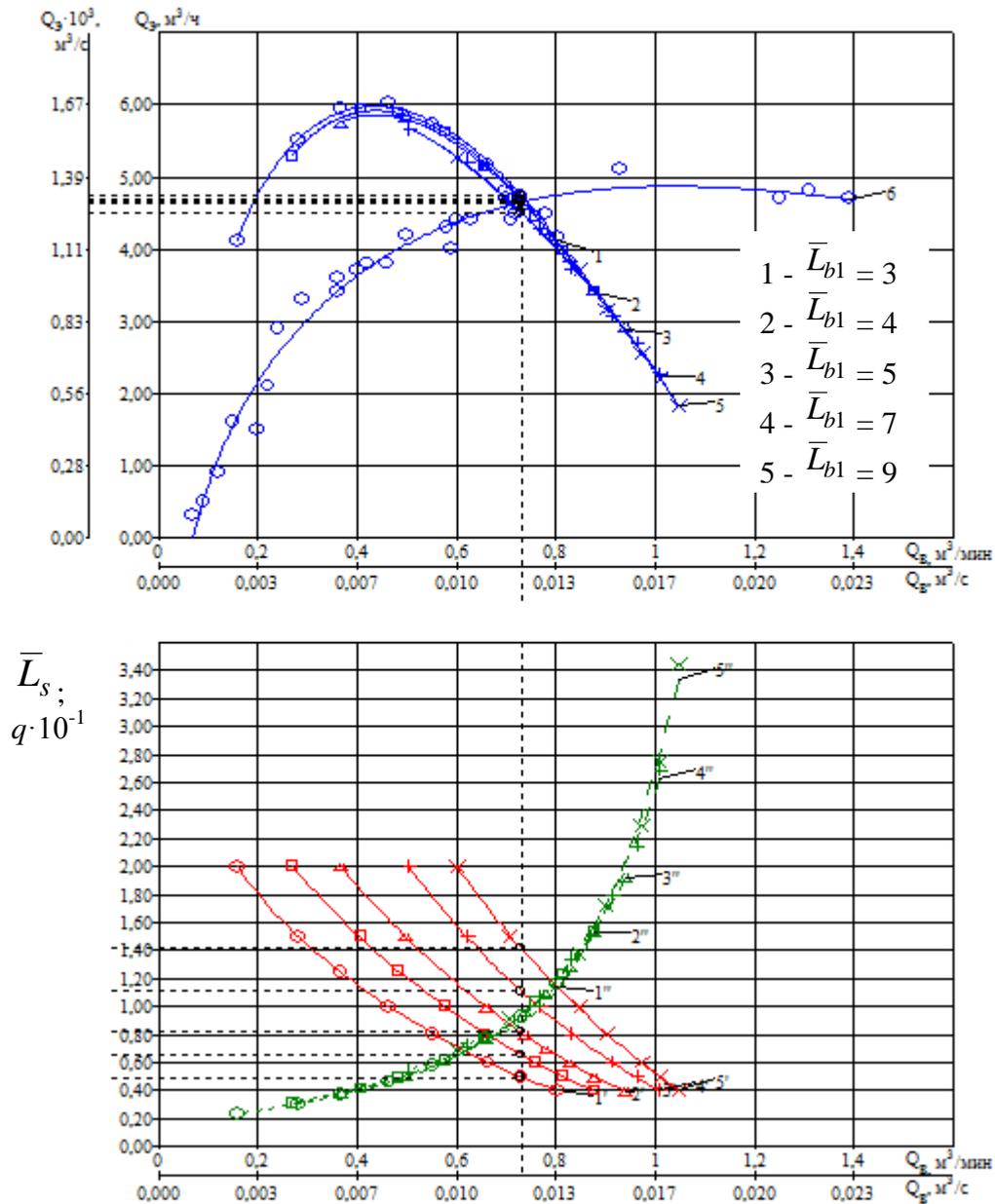


Рис. Б.3.1 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 50\text{мм}$ ,  $H+h = 14,0\text{м}$ ,  $h = 5,5\text{м}$ ,  $\alpha = 0,393$ :

1 ... 5 -  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ ; 6 -  $Q_g = f(Q_g)$ ; 1' ... 5' -  $\bar{L}_s = f(Q_g)$ ; 1'' ... 5'' -  $q = f(Q_g)$

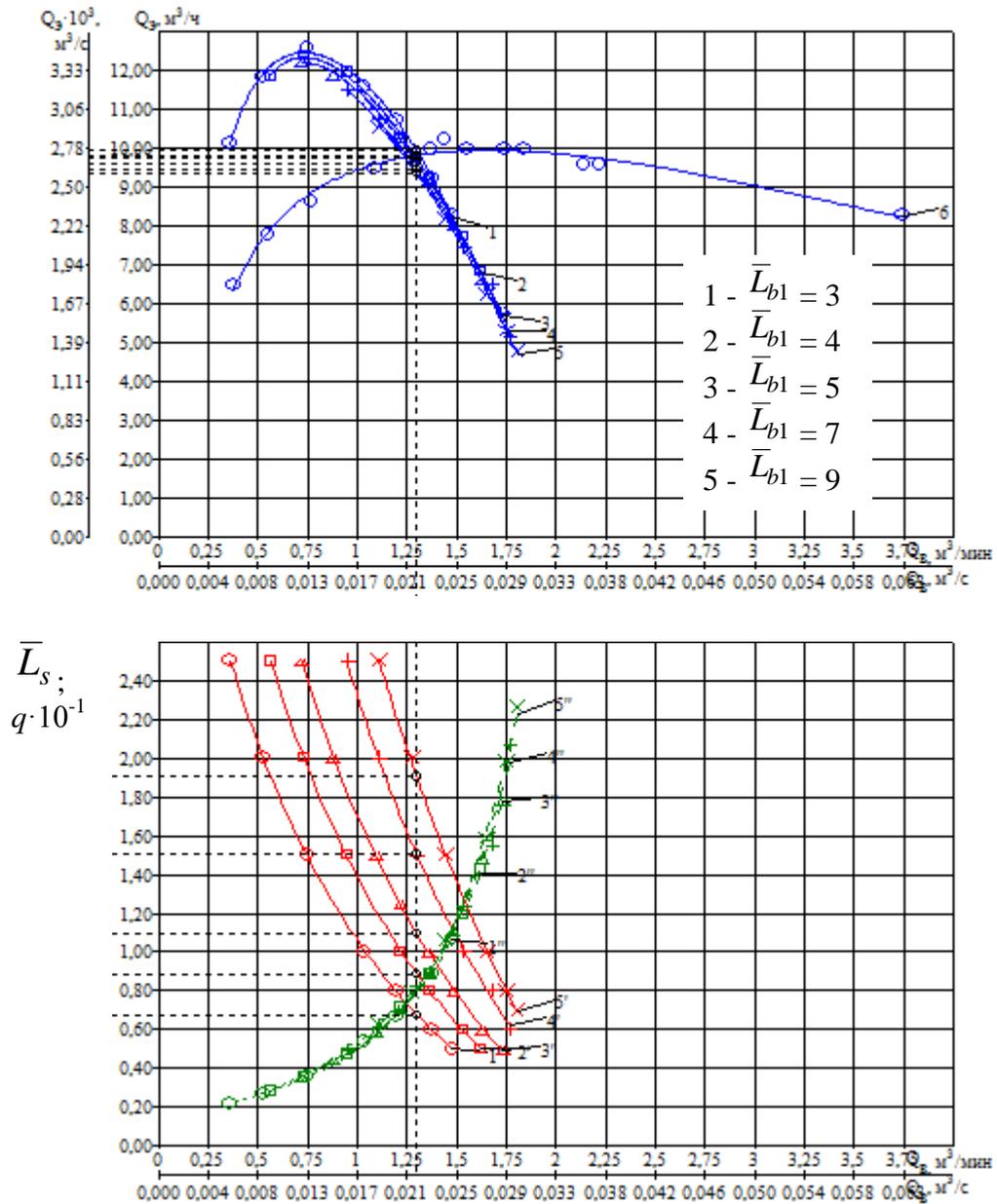


Рис. Б.3.2 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов  $\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 60\text{мм}$ ,  $H+h = 16,0\text{м}$ ,  $h = 8,0\text{м}$ ,  $\alpha = 0,500$ :  
 1 ... 5 -  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ ; 6 -  $Q_g = f(Q_g)$ ; 1' ... 5' -  $\bar{L}_s = f(Q_g)$ ; 1'' ... 5'' -  $q = f(Q_g)$

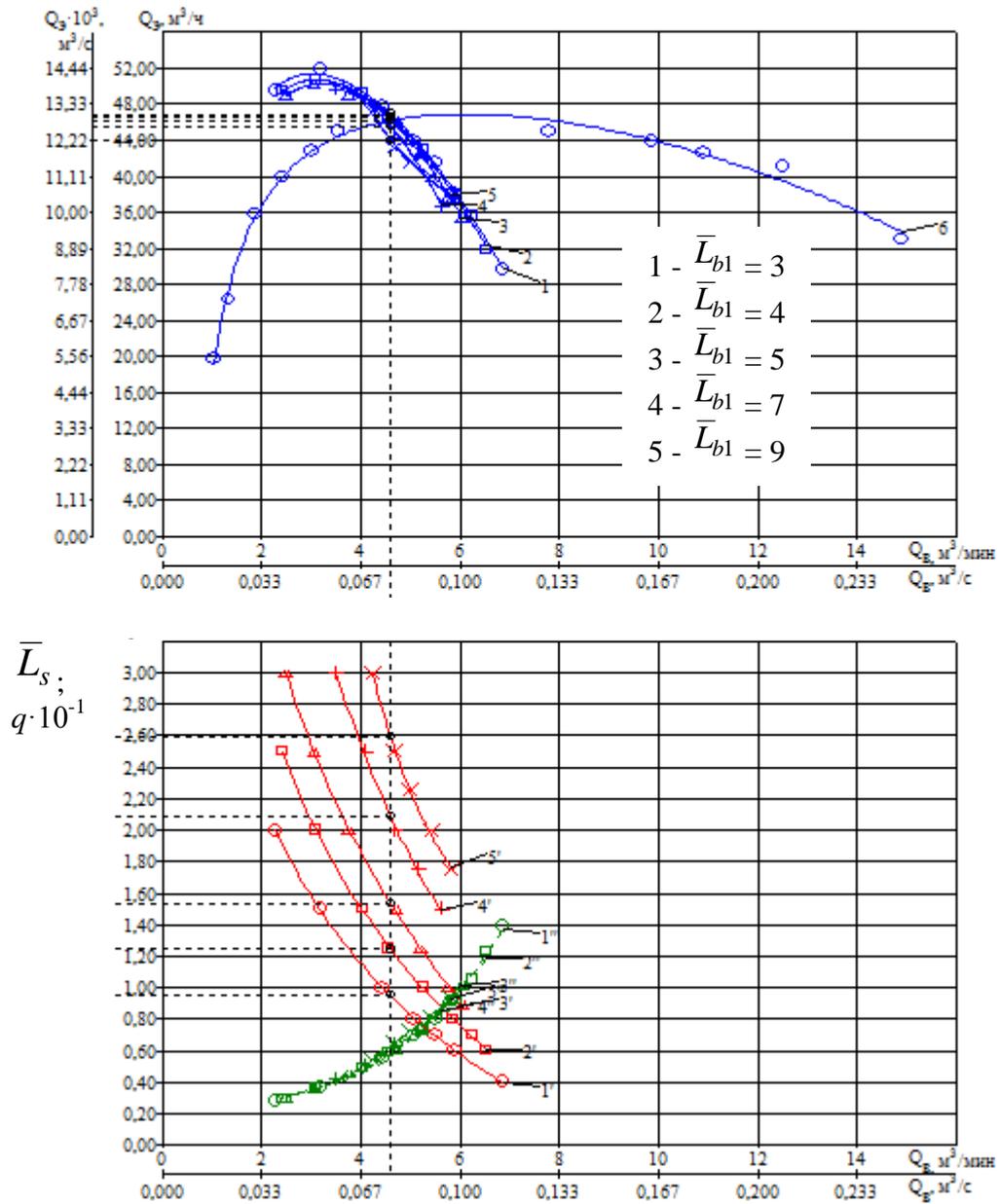


Рис. Б.3.3 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 100\text{мм}$ ,  $H+h = 17,5\text{м}$ ,  $h = 8,75\text{ м}$ ,  $\alpha = 0,500$ :

1 ... 5 -  $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ ; 6 -  $Q_g = f(Q_g)$ ; 1' ... 5' -  $\bar{L}_s = f(Q_g)$ ; 1'' ... 5'' -  $q = f(Q_g)$

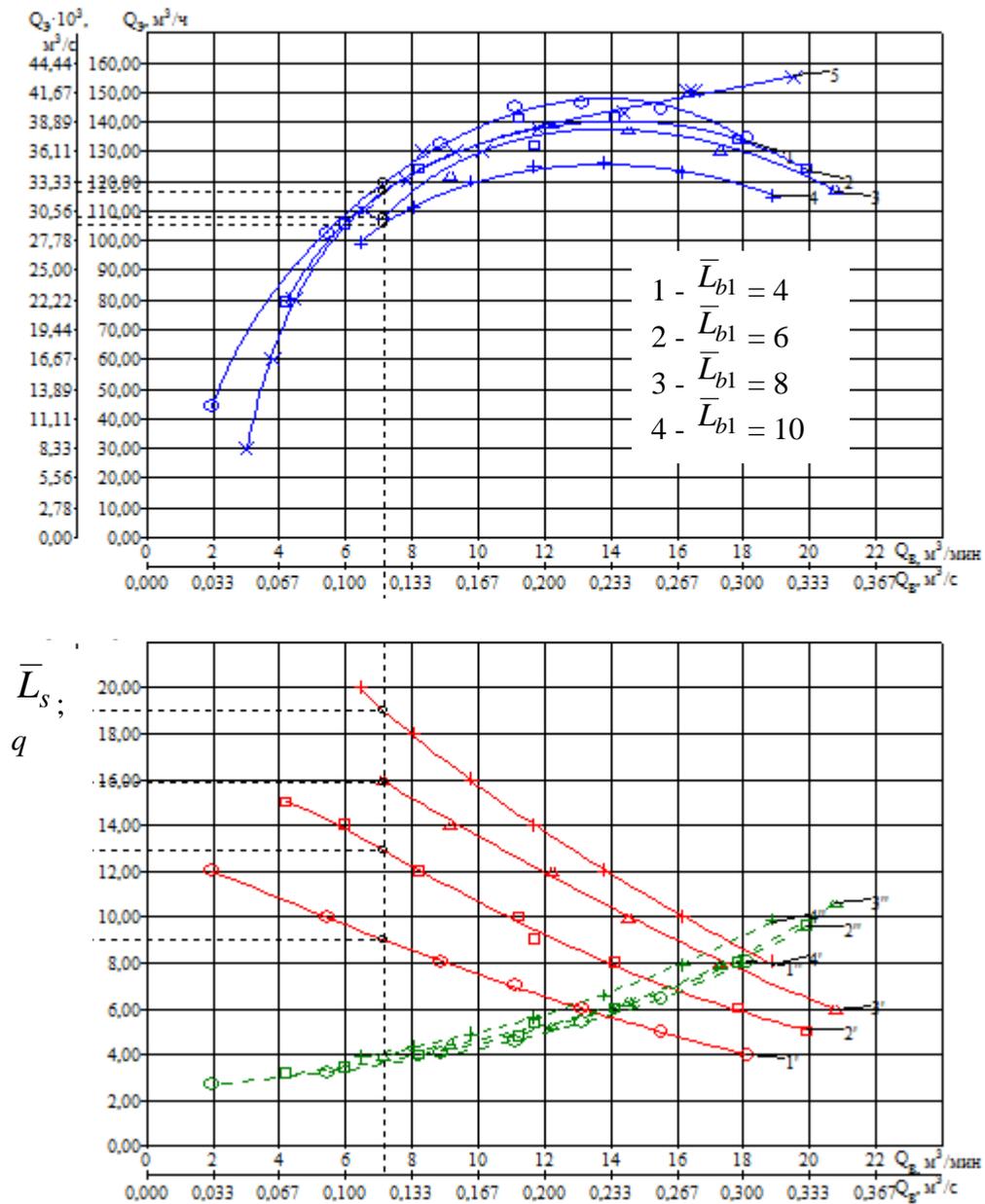


Рис. Б.3.4 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 150\text{мм}$ ,  $H+h = 115\text{м}$ ,  $h = 72\text{м}$ ,  $\alpha = 0,625$ :

1 ... 4 -  $Q_3 = f(Q_g, \bar{L}_s)$ ; 5 -  $Q_3 = f(Q_g)$ ; 1' ... 4' -  $\bar{L}_s = f(Q_g)$ ; 1'' ... 4'' -  $q = f(Q_g)$

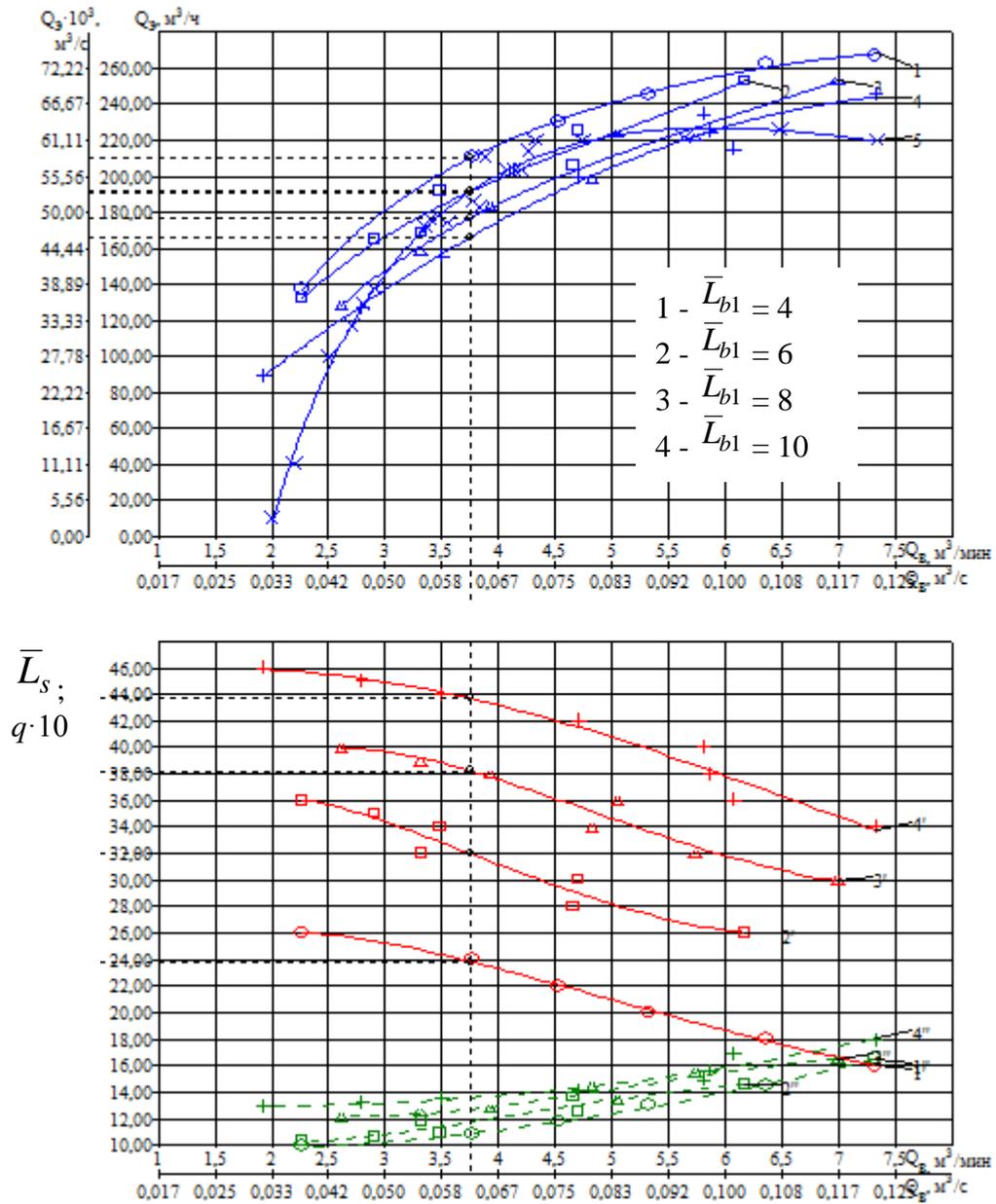


Рис. Б.3.5 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 150\text{мм}$ ,  $H+h = 63,7\text{м}$ ,  $h = 59,3\text{м}$ ,  $\alpha = 0,931$ :

1 ... 4 –  $Q_3 = f(Q_\epsilon, \bar{L}_s)$ ; 5 –  $Q_3 = f(Q_\epsilon)$ ; 1' ... 4' –  $\bar{L}_s = f(Q_\epsilon)$ ; 1'' ... 4'' –  $q = f(Q_\epsilon)$

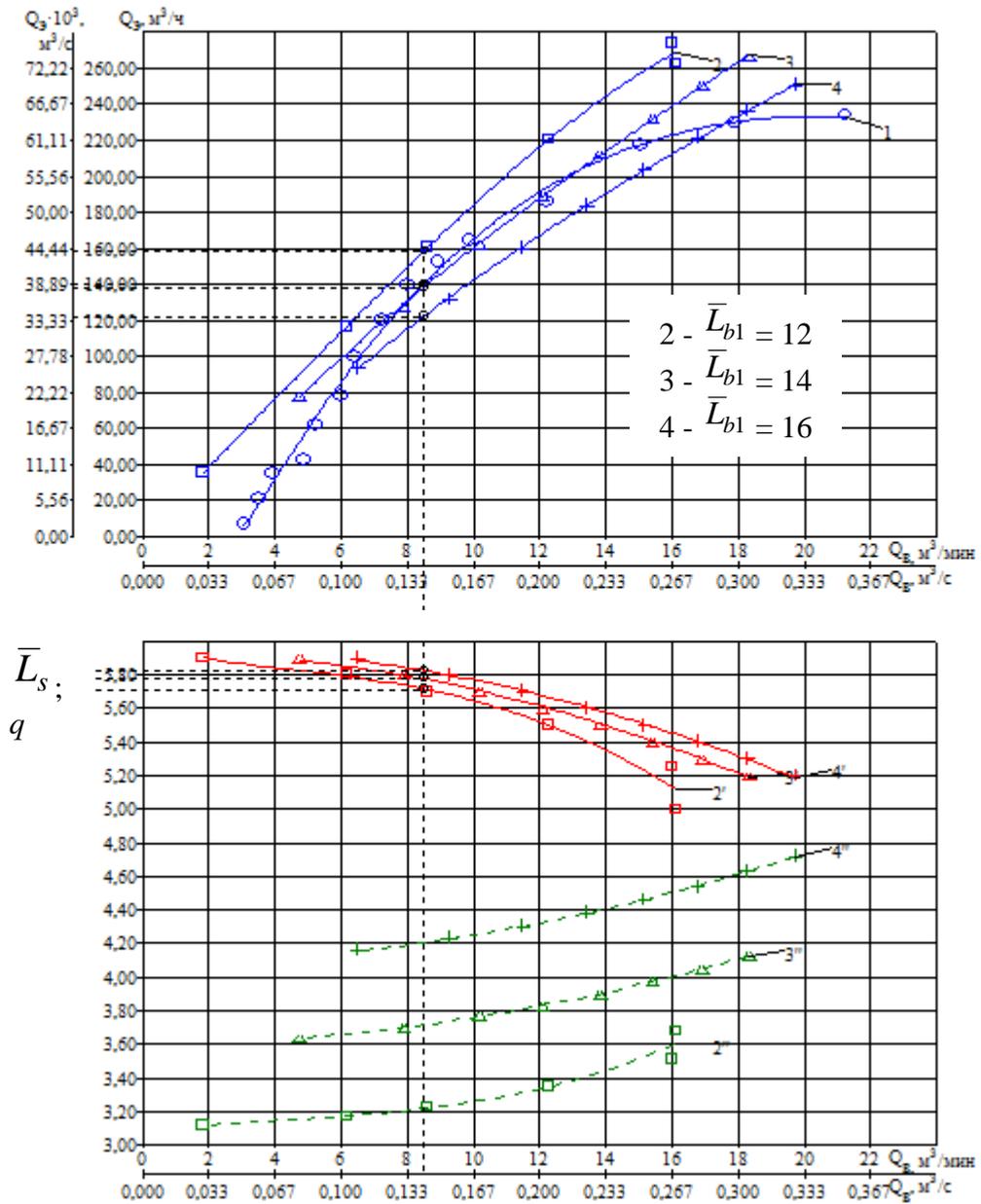


Рис. Б.3.6 – Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  и газовых снарядов

$\bar{L}_{b1}$  для эрлифта  $D = 250\text{мм}$ ,  $H+h = 16,0\text{м}$ ,  $h = 8,0\text{м}$ ,  $\alpha = 0,500$ :

1 -  $Q_3 = f(Q_g)$ ; 2 ... 4 -  $Q_3 = f(Q_g, \bar{L}_s)$ ; 2' ... 4' -  $\bar{L}_s = f(Q_g)$ ; 2'' ... 4'' -  $q = f(Q_g)$

## Приложение В

Результаты количественных исследований рабочего процесса эрлифта со  
снарядной структурой водовоздушного потока

Пример результатов расчета гидродинамических параметров рабочего  
процесса эрлифта ( $D=25\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,393$ ) со снарядной  
структурой водовоздушного потока

Параметры расчета:

Касательные напряжения по формулам:	Арманда-Невструевой
Истинное газосодержание по формулам:	Уоллиса Г. (учет влияния следа предыдущего пузыря)
Вид процесса изменения состояния воздуха:	изотермический
Исходные данные:	
Плотность воды $\rho'$ , кг/м <sup>3</sup> :	1000
Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_0''$ , кг/м <sup>3</sup> :	1,2
Атмосферное давление $p_0$ , Па:	$9,81 \cdot 10^4$
Динамическая вязкость воды $\mu'$ , Па·с:	$1 \cdot 10^{-3}$
Динамическая вязкость воздуха $\mu''$ , Па·с:	$1,79 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ , Н/м:	$72,3 \cdot 10^{-3}$
Показатель политропы $n$ :	1
Расход воздуха при нормальных условиях $Q_0$ , м <sup>3</sup> /мин:	0,112
Длина подъемной трубы $H+h$ , м:	14,0
Диаметр подъемной трубы $D$ , м:	0,025
Эквивалентная шероховатость трубы $\Delta_s$ , м:	0,00001
Геометрическое погружение смесителя $h$ , м:	5,5
Ускорение свободного падения $g$ , м/с <sup>2</sup>	9,81
Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	0,85

Результаты расчета:

Подача эрлифта  $Q_s = 0,000148 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $0,532 \text{ м}^3/\text{ч}$ )

Значения $z$ , м:	0,000	3,500	7,000	10,500	14,000
Давление $p_a(z)$ в сечении $z$ , кг/см <sup>2</sup> :	1,550	1,413	1,275	1,138	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$ , кг/м <sup>3</sup> :	1,860	1,695	1,530	1,365	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$ , кг/м <sup>3</sup> :	392,49	377,50	361,77	345,22	327,80
Объемное расходное воздухосодержание $\beta(z)$ :	0,891	0,899	0,908	0,917	0,927
Массовое расходное воздухосодержание $x$ :	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015

Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$ , Па·с:	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
Площадь сечения трубы $\omega \cdot 10^3$ , м <sup>2</sup> :	0,491	0,491	0,491	0,491	0,491
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$ , м/с:	2,76	2,99	3,28	3,64	4,10
Приведенная скорость воды $w'_0$ , м/с:	0,301	0,301	0,301	0,301	0,301
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$ , м/с:	2,45	2,69	2,98	3,34	3,80
Истинная скорость воды $w'(z)$ , м/с:	0,770	0,800	0,835	0,875	0,921
Истинная скорость воздуха $w''(z)$ , м/с:	4,03	4,32	4,67	5,10	5,65
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$ :	49,2	51,4	54,0	57,2	61,2
Привед-ая массовая скорость смеси $G$ , кг/м <sup>2</sup> ·с:	305,8	305,8	305,8	305,8	305,8
Давление, обусл. трением $p_{mpi} \cdot 10^3$ , кг/см <sup>2</sup> :	0,000	9,60	19,82	30,76	42,56
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} \cdot 10^3$ , кг/см <sup>2</sup> :	0,000	0,107	0,230	0,372	0,541
Давление, обусл. силой тяжести $p_{gi} \cdot 10^3$ , кг/см <sup>2</sup> :	0,000	134,8	264,2	387,9	505,7
Давление (сумма) $p_{\Sigma i} \cdot 10^3$ , кг/см <sup>2</sup> :	0,000	144,5	284,2	419,0	548,8
Относительное геометр. погруж. смес. $\alpha$ :	0,393	0,393	0,393	0,393	0,393
Касательные напряжения на стенке $\tau_w(z)$ , Па:	1,63	1,73	1,85	1,99	2,15
Коэффициент сопротивления $\lambda$ :	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Истинное газосодержание $\varphi(z)$ :	0,609	0,624	0,639	0,656	0,673
Средн. расход водовозд. смеси $Q_{cpi} \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /с:	–	0,390	0,398	0,407	0,417
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$ , кВт:	–	0,005	0,011	0,016	0,022
Мощность комп. потерь на трение $N_{mpi}$ , кВт:	–	0,000	0,001	0,001	0,002
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{ускi}$ , кВт:	–	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести $N_{gi}$ , кВт:	–	0,005	0,010	0,015	0,021
Мощность потока сжатого воздуха $N''_i$ , кВт:	0,000	0,017	0,036	0,057	0,080
Мощность потока воды $N'$ , кВт:	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Мощность, подведенная к трубе $N_{подi}$ , кВт:	0,008	0,025	0,044	0,065	0,088
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{скi}$ , кВт:	0,009	0,020	0,033	0,048	0,066
Ср. плотность по расх. возд.содерж. $\rho_{ср\beta i}$ , кг/м <sup>3</sup> :	–	106,6	102,1	97,60	93,01
Ср. плотность по ист. возд.содерж. $\rho_{ср\varphi i}$ , кг/м <sup>3</sup> :	–	385,1	377,4	369,4	361,2
Ср. плотность по среднему давл-ю $\rho_{срpi}$ , кг/м <sup>3</sup> :	111,0	106,6	102,2	97,7	93,1
Объемн. расх. воздуха при ср. давл. $Q''_{cpi}$ , м <sup>3</sup> /мин:	0,072	0,076	0,079	0,083	0,088

Таблица В.1

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=50\text{мм}$ ,  $H+h=14\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_g=0,730\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,25 \dots 20,0$

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_\Sigma$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_g$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_g$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
0,250	1,883	0,405	0,076	0,074	0,002	0,000	0,475	0,028	0,523	0,551
0,500	2,954	0,635	0,122	0,115	0,007	0,000	0,445	0,044	0,523	0,567
0,700	3,536	0,760	0,150	0,137	0,012	0,000	0,426	0,053	0,523	0,576
0,900	3,964	0,852	0,172	0,154	0,017	0,001	0,411	0,059	0,523	0,582
1,000	4,136	0,889	0,181	0,160	0,020	0,001	0,404	0,062	0,523	0,585
1,250	4,472	0,962	0,201	0,173	0,027	0,001	0,390	0,067	0,523	0,590
1,500	4,711	1,013	0,216	0,182	0,032	0,001	0,378	0,071	0,523	0,594
1,750	4,884	1,050	0,227	0,189	0,037	0,001	0,369	0,073	0,523	0,596
2,000	5,010	1,077	0,237	0,194	0,042	0,001	0,362	0,075	0,523	0,598
2,500	5,172	1,112	0,249	0,200	0,048	0,001	0,351	0,078	0,523	0,601
3,000	5,262	1,132	0,257	0,203	0,052	0,002	0,345	0,079	0,523	0,602
4,000	5,342	1,149	0,264	0,206	0,056	0,002	0,339	0,080	0,523	0,603
5,000	5,369	1,155	0,266	0,207	0,057	0,002	0,337	0,080	0,523	0,604
6,000	5,379	1,157	0,267	0,208	0,058	0,002	0,337	0,081	0,523	0,604
7,000	5,382	1,157	0,267	0,208	0,058	0,002	0,336	0,081	0,523	0,604
8,000	5,383	1,158	0,267	0,208	0,058	0,002	0,336	0,081	0,523	0,604
9,000	5,383	1,158	0,268	0,208	0,058	0,002	0,336	0,081	0,523	0,604
10,000	5,384	1,158	0,268	0,208	0,058	0,002	0,336	0,081	0,523	0,604
20,000	5,384	1,158	0,268	0,208	0,058	0,002	0,336	0,081	0,523	0,604

Продолжение таблицы В.1

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\Phi$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
0,250	0,128	0,125	0,003	0,000	0,801	0,047	0,882	0,929	0,088
0,500	0,206	0,194	0,012	0,000	0,750	0,074	0,882	0,956	0,136
0,700	0,253	0,231	0,020	0,000	0,718	0,089	0,882	0,971	0,161
0,900	0,290	0,260	0,029	0,002	0,693	0,099	0,882	0,981	0,182
1,000	0,305	0,270	0,034	0,002	0,681	0,105	0,882	0,987	0,187
1,250	0,339	0,292	0,046	0,002	0,658	0,113	0,882	0,995	0,203
1,500	0,364	0,307	0,054	0,002	0,637	0,120	0,882	1,002	0,212
1,750	0,383	0,319	0,062	0,002	0,622	0,123	0,882	1,005	0,222
2,000	0,400	0,327	0,071	0,002	0,610	0,126	0,882	1,008	0,228
2,500	0,420	0,337	0,081	0,002	0,592	0,132	0,882	1,013	0,233
3,000	0,433	0,342	0,088	0,003	0,582	0,133	0,882	1,015	0,237
4,000	0,445	0,347	0,094	0,003	0,572	0,135	0,882	1,017	0,241
5,000	0,449	0,349	0,096	0,003	0,568	0,135	0,882	1,019	0,243
6,000	0,450	0,351	0,098	0,003	0,568	0,137	0,882	1,019	0,243
7,000	0,450	0,351	0,098	0,003	0,567	0,137	0,882	1,019	0,243
8,000	0,450	0,351	0,098	0,003	0,567	0,137	0,882	1,019	0,243
9,000	0,452	0,351	0,098	0,003	0,567	0,137	0,882	1,019	0,243
10,000	0,452	0,351	0,098	0,003	0,567	0,137	0,882	1,019	0,243
20,000	0,452	0,351	0,098	0,003	0,567	0,137	0,882	1,019	0,243

Таблица В.2

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе традиционно работающего эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при расходе воздуха  $Q_6=0,950\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,25 \dots 10,0$

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_{\Sigma}$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_3$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_3$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
0,250	1,853	0,398	0,014	0,013	0,000	0,000	0,129	0,005	0,138	0,143
0,375	2,726	0,585	0,020	0,020	0,001	0,000	0,125	0,007	0,138	0,145
0,500	3,408	0,731	0,026	0,024	0,001	0,000	0,121	0,009	0,138	0,147
0,700	4,232	0,908	0,033	0,030	0,002	0,000	0,116	0,011	0,138	0,149
0,900	4,829	1,036	0,038	0,034	0,004	0,000	0,112	0,012	0,138	0,150
1,000	5,067	1,088	0,040	0,036	0,004	0,000	0,111	0,013	0,138	0,151
1,250	5,531	1,187	0,045	0,039	0,006	0,000	0,107	0,014	0,138	0,152
1,500	5,860	1,258	0,049	0,042	0,007	0,000	0,104	0,015	0,138	0,153
1,750	6,097	1,309	0,052	0,043	0,008	0,000	0,102	0,015	0,138	0,154
2,000	6,268	1,345	0,054	0,044	0,009	0,000	0,100	0,016	0,138	0,154
2,500	6,488	1,393	0,057	0,046	0,011	0,000	0,098	0,016	0,138	0,155
3,000	6,611	1,419	0,059	0,047	0,012	0,000	0,096	0,017	0,138	0,155
4,000	6,720	1,442	0,060	0,048	0,012	0,000	0,095	0,017	0,138	0,155
5,000	6,756	1,450	0,061	0,048	0,013	0,000	0,094	0,017	0,138	0,155
6,000	6,769	1,453	0,061	0,048	0,013	0,000	0,094	0,017	0,138	0,155
7,000	6,773	1,454	0,061	0,048	0,013	0,000	0,094	0,017	0,138	0,155
8,000	6,775	1,454	0,061	0,048	0,013	0,000	0,094	0,017	0,138	0,155
9,000	6,775	1,454	0,061	0,048	0,013	0,000	0,094	0,017	0,138	0,155
10,000	6,776	1,454	0,061	0,048	0,013	0,000	0,094	0,017	0,138	0,155

Продолжение таблицы В.2

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\Phi$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
0,250	0,093	0,087	0,000	0,000	0,860	0,033	0,920	0,953	0,058
0,375	0,133	0,133	0,007	0,000	0,833	0,047	0,920	0,967	0,094
0,500	0,173	0,160	0,007	0,000	0,807	0,060	0,920	0,980	0,109
0,700	0,220	0,200	0,013	0,000	0,773	0,073	0,920	0,993	0,138
0,900	0,253	0,227	0,027	0,000	0,747	0,080	0,920	1,000	0,159
1,000	0,267	0,240	0,027	0,000	0,740	0,087	0,920	1,007	0,167
1,250	0,300	0,260	0,040	0,000	0,713	0,093	0,920	1,013	0,181
1,500	0,327	0,280	0,047	0,000	0,693	0,100	0,920	1,020	0,196
1,750	0,347	0,287	0,053	0,000	0,680	0,100	0,920	1,027	0,203
2,000	0,360	0,293	0,060	0,000	0,667	0,107	0,920	1,027	0,203
2,500	0,380	0,307	0,073	0,000	0,653	0,107	0,920	1,033	0,217
3,000	0,393	0,313	0,080	0,000	0,640	0,113	0,920	1,033	0,217
4,000	0,400	0,320	0,080	0,000	0,633	0,113	0,920	1,033	0,225
5,000	0,407	0,320	0,087	0,000	0,627	0,113	0,920	1,033	0,225
6,000	0,407	0,320	0,087	0,000	0,627	0,113	0,920	1,033	0,225
7,000	0,407	0,320	0,087	0,000	0,627	0,113	0,920	1,033	0,225
8,000	0,407	0,320	0,087	0,000	0,627	0,113	0,920	1,033	0,225
9,000	0,407	0,320	0,087	0,000	0,627	0,113	0,920	1,033	0,225
10,000	0,407	0,320	0,087	0,000	0,627	0,113	0,920	1,033	0,225

Таблица В.3

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при расходе воздуха  $Q_в=0,840\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,25 \dots 10,0$  при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр}=1/1,5 \dots 1/2,5$

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_\Sigma$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_э$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_э$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
0,250	0,497	0,091	0,004	0,004	0,000	0,000	0,119	0,001	0,122	0,123
0,375	1,626	0,299	0,012	0,012	0,000	0,000	0,114	0,004	0,122	0,126
0,500	2,466	0,454	0,018	0,018	0,000	0,000	0,110	0,006	0,122	0,128
0,700	3,450	0,635	0,026	0,025	0,001	0,000	0,105	0,009	0,122	0,131
0,900	4,162	0,766	0,032	0,030	0,002	0,000	0,101	0,011	0,122	0,133
1,000	4,445	0,818	0,034	0,032	0,003	0,000	0,099	0,011	0,122	0,133
1,250	4,997	0,920	0,040	0,035	0,004	0,000	0,095	0,013	0,122	0,135
1,500	5,388	0,992	0,043	0,038	0,005	0,000	0,092	0,014	0,122	0,136
1,750	5,671	1,044	0,047	0,040	0,006	0,000	0,090	0,014	0,122	0,137
2,000	5,877	1,082	0,049	0,042	0,007	0,000	0,088	0,015	0,122	0,137
2,500	6,142	1,130	0,052	0,043	0,008	0,000	0,086	0,016	0,122	0,138
3,000	6,291	1,158	0,054	0,044	0,009	0,000	0,084	0,016	0,122	0,138
4,000	6,423	1,182	0,056	0,045	0,010	0,000	0,083	0,016	0,122	0,138
5,000	6,468	1,191	0,057	0,046	0,010	0,000	0,082	0,016	0,122	0,139
6,000	6,484	1,193	0,057	0,046	0,011	0,000	0,082	0,016	0,122	0,139
7,000	6,489	1,194	0,057	0,046	0,011	0,000	0,082	0,016	0,122	0,139
8,000	6,491	1,195	0,057	0,046	0,011	0,000	0,082	0,016	0,122	0,139
9,000	6,491	1,195	0,057	0,046	0,011	0,000	0,082	0,016	0,122	0,139
10,000	6,492	1,195	0,057	0,046	0,011	0,000	0,082	0,016	0,122	0,139

Продолжение таблицы В.3

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\varepsilon$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
0,250	0,029	0,029	0,000	0,000	0,875	0,007	0,897	0,904	0,025
0,375	0,088	0,088	0,000	0,000	0,838	0,029	0,897	0,926	0,066
0,500	0,132	0,132	0,000	0,000	0,809	0,044	0,897	0,941	0,098
0,700	0,191	0,184	0,007	0,000	0,772	0,066	0,897	0,963	0,131
0,900	0,235	0,221	0,015	0,000	0,743	0,081	0,897	0,978	0,156
1,000	0,250	0,235	0,022	0,000	0,728	0,081	0,897	0,978	0,172
1,250	0,294	0,257	0,029	0,000	0,699	0,096	0,897	0,993	0,180
1,500	0,316	0,279	0,037	0,000	0,676	0,103	0,897	1,000	0,197
1,750	0,346	0,294	0,044	0,000	0,662	0,103	0,897	1,007	0,213
2,000	0,360	0,309	0,051	0,000	0,647	0,110	0,897	1,007	0,221
2,500	0,382	0,316	0,059	0,000	0,632	0,118	0,897	1,015	0,221
3,000	0,397	0,324	0,066	0,000	0,618	0,118	0,897	1,015	0,230
4,000	0,412	0,331	0,074	0,000	0,610	0,118	0,897	1,015	0,238
5,000	0,419	0,338	0,074	0,000	0,603	0,118	0,897	1,022	0,246
6,000	0,419	0,338	0,081	0,000	0,603	0,118	0,897	1,022	0,246
7,000	0,419	0,338	0,081	0,000	0,603	0,118	0,897	1,022	0,246
8,000	0,419	0,338	0,081	0,000	0,603	0,118	0,897	1,022	0,246
9,000	0,419	0,338	0,081	0,000	0,603	0,118	0,897	1,022	0,246
10,000	0,419	0,338	0,081	0,000	0,603	0,118	0,897	1,022	0,246

Таблица В.4

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $h=8,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_в=1,300\text{м}^3/\text{мин}$  ( $2,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,25 \div 10,0$  ( $Q_{э\text{ баз}}=9,828\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N_{баз}=1,376\text{кВт}$ )

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_{\Sigma}$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_э$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_э$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
0,250	8,010	0,815	0,397	0,355	0,040	0,002	0,942	0,162	1,177	1,339
0,500	9,062	0,922	0,466	0,401	0,062	0,003	0,894	0,183	1,177	1,360
0,750	9,779	0,995	0,520	0,432	0,084	0,004	0,854	0,197	1,177	1,374
1,000	10,276	1,046	0,563	0,454	0,104	0,005	0,822	0,207	1,177	1,384
1,200	10,564	1,075	0,590	0,467	0,118	0,006	0,800	0,213	1,177	1,390
1,500	10,871	1,106	0,623	0,480	0,136	0,007	0,774	0,219	1,177	1,396
2,000	11,177	1,137	0,660	0,493	0,159	0,007	0,743	0,225	1,177	1,403
2,500	11,339	1,154	0,682	0,501	0,173	0,008	0,724	0,229	1,177	1,406
3,000	11,429	1,163	0,695	0,504	0,183	0,008	0,712	0,230	1,177	1,408
4,000	11,509	1,171	0,708	0,508	0,192	0,009	0,701	0,232	1,177	1,409
5,000	11,535	1,174	0,713	0,509	0,195	0,009	0,697	0,233	1,177	1,410
7,000	11,547	1,175	0,715	0,510	0,196	0,009	0,695	0,233	1,177	1,410
9,000	11,549	1,175	0,715	0,510	0,197	0,009	0,695	0,233	1,177	1,410
10,000	11,549	1,175	0,715	0,510	0,197	0,009	0,695	0,233	1,177	1,410

Продолжение таблицы В.4

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\varepsilon$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{поо}$	
0,250	0,289	0,258	0,029	0,001	0,685	0,118	0,855	0,973	0,164
0,500	0,339	0,291	0,045	0,002	0,650	0,133	0,855	0,988	0,185
0,750	0,378	0,314	0,061	0,003	0,621	0,143	0,855	0,999	0,200
1,000	0,409	0,330	0,076	0,004	0,597	0,150	0,855	1,006	0,210
1,200	0,429	0,339	0,086	0,004	0,581	0,155	0,855	1,010	0,216
1,500	0,453	0,349	0,099	0,005	0,563	0,159	0,855	1,015	0,222
2,000	0,480	0,358	0,116	0,005	0,540	0,164	0,855	1,020	0,228
2,500	0,496	0,364	0,126	0,006	0,526	0,166	0,855	1,022	0,231
3,000	0,505	0,366	0,133	0,006	0,517	0,167	0,855	1,023	0,233
4,000	0,515	0,369	0,140	0,007	0,509	0,169	0,855	1,024	0,234
5,000	0,518	0,370	0,142	0,007	0,507	0,169	0,855	1,025	0,234
7,000	0,520	0,371	0,142	0,007	0,505	0,169	0,855	1,025	0,235
9,000	0,520	0,371	0,143	0,007	0,505	0,169	0,855	1,025	0,235
10,000	0,520	0,371	0,143	0,007	0,505	0,169	0,855	1,025	0,235

Таблица В.5

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=100\text{мм}$ ,  $H+h=17,5\text{м}$ ,  $h=8,75\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_в=4,600\text{м}^3/\text{мин}$  ( $7,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,25 \dots 10,0$  ( $Q_{э\text{ баз}}=46,20\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N_{баз}=5,830\text{кВт}$ )

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_\Sigma$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_э$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_э$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
0,250	36,392	0,788	2,005	1,761	0,218	0,025	3,591	0,868	4,728	5,595
0,500	40,045	0,867	2,285	1,936	0,313	0,035	3,397	0,955	4,728	5,683
0,750	42,577	0,922	2,506	2,058	0,403	0,045	3,237	1,015	4,728	5,743
1,000	44,356	0,960	2,681	2,143	0,485	0,053	3,104	1,058	4,728	5,785
1,250	45,621	0,987	2,820	2,204	0,555	0,060	2,996	1,088	4,728	5,816
1,650	46,950	1,016	2,983	2,267	0,646	0,069	2,865	1,119	4,728	5,847
2,000	47,670	1,032	3,081	2,302	0,705	0,074	2,783	1,137	4,728	5,864
3,000	48,634	1,053	3,230	2,348	0,800	0,083	2,657	1,160	4,728	5,887
4,000	48,944	1,059	3,283	2,363	0,835	0,086	2,612	1,167	4,728	5,895
5,000	49,048	1,062	3,302	2,368	0,847	0,087	2,596	1,169	4,728	5,897
6,000	49,084	1,062	3,308	2,369	0,852	0,087	2,590	1,170	4,728	5,898
7,000	49,096	1,063	3,310	2,370	0,853	0,087	2,588	1,171	4,728	5,898
9,000	49,102	1,063	3,311	2,370	0,854	0,087	2,587	1,171	4,728	5,899
10,000	49,102	1,063	3,311	2,370	0,854	0,087	2,587	1,171	4,728	5,899

Продолжение таблицы В.5

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\Phi$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
0,250	0,344	0,302	0,037	0,004	0,616	0,149	0,811	0,960	0,189
0,500	0,392	0,332	0,054	0,006	0,583	0,164	0,811	0,975	0,207
0,750	0,430	0,353	0,069	0,008	0,555	0,174	0,811	0,985	0,221
1,000	0,460	0,368	0,083	0,009	0,532	0,181	0,811	0,992	0,229
1,250	0,484	0,378	0,095	0,010	0,514	0,187	0,811	0,998	0,236
1,650	0,512	0,389	0,111	0,012	0,491	0,192	0,811	1,003	0,243
2,000	0,528	0,395	0,121	0,013	0,477	0,195	0,811	1,006	0,246
3,000	0,554	0,403	0,137	0,014	0,456	0,199	0,811	1,010	0,251
4,000	0,563	0,405	0,143	0,015	0,448	0,200	0,811	1,011	0,253
5,000	0,566	0,406	0,145	0,015	0,445	0,201	0,811	1,011	0,254
6,000	0,567	0,406	0,146	0,015	0,444	0,201	0,811	1,012	0,254
7,000	0,568	0,407	0,146	0,015	0,444	0,201	0,811	1,012	0,254
9,000	0,568	0,407	0,146	0,015	0,444	0,201	0,811	1,012	0,254
10,000	0,568	0,407	0,146	0,015	0,444	0,201	0,811	1,012	0,254

Таблица В.6

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=150\text{мм}$ ,  $H+h=115,0\text{м}$ ,  $h=72,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,625$  при расходе воздуха  $Q_g=7,150\text{м}^3/\text{мин}$  ( $0,119\text{м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=1,0 \dots 20,0$  ( $Q_{э\text{ баз}}=116,5\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N_{баз}=42,209\text{кВт}$ )

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_{\Sigma}$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_g$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_g$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
1,000	41,996	0,360	13,978	13,825	0,139	0,014	18,860	8,240	24,598	32,838
1,250	53,728	0,461	17,958	17,649	0,280	0,029	17,182	10,541	24,598	35,139
1,500	62,453	0,536	20,975	20,496	0,433	0,045	15,876	12,253	24,598	36,851
2,000	73,941	0,635	25,040	24,251	0,713	0,076	14,065	14,507	24,598	39,105
2,500	80,533	0,691	27,429	26,409	0,921	0,099	12,969	15,801	24,598	40,398
3,000	84,357	0,724	28,838	27,663	1,060	0,115	12,311	16,551	24,598	41,149
5,000	89,116	0,765	30,614	29,223	1,254	0,137	11,468	17,485	24,598	42,082
7,500	89,715	0,770	30,840	29,420	1,280	0,140	11,360	17,602	24,598	42,200
10,000	89,757	0,770	30,856	29,434	1,281	0,141	11,352	17,610	24,598	42,208
12,500	89,760	0,770	30,857	29,435	1,282	0,141	11,352	17,611	24,598	42,209
14,500	89,761	0,770	30,857	29,435	1,282	0,141	11,352	17,611	24,598	42,209
17,500	89,761	0,770	30,857	29,435	1,282	0,141	11,352	17,611	24,598	42,209
20,000	89,761	0,770	30,857	29,435	1,282	0,141	11,352	17,611	24,598	42,209

Продолжение таблицы В.6

Относительная длина жидкостной пробки $L_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\Delta$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потеря на трение $\dot{N}_{тр}$	потеря на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потеря на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
1,000	0,331	0,328	0,003	0,000	0,447	0,195	0,583	0,778	0,227
1,250	0,425	0,418	0,007	0,001	0,407	0,250	0,583	0,833	0,289
1,500	0,497	0,486	0,010	0,001	0,376	0,290	0,583	0,873	0,335
2,000	0,593	0,575	0,017	0,002	0,333	0,344	0,583	0,926	0,396
2,500	0,650	0,626	0,022	0,002	0,307	0,374	0,583	0,957	0,431
3,000	0,683	0,655	0,025	0,003	0,292	0,392	0,583	0,975	0,452
5,000	0,725	0,692	0,030	0,003	0,272	0,414	0,583	0,997	0,477
7,500	0,731	0,697	0,030	0,003	0,269	0,417	0,583	1,000	0,480
10,000	0,731	0,697	0,030	0,003	0,269	0,417	0,583	1,000	0,481
12,500	0,731	0,697	0,030	0,003	0,269	0,417	0,583	1,000	0,481
14,500	0,731	0,697	0,030	0,003	0,269	0,417	0,583	1,000	0,481
17,500	0,731	0,697	0,030	0,003	0,269	0,417	0,583	1,000	0,481
20,000	0,731	0,697	0,030	0,003	0,269	0,417	0,583	1,000	0,481

Таблица В.7

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=150\text{мм}$ ,  $H+h=63,7\text{м}$ ,  $h=59,3\text{м}$ ,  $\alpha=0,931$  при расходе воздуха  $Q_{\text{в}}=3,750\text{м}^3/\text{мин}$  ( $6,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=0,5 \dots 40,0$  ( $Q_{\text{в баз}}=191,4\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N_{\text{баз}}=41,80\text{кВт}$ )

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_{\Sigma}$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_{\text{в}}$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_{\text{в}}$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{\text{тр}}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{\text{уск}}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{\text{ск}}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{\text{под}}$ , кВт
0,500	146,590	0,766	28,115	25,709	2,273	0,133	6,758	23,129	11,744	34,873
1,000	164,844	0,861	32,127	28,937	2,981	0,209	5,626	26,009	11,744	37,753
2,500	186,668	0,975	37,156	32,814	4,002	0,340	4,041	29,452	11,744	41,196
5,000	192,042	1,003	38,437	33,771	4,285	0,382	3,607	30,300	11,744	42,044
10,000	192,452	1,005	38,535	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109
15,000	192,454	1,006	38,536	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109
20,000	192,454	1,006	38,536	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109
25,000	192,454	1,006	38,536	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109
30,000	192,454	1,006	38,536	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109
34,500	192,454	1,006	38,536	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109
40,000	192,454	1,006	38,536	33,844	4,307	0,385	3,573	30,365	11,744	42,109

Продолжение таблицы В.7

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\Phi$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
0,500	0,673	0,615	0,054	0,003	0,162	0,553	0,281	0,834	0,220
1,000	0,769	0,692	0,071	0,005	0,135	0,622	0,281	0,903	0,249
2,500	0,889	0,785	0,096	0,008	0,097	0,705	0,281	0,986	0,286
5,000	0,920	0,808	0,103	0,009	0,086	0,725	0,281	1,006	0,296
10,000	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296
15,000	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296
20,000	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296
25,000	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296
30,000	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296
34,500	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296
40,000	0,922	0,810	0,103	0,009	0,085	0,726	0,281	1,007	0,296

Таблица В.8

Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D=250\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $h=8,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_6=8,500\text{м}^3/\text{мин}$  ( $0,142\text{м}^3/\text{с}$ ) в диапазоне значений относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s=1,5 \dots 15,0$  ( $Q_{\text{э баз}}=140,1\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N_{\text{баз}}=11,22\text{кВт}$ )

Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Подача эрлифта:		Мощность суммарная $N_{\Sigma}$ , кВт	Мощность, расходуемая на компенсацию:				Мощность подведенная:		
	абсолютная $Q_3$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	относительная $\bar{Q}_3$		силы тяжести $N_g$ , кВт	потерь на трение $N_{тр}$ , кВт	потерь на ускорение $N_{уск}$ , кВт	потерь на скольжение $N_{ск}$ , кВт	потоком воды $N'$ , кВт	воздушным потоком $N''$ , кВт	полная $N_{под}$ , кВт
1,500	23,503	0,168	1,077	1,056	0,021	0,000	7,604	0,512	8,169	8,681
1,750	51,694	0,369	2,345	2,291	0,052	0,001	6,951	1,127	8,169	9,296
2,000	73,194	0,522	3,318	3,233	0,082	0,004	6,446	1,596	8,169	9,764
3,000	119,064	0,850	5,419	5,242	0,161	0,016	5,345	2,596	8,169	10,764
4,000	134,816	0,962	6,150	5,932	0,194	0,023	4,958	2,939	8,169	11,108
5,000	140,258	1,001	6,403	6,171	0,206	0,026	4,823	3,058	8,169	11,226
5,500	141,443	1,010	6,459	6,223	0,209	0,027	4,794	3,083	8,169	11,252
6,000	142,141	1,015	6,491	6,253	0,210	0,028	4,776	3,099	8,169	11,267
7,000	142,793	1,019	6,522	6,282	0,212	0,028	4,760	3,113	8,169	11,282
8,000	143,019	1,021	6,532	6,292	0,212	0,028	4,755	3,118	8,169	11,287
9,000	143,097	1,021	6,536	6,295	0,212	0,028	4,753	3,120	8,169	11,288
10,000	143,124	1,022	6,537	6,296	0,212	0,028	4,752	3,120	8,169	11,289
12,500	143,138	1,022	6,538	6,297	0,213	0,028	4,752	3,120	8,169	11,289
15,000	143,139	1,022	6,538	6,297	0,213	0,028	4,752	3,120	8,169	11,289

Продолжение таблицы В.8

Относительная длина жидкостной пробки $\dot{L}_s$	Относительная суммарная мощность $\dot{N}_\Sigma$	Относительная мощность, расходуемая на компенсацию:				Относительная мощность подведенная:			КПД $\eta_\varepsilon$
		силы тяжести $\dot{N}_g$	потерь на трение $\dot{N}_{тр}$	потерь на ускорение $\dot{N}_{уск}$	потерь на скольжение $\dot{N}_{ск}$	потоком воды $\dot{N}'$	воздушным потоком $\dot{N}''$	полная $\dot{N}_{под}$	
1,500	0,096	0,094	0,002	0,000	0,678	0,046	0,728	0,774	0,067
1,750	0,209	0,204	0,005	0,000	0,620	0,100	0,728	0,829	0,142
2,000	0,296	0,288	0,007	0,000	0,575	0,142	0,728	0,870	0,200
3,000	0,483	0,467	0,014	0,001	0,476	0,231	0,728	0,959	0,324
4,000	0,548	0,529	0,017	0,002	0,442	0,262	0,728	0,990	0,366
5,000	0,571	0,550	0,018	0,002	0,430	0,273	0,728	1,001	0,381
5,500	0,576	0,555	0,019	0,002	0,427	0,275	0,728	1,003	0,384
6,000	0,579	0,557	0,019	0,002	0,426	0,276	0,728	1,004	0,386
7,000	0,581	0,560	0,019	0,002	0,424	0,277	0,728	1,006	0,388
8,000	0,582	0,561	0,019	0,002	0,424	0,278	0,728	1,006	0,389
9,000	0,583	0,561	0,019	0,002	0,424	0,278	0,728	1,006	0,389
10,000	0,583	0,561	0,019	0,002	0,424	0,278	0,728	1,006	0,389
12,500	0,583	0,561	0,019	0,002	0,424	0,278	0,728	1,006	0,389
15,000	0,583	0,561	0,019	0,002	0,424	0,278	0,728	1,006	0,389

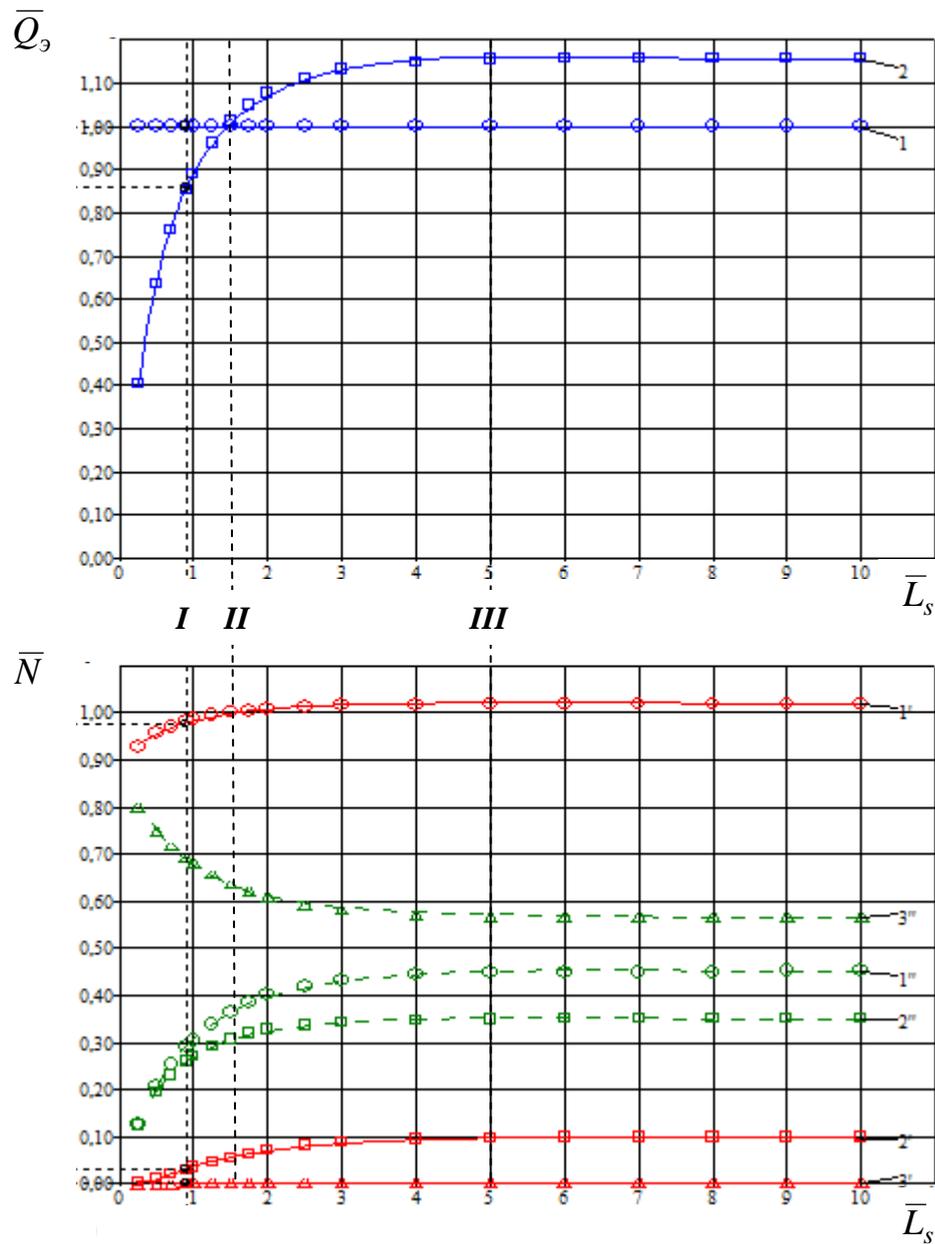


Рис. В.1 – Зависимости относительных подачи  $\bar{Q}_3$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=50\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_6=0,730\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (базисные значения  $Q_3=4,650\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=0,593\text{кВт}$ ):  
 1 –  $\bar{Q}_3 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{под}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

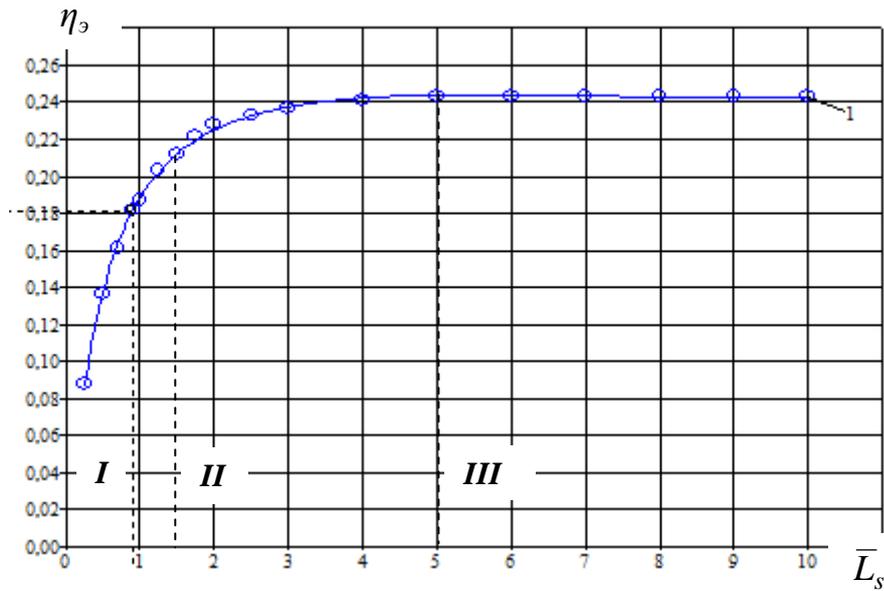


Рис. В.2 – Зависимость КПД  $\eta_3$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=50\text{мм}$ ,  $H+h=14,0\text{м}$ ,  $h=5,5\text{м}$ ,  $\alpha=0,393$  при расходе воздуха  $Q_e=0,730\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ):  $1 - \eta_3 = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II**– режим 2; **III**– режим 3

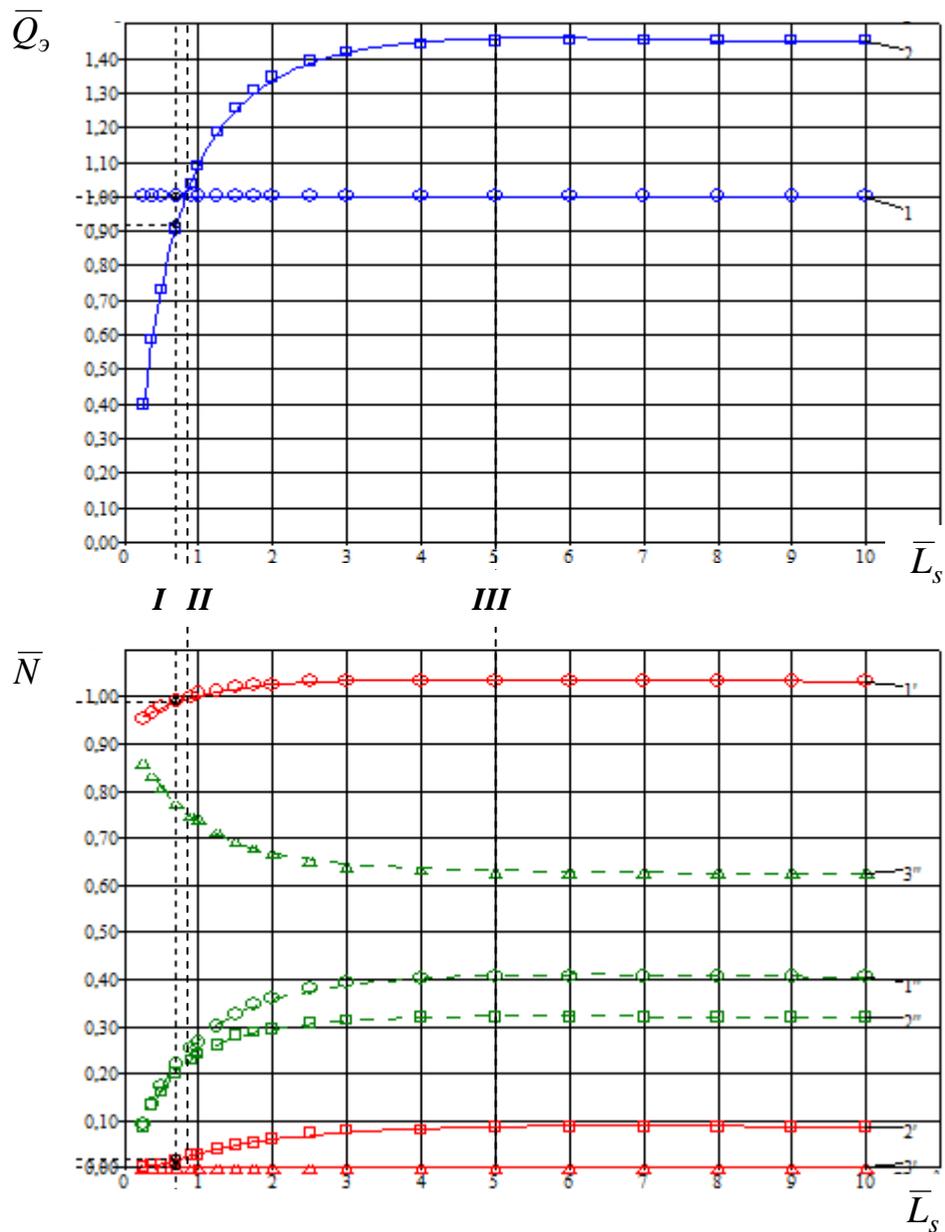


Рис. В.3 – Зависимости относительных подачи  $\bar{Q}_3$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе традиционно работающего эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при расходе воздуха  $Q_g=0,950\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (базисные значения  $Q_3=4,659\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=0,150\text{кВт}$ ):  
 1 –  $\bar{Q}_3 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{нод}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

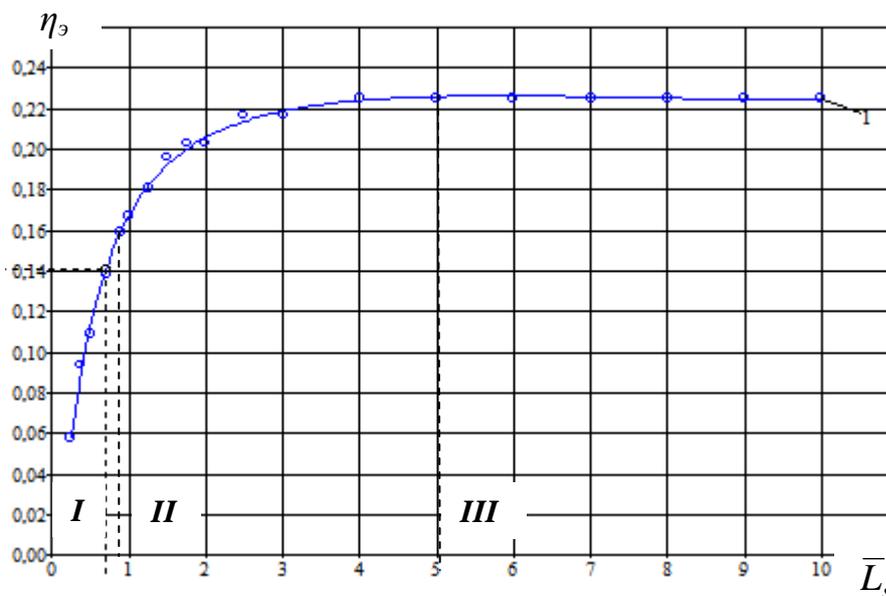


Рис. В.4 – Зависимость КПД  $\eta_e$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе традиционного эрлифта  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при расходе воздуха  $Q_e=0,950\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ):  $1 - \eta_e = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II**– режим 2; **III**– режим 3

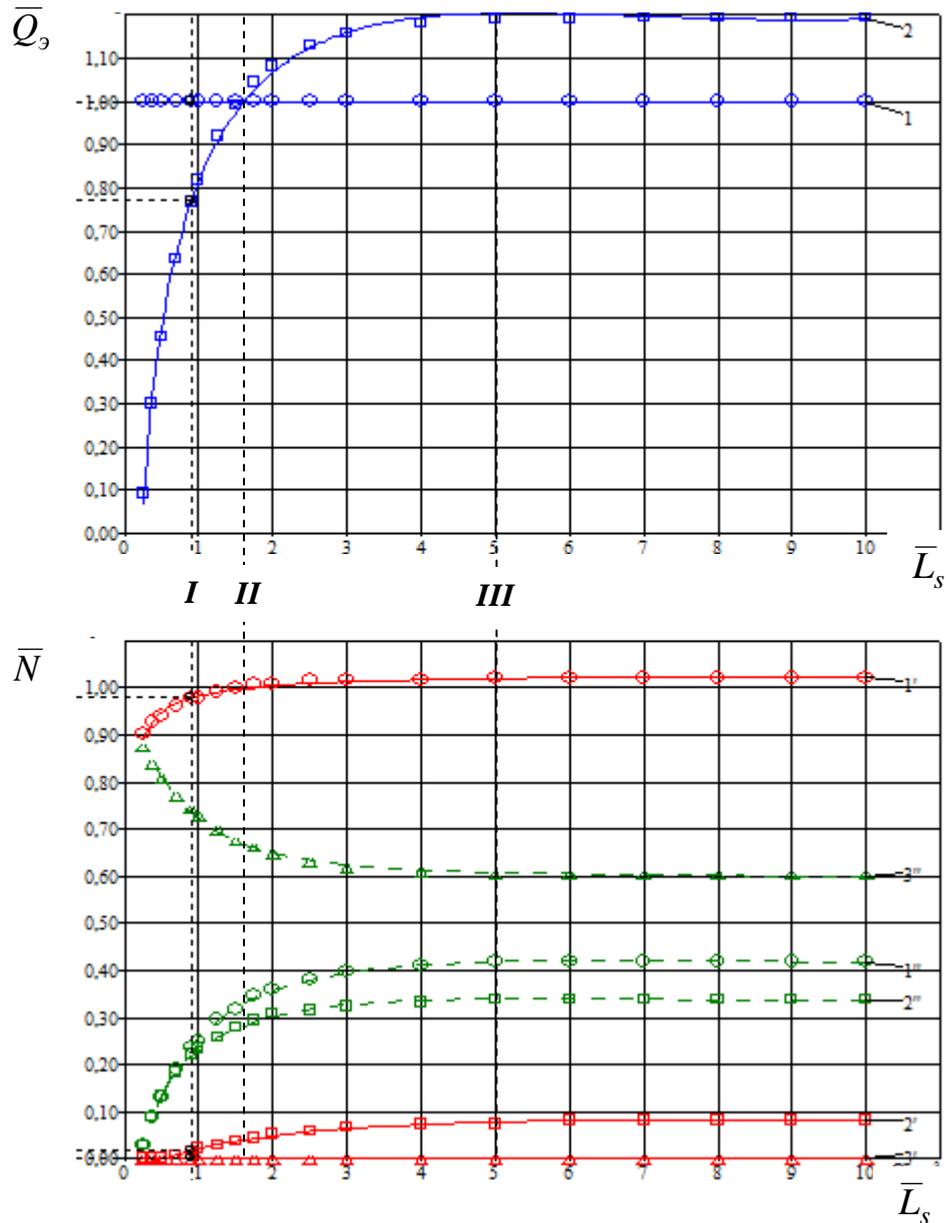


Рис. В.5 – Зависимости относительных подачи  $\bar{Q}_9$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта с дискретной подачей воздуха  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при расходе воздуха  $Q_9=0,840\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (базисные значения  $Q_9=5,433\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=0,136\text{кВт}$ ):  
 1 –  $\bar{Q}_9 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_9 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{нод}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

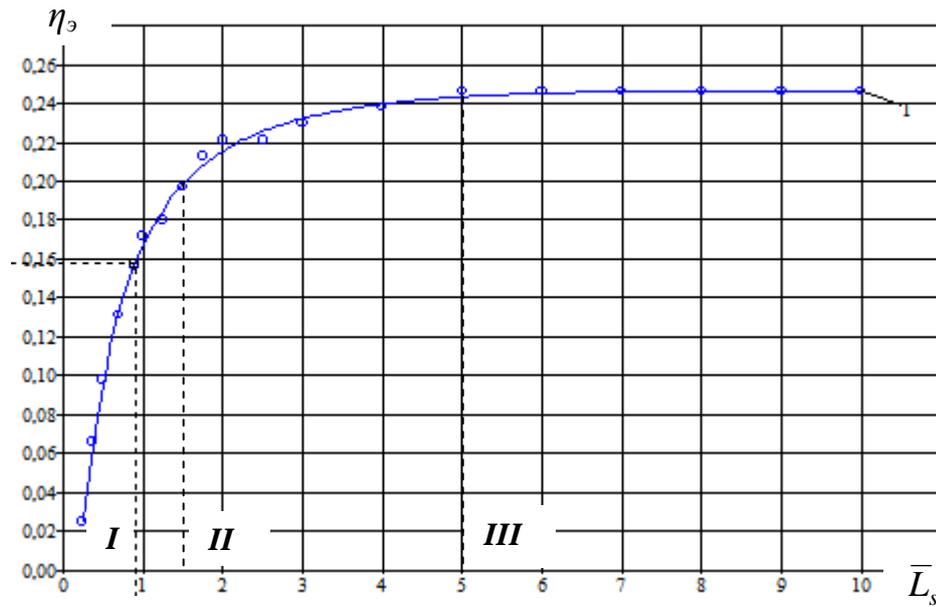


Рис. В.6 – Зависимость КПД  $\eta_3$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта с дискретной подачей воздуха  $D=57\text{мм}$ ,  $H+h=2,57\text{м}$ ,  $h=0,93\text{м}$ ,  $\alpha=0,362$  при расходе воздуха  $Q_в=0,840\text{м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ):  $1 - \eta_3 = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II**– режим 2; **III**– режим 3

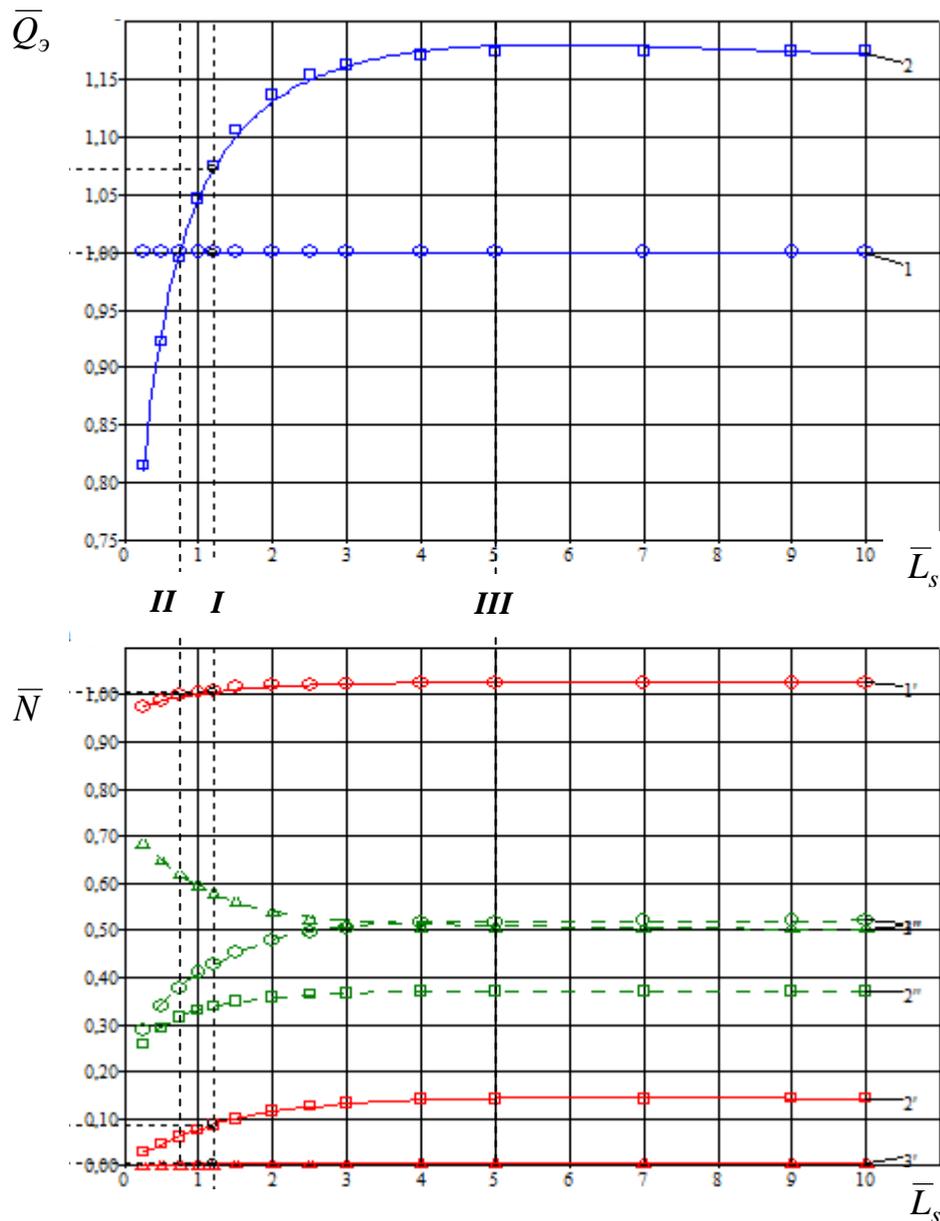


Рис. В.7 – Зависимости относительных подачи  $\bar{Q}_3$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $h=8,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_6=1,300\text{м}^3/\text{мин}$  ( $2,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (базисные значения  $Q_3=9,828 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $N=1,376\text{кВт}$ ):  
 1 –  $\bar{Q}_3 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_3 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{под}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_{\Sigma} = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

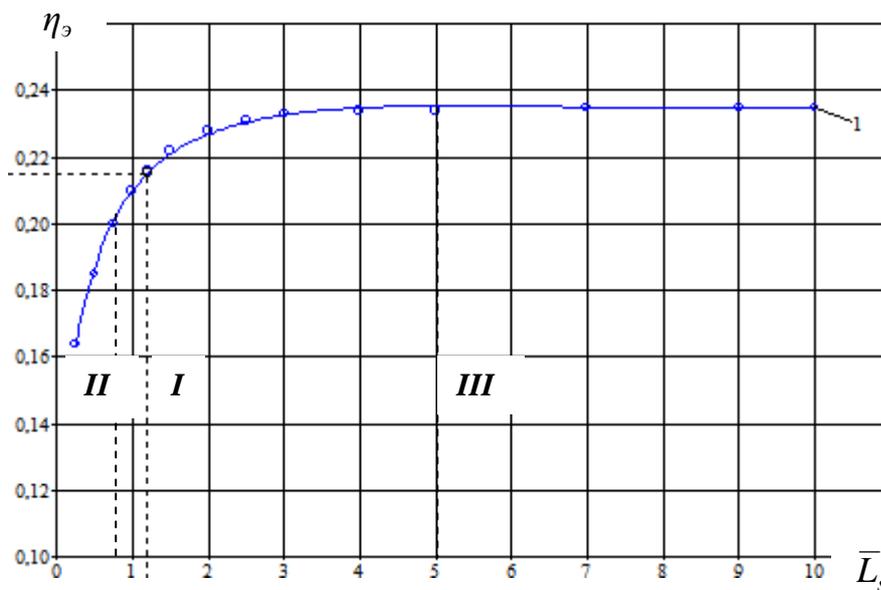


Рис. В.8 – Зависимость КПД  $\eta_3$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=60\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $h=8,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_g=1,300\text{м}^3/\text{мин}$  ( $2,17 \cdot 10^{-2}\text{ м}^3/\text{с}$ ): 1 –  $\eta_3 = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

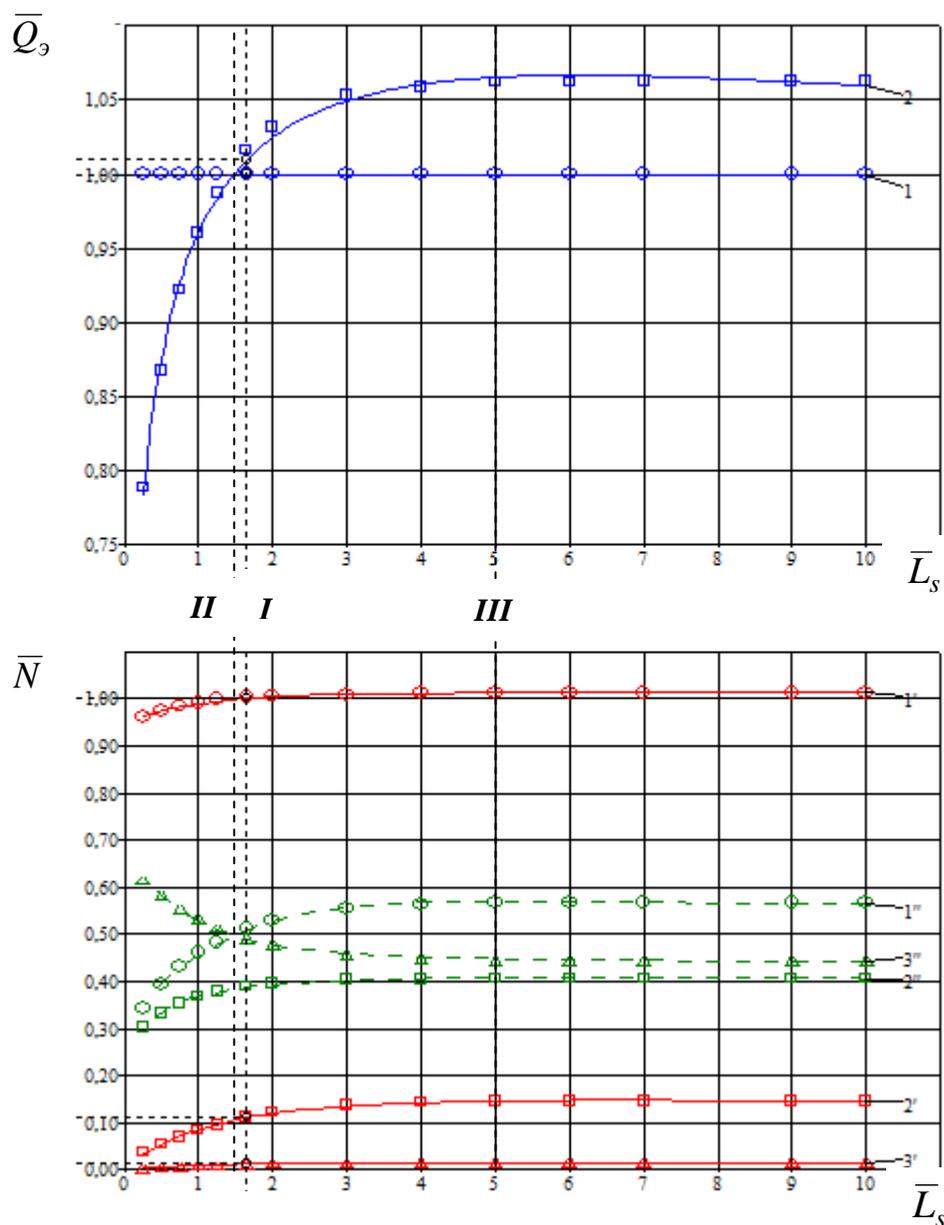


Рис. В.9 – Зависимости относительных подачи  $\bar{Q}_9$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=100\text{мм}$ ,  $H+h=17,5\text{м}$ ,  $h=8,75\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_6=4,600\text{м}^3/\text{мин}$  ( $7,67 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (базисные значения  $Q_9=46,20\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=5,830\text{кВт}$ ):  
 1 –  $\bar{Q}_9 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_9 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{нод}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

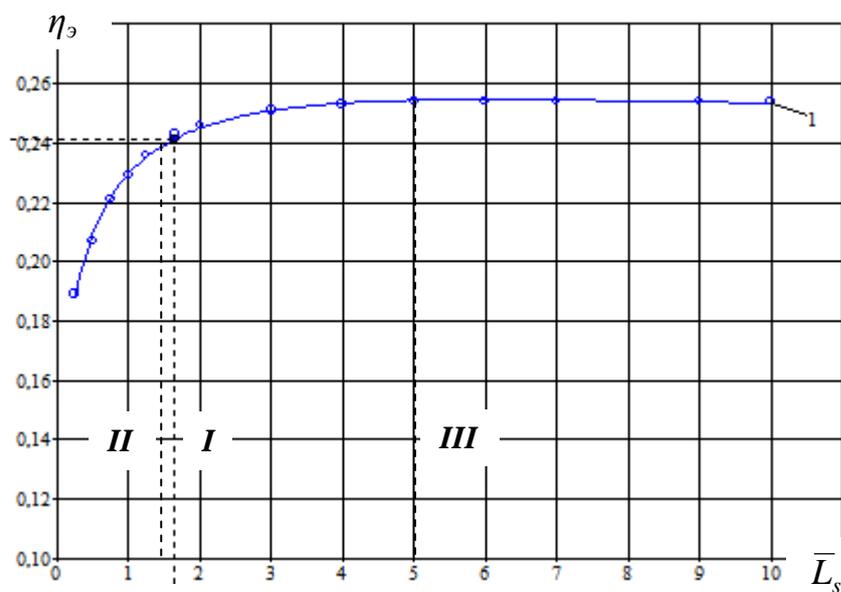


Рис. В.10 – Зависимость КПД  $\eta_9$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=100$ мм,  $H+h=17,5$  м,  $h=8,75$ м,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_8=4,600$ м<sup>3</sup>/мин ( $7,67 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с):  $1 - \eta_9 = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II**– режим 2; **III**– режим 3

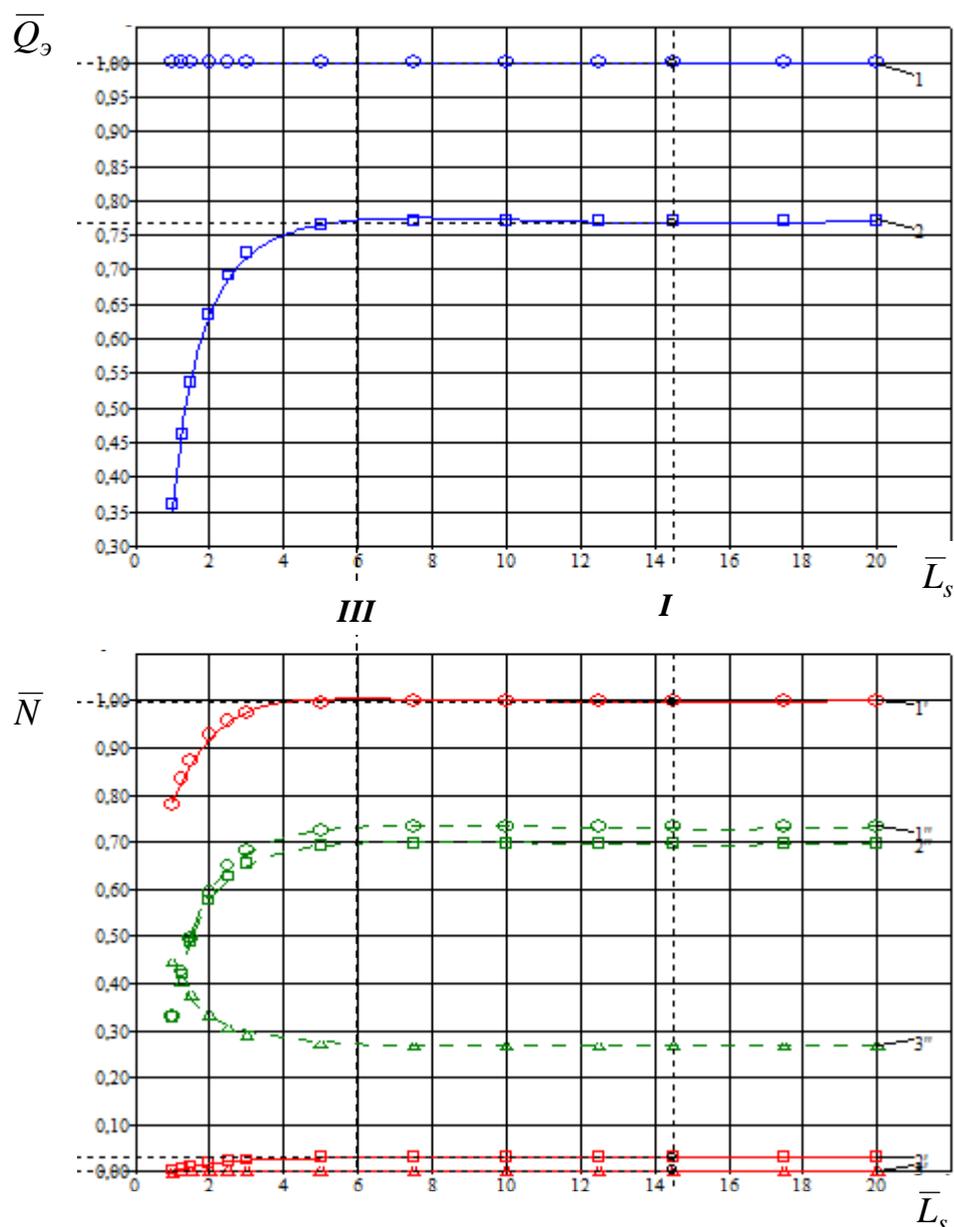


Рис. В.11 – Зависимости относительных подачи  $\bar{Q}_9$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=150\text{мм}$ ,  $H+h=115\text{м}$ ,  $h=72\text{м}$ ,  $\alpha=0,625$  при расходе воздуха  $Q_6=7,150\text{м}^3/\text{мин}$  ( $0,119\text{ м}^3/\text{с}$ )

(базисные значения  $Q_9=116,5\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=42,209\text{кВт}$ ):

1 –  $\bar{Q}_9 = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_9 = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{нод}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_{\Sigma} = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ; 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ; **I** – режим 1; **III** – режим 3

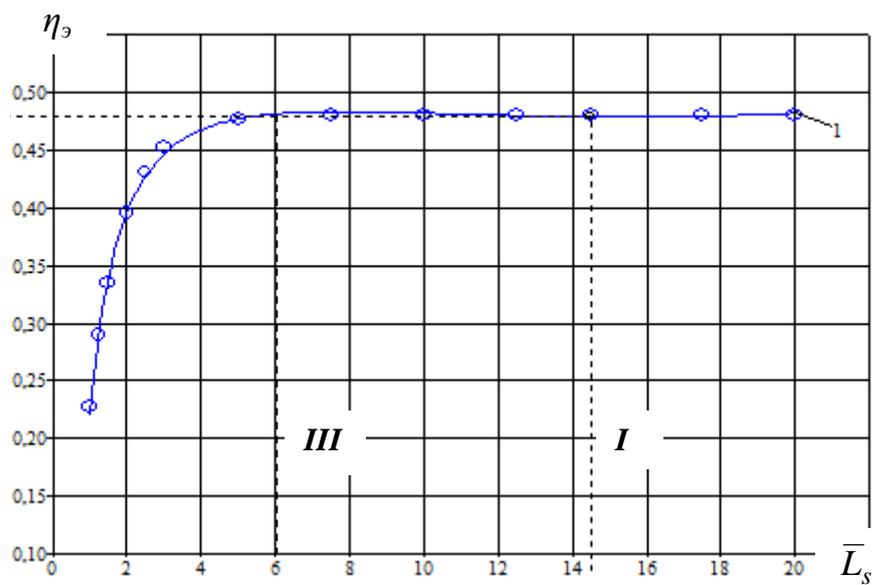


Рис. В.12 – Зависимость КПД  $\eta_9$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=150\text{мм}$ ,  $H+h=115\text{м}$ ,  $h=72\text{м}$ ,  $\alpha=0,625$  при расходе воздуха  $Q_9=7,150\text{м}^3/\text{мин}$  ( $0,119\text{ м}^3/\text{с}$ ):  $1 - \eta_9 = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **III**– режим 3

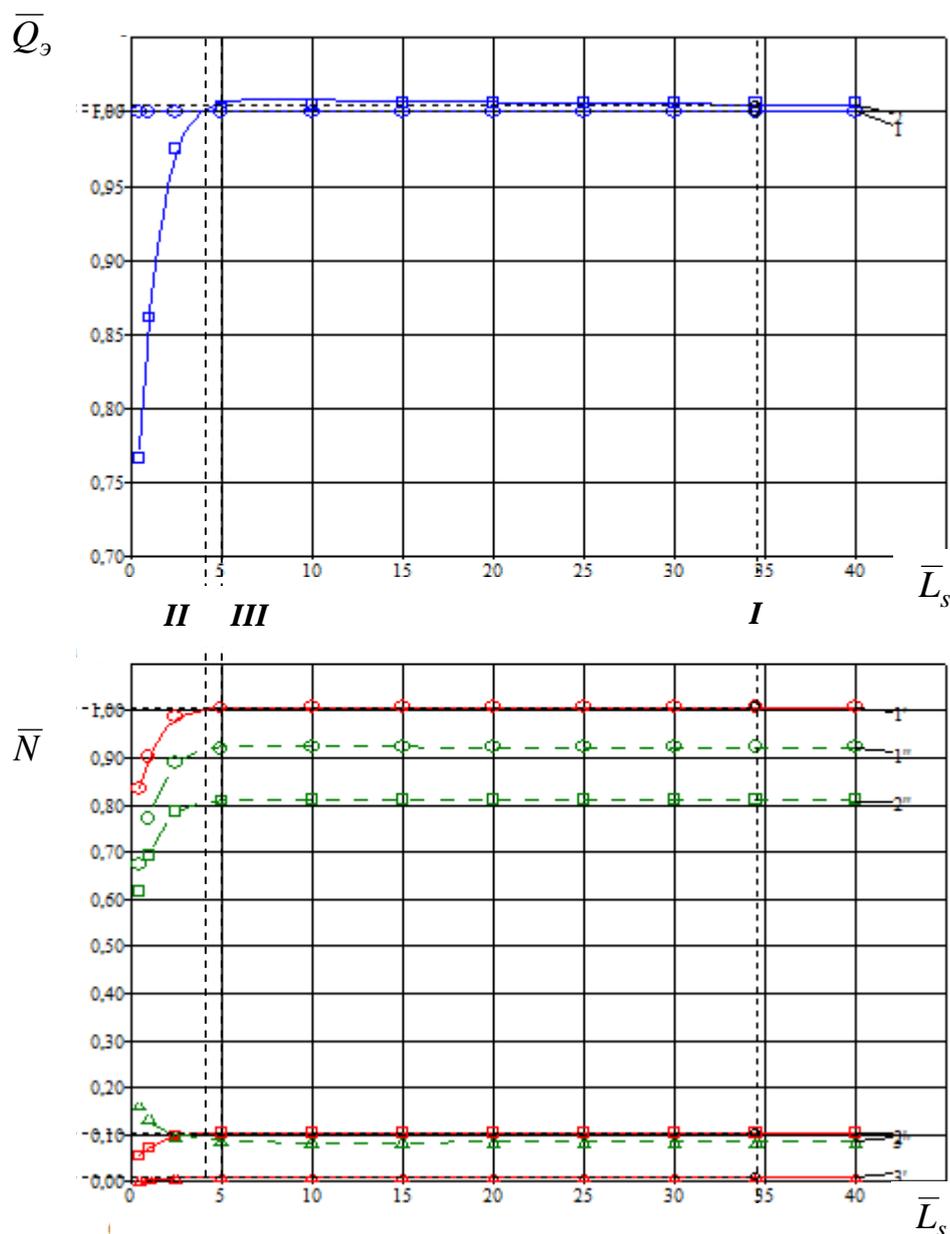


Рис. В.13 – Зависимости относительной подачи  $\bar{Q}_s$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=150\text{мм}$ ,  $H+h=63,7\text{м}$ ,  $h=59,3\text{м}$ ,  $\alpha=0,931$  при расходе воздуха  $Q_6=3,750\text{м}^3/\text{мин}$  ( $6,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) (базисные значения  $Q_s=191,4\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=41,8\text{кВт}$ ):  
 1 –  $\bar{Q}_s = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_s = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{нод}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_\Sigma = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
 2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

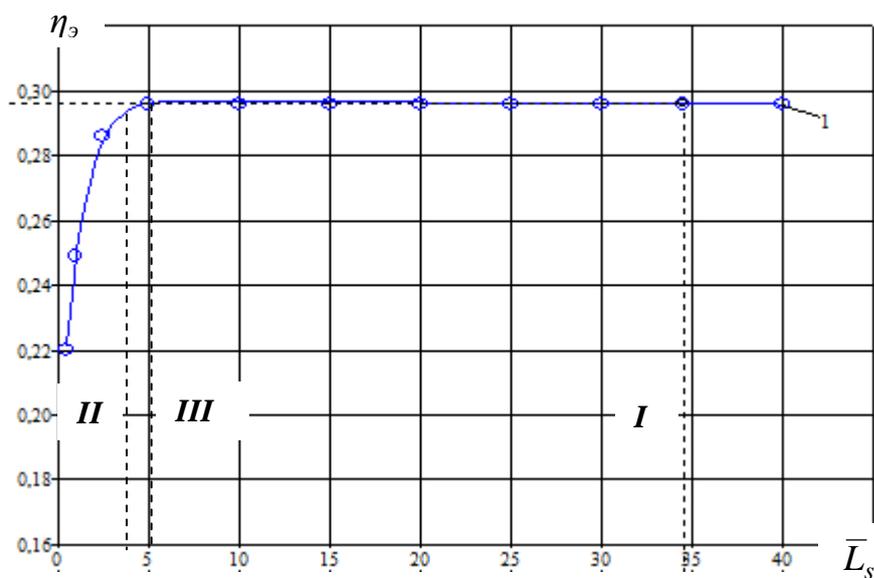


Рис. В.14 – Зависимость КПД  $\eta_e$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=150\text{мм}$ ,  $H+h=63,7\text{м}$ ,  $h=59,3\text{м}$ ,  $\alpha=0,931$  при расходе воздуха  $Q_g=3,750\text{м}^3/\text{мин}$  ( $6,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ): 1 –  $\eta_e = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

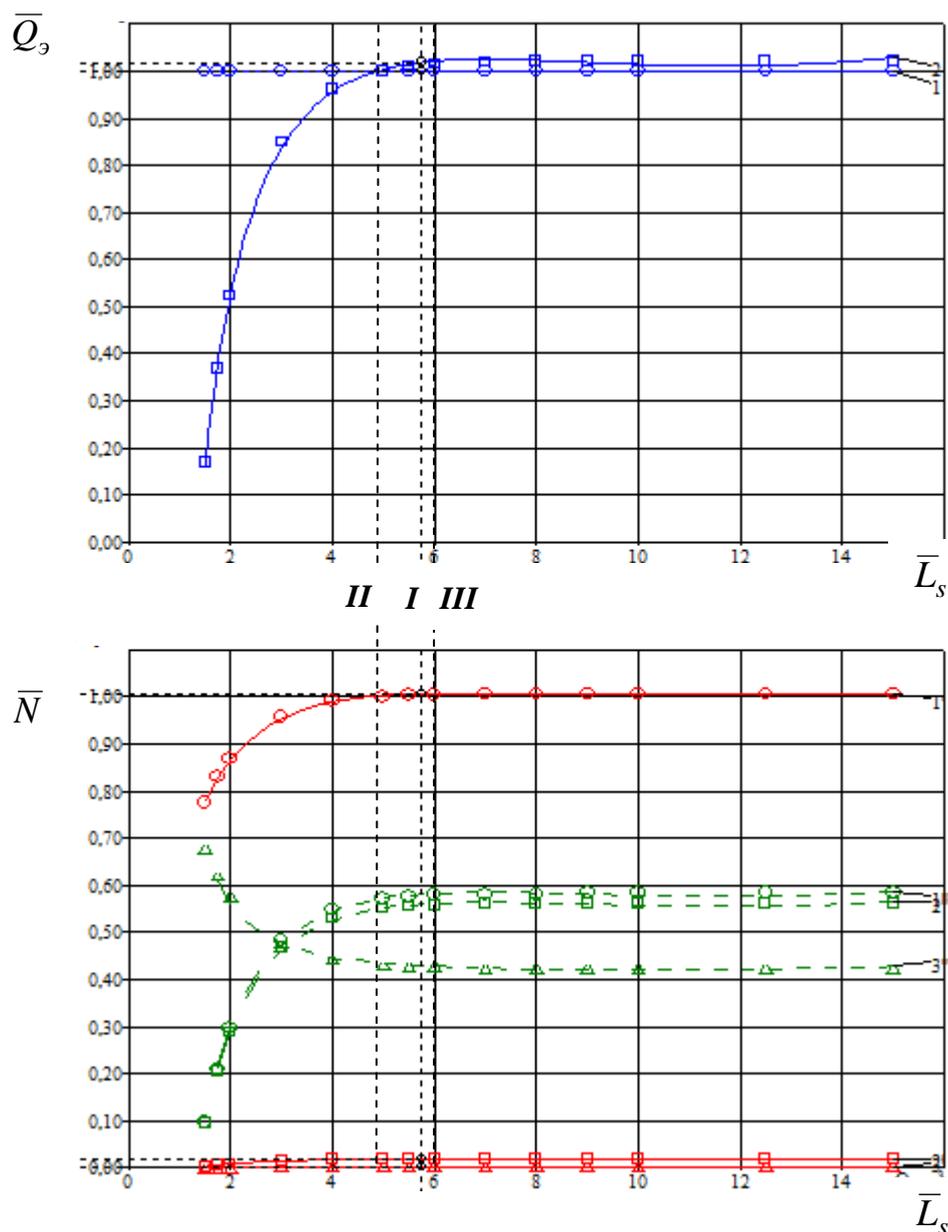


Рис. В.15 – Зависимости относительной подачи  $\bar{Q}_s$  и мощностей водовоздушного потока  $\bar{N}$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=250\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $h=8,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_в=8,500\text{м}^3/\text{мин}$  ( $0,142\text{м}^3/\text{с}$ )

(базисные значения  $Q_s=140,1\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $N=11,22\text{кВт}$ ):

1 –  $\bar{Q}_s = 1$ ; 2 –  $\bar{Q}_s = f(\bar{L}_s)$ ; 1' –  $\bar{N}_{\text{под}} = f(\bar{L}_s)$ ; 1'' –  $\bar{N}_{\Sigma} = f(\bar{L}_s)$ ; 2' –  $\bar{N}_{\text{мп}} = f(\bar{L}_s)$ ;

2'' –  $\bar{N}_g = f(\bar{L}_s)$ ; 3' –  $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{L}_s)$ ; 3'' –  $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{L}_s)$ ;

**I** – режим 1; **II** – режим 2; **III** – режим 3

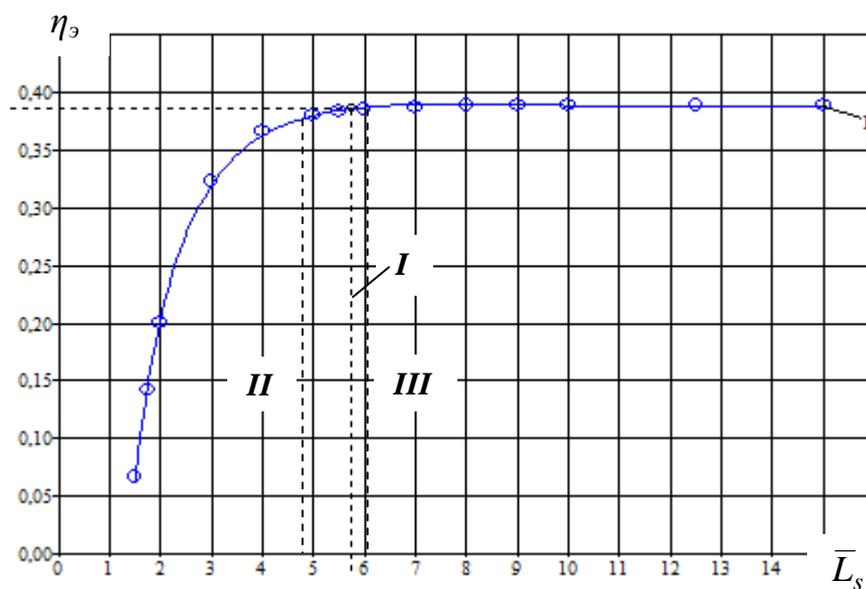


Рис. В.16 – Зависимость КПД  $\eta_3$  от относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в подъемной трубе эрлифта  $D=250\text{мм}$ ,  $H+h=16,0\text{м}$ ,  $h=8,0\text{м}$ ,  $\alpha=0,500$  при расходе воздуха  $Q_в=8,500\text{м}^3/\text{мин}$  ( $0,142\text{м}^3/\text{с}$ ): 1 –  $\eta_3 = f(\bar{L}_s)$ ;  
**I** – режим 1; **II**– режим 2; **III**– режим 3

## Приложение Г

Используемые контрольно-измерительные приборы, погрешности измерений, протоколы экспериментальных исследований работы эрлифтов и результаты статистической обработки экспериментальных данных.

Таблица Г.1

Характеристика контрольно-измерительных приборов, применявшихся при экспериментальных исследованиях работы эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D=57$ мм и длиной  $H+h=2,57$ м, геометрическим погружением смесителя  $h=0,93$ м и относительным погружением смесителя  $\alpha=0,362$

№ поз. на рис. 4.1	Измеряемый параметр	Контрольно-измерительный прибор	Ед. измерения	Диапазон измерения и класс точности прибора	Примечания
1	2	3	4	5	6
8	Подача эрлифта	датчик расхода жидкости	м <sup>3</sup> /с	0÷1,9·10 <sup>-3</sup> кл. точн. 1,5	
11	Давление в смесителе	датчик давления	м.вод.ст.	0÷1,6 кл. точн. 1,5	
15	Температура сжатого воздуха перед диафрагмой	термометр	°С	0÷100, цена деления шкалы 1 °С	
19	Перепад давлений на диафрагме	дифманометр U-образный	мм.вод. ст.	0÷2000, цена деления шкалы 1 мм.вод.ст.	уравновешивающая жидкость – вода (плотность $\rho = 1000$ кг/м <sup>3</sup> )
20	Перепад давлений на диафрагме	дифманометр	мм.вод.ст.	0÷135 кл. точн. 1,5	
21	Давление сжатого воздуха перед диафрагмой	датчик давления	м.вод.ст.	0÷1,75 кл. точн. 1,5	

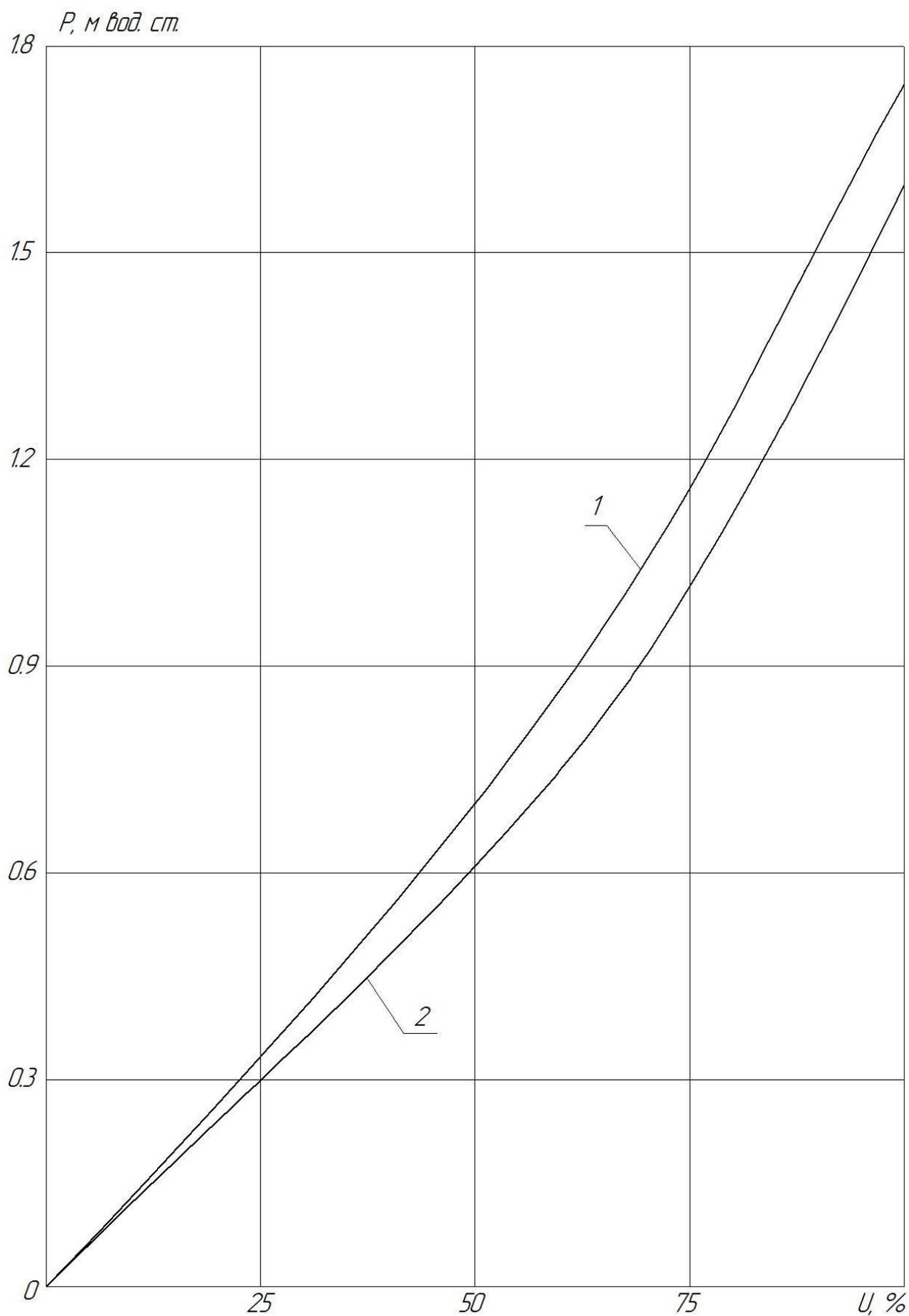


Рис. Г.1 – Характеристики датчиков давления: 1 (позиция 21, рис. 4.1) –  $p_{\text{макс}} = 1,75$  м.вод.ст.; 2 (позиция 11, рис. 4.1) –  $p_{\text{макс}} = 1,60$  м.вод.ст.

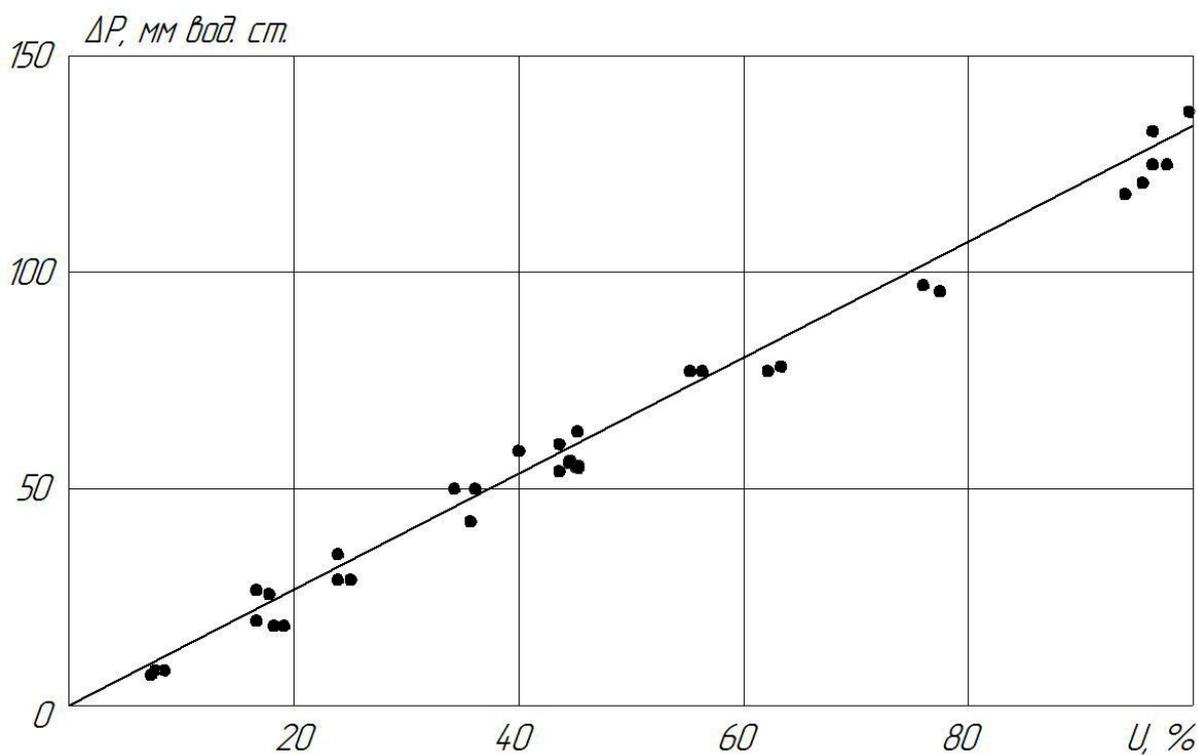


Рис. Г.2 – Характеристика дифференциального датчика давления (позиция 20, рис. 4.1) –  $p_{\text{макс}} = 135 \text{ мм.вод.ст.}$

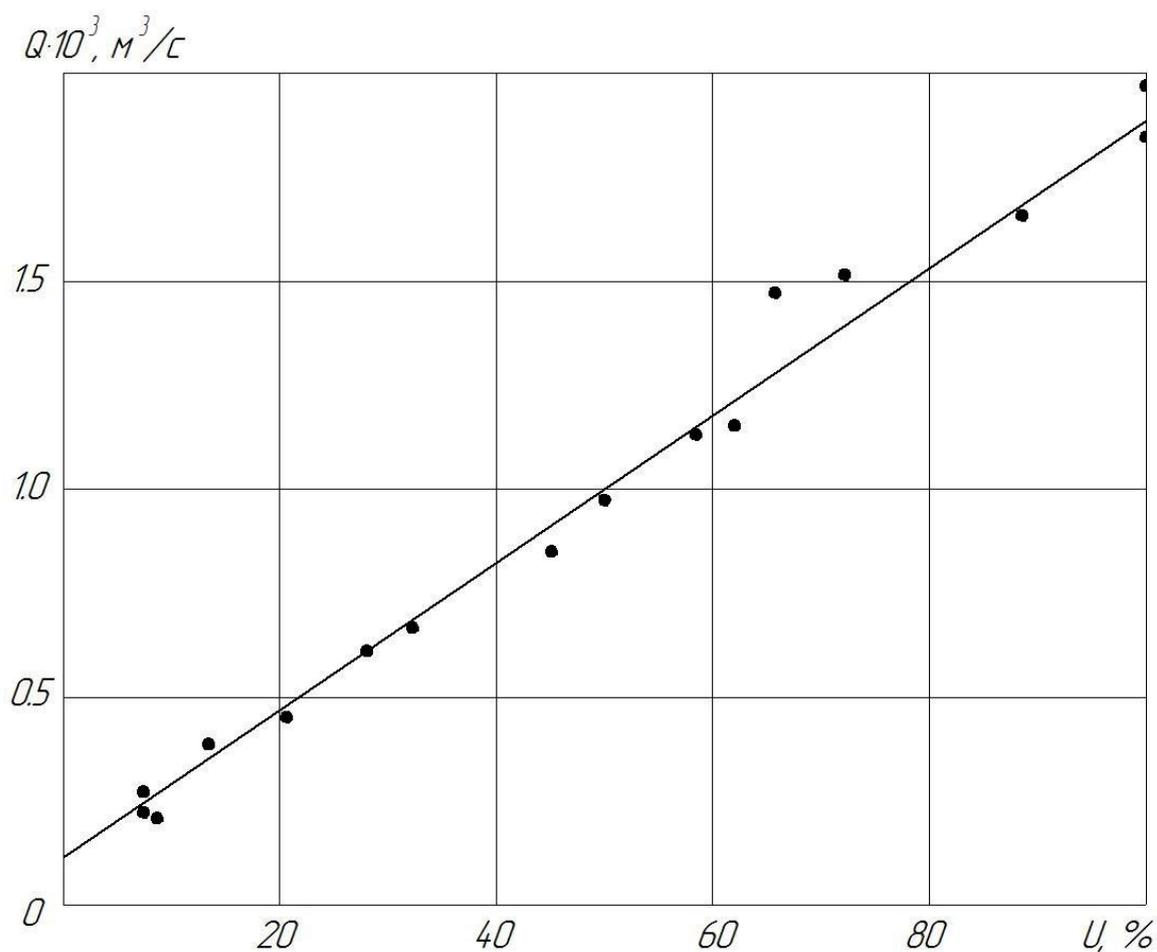


Рис. Г.3 – Характеристика датчика расхода жидкости (позиция 8, рис. 4.1)

Г.1. Погрешность измерения расхода сжатого воздуха и подачи при экспериментальных исследованиях работы эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D = 57$  мм и длиной  $H+h = 2,57$  м

Расход сжатого воздуха, измеряемый при помощи стандартной диафрагмы, вычислялся по выражению [108]:

$$Q_g = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_\varphi \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{ном} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (\text{Г.1})$$

где  $Q_g$  – объемный расход воздуха, приведенный к нормальному состоянию ( $p_{ном} = 1,0332 \text{ кгс/см}^2$  и  $T_{ном} = 293,15 \text{ К}$ );

$\alpha$  – коэффициент расхода;

$\varepsilon$  – поправочный множитель на расширение измеряемой среды (коэффициент расширения);

$k_t$  – поправочный множитель на тепловое расширение материала сужающего устройства;

$k_\varphi$  – коэффициент коррекции расхода на влажность газа;

$d_{20}$  – диаметр отверстия сужающего устройства при температуре  $20^\circ\text{C}$ , мм;

$\Delta p'$  – перепад давлений на сужающем устройстве,  $\text{кгс/м}^2$ ;

$p$  – абсолютное давление перед сужающим устройством,  $\text{кгс/см}^2$ ;

$\rho_{ном}$  – плотность воздуха в нормальном состоянии,  $\rho_{ном} = 1,2046 \text{ кг/м}^3$ ;

$T$  – температура воздуха, К;

$K$  – коэффициент сжимаемости газа.

Для измерения расхода сжатого воздуха использовались две диафрагмы со следующими геометрическими параметрами: 1-я диафрагма - диаметр отверстия диафрагмы при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$   $d_{20} = 22,0$  мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$   $D_{20} = 52,0$  мм, относительная площадь сужающего устройства  $m = 0,1790$ ; 2-я диафрагма -  $d_{20} = 30,7$  мм,  $D_{20} = 52,0$  мм,  $m = 0,3486$ .

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода воздуха равна

$$\sigma_{Q_v} = \left[ \sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{k_{\varphi}}^2 + 0,25(\sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_{\rho_{ном}}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_T^2 + \sigma_K^2) \right]^{0,5}, \quad (\Gamma.2)$$

где  $\sigma_{\alpha}, \sigma_{\varepsilon}, \sigma_{k_{Re}}, \sigma_{k_{\varphi}}, \sigma_{\Delta p}, \sigma_{\rho_{ном}}, \sigma_p, \sigma_T, \sigma_K$  - средние квадратичные относительные погрешности величин  $\alpha, \varepsilon, k_{Re}, k_{\varphi}, \Delta p, \rho_{ном}, p, T, K$ .

В соответствии с [108] составляющие погрешности  $\sigma_{d_{20}}^2$  и  $\sigma_{k_t}^2$  опущены ввиду их малости.

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расхода

$$\sigma_{\alpha} = \left[ \sigma_{\alpha'}^2 + \sigma_{k_{ui}}^2 + \sigma_{k_n}^2 \right]^{0,5}, \quad (\Gamma.3)$$

где как для диафрагмы с  $m = 0,1790$ , так и для диафрагмы с  $m = 0,3486$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[ 0,3^2 + \sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\alpha_D}^2 \right]^{0,5}. \quad (\Gamma.4)$$

Относительная площадь сужающего устройства

$$m = \left( \frac{d}{D} \right)^2, \quad (\Gamma.5)$$

где  $d$  – диаметр отверстия диафрагмы при рабочей температуре, мм;

$D$  – внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой при рабочей температуре, мм.

Погрешности

$$\sigma_{\alpha_d} = 2\sigma_d \left( 1 + \frac{m^2}{\alpha} \right), \quad (\Gamma.6)$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2\sigma_D \frac{m^2}{\alpha}. \quad (\Gamma.7)$$

Согласно [108] при  $m < 0,4$  значения  $\sigma_d = 0,05$  и  $\sigma_D = 0,15$ .

Диапазон изменений значений коэффициента расхода составил:

– для диафрагмы с  $m = 0,1790$  –  $\alpha = 0,6192 \div 0,6232$ ;

- для диафрагмы с  $m = 0,3486 - \alpha = 0,6553 \div 0,6630$ .

Для оценки погрешности принимаем расчетные значения коэффициентов расхода:

- для диафрагмы с  $m = 0,1790 - \alpha = 0,6212$ ;
- для диафрагмы с  $m = 0,3486 - \alpha = 0,6592$ .

Тогда:

- для диафрагмы с  $m = 0,1790$  из (Г.6), (Г.7) и (Г.4)

$$\sigma_{\alpha_d} = 2 \cdot 0,05 \left( 1 + \frac{0,1790^2}{0,6212} \right) = 0,105,$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2 \cdot 0,15 \frac{0,1790^2}{0,6212} = 0,015,$$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[ 0,3^2 + 0,105^2 + 0,015^2 \right]^{0,5} = 0,318;$$

- для диафрагмы с  $m = 0,3486$  из (Г.6), (Г.7) и (Г.4)

$$\sigma_{\alpha_d} = 2 \cdot 0,05 \left( 1 + \frac{0,3486^2}{0,6592} \right) = 0,118,$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2 \cdot 0,15 \frac{0,3486^2}{0,6592} = 0,055,$$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[ 0,3^2 + 0,118^2 + 0,055^2 \right]^{0,5} = 0,327.$$

В соответствии с [108] для условий проведения эксперимента поправочный множитель на шероховатость трубопровода  $k_{ш} = 1$  и поправочный множитель на притупление входной кромки отверстия диафрагмы  $k_n = 1$ . Тогда погрешности  $\sigma_{k_{ш}} = 0$  и  $\sigma_{k_n} = 0$ .

Следовательно, средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расхода в соответствии с (Г.3) равна:

- для диафрагмы с  $m = 0,1790$

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha'} = 0,318;$$

– для диафрагмы с  $m = 0,3486$

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha'} = 0,327.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[ \sigma_{\chi}^2 + \sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_p^2 \right]^{0,5} + \sigma_0, \quad (\text{Г.8})$$

где для диафрагм с  $m \leq 0,56$

$$\sigma_0 = 2 \frac{\Delta p}{p}. \quad (\text{Г.9})$$

Погрешность определения показателя адиабаты воздуха

$$\sigma_{\chi} = 50 \frac{\Delta K}{K}, \quad (\text{Г.10})$$

где  $\Delta K$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $K$  (показателя адиабаты), равная половине единицы разряда 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 (Г.10)

$$\sigma_{\chi} = 50 \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{1,400} = 0,002.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность дифманометра

$$\sigma_{\Delta p} = 0,5 \frac{\Delta p_{np}}{\Delta p} S_{\Delta p} \quad (\text{Г.11})$$

где  $\Delta p_{np}$  – наибольший измеряемый перепад давлений;

$\Delta p$  – диапазон измеряемых давлений;

$S_{\Delta p}$  – класс точности прибора,  $S_{\Delta p} = 1,5$ .

Значение средней квадратичной относительной погрешности дифманометра составляет при  $\Delta p_{np} = 135$  мм. вод. ст. и  $\Delta p = 32 \dots 130$  мм. вод. ст. согласно (Г.11)  $\sigma_{\Delta p} = 0,779 \dots 3,16$ ;

Погрешность измерения абсолютного давления

$$\sigma_p = \left[ \sigma_{p_0}^2 + \left( \sigma_{p_u} \frac{p_u}{p} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (\text{Г.12})$$

Погрешность измерения барометрического давления

$$\sigma_{p_0} = 50 \frac{\Delta p_0}{p}, \quad (\text{Г.13})$$

где  $\Delta p_0$  – максимальная абсолютная погрешность измерения барометрического давления,  $\Delta p_0 = 0,5$  мм. рт. ст. =  $0,68 \cdot 10^{-3}$  кгс/см<sup>2</sup>;

$p$  – абсолютное давление измеряемой среды,  $p = 1,141 \dots 1,179$  кгс/см<sup>2</sup>.

Тогда в соответствии с (Г.13)  $\sigma_{p_0} = 0,030$ .

Погрешность измерения избыточного давления

$$\sigma_{p_u} = 0,5 \frac{p_{np}}{p_u} S_{p_u}, \quad (\text{Г.14})$$

где  $p_{np}$  – значение верхнего предела измерения давления,  $p_{np} = 0,175$  кгс/см<sup>2</sup>;

$p_u$  – значение измеряемого избыточного давления,  $p_u = 0,118 \dots 0,153$  кгс/см<sup>2</sup>;

$S_{p_u}$  – класс точности прибора,  $S_{p_u} = 1,5$ .

Тогда в соответствии с (Г.14)  $\sigma_{p_u} = 0,858 \dots 1,110$ .

Из выражения (Г.12) погрешность измерения абсолютного давления  $\sigma_p = 0,0937 \dots 0,147$ .

Согласно (Г.9)  $\sigma_0 = 0,0056 \dots 0,022$ .

Значение коэффициента расширения  $\varepsilon = 0,996 \dots 0,999$ .

Тогда средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды в соответствии с (Г.8)  $\sigma_\varepsilon = 0,00687 \dots 0,0233$ .

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность газа

$$\sigma_{k_\varphi} = \left[ \left( \frac{1-k_\varphi}{k_\varphi} \right)^2 (\sigma_\varphi^2 + \sigma_{p_{\text{вн.макс}}}^2 + \sigma_p^2) \right]^{0,5}, \quad (\text{Г.15})$$

где  $\sigma_\varphi$  – погрешность определения относительной влажности воздуха,

$$\sigma_\varphi = [\sigma_{p_{\text{вн}}}^2 + \sigma_{p_{\text{вн.макс}}}^2]^{0,5}; \quad (\text{Г.16})$$

$\sigma_{p_{\text{вн}}}$  – погрешность определения давления водяного пара;

$\sigma_{p_{\text{вн.макс}}}$  – погрешность определения наибольшего возможного давления водяного пара.

$$\sigma_{p_{\text{вн.макс}}} = [\sigma_t^2 + \sigma_{p_{\text{вн}}}^2]^{0,5}. \quad (\text{Г.17})$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения температуры атмосферного воздуха

$$\sigma_t = 50 \frac{\Delta t}{t}, \quad (\text{Г.18})$$

где  $t$  – значение предела шкалы измерений термометра;

$\Delta t$  – максимальная абсолютная погрешность измерения температуры.

Для данного случая  $t = 50$  °С,  $\Delta t = 0,1$  °С. Тогда

$$\sigma_t = 50 \frac{0,1}{50} = 0,1.$$

$$\sigma_{p_{\text{вн}}} = 50 \frac{\Delta p_{\text{вн}}}{p_{\text{вн}}}, \quad (\text{Г.19})$$

где  $\Delta p_{\text{вн}}$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $p_{\text{вн}}$ , равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении  $p_{\text{вн}}$ .

Для рассматриваемых условий  $p_{\text{ен}} = 0,0200 \dots 0,1000 \text{ кгс/см}^2$ ,  
 $\Delta p_{\text{ен}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кгс/см}^2$ .

Тогда в соответствии с (Г.19)  $\sigma_{p_{\text{ен}}} = 0,03 \dots 0,13$ , и в соответствии с (Г.17)  
 $\sigma_{p_{\text{ен. max}}} = 0,10 \dots 0,16$ .

Величина погрешности определения относительной влажности воздуха  
 (Г.16)  $\sigma_{\varphi} = 0,10 \dots 0,21$ .

Величина коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха  
 $k_{\varphi} = 0,993 \dots 0,994$ .

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента  
 коррекции расхода на влажность газа (Г.15)  $\sigma_{k_{\varphi}} = 0,001 \dots 0,050$ .

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента  
 коррекции на число Рейнольдса

$$\sigma_{k_{\text{Re}}} = (1 - k_{\text{Re}}) \sigma_{\mu}, \quad (\text{Г.20})$$

где  $\sigma_{\mu}$  – погрешность определения вязкости измеряемой среды.

Определим расход воздуха при действительных рабочих параметрах и  
 допущении, что  $Re = 10^6$

$$Q_{\varepsilon}^* = 0,2109 \cdot \alpha^* \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_{\varphi} \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{\text{ном}} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (\text{Г.21})$$

где  $\alpha^*$  – значение коэффициента расхода  $\alpha$  при  $Re = 10^6$ .

В соответствии с выражением

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \left[ 0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,1840 \cdot m^4 + 0,0029 \cdot m^{1,25} \left( \frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} \right] \quad (\text{Г.22})$$

при  $Re = 10^6$  коэффициенты расхода равны:

- для диафрагмы с  $m = 0,1790$   $\alpha^* = 0,6123$ ;
- для диафрагмы с  $m = 0,3486$   $\alpha^* = 0,6634$ .

Для расчетов принимаем:

- для диафрагмы с  $m = 0,1790$  –  $d_{20} = 22$  мм;  $\varepsilon = 0,998$ ;  $k_t^2 = 1,001$ ;  
 $k_\varphi = 0,994$ ;  $\Delta p' = 50$  кг/м<sup>2</sup>;  $p = 1,15$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\rho_{ном} = 1,2046$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $T = 330,5$  К;  $K = 1,0$ ;
- для диафрагмы с  $m = 0,3486$  –  $d_{20} = 30,7$  мм;  $\varepsilon = 0,999$ ;  $k_t^2 = 1,001$ ;  
 $k_\varphi = 0,993$ ;  $\Delta p' = 130$  кг/м<sup>2</sup>;  $p = 1,17$  кгс/см<sup>2</sup>;  $\rho_{ном} = 1,2046$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $T = 333,0$  К;  $K = 1,0$ .

При принятых значениях переменных:

- для диафрагмы с  $m = 0,1790$  –  $Q_6^* = 23,6$  м<sup>3</sup>/ч;
- для диафрагмы с  $m = 0,3486$  –  $Q_6^* = 80,6$  м<sup>3</sup>/ч.

Критерий Рейнольдса при расходе воздуха  $Q_6^*$

$$Re^* = 0,0361 \frac{Q_6^* \cdot \rho_{ном}}{D \cdot \mu}, \quad (\Gamma.23)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воды в рабочих условиях,  $\mu = 2,1 \cdot 10^{-6}$  кг·с/м<sup>2</sup>.

Значения критерия Рейнольдса при расходе воздуха  $Q_6^*$ :

- для диафрагмы с  $m = 0,1790$

$$Re^* = 0,0361 \frac{23,6 \cdot 1,2046}{52 \cdot 2,1 \cdot 10^{-6}} = 9,40 \cdot 10^3;$$

- для диафрагмы с  $m = 0,3486$

$$Re^* = 0,0361 \frac{80,6 \cdot 1,2046}{52,0 \cdot 2,1 \cdot 10^{-6}} = 3,21 \cdot 10^4.$$

Действительное число Рейнольдса

$$Re = \frac{Re^* \cdot C}{\alpha^* \left\{ 1 - S \left[ 1 - S(1 - S)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}}, \quad (\Gamma.24)$$

где вспомогательные величины

$$B = \frac{0,0029m^{1,25}}{\sqrt{1 - m^2}}, \quad (\Gamma.25)$$

$$C = \left(0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4\right) \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}, \quad (\Gamma.26)$$

$$S_1 = B \frac{Re^*}{\alpha^* \cdot 10^6}, \quad (\Gamma.27)$$

$$S_2 = C \frac{Re^*}{\alpha^* \cdot 10^6}, \quad (\Gamma.28)$$

$$S = \frac{S_1}{S_2^{1,75}}. \quad (\Gamma.29)$$

Результаты вычислений:

– для диафрагмы с  $m = 0,1790$

$$B = \frac{0,0029 \cdot 0,1790^{1,25}}{\sqrt{1-0,1790^2}} = 0,343 \cdot 10^{-3},$$

$$C = \left(0,5959 + 0,0312 \cdot 0,1790^{1,05} - 0,184 \cdot 0,1790^4\right) \frac{1}{\sqrt{1-0,1790^2}} = 0,641,$$

$$S_1 = 0,343 \cdot 10^{-3} \frac{9,40 \cdot 10^3}{0,6123 \cdot 10^6} = 5,266 \cdot 10^{-6},$$

$$S_2 = 0,641 \frac{9,40 \cdot 10^3}{0,6123 \cdot 10^6} = 9,841 \cdot 10^{-3},$$

$$S = \frac{5,266 \cdot 10^{-6}}{0,009841^{1,75}} = 0,0171,$$

$$Re = \frac{9,40 \cdot 10^3 \cdot 0,641}{0,6123 \left\{ 1 - 0,0171 \left[ 1 - 0,0171 (1 - 0,0171)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}} = 10000;$$

– для диафрагмы с  $m = 0,3486$

$$B = \frac{0,0029 \cdot 0,3486^{1,25}}{\sqrt{1-0,3486^2}} = 0,829 \cdot 10^{-3},$$

$$C = (0,5959 + 0,0312 \cdot 0,3486^{1,05} - 0,184 \cdot 0,3486^4) \frac{1}{\sqrt{1 - 0,3486^2}} = 0,782,$$

$$S_1 = 0,829 \cdot 10^{-3} \frac{3,21 \cdot 10^4}{0,6634 \cdot 10^6} = 4,011 \cdot 10^{-5},$$

$$S_2 = 0,782 \frac{3,21 \cdot 10^4}{0,6634 \cdot 10^6} = 0,0378,$$

$$S = \frac{4,011 \cdot 10^{-5}}{0,0378^{1,75}} = 0,0124,$$

$$Re = \frac{3,21 \cdot 10^4 \cdot 0,782}{0,6634 \left\{ 1 - 0,0124 \left[ 1 - 0,0124 (1 - 0,0124)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}} = 38300.$$

Коэффициент коррекции на число Рейнольдса

$$k_{Re} = \frac{C + B \left( \frac{10^6}{Re} \right)^{0,75}}{C + B}, \quad (\Gamma.30)$$

– для диафрагмы с  $m = 0,1790$

$$k_{Re} = \frac{0,641 + 0,343 \cdot 10^{-3} \left( \frac{10^6}{10000} \right)^{0,75}}{0,641 + 0,343 \cdot 10^{-3}} = 1,0;$$

– для диафрагмы с  $m = 0,3486$

$$k_{Re} = \frac{0,782 + 0,829 \cdot 10^{-3} \left( \frac{10^6}{38300} \right)^{0,75}}{0,782 + 0,829 \cdot 10^{-3}} = 1,0.$$

Тогда средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольдса как для диафрагмы с  $m = 0,1790$ , так и для диафрагмы с  $m = 0,3486$

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re}) \sigma_{\mu} = (1 - 1,0) \sigma_{\mu} = 0.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения температуры

$$\sigma_T = 0,5 \frac{N_T}{273,15 + t} S_t, \quad (\text{Г.31})$$

где  $N_T$  – диапазон шкалы измерений термометра,  $N_T = 100 + 273,15 = 73,15$  К;  
 $S_t$  – класс точности термометра,

$$S_t = \frac{1}{100} 100 = 1,0;$$

$t$  – диапазон измеряемых температур,  $t = 56 \dots 61$  °С.

Тогда в соответствии с (Г.31)  $\sigma_T = 0,558 \dots 0,567$ .

Средняя квадратичная относительная погрешность определения плотности сухого воздуха в нормальных условиях

$$\sigma_{\rho_{\text{ном}}} = 50 \frac{\Delta\rho_{\text{ном}}}{\rho_{\text{ном}}}, \quad (\text{Г.32})$$

где  $\Delta\rho_{\text{ном}}$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $\rho_{\text{ном}}$ , равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении  $\rho_{\text{ном}}$ ,  $\Delta\rho_{\text{ном}} = 5 \cdot 10^{-5}$  кг/м<sup>3</sup>.

$$\sigma_{\rho_{\text{ном}}} = 50 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1,2046} = 0,01.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости воздуха

$$\sigma_K = 50 \frac{\Delta K}{K}, \quad (\text{Г.33})$$

где  $\Delta K$  – максимальная абсолютная погрешность величины  $K$ , равная половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении  $K$ ,  $\Delta K = 5 \cdot 10^{-3}$ .

$$\sigma_K = 50 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 0,25.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода воздуха в соответствии с (Г.2) равна:

– для диафрагмы с  $m = 0,1790$

$$\sigma_{Q_g} = \left\{ 0,318^2 + (0,00687 \dots 0,0233)^2 + 0^2 + (0,001 \dots 0,05)^2 + \right. \\ \left. + 0,25 \left[ (0,779 \dots 3,16)^2 + 0,01^2 + (0,0937 \dots 0,147)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (0,558 + 0,567)^2 + 0,25^2 \right] \right\}^{0,5} = 0,59 \dots 1,64;$$

– для диафрагмы с  $0,3486$

$$\sigma_{Q_g} = \left\{ 0,327^2 + (0,00687 \dots 0,0233)^2 + 0^2 + (0,001 \dots 0,05)^2 + \right. \\ \left. + 0,25 \left[ (0,779 \dots 3,16)^2 + 0,01^2 + (0,0937 \dots 0,147)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (0,558 + 0,567)^2 + 0,25^2 \right] \right\}^{0,5} = 0,59 \dots 1,64.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность расходомера

$$\sigma_{Q_s} = 0,5 \frac{Q_{np}}{\Delta Q} S_Q \quad (\text{Г.34})$$

где  $Q_{np}$  – наибольший измеряемый расход воды;

$\Delta Q$  – диапазон измеряемых расходов;

$S_Q$  – класс точности прибора,  $S_Q = 1,5$ .

Значение средней квадратичной относительной погрешности расходомера составляет при  $Q_{np} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $\Delta Q = (0,74 \div 1,69) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  согласно (Г.34)  $\sigma_{Q_s} = 0,84 \dots 1,93$ .

Следовательно, при экспериментальных исследованиях эрлифтов средние квадратичные относительные погрешности измерения составили:

- расхода воздуха  $\sigma_{Q_g} = 0,59 \dots 1,64$ ;
- подачи эрлифта  $\sigma_{Q_s} = 0,84 \dots 1,93$ .

Таблица Г.2

Протоколы экспериментальных исследований работы эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D = 57$  мм и длиной  $H+h = 2,57$  м, геометрическим погружением смесителя  $h = 0,93$  м

Протокол №1								
15 июля 2001 г.								
Традиционно работающий эрлифт.								
Барометрическое давление $p_b = 753,3$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 24\%$ .								
Температура атмосферного воздуха $t_a = 22,5$ °С.								
№ П/П	Расход сжатого воздуха						Давление в смесителе (избыточное), м.вод.ст.	Подача эрлифта, м <sup>3</sup> /с
	Диаметр отверстия диафрагмы $d_{20}$ , мм	Относительная площадь сужающего устройства $m$	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диафрагмой (избыточное), м.вод.ст.	Температура воздуха перед диафрагмой, °С	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	22,0	0,1790	41	1,22	57,5	0,00603	0,932	0,00078
2	22,0	0,1790	87	1,31	57	0,00878	0,930	0,00106
3	30,7	0,3486	42	1,19	56	0,01263	0,931	0,00122
4	30,7	0,3486	71	1,33	58	0,01638	0,930	0,00128
5	30,7	0,3486	85	1,41	59	0,01793	0,931	0,00130
6	30,7	0,3486	115	1,46	61	0,02077	0,931	0,00127
Протокол №2								
15 июля 2001 г.								
Дискретная подача сжатого воздуха $t_{откр}/t_{закр} = 1/1$								
$p_b = 755$ мм. рт. ст., $\varphi = 25\%$ , $t_a = 24$ °С								
1	22,0	0,1790	46	1,24	56,5	0,00640	0,929	0,00074
2	22,0	0,1790	116	1,48	56	0,01020	0,930	0,00111
3	30,7	0,3486	48	1,29	57	0,01352	0,930	0,00126
4	30,7	0,3486	64	1,36	57,5	0,01560	0,931	0,00129
5	30,7	0,3486	85	1,46	58	0,01800	0,930	0,00132
6	30,7	0,3486	106	1,53	58,5	0,02010	0,930	0,00131
Протокол №3								
15 июля 2001 г.								
Дискретная подача сжатого воздуха $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5$								
$p_b = 754,5$ мм. рт. ст., $\varphi = 26\%$ , $t_a = 24$ °С								
1	22,0	0,1790	52	1,26	56,5	0,00680	0,930	0,00108
2	30,7	0,3486	32	1,32	57	0,01110	0,930	0,00136
3	30,7	0,3486	62	1,36	59	0,01532	0,931	0,00154
4	30,7	0,3486	84	1,39	59	0,01780	0,930	0,00159
5	30,7	0,3486	117	1,41	61	0,02090	0,930	0,00161
6	30,7	0,3486	130	1,48	60	0,02210	0,931	0,00160

## Продолжение таблицы Г.2

Протокол №4								
15 июля 2001 г.								
Дискретная подача сжатого воздуха $t_{откр}/t_{закр} = 1/2$								
$p_{\bar{o}} = 755$ мм. рт. ст., $\varphi = 24\%$ , $t_a = 25$ °С								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	22,0	0,1790	57	1,18	56	0,00710	0,930	0,00112
2	30,7	0,3486	35	1,20	59	0,01151	0,929	0,00140
3	30,7	0,3486	57	1,29	57,5	0,01470	0,929	0,00153
4	30,7	0,3486	71	1,34	57,5	0,01640	0,930	0,00159
5	30,7	0,3486	86	1,43	57	0,01810	0,930	0,00162
6	30,7	0,3486	108	1,53	60,5	0,02020	0,930	0,00164
Протокол №5								
15 июля 2001 г.								
Дискретная подача сжатого воздуха $t_{откр}/t_{закр} = 1/2,5$								
$p_{\bar{o}} = 755,5$ мм. рт. ст., $\varphi = 26\%$ , $t_a = 24$ °С								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	22,0	0,1790	64	1,20	58	0,00750	0,932	0,00120
2	30,7	0,3486	34	1,28	58	0,01140	0,931	0,00144
3	30,7	0,3486	53	1,35	58	0,01421	0,931	0,00156
4	30,7	0,3486	70	1,38	60	0,01626	0,930	0,00163
5	30,7	0,3486	89	1,41	60,5	0,01830	0,929	0,00166
6	30,7	0,3486	123	1,46	60	0,02150	0,930	0,00169

Г.2. Значения числа подобия Струхаля (критерия гомохронности)  $Sh$ , имеющих место при экспериментальном исследовании эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м и  $\alpha = 0,362$  с дискретной подачей сжатого воздуха

Число подобия Струхаля (критерий гомохронности) [105 ... 107]

$$Sh = \frac{L}{t \cdot u}, \quad (\text{Г.35})$$

где  $L$  – характерный линейный размер;

$t$  – время;

$u$  – скорость.

В качестве характерного линейного размера целесообразно принять длину подъемной трубы эрлифта  $L = H+h = 2,57$  м, в качестве характерного времени – время закрытия запорно-регулирующего элемента клапана  $t = t_{\text{закр}}$ , а в качестве скорости – скорость водовоздушной смеси на входе в подъемную трубу  $u = w_{\text{см}}$ , которая определяется выражением

$$w_{\text{см}} = \frac{4 \cdot \left( Q_3 + \frac{Q_6 \cdot p_0}{p_0 + \rho' \cdot g \cdot h} \right)}{\pi \cdot D^2}. \quad (\text{Г.36})$$

Диапазон изменения значимых факторов и числа подобия Струхаля, имевших место при экспериментальных исследованиях эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м и  $\alpha = 0,362$  приведены в табл. Г.3. Постоянные значения параметров принимались при вычислениях следующие:  $L = H+h = 2,57$  м,  $p_0 = 9,81 \cdot 10^4$  Па,  $\rho' = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>,  $h = 0,93$  м,  $D = 57$  мм.

Таблица Г.3.

Диапазоны значений значимых факторов и числа подобия Струхалия, имевших место при экспериментальных исследованиях эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м и  $\alpha = 0,362$

Значение параметра:	Параметр:				Число Струхалия $Sh$
	подача $Q_э, \text{м}^3/\text{с}$	расход воздуха $Q_в, \text{м}^3/\text{с}$	скорость водовоздушной смеси на входе в подъемную трубу $u = w_{см}, \text{м}/\text{с}$	время закрытия запорно-регулирующего элемента клапана $t = t_{закр}, \text{с}$	
минимальное	0,00074	0,0064	2,59	1	0,992
максимальное	0,00169	0,0215	8,38	2,5	0,123

Таким образом, при экспериментальных исследованиях эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м и  $\alpha = 0,362$  с дискретной подачей сжатого воздуха число подобия Струхалия (критерия гомохронности) изменялось в диапазоне  $Sh = 0,123 \dots 0,992$ .

## Приложение Д

## Д.1. Пример расчета шламового эрлифта для очистки зумпфа главного ствола шахты «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь» [12]

Исходные данные:

- глубина зумпфового водосборника 4,5 м;
- требуемая высота подъема эрлифта  $H = 2,0$  м;
- максимальная крупность кусков транспортируемого материала  $d_m = 100$  мм;
- плотность транспортируемого материала  $\rho_m = 2500$  кг/м<sup>3</sup>.

Определение основных конструктивных и технологических параметров шламовой эрлифтной установки. С учетом габаритов подводящего узла шламового эрлифта возможное максимальное геометрическое погружение смесителя составляет  $h = 3,5$  м.

Относительное погружение смесителя эрлифта

$$\alpha = \frac{h}{H + h} = \frac{3,5}{2,0 + 3,5} = 0,64. \quad (\text{Д.1})$$

Диаметр подающей трубы

$$d' = (2,5 \div 3,0) \cdot d_m = 2,5 \cdot 100 = 250 \text{ мм}. \quad (\text{Д.2})$$

В качестве подающей принята труба по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 273 \times 11$  мм, то есть внутренний диаметр подающей трубы составил  $d = 251$  мм.

Требуемая скорость гидросмеси в подающей трубе

$$v = 6,5 \cdot \sqrt{d_m \cdot \left( \frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right)} = 6,5 \cdot \sqrt{0,1 \cdot \left( \frac{2500}{1000} - 1 \right)} = 2,52 \text{ м/с}. \quad (\text{Д.3})$$

Требуемая подача эрлифта

$$Q_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v = \frac{3,14 \cdot 0,251^2}{4} \cdot 2,52 = 0,125 \text{ м}^3/\text{с} = 450 \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (\text{Д.4})$$

Диаметр подъемной трубы

$$D = \left( \frac{Q_3}{c} \right)^{0,4} = \left( \frac{0,125}{2,3} \right)^{0,4} = 0,312 \text{ м}, \quad (\text{Д.5})$$

здесь  $c$  – коэффициент подачи эрлифта, согласно зависимости  $c = f(\alpha)$  (рис. Д.1) [12]  $c = 2,3$ .

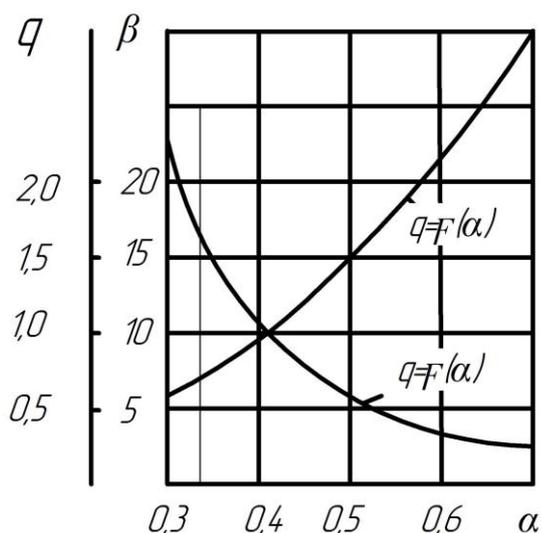


Рис. Д.1 – Зависимости коэффициент подачи  $c = f(\alpha)$  и удельного расхода воздуха  $q = f(\alpha)$  от относительного погружения смесителя шламowego эрлифта [12]

В качестве подъемной принята труба по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 325 \times 9$  мм, то есть внутренний диаметр подъемной трубы составил  $D = 307$  мм.

Расход воздуха

$$Q_8 = q \cdot Q_3 = 2,8 \cdot 0,125 = 0,35 \text{ м}^3/\text{с} = 21 \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (\text{Д.6})$$

здесь  $q$  – удельный расход воздуха, согласно зависимости  $q = f(\alpha)$  (рис. Д.1) [12]  $q = 2,8$ .

Потребное давление сжатого воздуха у смесителя

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5 = 34300 \text{ Па} = 0,343 \text{ кПа}. \quad (\text{Д.7})$$

Диаметр корпуса подводящего устройства

$$D_k = (3 \dots 4) \cdot d = 3,5 \cdot 251 = 879 \text{ мм}. \quad (\text{Д.8})$$

В качестве корпуса подводящего устройства принята труба по ГОСТ 10704-76  $\varnothing 920 \times 8$  мм.

Диаметр пусковой трубы

$$d_{nc} = (0,6 \dots 0,7) \cdot d = 0,65 \cdot 251 = 163 \text{ мм.} \quad (\text{Д.9})$$

В качестве пусковой принята труба по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 168 \times 8$  мм.

Диаметр воздухоподводящего трубопровода

$$\begin{aligned} d_6 &= \sqrt{\frac{4 \cdot Q_6 \cdot p_0}{\pi \cdot v_6 \cdot (p_0 + \rho \cdot g \cdot h)}} = \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot 0,35 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{3,14 \cdot 15 \cdot (9,81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5)}} = 148 \text{ мм,} \end{aligned} \quad (\text{Д.10})$$

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

$v_6$  – скорость воздуха в воздухопроводе,  $v_6 = 15$  м/с.

В качестве воздухоподводящего трубопровода принята труба по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 168 \times 8$  мм.

Диаметр трубы подпитки

$$D_n = (0,7 \dots 0,8) \cdot d = 0,75 \cdot 251 = 188 \text{ мм.} \quad (\text{Д.11})$$

В качестве трубы подпитки принята труба по ГОСТ 8732-78  $\varnothing 194 \times 8$  мм.

Площадь кольцевой щели смесителя

$$\begin{aligned} \omega &= 2 \cdot 10^{-2} \cdot Q_6 \cdot \sqrt{\frac{p_0}{p_0 + \rho \cdot g \cdot h}} = \\ &= 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,35 \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot 10^4}{9,81 \cdot 10^4 + 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,5}} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned} \quad (\text{Д.12})$$

Диаметр камеры смесителя

$$\begin{aligned} D_{cm} &= \sqrt{\frac{4 \cdot (\omega + \pi \cdot d_n^2 / 4)}{\pi}} = \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot (6,0 \cdot 10^{-3} + 3,14 \cdot 0,273^2 / 4)}{3,14}} = 0,287 \text{ м.} \end{aligned} \quad (\text{Д.13})$$

## СПРАВКА

об использовании научно-технических разработок Красноармейского индустриального института Донецкого национального технического университета на ОП «Шахта «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь»

На шахте «Стаханова» с 1982 года находится в эксплуатации шламовая эрлифтная установка для чистки зумпфа скипового ствола, разработанная сотрудниками Донецкого национального технического университета (донецкого политехнического института). За время эксплуатации эрлифтной установки подтверждена правомерность принятых технических решений, работоспособность и эффективность установки.

По результатам научных исследований ст. преподавателем Красноармейского индустриального института Донецкого национального технического университета Калиниченко В.В. разработаны и переданы шахте «Стаханова» рекомендации по снижению расхода воздуха шламовым эрлифтом с имеющего в настоящее время место  $Q_6=21\div30\text{м}^3/\text{мин}$  до  $Q_6=18,5\div27\text{м}^3/\text{мин}$  при сохранении подачи  $Q_3=450\text{м}^3/\text{ч}$ . Снижение расхода пневмоэнергии обеспечивается дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель шламового эрлифта.

Разработка дискретной подачи сжатого воздуха в шламовый эрлифт для чистки зумпфа скипового ствола запланирована к внедрению на 2014-2015г.

Разработка системы дискретной подачи воздуха в смеситель эрлифта и рекомендации к ее внедрению выполнены по результатам исследований, проведенных ст. преподавателем КИИ ДонНТУ Калиниченко В.В. при подготовке кандидатской диссертации.



А.М. Качалов  
(Ф.И.О)

Утверждаю:  
 Техн. директор ГП «Красноармейскуголь»  
 А.М. Качалов  
 « 28 » ноября 2013 г.

РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения системы дискретной подачи сжатого воздуха в шламовый эрлифт для чистки зумпфа скипового ствола ОП «Шахта «Стаханова» ГП «Красноармейскуголь»

Экономический эффект от внедрения системы дискретной подачи сжатого воздуха в шламовый эрлифт для чистки зумпфа скипового ствола шахты «Стаханова» будет получен за счет снижения расхода воздуха на установку с  $Q_в = 21 \div 30$  м<sup>3</sup>/мин до  $Q_в = 18,5 \div 27$  м<sup>3</sup>/мин при обеспечении подачи как при базовом, так и новом вариантах  $Q_з = 450$  м<sup>3</sup>/ч.

Экономический эффект от внедрения нового варианта установки в сравнении с базовым вариантом составляет

$$\mathcal{E}_э = (C_1 - C_2) + E_n \cdot (K_1 - K_2), \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – годовые эксплуатационные затраты соответственно по базовому и новому вариантам, грн;

$K_1$  и  $K_2$  – капитальные вложения соответственно по базовому и новому вариантам, грн;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,  $E_n = 0,15$  1/год.

Дополнительные капитальные вложения по новому варианту составят:

- стоимость воздушной задвижки Ду 150 с электромагнитным приводом запорно-регулирующего элемента – 1680 грн.;

- стоимость реле времени – 420 грн.

Других каких либо дополнительных капитальных вложений при внедрении нового варианта эрлифтной установки не требуется.

Годовые эксплуатационные затраты на эрлифтную установку при новом варианте ее эксплуатации уменьшатся за счет сокращения потребного расхода сжатого воздуха.

Так, при базовом варианте средний расход воздуха эрлифтом составляет  $\bar{Q}_в^{баз} = (21 + 30)/2 = 25,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ , при новом варианте -  $\bar{Q}_в^{нов} = (18,7 + 27)/2 = 22,9 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Шламовая эрлифтная установка для чистки зумпфа скипового ствола работает периодически – в течение 1 часа 3 раза в неделю. Тогда годовое уменьшение расхода сжатого воздуха из шахтной пневмосети составит

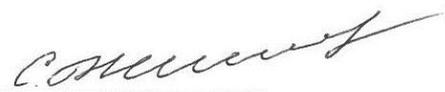
$$\Delta Q_в = (\bar{Q}_в^{баз} - \bar{Q}_в^{нов}) \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 12 = (25,5 - 22,9) \cdot 1 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 12 = 3740 \text{ м}^3/\text{год}.$$

При стоимости производства сжатого воздуха на шахте «Стаханова»  $c_Q = 0,76 \text{ грн./м}^3$ , снижение годовых эксплуатационных затрат при новом варианте работы шламового эрлифта, учитывая неизменность других статей эксплуатационных расходов, составит

$$C_1 - C_2 = \Delta Q_в \cdot c_Q = 3740 \cdot 0,76 = 2840,4 \text{ грн./год.} \quad (2)$$

Тогда экономический эффект от внедрения нового варианта установки в сравнении с базовым вариантом в соответствии с (1) составит

$$\mathcal{E}_r = 2840,4 + 0,15 \cdot [0 - (1680 + 420)] = 17487,4 \text{ грн./год.}$$

  
(подпись)

С.О. Маньковский  
(Ф.И.О.)

Д.3. Материалы по внедрению результатов диссертационных исследований на участке обогащения ГП УК «Краснолиманская»

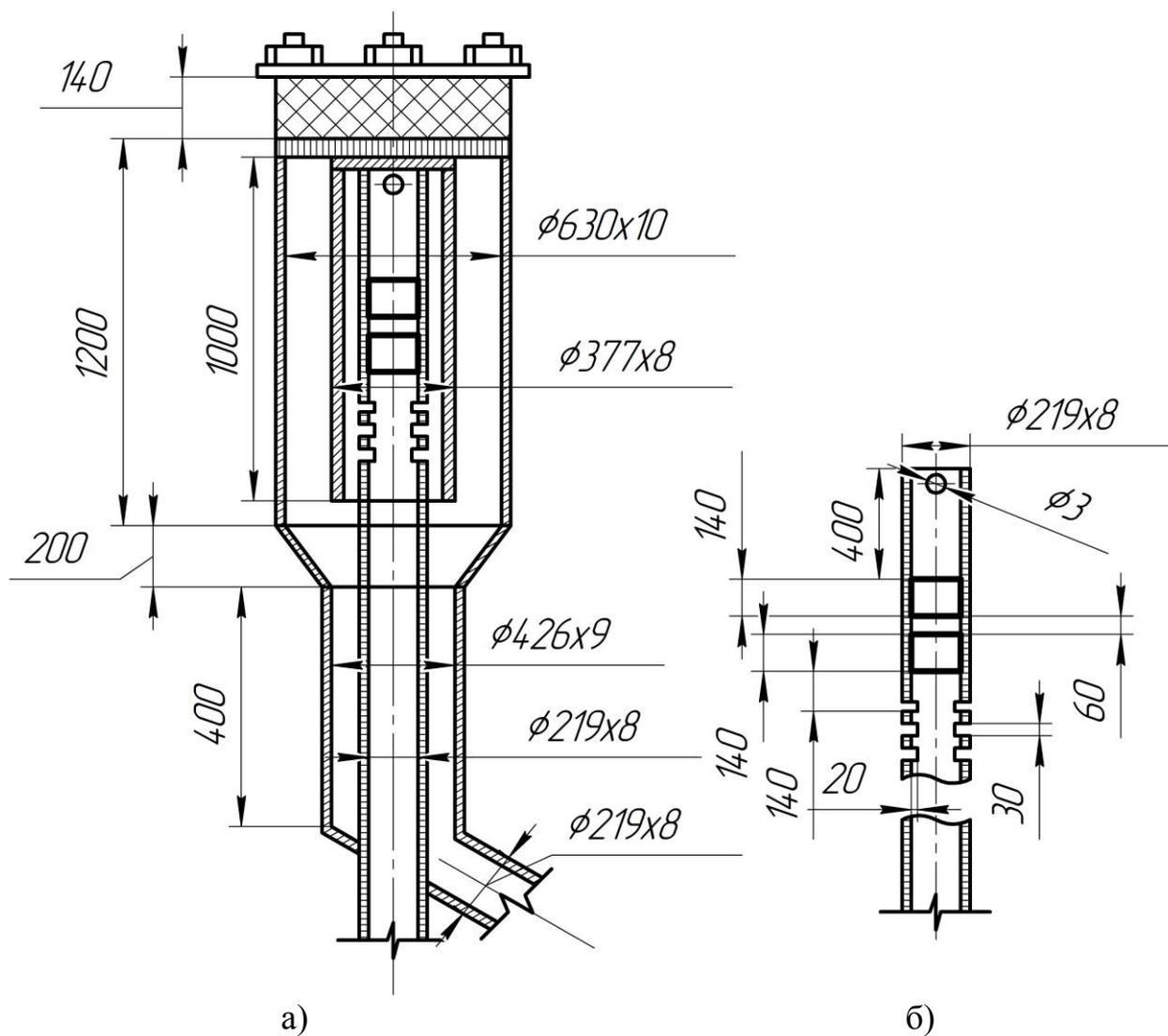


Рис. Д.2 – Схема воздухоотделителя эрлифта участка обогащения ГП УК «Краснолиманская»: а) – общий вид; б) – фрагмент подъемной трубы

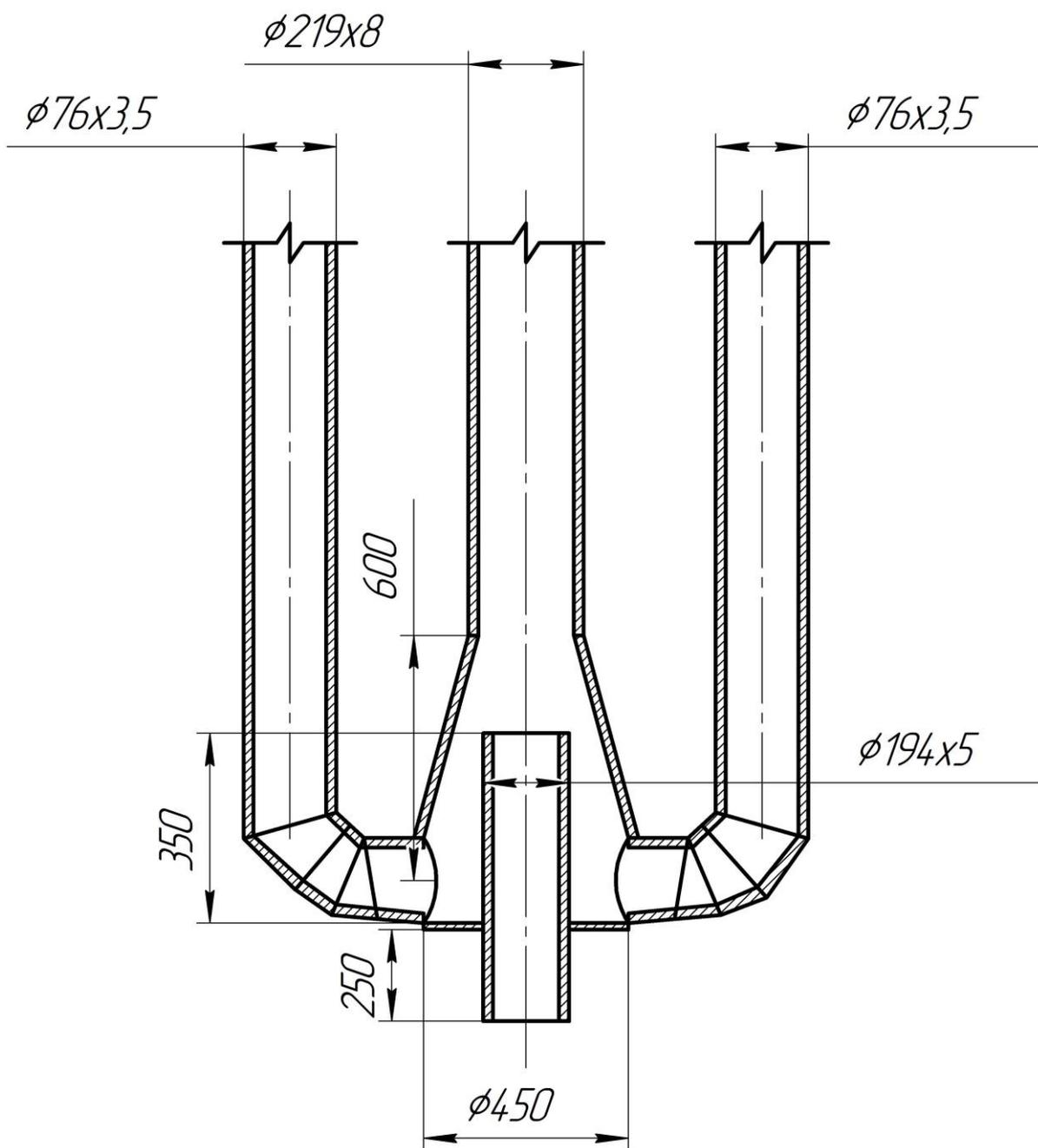


Рис. Д.3 – Схема смесителя эрлифта участка обогащения  
ГП УК «Краснолиманская»

## СПРАВКА

об использовании научно-технических разработок Красноармейского индустриального института Донецкого национального технического университета на ГП «Угольная компания «Краснолиманская»

Для замены шламового насоса ШН250-34, используемого в технологическом процессе обогащения угля для механического перемешивания минеральной суспензии и требующего затратного технического обслуживания из-за интенсивного износа рабочих колес, Красноармейским индустриальным институтом Донецкого национального технического университета по результатам научных исследований ст. преподавателя Калиниченко В.В. разработана эрлифтная установка с дискретной подачей сжатого воздуха.

Красноармейским индустриальным институтом передана службе обогащения техническая документация, содержащая результаты расчета эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха для перемешивания минеральной суспензии, а также технологическую схему установки и чертежи основных узлов эрлифта (смесителя и воздухоотделителя).

Эрлифтная установка с дискретной подачей сжатого воздуха для перемешивания минеральной суспензии запланирована к внедрению на ГП «Угольная компания «Краснолиманская» в 2014-2015 г.г.

Главный механик  
ГП «УК «Краснолиманская»



(подпись)

Н.С.Костев  
(Ф.И.О)

Генеральный директор  
 М.П. О.А. Козлов



### РАСЧЕТ

ожидаемого экономического эффекта от внедрения эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха для перемешивания минеральной суспензии в технологическом процессе обогащения ГП «Угольная компания «Краснолиманская»

Экономический эффект от внедрения эрлифтной установки с дискретной подачей сжатого воздуха (новый вариант) для перемешивания минеральной суспензии в технологическом процессе обогащения ГП «Угольная компания «Краснолиманская» будет получен за счет снижения эксплуатационных расходов в сравнении с базовым вариантом, в качестве которого принят существующий вариант перемешивания минеральной суспензии шламовым насосом ШН250-34.

Экономический эффект от внедрения нового варианта установки в сравнении с базовым вариантом составляет

$$\mathcal{E}_2 = (C_1 - C_2) + E_n \cdot (K_1 - K_2), \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – годовые эксплуатационные затраты соответственно по базовому и новому вариантам, грн;

$K_1$  и  $K_2$  – капитальные вложения соответственно по базовому и новому вариантам, грн;

$E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений,  $E_n = 0,15$  1/год.

Основные капитальные затраты по базовому варианту установки:

- стоимость шламового насоса ШН250-34 - 39800 грн.

Основные капитальные вложения по новому варианту:

- стоимость эрлифта (металлоконструкция) - 5320 грн.;

- стоимость винтового безмасляного компрессора низкого давления ВС30-1,5 – 176700 грн.;

- стоимость ресивера РВ 500.11 – 5814 грн.;

- стоимость реле времени – 420 грн.

Принимаем, что капитальные затраты на остальные составляющие установок (насосной - базовой и эрлифтной - новой) – стоимость трубопроводов, запорно-регулирующей арматуры и др. равноценны и в сравнительных расчетах не учитываются.

Годовые эксплуатационные расходы на ремонт и поддержание в работоспособном состоянии шламового насоса ШН250-34, включающие стоимость запасных частей (рабочие колеса, сальники и др.), заработную плату ремонтного персонала и др. –  $\Delta C_1 = 45000$  грн.

Эксплуатационные расходы на ремонт и поддержание в работоспособном состоянии эрлифтной установки пренебрежимо малы и в расчете не учитываются.

Разница в энергопотреблении при базовом и новом вариантах установок учитывается по значению установленной мощности электродвигателей шламового насоса ШН250-34 – 110кВт и компрессора низкого давления ВС30-1,5 – 22кВт. При 300 рабочих дней в году, 16 рабочих часах за сутки и стоимости электроэнергии 0,83грн./кВт·ч, уменьшение стоимости энергопотребления установкой для перемешивания минеральной суспензии составит:

$$\Delta \mathcal{E} = (110 - 22) \cdot 300 \cdot 16 \cdot 0,83 = 420710,4 \text{ грн.}$$

Тогда экономический эффект от внедрения нового варианта установки в сравнении с базовым вариантом в соответствии с (1) составит

$$\mathcal{E}_2 = (C_1 - C_2) + E_n \cdot (K_1 - K_2) = \Delta C_1 + \Delta \mathcal{E} + E_n \cdot (K_1 - K_2) = 45000 + 420710,4 + 0,15 \cdot [39800 - (5320 + 176700 + 5814 + 420)] = 443442,3 \text{ грн/год.}$$

Главный механик  
ГП «УК «Краснолимаская»



(подпись)

Н.С.Костев  
(Ф.И.О)

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Определение числа Рейнольда и кинематической вязкости смеси в подъемной трубе эрлифта / Логвинов Н.Г., Надеев Е.И., Калиниченко В.В. [та ін.] // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – Вип. 42. – С. 144 – 148.
2. Определение плотности смеси в эрлифте / В.В. Вознесенский, А.И. Ганза, В.В. Калиниченко [та ін.] // Вісник інженерної академії України. – 2005. – № 2-3, С. 74 – 78.
3. Калиниченко В.В. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – №5 (979). – С. 110 – 118.
4. Калиниченко В.В. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 2(26). – С. 151 – 164.
5. Калиниченко В.В. Экспериментальное обоснование влияния дискретной подачи сжатого воздуха на энергоемкость рабочего процесса эрлифта / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2014. – № 1 (43). – С. 45 – 50.
6. Калиниченко В.В. Аналитическое решение математической модели рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, Г.В. Улитин, В.В. Калиниченко MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – 2014. – Vol. 16 №5. – С. 137 – 140.
7. Гейер В.Г. Новые технологические схемы и средства шахтного водоотлива. - Донецк: ДПИ, 1972. - 35 с.

8. Малыгин С.С., Усков Е.В. Эрлифты как средство шахтного водоотлива // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 29. - Киев: Техніка. – 1972. - С. 93-97.

9. Гейер В.Г., Малыгин С.С. Эрлифты для участкового и вспомогательного водоотлива // Уголь Украины. – 1965. - №1. - С. 26-27.

10. Гейер В.Г., Каплюхин А.А., Данилов Е.И., Дергач В.И. Наклонные эрлифты для очистки зумпфов и водоотливы из них // Уголь Украины. – 1979. - № 5. - С. 28-29.

11. Трейгер А.В., Степных С.И. Применение эрлифтов для откачки воды из ствола при углубке // Уголь Украины. – 1982. - № 10. - С. 19-20.

12. Методические рекомендации по применению средств механизации очистки шахтных водосборных емкостей // Гейер В.Г., Антонов Я.К., Боруменский А.Г., Малеев В.Б., Малыгин С.С., Дулин В.С., Данилов Е.И., Лазаренко В.И., Яковлев В.М., Вознесенский В.В., Триллер Е.А., Мизерный В.И., Трейгер А.В., Кононенко А.П., Гого В.Б. – Донецк: ЦБНТИ Минуглепрома УССР, 1983. – 50 с.

13. Триллер Е.А. Разработка схем и средств транспорта горной массы из подземных технологических емкостей: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1983. – 232 с.

14. Кузнецов П.М. Применение эрлифтов для золоудаления // Теплоэнергетика. – 1957. - №10. - С. 50-53.

15. Гейер В.Г., Пащенко В.С. Эрлифтные установки для транспортирования золошлаковых смесей // Энергетик. – 1979. - № 4. - С. 18-20.

16. Миргородский В.Г., Панасовский О.Г. Совершенствование гидравлической системы сбора золы и шлака на электрических станциях // Теплоэнергетика. – 1988. - №2. - С. 49-51.

17. Гейер В.Г., Кононенко А.П., Усков Е.В., Григорьев А.С., Климов С.В., Краснов В.А. Совершенствование системы энергоснабжения эрлифтов гидрозолошлакоудаления // Энергетик. – 1986. - № 8. - С. 14-15.

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

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

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

21. Гого В.Б. Особенности работы комплексной газлифтной системы гидротранспорта-газоочистки продуктов сгорания угля как синергетической структуры // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 27, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ. – 2001. - С. 119-122.

22. Зайцев Ю.В. Перспективы развития газлифтного способа подъема жидкости из скважин // Нефтяное хозяйство. – 1969. - №12. - С. 1-7.

23. Бутряков П.Н. Некоторые результаты газлифтной эксплуатации // Нефтяное хозяйство. – 1982. - №3. - С. 52-55.

24. Малыгин С.С. Расчет гидротранспортных эрлифтов малой длины // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Випуск 20. - Киев: Техніка. – 1970. - С. 130-136.

25. Кириченко Е.А. Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъема полезных ископаемых: Дис. ... докт. техн. наук: 05.05.06. – Днепропетровск: НГАУ, 2001. – 337 с.

26. Эрлифтные установки: Учебное пособие / В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, Я.К. Антонов – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.

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

28. Гейер В.Г., Груба В.И., Костенко А.Г., Перов И.В., Качура М.Н., Шаповалов А.Д. Эксплуатация гидрошахты «Красноармейская №2» с эрлифтным подъемом // Уголь Украины. – 1968. - № 9. - С. 38-40.

29. Усков Е.В., Миргородский В.Г., Миргородский В.Г., Стегниенко А.П. Первые результаты эксплуатации эрлифтной установки шахты «Самсоновская №1» // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 31. - Киев: Техніка. – 1973. - С. 111-115.

30. Малеев В.Б., Данилов Е.И., Яковлев В.М. Специальные средства водоотлива и гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей: Учебн. пособие. – Донецк: ДПИ, 1986. – 36 с.

31. Стифеев Ф.Ф. Разработка эрлифтов для подъема пульп повышенной плотности: Дис.... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1985. - 262 с.

32. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт: Дис. ... канд. техн. наук: - Донецк: ДПИ, 1963, том I - 209 с., том II – 140 с.

33. Карпушин М.Ю. Обоснование параметров рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси): Дис. ... канд. техн. наук: - Донецк: ДонНТУ, 2013.– 255 с.

34. Гейер В.Г. Энергетическая оценка гидравлических подъемов // В кн.: Труды Донецкого политехнического института. Выпуск 10.– том XLVI. - Донецк: ДПИ. - 1960. - С. 5-19.

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

36. Кононенко А.П. Теория и рабочий процесс эрлифтов: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.17. - Донецк: ДонНТУ, 2007. - 565 с.

37. Кириченко Е.А., Кириченко В.Е., Евтеев В.В. Теория и алгоритм расчета снарядного течения в эрлифте. Днепропетровск: Национальный горный университет. – 2013. – 263 с.

38. Расчет и выбор оптимальных характеристик гидравлического комплекса для добычи железомарганцевых конкреций со дна Мирового океана / [Борисов А.А., Грибанов А.М., Пащенко В.С., Шевченко Ф.Л.]. – Геленджик: ПО “Южморгеология”, 1990. – 56 с.

39. Гого В.Б. Разработка газлифтных систем, использующих отходящие газы предприятий угольной промышленности: Дис.... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1985. - 233 с.

40. Кононенко А.П. Разработка эрлифтных установок с пароструйными компрессорами: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06; 05.14.19. - Донецк: ДПИ, 1988. – 381 с.

41. Репин Н.Н. Основные закономерности движения многокомпонентных смесей и их приложение в фонтанной и газлифтной добыче. Дисс. ... докт. техн. наук. - Уфа: УфНИИ, 1966. – 338 с.

42. Малыгин С.С., Малеев В.Б. К вопросу обоснования рациональной формы сечения подъемной трубы короткого эрлифта // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 16, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ – 2000. - С. 198-203.

43. Сулейманов А.Б., Гурбанов Р.С., Мамедов А.И., Рашидов М.М., Пашаев Н.Г., Микаилов Н.А. Механическое воздействие на восходящий поток газожидкостной смеси с целью увеличения КПД газлифтных скважин // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. – 1989. - №5. - С.41-45.

44. Протодряконов И.О., Люблинская И.Е. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость. Л., 1990.- 349 с.

45. Невструева Е.И., Хлесткин Д.А., Антидзе Т.Т., Дворина Г.М. Гидродинамика двухфазных неравновесных потоков. Труды ЦКТИ, Гидравлика и теплообмен в элементах энергетического оборудования, вып. 101, Л., 1970. - с. 183-188.

46. Муравьев И.М., Андриасов Р.С., Гиматудинов Ш.К., Говорова Г.Л., Полозков В.Т. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. М., 1970. - 447 с.

47. Миропольский З.Л., Шнеерова Р.И. и др. Влияние теплового потока и геометрических форм канала на объемное паросодержание среды при кипении. Труды ЦКТИ, Гидравлика и теплообмен в элементах энергетического оборудования, вып. 101, Л., 1970. - с. 202-207.

48. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. - 292 с.

49. Исангулов К.И. Исследование особенностей движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах и разработка методов повышения эффективности процесса лифтирования. Диссерт. канд. техн. наук, Уфа, 1970 (Дк 70-5/3163).

50. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1976. – 197 с.

51. Кононенко А.П., Карпушин М.Ю. Рабочий режим и особенности формирования подачи эрлифта в условиях переменных притоков гидросмесей (жидкостей). MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. - Lublin. - 2010. - Vol. 12 C. - pp. 300-308.

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

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

54. Субботин В.И., Похвалов Ю.Е., Михайлов Л.Е., Кронин И.В., Леонов В.А. Временные и структурные характеристики газожидкостного потока при снаряжном течении // Теплоэнергетика. – 1976. - №1. - С. 67-70.

55. Субботин В.И., Похвалов Ю.Е., Леонов В.А. Структура снарядного пароводяного потока // Теплоэнергетика. – 1977. - №7. - С. 65-67.
56. Маркович Э.Э. Образование и длина жидких пробок в газлифтных скважинах // Нефтяное хозяйство. – 1991. - №12. - С. 22-23.
57. Стырикович М.А., Полонский В.С., Циклаури Г.В. Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций. - М.: Наука, 1982. - 370 с.
58. Теплопередача в двухфазном потоке / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта: Пер. с англ. - М.: Энергия, 1980. – 328 с.
59. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. II. – М.: Наука, Гл. ред. физ.мат. лит., 1987. – 360 с.
60. Гриценко А.И., Клапчук О.В., Харченко Ю.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах.- М.:Недра, 1994.– 238 с.
61. Исследование турбулентных течений двухфазных сред / Под ред. Кутателадзе С.С. - Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1973. – 315 с.
62. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. - М.: Мир, 1972.- 440 с.
63. Хьюитт Д., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. - М.: Энергия, 1974. – 408 с.
64. Движение газожидкостных смесей в трубах / В.А Мамаев., Г.Э. Одишария, О.В. Клапчук, А.А. Точигин, Е.И. Семенов - М.: Недра, 1978. – 271 с.
65. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. I. – М.: Наука, Гл. ред. физ. - мат. лит., 1987. – 464 с.
66. Сорокин Ю.Л. Об условиях устойчивости некоторых режимов движения газо-жидкостных смесей в вертикальных трубах // Прикладная механика и техническая физика. – 1963. - №6. - С. 160-165.
67. Сорокин Ю.Л., Пушкина О.Л. О режимах течения газожидкостных смесей // Труды ЦКТИ. Выпуск 47. – Л. - 1964. - С. 72-82.

68. Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л. О гидродинамической устойчивости некоторых газожидкостных систем // Сб. ст.: Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. - М.-Л.: Госэнергоиздат. – 1961. - С. 315-324.

69. Сорокин Ю.Л., Кирдяшкин А.Г., Сорокин В.Н. Покусаев Б.Г. Исследование режимов течения газожидкостной смеси методом электропроводности // В кн.: Гидравлика газожидкостных смесей и потоков при сверхкритическом давлении. Выпуск 59. - Л.: Труды ЦКТИ, Котлотурбостроение, 1965. - С. 296-301.

70. Мойссис, Гриффитс. Влияние входных условий на снарядный режим течения двухфазной смеси // Труды американского общества инж.-мех., Теплопередача, серия С, февраль 1962, том 84, №1, С. 38-51.

71. Мойссис. Переход от снарядного к эмульсионному режиму течения двухфазной среды // Труды американского общества инженеров-механиков, серия С. Теплопередача. - Том 85. – 1963. - № 4. - С. 93 - 98.

72. Субботин В.И., Похвалов Ю.Е. Влияние обогрева на структуру снарядного пароводяного потока в трубе // Теплоэнергетика. – 1983. - №7. - С. 48-51.

73. Похвалов Ю.Е., Субботин В.И. Статистические параметры снарядного двухфазного течения // Теплоэнергетика. – 1988. - №2. - С. 28-33.

74. Обручкова Л. Р., Похвалов Ю. Е. Влияние давления на структурные параметры снарядного восходящего пароводяного потока в трубе // Теплоэнергетика, №3, 2001, с. 49-52.

75. Болотов А.А., Вайсблат М.Б., Минухин Л.А. Исследование структуры потока при движении парожидкостной смеси в вертикальных трубах // Теплоэнергетика. – 1967. - №11. - С. 79-84.

76. Новохацкий Е.М. Влияние диаметра трубы на структуру потока двухфазной жидкости, движущейся в вертикальных трубках // Изв. вузов, Энергетика, 1961, №4, С. 93-97.

77. Малеев В.Б., Малыгин С.С., Удовенко С.А. Стеkanie пленки жидкости в подъемной трубе эрлифтной установки // Труды международной

научно-технической конференции "Горная энергомеханика и автоматика". - Том 1. - Донецк: ДонНТУ. – 2003. - С. 163-169.

78. Малеев В.Б., Удовенко С.А. Влияние формы поперечного сечения подъемной трубы короткого эрлифта на величину его подачи // Вісник Криворізького технічного університету. - Випуск 8. – 2005. - С. 88-92.

79. Малеев В.Б., Удовенко С.А. Влияние пленки жидкости на сопротивление движению газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта // Проблеми експлуатації обладнання шахтних стаціонарних установок: Збірник наукових праць. Донецьк: ВАТ «НДІГМ імені М.М. Федорова». – Вип. 96. - 2003. – С. 133-140.

80. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976. - 296 с.

81. Гриценко А.И., Клапчук О.В., Харченко Ю.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. М.: Недра, 1994. - 238с.

82. Романовский П.И. Ряды Фурье. Теория поля. Аналитические и специальные функции. Преобразование Лапласа. – М.: Наука, 1980. - 336с.

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

84. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 331 с.

85. Арманд А.А., Невструева Е.И. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Известия ВТИ. – 1950. - №2 (178). - С. 1-8.

86. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // В кн.: Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. - М.: Изд-во АН СССР. – 1955. - С. 21-34.

87. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Донецк: ДПИ, 1982. – 323 с.

88. Шевченко В.Ф. Исследование и разработка узла подвода пневматической энергии в эрлифте: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.173. - Донецк: ДПИ, 1974. – 183 с.

89. Кононенко А.П., Гусак А.Г. Экспериментальное подтверждение влияния вида структуры водовоздушного потока на энергоемкость эрлифта // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки, Науковий журнал. - 2009. - № 1. - С. 34-42.

90. Айтемиров З.А. Некоторые вопросы движения пробковой структуры газонефтяного потока // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. - 1969. - №8. - С. 39-41.

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

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

93. Делайе Дж, Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 424 с.

94. Малеев В.Б., Лисицын Д.А., Локтионов Г.Л. Основы подобия и моделирования эрлифтов // Наука-практика: Научно-метод. сб. Выпуск 4. - Донецк: ДонГТУ. – 1999. - С. 173-192.

95. Малеев В.Б. Сходственные режимы эрлифтных установок // В сб.: Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГАУ. – 1999. - №2(61). – С. 168-173.

96. Малеев В.Б. Соотношение между основными параметрами подобных эрлифтов // Науковий вісник НГА України. – 1999. - №2. – С. 49-50.

97. Малыгин С.С. Подобие эрлифтов // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 88. - Киев: Техніка. – 1991. - С. 51-58.

98. Акагава К. Исследование пульсаций падения давления при двухфазном снарядном течении // *Bulletin of the JSME*. - Том 14. – 1971. - №71. - С. 447-469.

99. Арсенов В.Г. Экспериментальные исследования области существования пробкового режима и гидравлических сопротивлений при течении двухфазной смеси в трубах // Сб. тр.: Гидродинамика и акустика одно- и двухфазных потоков. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР. – 1983. - С. 13-17.

100. Гешев П.И., Кроковный П.М. Локальные характеристики снарядного режима в горизонтальной трубе // В сб.: Гидродинамика и теплообмен в одно- и двухфазных средах. – Новосибирск. – 1979. - С. 183-188.

101. Дзидзигури А.А., Метревели Л.И. Характер пульсации давления при движении газожидкостных смесей в подъемной трубе эрлифта // В кн.: Горная электромеханика и шахтная аэрология. Сб. статей Института горной механики АН ГССР, ч. 2. - Тбилиси: Мецниереба. – 1971. - С. 105-111.

102. Гужов А.И., Медведев В.Ф., Савельев В.А. Гидравлические сопротивления при пробковой структуре движения газомульсионных смесей // *Нефтяное хозяйство*. – 1981. - №2. - С.55-56.

103. Мамаев В.А., Исунов Г.П. Кинематическая структура пробкового газожидкостного течения в трубе // *Нефтяное хозяйство*. – 1970. - №8. - С. 65-67.

104. Мамаев В.А., Исунов Г.П. Профиль скоростей в пробковом газожидкостном течении // *Нефтяное хозяйство*. – 1969. - №12.- С. 50-52.

105. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии. – Киев: Вища школа, 1976. – 184с.

106. Горский В.Г., Адлер Ю.П. Планирование промышленных экспериментов. – М.: Металлургия, 1974. – 264с.

107. Тимошенко Г.М., Зима П.Ф. Теория инженерного эксперимента: Учебное пособие. – К.: УМК ВО, 1991. – 124с.

108. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. РД 50-213-80. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 320с.

109. Теория инженерного эксперимента: Учебное пособие / Тимошенко Г.М., Зима П.Ф. – Киев: УМК ВО, 1991. – 124с.

110. Средства гидромеханизации: учебн. пособ./ З.Л. Финкельштейн, Л.Н. Козыряцкий. - Алчевск: ДонГТУ, 2013. - 168 с.

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

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

113. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. – Донецк: ДПИ, 1982. – 323 с.