

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА
УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

КАРПУШИН Михаил Юрьевич

УДК 621.695

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА В
УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИТОКОВ ЖИДКОСТИ (ГИДРОСМЕСИ)

Специальность 05.05.17. – «Гидравлические машины и
гидропневмоагрегаты»

Диссертация
на соискание научной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Кононенко А.П.

Донецк - 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	10
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	16
1.1. Актуальность научной задачи	16
1.2. Анализ состояния задачи	24
1.2.1. Существующие способы изменения подачи эрлифта и их особенности	24
1.2.2. Особенности блочного воздуходообеспечения эрлифтов от центробежных (радиальных) нагнетателей в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей)	31
1.2.3. Особенности блочного воздуходообеспечения эрлифтов источниками пневмоэнергии неизменной производительности в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей)	34
1.3. Цель, задачи и методика исследований	35
2. РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ ЭРЛИФТОВ С БЛОЧНЫМ ПНЕВМОСНАБЖЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ (ГИДРОСМЕСЕЙ)	37
2.1. Блочное пневмоснабжение эрлифтов от серийно производимых центробежных (радиальных) нагнетателей	37
2.1.1. Теоретический диапазон подач эрлифтов	37
2.1.2. Диапазон подач эрлифтов с учетом влияния потерь напора (давления) в подающей трубе на рабочий режим нагнетателя сжатого воздуха	48
2.2. Подача эрлифтных установок с блочными источниками пневмоэнергии неизменной производительности	60
2.3. Энергетически оптимальный способ изменения подачи эрлифта	73
2.4. Выводы	77

3. ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ (ГИДРОСМЕСИ) В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ	79
3.1. Обоснование целесообразности разработки эрлифтной установки с близким к постоянному давлением в смесителе в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси)	79
3.2. Гидравлическая схема и физическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы	81
3.3. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы	89
3.4. Особенности рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы	95
3.5. Выводы	106
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ	109
4.1. Задачи и обоснование выбора объекта экспериментальных исследований	109
4.2. Экспериментальная установка и измерительный комплекс	110
4.3. Объем, методика и результаты экспериментальных исследований	117
4.4 Выводы	129
5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ (ГИДРОСМЕСИ) В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ	130

5.1. Определение параметров эрлифтов с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы	130
5.2. Опытно-промышленная эрлифтная установка удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ПАО «Донбассэнерго»	137
5.2.1. Общие положения и исходные данные	137
5.2.2. Определение основных параметров эрлифтной установки для удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС	138
5.2.3. Методика приемочных испытаний	148
5.3. Выводы	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	155
ПРИЛОЖЕНИЯ	171
ПРИЛОЖЕНИЕ А	171
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	198
ПРИЛОЖЕНИЕ В	205
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	242

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Условное обозначение	Единица измерения в системе СИ	Наименование условного обозначения
1	2	3
$D (D_э)$	м	диаметр подъемной трубы эрлифта (эквивалентный диаметр)
$d (\bar{d})$	м (-)	диаметр подающей трубы эрлифта (диаметр подающей трубы, отнесенный к диаметру подъемной трубы эрлифта)
d_n	м	диаметр дополнительного подводящего трубопровода
$G (G', G'')$	кг/см ²	приведенная массовая скорость водовоздушной смеси (воды, воздуха)
g	м/с ²	ускорение свободного падения
H	м	высота подъема эрлифта
H'	м	высота подъема жидкости (гидросмеси) относительно отметки 0.000
H_p	м	располагаемый напор системы подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси)
$h (h_{\max}, h_{\min}, h_{\text{опт}})$	м	геометрическое погружение смесителя эрлифта (максимально возможное, минимально допустимое, оптимальное)
$h_в$	м	высота перепада жидкости (гидросмеси) в воздухоотделителе эрлифта
$h_{n.m}$	м	потери напора в подающей трубе эрлифта
$h_{ск}$	м	скоростной напор жидкости (гидросмеси) на выходе из дополнительного подводящего трубопровода в подающую трубу
K_{Qh}, K_{Qp}	-	коэффициент увеличения подачи эрлифта традиционной схемы (эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы)
$k_{Nэ}$	-	коэффициент снижения удельного энергопотребления эрлифтной установки
$k_Q (k_{Qh}, k_{Qp})$	-	коэффициент увеличения подачи эрлифта (при постоянном геометрическом погружении смесителя, при постоянном давлении в смесителе)
l	м	длина подающей трубы

1	2	3
$l_{\text{макс}}$	м	максимальный уровень в приемной емкости
l_n	м	длина дополнительного подводящего трубопровода
$N_{\text{в1}}, N_{\text{в2}}$	Вт	мощность основного и дополнительного потоков сжатого воздуха
$N_{\text{нагпр}}$	кВт	мощность нагнетателя
$\bar{N}_{\text{в2}}$	-	мощность дополнительного потока, отнесенная к мощности основного потока сжатого воздуха
N'	Вт	мощность потока воды на входе в подъемную трубу
$n_{\text{э}} (n_{\text{э, мин}}, \bar{n}_{\text{э}})$	Вт·с/м ³ ·м (Вт·с/м ³ ·м, -)	удельное энергопотребление эрлифтной установки (минимальное, безразмерное)
$p (p_0; p_{z_{ja}}, p_{z_j}; p_B, p_B)$	Па	Давление (атмосферное; абсолютное и избыточное в подъемной трубе в сечении z_j ; избыточные в подъемной трубе и дополнительном подводящем трубопроводе на высоте $z_{\text{макс}}$)
p_{gi}	Па	перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i , обусловленный силой тяжести
$p_n (p_{n, \text{макс}}, p_{n, \text{мин}})$	Па	абсолютное давление на выходе из нагнетателя (максимальное и минимальное из диапазона устойчивой работы)
$p_{n.c}$	Па	гидростатическое давление геометрического погружения смесителя эрлифта
$p_{\text{см}} (p_{\text{сма}})$	Па	избыточное (абсолютное) давление в смесителе эрлифта
$p_{\text{тр}}$	Па	давление в дополнительном подводящем трубопроводе на уровне входа в подъемную трубу эрлифта
$p_{\text{три}}, p_{\text{ускi}}, p_{gi} (p_{\Sigma i})$	Па	перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i , обусловленный трением, ускорением, гидростатической составляющей (суммарный)
$Q_{\text{в}} (Q_{\text{в1}}, Q_{\text{в2}})$	м ³ /с	объемный расход воздуха (подаваемый по основному и дополнительному воздухопроводам)
$Q_{\text{в}}^0$	м ³ /с	объемный расход воздуха при нормальных (технических) условиях
$\bar{Q}_{\text{в2}}$	-	дополнительный расход, отнесенный к основному расходу сжатого воздуха

1	2	3
$Q_{в.макс} (Q_{в.опт})$	$м^3/с$	объемный расход воздуха при нормальных (технических) условиях в режиме максимальной подачи эрлифта (в оптимальном режиме работы)
$Q_{гп.макс} ,$ $Q_{гп.ном}$	$м^3/ч$	максимальная и номинальная подачи гидроподъемной эрлифтной установки
Q_n	$м^3/с$	объемная производительность нагнетателя
$Q_{пр}$ ($Q_{пр1}, Q_{пр2}$)	$м^3/с$	объемный приток жидкости (гидросмеси) (основной, дополнительный)
$\bar{Q}_{пр2}$	-	дополнительный приток, отнесенный к базовому притоку жидкости (гидросмеси)
$Q_{пр.б}, Q_{пр.мин} ,$ $Q_{пр.макс} ,$ $Q_{пр.ном}$	$м^3/с$	приток жидкости (гидросмеси) базовый, минимальный, максимальный, номинальный
$Q_э (Q_э баз ;$ $Q_э.опт, Q_э.макс)$	$м^3/с$	объемная подача эрлифта (базисное значение; в оптимальном режиме работы эрлифта и максимальная)
$\bar{Q}_э$	-	подача эрлифта, отнесенная к базисному значению
q	$м^3/м^3$	удельный расход воздуха эрлифта
w', w_1	$м/с$	истинная скорость жидкости (воды)
w'', w_2	$м/с$	истинная скорость газа (воздуха)
w'_0	$м/с$	приведенная скорость жидкости (воды)
w''_0	$м/с$	приведенная скорость газа (воздуха)
$w_{п.т.}$	$м/с$	скорость жидкости (гидросмеси) в подающей трубе эрлифта
$w_{см}$	$м/с$	приведенная скорость водовоздушной смеси
x	-	массовое расходное газосодержание двухфазной смеси
z	$м$	вертикальная координата (расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы эрлифта)
$z_j (z_{j.макс} ,$ $z'_{j.макс} , \bar{z}_j)$	$м$	вертикальная координата подвода дополнительного притока в подъемную трубу эрлифта (максимально возможная, максимально возможная с учетом потерь напора в дополнительном подводящем трубопроводе, безразмерная)

1	2	3
α (α_{\max} , α_{\min} , α_{∂})	-	относительное погружение смесителя эрлифта (максимальное, минимальное, относительное динамическое)
β	-	объемное расходное газосодержание двухфазной смеси
Δh	м	превышение уровня жидкости в приемной емкости над уровнем в зумпфе
$\Delta h_{\partial.t}$	м	потери напора потока жидкости (гидросмеси) в дополнительном подводящем трубопроводе
$\Delta p_{n.t}$	Па	перепад давления потока жидкости (гидросмеси) в подающей трубе эрлифта
$\Delta p_{тр}$	Па	потери давления в дополнительном подводящем трубопроводе
η_n	-	КПД нагнетателя
$\eta_{\partial h}$	-	КПД эрлифта при постоянном геометрическом погружении смесителя
$\eta_{\partial p}$	-	КПД эрлифта при постоянном давлении в смесителе
$\eta_{\partial n}$	-	КПД эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы
$\eta_{\partial t}$	-	КПД эрлифта традиционной схемы
$\eta_{\partial \max}$	-	максимальный КПД эрлифта
$\eta_{\partial h \max}$	-	КПД эрлифта при максимальной подаче для максимального геометрического погружения смесителя
$\eta_{\partial h \min}$	-	максимальный КПД эрлифта при минимальном геометрическом погружении смесителя
λ	-	коэффициент трения (Дарси)
ρ', ρ_1	кг/м ³	плотность жидкости (воды)
ρ'', ρ_2	кг/м ³	плотность газа (воздуха)
$\rho''(z)$	кг/м ³	плотность газа (воздуха) в сечении z подъемной трубы эрлифта
ρ_0''	кг/м ³	плотность воздуха при нормальных (технических) условиях
ρ_k	кг/м ³	плотность фазы k ($k = 1, 2$) двухфазной смеси
$\rho_{см}$	кг/м ³	плотность водовоздушной смеси

1	2	3
$\rho_{см\beta}$	кг/м ³	плотность водовоздушной смеси, вычисленная по объемному расходу газосодержанию
$\sum \zeta_n$	-	сумма коэффициентов сопротивления дополнительного подводящего трубопровода
$\sum \zeta_{n.m}$	-	сумма коэффициентов сопротивления подающей трубы эрлифта
τ_w	Па	касательное напряжение на стенке подъемной трубы эрлифта
φ	-	истинное газосодержание двухфазной смеси
χ	м	периметр поперечного сечения трубы
ω	м ²	площадь поперечного сечения трубы

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Востребованность эрлифтных установок в системах водоотлива и гидроподъема энергетических, горнорудных и других предприятий обусловлена рядом преимуществ в сравнении с насосным оборудованием, основные из которых: отсутствие вращающихся и движущихся элементов в проточной части, где движется транспортируемая жидкость (гидросмесь), высокая консистенция транспортируемой гидросмеси при значительной допустимой крупности частиц, саморегулирование подачи эрлифта при изменении в определенном диапазоне притока, простота в обслуживании и эксплуатации.

Основным недостатком эрлифтных установок в сравнении с насосным оборудованием является высокая энергозатратность, что особо ощутимо при работе в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси). Это связано с тем, что при увеличении подачи эрлифта, вызванной поступлением большего притока жидкости (гидросмеси), потери напора (давления) потока в подающей трубе увеличиваются, а давление в смесителе снижается. При широко распространенном блочном воздухообеспечении газожидкостных подъемников от центробежных (радиальных) нагнетателей это приводит к смещению их рабочих режимов и рабочих режимов эрлифтов от номинальных значений, а при использовании источников пневмоэнергии неизменной производительности – к смещению рабочих режимов эрлифтов в область недопустимо низкой энергетической эффективности работы. К тому же, снижение давления в смесителе ведет к уменьшению значения максимально возможной подачи эрлифта, так как движение водовоздушного потока в подъемной трубе подъемника является напорным.

Обеспечение близкого к постоянному давления в смесителе эрлифта при изменении его подачи позволит повысить энергетическую эффективность и расширить диапазон возможных подач установки. Поэтому разработка эрлифтных установок с возможностью обеспечения близкого к постоянному

давления в смесителе в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) является актуальной.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Исследования проводились в рамках основного научного направления кафедры «Энергомеханические системы» ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» по разработке схем и средств транспортирования жидкостей (гидросмесей), научно-исследовательской госбюджетной темы №Н25-10 «Обґрунтування параметрів схем і засобів гідравлічного руйнування твердих масивів та транспортування гідросумішей (рідин) з метою підвищення технічних показників» (2010 – 2015 гг.), и договора о сотрудничестве между ГВУЗ «ДонНТУ» и Старобешевской ТЭС ПАО «Донбассэнерго» (2009 – 2011 гг.).

Цель и задачи исследований. *Цель исследования* – повышение энергетической эффективности работы и расширение диапазона подач эрлифтной установки в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) за счет обеспечения давления в смесителе близкого к постоянному в процессе работы эрлифта.

Задачи исследования:

а) определить энергетически целесообразные и технически допустимые области эксплуатации, а также возможные диапазоны изменения подач традиционных эрлифтных установок с блочным воздухообеспечением серийно производимыми центробежными (радиальными) нагнетателями и источниками пневмоэнергии неизменной производительности в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей);

б) разработать эрлифтную установку с возможностью эксплуатации в широком диапазоне подач без существенного увеличения потерь давления (напора) в подающей трубе и изменения давления в смесителе счет подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы;

в) разработать математическую модель рабочего процесса эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы;

г) провести экспериментальные исследования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы с целью подтверждения адекватности разработанной математической модели;

д) разработать программу для численного решения математической модели эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы;

е) обосновать зоны энергетически целесообразного использования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы и определить рациональные параметры и характеристики рабочего процесса таких эрлифтов;

ж) привести рекомендации по разработке эрлифтных установок с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы.

Объект исследования – рабочий процесс эрлифтной установки с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы.

Предмет исследования – параметры рабочего процесса эрлифта – базовые и дополнительные подача и расход воздуха, давление и мощность водовоздушного потока в подъемной трубе.

Методы исследования. Основные использованные методы исследований: анализ и научное обобщение данных с литературных источников, что позволило обосновать актуальность научной задачи и сформулировать задачи исследований; аналитическое исследование совместной работы эрлифтов с центробежными (радиальными) нагнетателями при блочном воздуходообеспечении, а также с источниками пневмоэнергии неизменной производительности позволило определить диапазон подач эрлифтной

установки; методы анализа и синтеза параметров рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) позволили обосновать физическую модель эрлифта, наиболее эффективно работающего в таких условиях; закономерности теории двухфазного течения и гидромеханики положены в основу математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы; численный анализ математической модели позволил обосновать зоны энергетически целесообразного использования и определить рациональные параметры и характеристики эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы; экспериментальный метод исследования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) позволил подтвердить адекватность математической модели рабочего процесса.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые установлены возможные диапазоны изменения подачи эрлифта при блочном воздухообеспечении центробежными (радиальными) нагнетателями, источниками пневмоэнергии неизменной производительности и при работе подъемника в оптимальных энергетических режимах.

2. Разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта, отличающаяся учетом подвода дополнительных притока жидкости (гидросмеси) и расхода воздуха в промежуточное сечение подъемной трубы.

3. Впервые обоснован допустимый диапазон и энергетически оптимальное значение вертикальной координаты сечения подъемной трубы для подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси).

4. Получило дальнейшее развитие физическое обоснование процесса транспортирования жидкости (гидросмеси) эрлифтами в условиях переменных притоков.

Практическое значение полученных результатов состоит в возможности определения энергетически целесообразных и технически допустимых зон применения традиционных эрлифтных установок с блочным

воздухоснабжением центробежными (радиальными) нагнетателями и с источниками пневмоэнергии неизменной производительности, а также в возможности использования полученных в работе результатов и приведенных рекомендаций при разработке эрлифтов с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы.

Разработана и передана Старобешевской ТЭС ПАО «Донбассэнерго» рабочая документация эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости в промежуточное сечение подъемной трубы для удаления случайных стоков котлотурбинного цеха-2. Изготовлены основные узлы и элементы установки. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 67,168 тыс. гривен.

Результаты исследований использованы в ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» в учебном процессе в курсах «Специальные средства и схемы транспортирования жидкостей», «Гидромеханизация, гидро- и пневмотранспорт», при курсовом и дипломном проектировании.

Личный вклад соискателя. Основные положения, которые были получены в процессе выполнения диссертационной работы, приведенные в диссертации и опубликованные в статьях в соавторстве, принадлежат соискателю: [81] - обоснованы диапазоны возможных подач и целесообразные высоты подъема эрлифтов с блочным воздухоснабжением от серийно производимых центробежных нагнетателей без учета потерь напора в подающей трубе; [82]- уточнены диапазоны возможных подач эрлифтов с блочным воздухоснабжением от серийно производимых центробежных нагнетателей; [86] – установлено влияние на гидродинамические характеристики подъемника параметров подъемной и подающей труб; [92] - выполнено экспериментальное обоснование энергетической целесообразности и количественной значимости подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы газожидкостного подъемника; [93]- разработана математическая модель рабочего процесса

эрлифта с подводом дополнительных притока жидкости (гидросмеси) и расхода воздуха в промежуточное сечение подъемной трубы; [94] - получены расчетные характеристики эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и получили одобрение на: VII Международной научно-технической студенческой конференции «Механика жидкости и газа», г. Донецк, 2008 г.; Международной научно-технической конференции АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика» - X, г. Львов, 2009 г.; XII, г. Донецк, 2011 г (лауреат конкурса докладов); XIII, г. Чернигов, 2012 г; XVII Международной научно-технической конференции «Гидроаэромеханика в инженерной практике», г. Черкассы, 2012 г; XVIII Международной научно-практической конференции «Информационные технологии: наука, технология, образование, здоровье» (MICROCAD-2010), г. Харьков, 2010 г..

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей в специальных изданиях, входящих в утвержденный перечень, 1 статья по материалам доклада на конференции, 4 тезиса докладов.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 разделов, заключения и приложений. Общий объем работы составляет 255 страницы, в том числе 120 страниц основного машинописного текста, 58 рисунков, 20 таблиц, 4 приложения на 85 страницах и список литературы из 136 наименований представлен на 16 страницах.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Актуальность научной задачи

Востребованное применение эрлифтов в системах водоотлива и гидроподъема обусловлено рядом их известных технологических и конструктивных особенностей и преимуществ в сравнении с насосами (грунтовыми насосами), основными из которых являются [1,2]:

а) конструктивная простота сварной металлоконструкции в изготовлении и долговечность в эксплуатации из-за отсутствия подвижных элементов в проточной части;

б) существенно более низкое давление в подъемной трубе газожидкостного подъемника по сравнению с давлением в напорном трубопроводе насоса при одинаковых геометрических высотах подъема;

в) при использовании в составе гидроподъемной установки – высокая консистенция транспортируемой гидросмеси (25-30%, а в некоторых условиях – до 70% по объему);

г) автоматическое согласование, в определенном диапазоне, подачи эрлифта с притоками жидкости (гидросмеси).

Последняя из перечисленных особенностей работы эрлифта особенно важна в условиях переменных во времени притоков жидкостей (гидросмесей).

Изменение величин притоков жидкостей (гидросмесей) в промышленных системах водоотлива и гидроподъема обусловлено особенностями их эксплуатации.

В весенний период, из-за повышения уровня грунтовых вод, притоки воды, подлежащие удалению шахтными водоотливными установками (главными, вспомогательными, зумпфовыми) могут увеличиваться в $1,1 \div 1,2$ раз [3-9].

Особенно ощутимо возможное резкое увеличение притоков проявляется в условиях мокрой консервации закрывающихся шахт Донбасса, что в ряде аварийных случаев приводит к затоплению горных выработок. Так, из-за неподготовленности главных водоотливов к удалению дополнительных притоков с закрытых шахт были затоплены шахты «Максимовская», им. Ильича, им. Чеснакова, «Луганская» ПО «Стахановуголь». В 1995 г. произошло затопление выработок шахты «Краснолучская» ПО «Донбассантрацит» из-за скопления и внезапного прорыва воды со стороны выработок шахты «Центральная». Приток практически внезапно вырос с 370 до 700 м³/ч (увеличение в 1,89 раз). В 1999 г. со стороны выработок закрываемой шахты «Панфиловская» ГП «Донецкуголь» произошло аварийное затопление зумпфовой части скипового ствола шахты «Октябрьский рудник» ГП «Донецкуголь», вследствие возрастания притока с 17 до 165 м³/ч (увеличение в 9,7 раз) [10].

Производительность гидроподъемных установок, следовательно, требуемая подачи средства транспортирования гидросмесей, определяется особенностями технологического процесса и может изменяться в условиях шахтного гидроподъема (с учетом и шахтного водоотлива) в 1,34÷1,36 раз (табл. 1.1) [1, 11-16].

Таблица 1.1 - Диапазоны производительностей гидроподъемных установок угольных гидрошахт [1, 11-16]

Наименование гидрошахты и годы эксплуатации гидроподъемов	Производительность гидроподъема (по гидросмеси), м ³ /ч:		Относительное увеличение производительности $\frac{Q_{гп.макс}}{Q_{гп.ном}}$
	номинальная $Q_{гп.ном}$	максимальная $Q_{гп.макс}$	
„Красноармейская“, ПО «Добропольеуголь», 1967-2000 гг.	3200	4288	1,34
им. 50-летия СССР, ПО «Краснодонуголь», 1970-1992 гг.	1700	2312	1,36

Разработанные для добычи полезных ископаемых (песок, песчано-гравийные смеси и др.) эрлифтно-земснарядные установки характеризуются относительным диапазоном подач гидросмеси, составляющим $1,3 \div 1,4$ раз (табл. 1.2) [1, 17-23].

Таблица 1.2 - Подачи эрлифтно-земснарядных установок для добычи полезных ископаемых со дна рек и озер [1, 17-23]

Наименование эрлифтно-земснарядной установки	Подача гидросмеси, м ³ /ч:		Относительное увеличение подачи $\frac{Q_{ЭЗ.макс}}{Q_{ЭЗ.ном}}$
	номинальная $Q_{ЭЗ.ном}$	максимальная $Q_{ЭЗ.макс}$	
Эрлифтно-земснарядные комплексы (10 экз.) НПСО «Запсибнинефтегазстрой» (на реках и озерах г. Сургут, г. Нижневартовск)	640 (ЭЗК-1) 750 (ЭЗК-13М) 850 (ЭЗК-IV)	883 (ЭЗК-1) 1043 (ЭЗК-13М) 1190 (ЭЗК-IV)	1,38 (ЭЗК-1) 1,39 (ЭЗК-13М) 1,4 (ЭЗК-IV)
3 эрлифтно-земснарядные установки института «ВНИИИнеруд»	400	520	1,30
Горно-морская эрлифтная установка (совместный проект Донецкого политехнического института и института «ВНИИПИГорцветмет»)	130	170	1,31
4 эрлифтно-земснарядные комплексы (4 экз.) разработки Донецкого политехнического института для условий «Нефтеюганскспецгидромеханизация», г. Нефтеюганск	850	1105	1,3

В системах гидрозолошлакоудаления тепловых электростанций (ТЭС), работающих на твердом топливе, в зависимости от нагрузки энергоблока притоки золошлаковой гидросмеси изменяются в $1,11 \div 1,50$ раза [24-33] (табл. 1.3).

Особенно значимо изменение притоков золошлаковых гидросмесей на тепловых электростанциях (котельных) с «пиковым» режимом работы. Так, исходя из технологических условий, разработанные для условий «пиковой» водогрейной котельной Кузнецкой ТЭЦ эрлифтные установки предназначены

Таблица 1.3 - Притоки золошлаковых гидросмесей некоторых тепловых электростанций, работающих на твердом топливе и оборудованных эрлифтным гидроподъемом [24-33], разработанные в ДПИ

Наименование ТЭС	Приток золошлаковой гидросмеси, м ³ /ч:		Относительное увеличение притока $\frac{Q_{пр.макс}}{Q_{пр.ном}}$
	номинальный $Q_{пр.ном}$	максимальный $Q_{пр.макс}$	
Приморская ГРЭС (блоки 200 МВт)	800	950	1,19
Экибастузская ГРЭС-1	500	750	1,50
Экибастузская ГРЭС-2	660	775	1,17
Новосибирская ТЭЦ-5, котлы №1, 2	265,4	313	1,18
Новосибирская ТЭЦ-5, котлы №3, 4	205	250	1,22
Павлодарская ТЭЦ-3 (проект)	270	300	1,11

каждая для удаления золошлаков от четырех котлов (работающих в «пиковом» режиме) [34]. В этих условиях величина притока гидросмеси на установку может изменяться четырехкратно - от 150 м³/ч при работе одного котла до 600 м³/ч при работе четырех котлов. Каждый из четырех разработанных эрлифтов

(два рабочих, два резервных), входящие в установку, обеспечивает подачу гидросмеси в диапазоне $150\div 300$ м³/ч (двукратное увеличение подачи). Все эрлифты размещены в зумпфе диаметром 6 м, что увеличивает вероятность заиливания резервных подъемников. Воздухоснабжение осуществляется от воздушных нагнетателей Э200-31-1. Значение диаметра подающей трубы $d = 150$ мм принято исходя из необходимости обеспечения транспортных скоростей в ней при величине притоков 150 м³/ч, что с увеличением этой величины до 300 м³/ч приводит к существенному увеличению потерь напора (давления) в данной трубе, снижению возможной подачи и увеличенному энергопотреблению подъемником. В таких условиях, для обеспечения двукратного увеличения подачи при таком росте притоков, потребовалось бы более значительное, по сравнению с возможным, увеличение глубины зумпфа. Таким образом, «пиковый» режим работы основного технологического оборудования (котлов) и значительный диапазон изменения притоков гидросмеси (4-х кратный) потребовал создания громоздкой и достаточно энергоемкой эрлифтной установки.

При использовании в рассматриваемых нестационарных условиях (в условиях переменных притоков) в качестве средств транспортирования жидкостей (гидросмесей) насосов (грунтовых насосов), согласование их подачи с притоками может обеспечиваться регулированием установок либо за счет изменения напорной характеристики трубопровода его дросселированием или байпасированием, либо за счет изменения частоты вращения ротора насоса или количества работающих насосов [35-38]. И если регулирование насосов водоотливных установок достаточно широко используется в промышленности, то ни перечисленные, ни другие способы регулирования грунтовых насосов в условиях гидроподъемных установок практически не применяются из-за известных сложностей в реализации [39].

Необходимость применения средств регулирования насосных установок приводит к их усложнению и удорожанию, а, зачастую, и к снижению надежности работы. К тому же в ряде практических случаев, в частности, в

системах гидрозолошлакоудаления тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, поддержание величины притоков гидросмеси в технически допустимом для используемого грунтового (багерного) насоса диапазоне обеспечивается за счет дополнительного, не требуемого технологическими условиями работы данной системы, расхода технической воды [24-26, 29, 30-33]. Такой способ согласования подачи грунтового (багерного) насоса с притоками гидросмесей обусловлен, в частности в условиях ТЭС, высокой абразивностью последней и, как следствие, интенсивным износом проточной части насоса, а также, и износом возможных средств регулирования. Существующие высокие требования к надежности работы системы гидрозолошлакоудаления ТЭС и недопустимость аварийного затопления пола котельного отделения приводит к существенному удорожанию процесса удаления золы и шлака.

Преимуществом эрлифтов при работе в нестационарных условиях является автоматическое согласование подачи с притоком жидкости (гидросмеси). Однако свойство самонастраивания на приток и диапазон возможных подач газожидкостного подъемника определяются, во многом, типом источника пневмоэнергии (динамический, объемный, струйный, пневмосеть) и схемой пневмоснабжения (блочная, коллекторная и др.).

Свойство самовыравнивания на переменный по величине приток в наиболее полной мере реализуется в эрлифте за счет изменения геометрического погружения смесителя при неизменном расходе воздуха. Гидродинамические (радиальные) нагнетатели, в силу особенностей их расходных характеристик, снижают свою производительность при увеличении давления сжатого воздуха и наоборот [3, 35]. При наиболее широко распространенном блочном пневмоснабжении эрлифтов этими машинами (один нагнетатель работает на один эрлифт) такое свойство их характеристик снижает интенсивность изменения подач эрлифтов и величину их диапазона. Изменяется также в определенном диапазоне и энергетическая эффективность

работы эрлифтной установки (нагнетателя и эрлифта) от максимально возможной до, иногда, существенно более низкой.

Источники пневмоэнергии с неизменной производительностью в составе эрлифтных установок зачастую не соответствует требуемым значениям технологических параметров – производительности и давлению (объемные компрессоры – поршневые, винтовые и др.), требуют конструктивного усложнения схемы пневмоснабжения (струйные компрессоры) и зачастую, в этом случае, нереализуемы из-за отсутствия первичных источников гидравлической энергии с необходимыми параметрами (в основном с необходимым давлением), а пневмосети достаточно мощных компрессорных станций существуют на ограниченном числе предприятий.

Применение коллекторных схем пневмоснабжения эрлифтов со множеством их вариантов требует, как правило, достаточно сложных средств автоматического регулирования и существенно ограничивает области применения эрлифтных установок.

Изменение подачи эрлифта вследствие переменного притока жидкости (гидросмеси) приводит, как указывалось выше, к изменению потерь напора (давления) в подающей трубе эрлифта, являющейся его необходимой конструктивной составляющей. Увеличение потерь напора (давления) в подающей трубе при увеличении притоков приводит к уменьшению давления в смесителе и снижению подачи эрлифта по сравнению с возможной при постоянстве этого давления. Так, в соответствии с результатами экспериментальных исследований эрлифта [эквивалентный диаметр подъемной трубы $D_э = 624$ мм, диаметр подающей трубы $d = 233$ мм, длина подъемной трубы $H + h = 36,28$ м (H - высота подъема эрлифта, h - геометрическое погружение смесителя)] системы гидрозолошлакоудаления Экибастузской ГРЭС-1 [40, 41] при расходах воздуха $Q_г = 200 \div 300$ м³/мин (3,33 ÷ 5 м³/с) и геометрическом погружении смесителя $h = 7,61$ м подача эрлифта в 1,1 ÷ 1,5 раза меньше, чем подача такого же эрлифта при неизменном давлении в

смесителе, равном гидростатическому давлению $p_{н.с}$ геометрического погружения смесителя $h = 7,61$ м, то есть величине $p_{см} = 0,761$ кгс/см² (70,2 кПа, $p_{см}$ - избыточное давление в смесителе) (рис.1.1). Таким образом, потери напора (давления) в подающей трубе в рассматриваемых условиях приводят к уменьшению возможной подачи эрлифта в 1,1÷1,5 раза. Следовательно, зависимость давления в смесителе (из-за переменных потерь в подающей трубе) от величины притока жидкости (гидросмеси), которую транспортирует эрлифт, сужает возможный диапазон изменения подач эрлифта при прочих равных условиях.

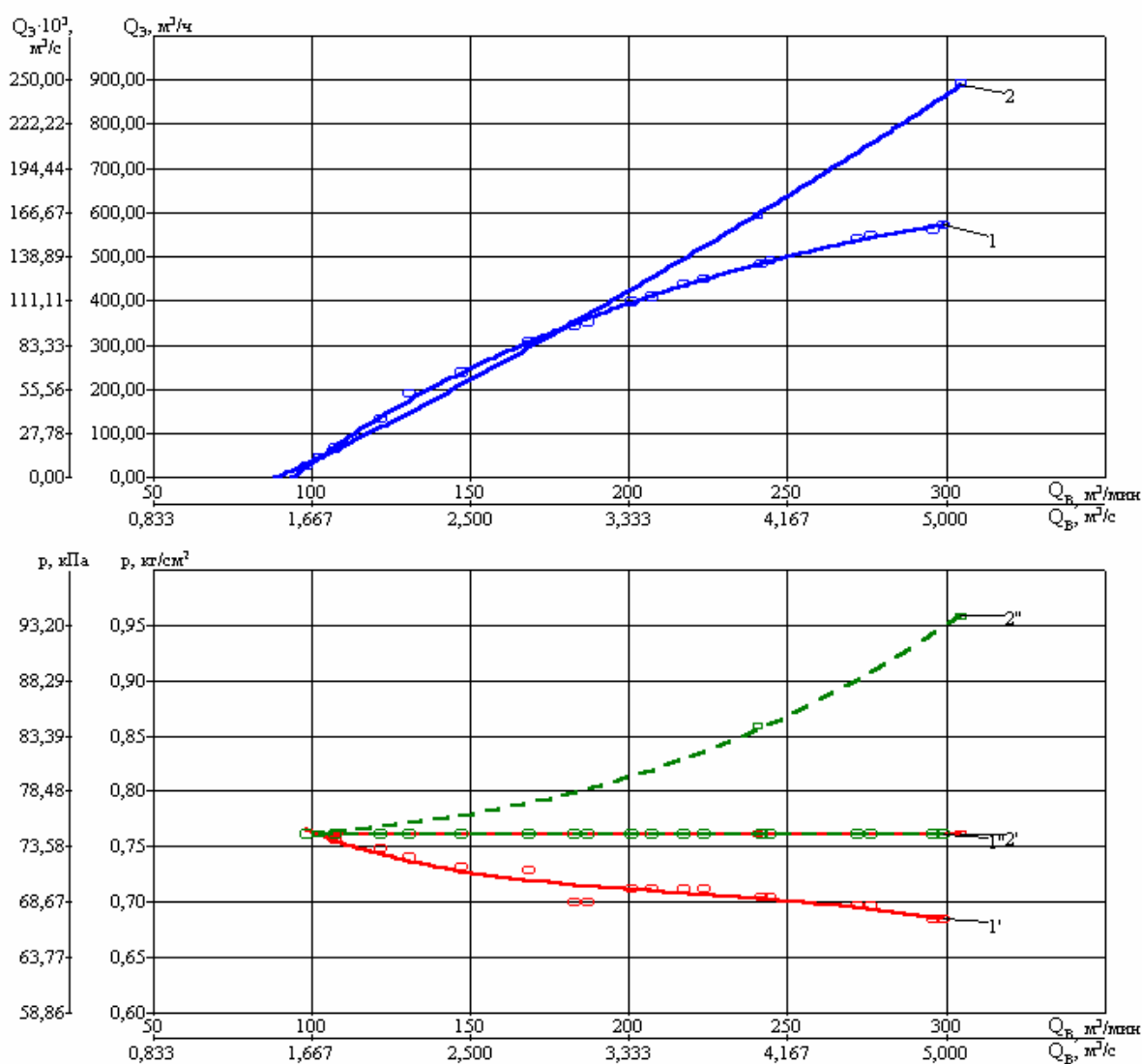


Рисунок 1.1 – Характеристики эрлифтов $D_3 = 624$ мм, $d = 233$ мм, $H+h = 36,28$ м: 1 – $h = 7,61$ м; 2 – $p_{см} = 0,761$ кгс/см² [1, 2 – $Q_3 = f(Q_B)$; 1', 2' – $p_{см} = f(Q_B)$; 1'', 2'' – $p_{н.с} = f(Q_B)$]

Приведенные особенности работы эрлифта в условиях переменных притоков жидкости – влияние на возможный диапазон изменения подачи газожидкостного подъемника типа источника пневмоэнергии, схемы пневмоснабжения и потерь напора (давления) в подающей трубе не нашли потребной глубины исследований в известных работах и требуют существенного уточнения.

Таким образом, уточнение особенностей работы и обоснование параметров рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) является актуальной научной задачей, решение которой позволит повысить эффективность применения газожидкостных подъемников.

1.2 Анализ состояния задачи

1.2.1. Существующие способы изменения подачи эрлифта и их особенности

Существует несколько основных способов изменения подачи эрлифта [1, 2, 42-49]: использование свойства саморегулирования газожидкостного подъемника (саморегулирование геометрического погружения смесителя) при неизменном расходе воздуха; изменение расхода сжатого воздуха при неизменном геометрическом погружении смесителя эрлифта; изменение как геометрического погружения смесителя, так и расхода сжатого воздуха; применение групповой и батарейной схем установок.

Свойство саморегулирования газожидкостного подъемника заключается в том, что изменение подачи эрлифта $Q_э$ при постоянном расходе воздуха $Q_в$ обеспечивается изменением геометрического погружения смесителя h , вызываемого соответствующим изменением притока жидкости (гидросмеси) Q_{np} в зумпф (рис. 1.2) [1, 2]. Увеличение притока Q_{np} приводит к повышению уровня жидкости (гидросмеси) в зумпфе, следовательно - увеличению геометрического погружения смесителя h и подачи эрлифта $Q_э$. При

уменьшении притока Q_{np} происходят обратные процессы - снижение уровня жидкости (гидросмеси) в зумпфе, уменьшение геометрического погружения смесителя h и подачи эрлифта $Q_э$. Энергетическая эффективность работы эрлифта при этом будет максимальной при, как правило, максимально возможном геометрическом погружении смесителя h и снижается при его уменьшении [1, 2].

В данных условиях, кроме соответствующих резервов глубины зумпфа, необходим источник пневмоэнергии, эффективно работающий в значительном диапазоне степеней сжатия газа и обеспечивающий при этом неизменность производительности.

Рекомендуемый диапазон изменения подачи эрлифта (при значении КПД эрлифта не ниже $0,8 \cdot \eta_{э.макс}$, с минимальной $Q_{э1}$ и максимальной $Q_{э2}$ подачами на границах диапазона [рис 1.3]) при постоянном геометрическом погружении смесителя h и изменении расхода воздуха $Q_в$ находится, как правило, в пределах $Q_{э.опт} \leq Q_э \leq Q_{э.макс}$ (где $Q_{э.опт}$ – подача

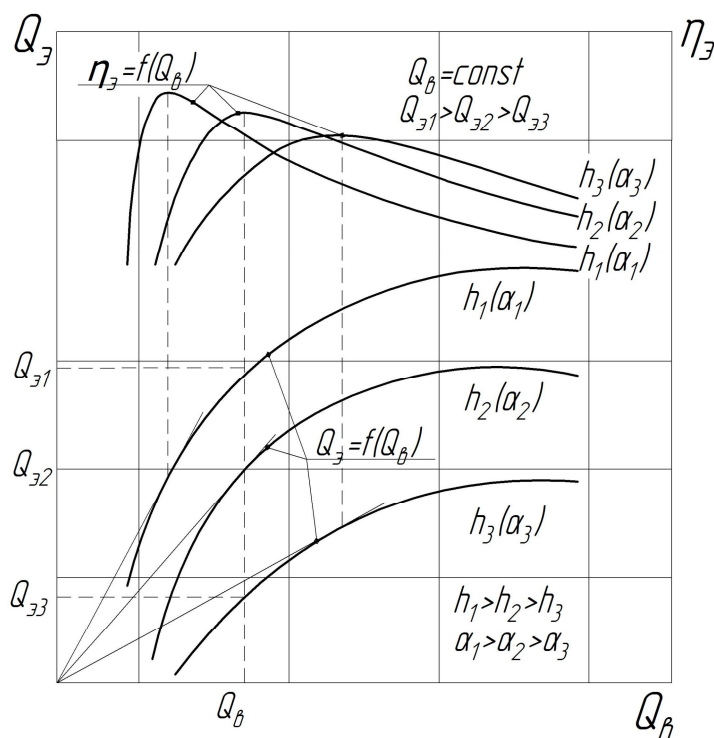


Рисунок 1.2 – Расходные характеристики и зависимости $\eta_э = f(Q_в)$ при различных геометрических погружениях смесителя

эрлифта в оптимальном режиме работы, $Q_{э.макс}$ – максимальная подача

эрлифта), где $Q_{э.макс} / Q_{э.опт} \approx 1,3 \div 1,4$ (рис. 1.3) [1, 2]. При этом смещение текущего рабочего режима по направлению от режима с оптимальной подачей к режиму с максимальной подачей подъемника сопровождается существенным снижением КПД эрлифта за счет, в основном, такого изменения структуры водовоздушного потока в подъемной трубе, которое приводит к увеличению энергоемкости рабочего процесса [40, 50-52]. При этом способе изменения подачи эрлифта исключается необходимость резервирования глубины зумпфа, однако необходимо использование системы автоматического регулирования расхода сжатого воздуха.

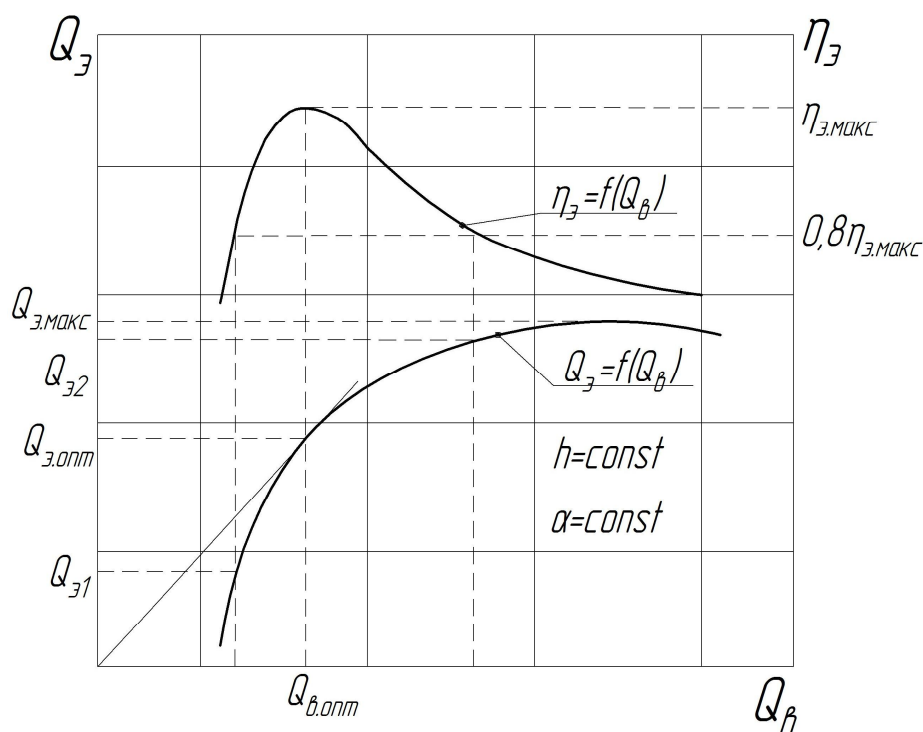


Рисунок 1.3 – Расходная характеристика эрлифта и зависимость $\eta_э = f(Q_э)$ при изменении подачи регулированием расхода воздуха (при неизменном геометрическом погружении смесителя)

Способ изменения подачи эрлифта $Q_э$, сочетающий в себе оба выше описанных способа – саморегулирование эрлифта за счет изменения геометрического погружения смесителя h и изменение расхода воздуха $Q_б$, может преследовать две цели. В случае необходимости обеспечения наибольшего диапазона подачи при минимально возможном изменении геометрического погружения смесителя h (и, следовательно, минимально

возможной глубине зумпфа) расход воздуха необходимо изменять таким образом, чтобы, к примеру, при минимальных притоках $Q_{пр.мин}$ эрлифт работал в энергетически оптимальном режиме (с оптимальной подачей $Q_{э\text{h}_{мин}}^{опт}$) при минимально возможном геометрическом погружении смесителя h , а при максимальных притоках $Q_{пр.макс}$ – в режиме максимальной, хотя и менее энергетически эффективной в сравнении с оптимальной, подачи $Q_{э\text{h}_{макс}}^{макс}$ при максимально возможном геометрическом погружении смесителя h (рис. 1.4).

Для обеспечения максимально возможной энергетической эффективности работы эрлифта во всем диапазоне подач $Q_э$ (соответствующем диапазону притоков $Q_{пр}$) расход воздуха $Q_в$ необходимо изменять таким образом, чтобы каждая, из диапазона требуемых подач эрлифта $Q_э$, обеспечивалась в оптимальном режиме его работы при соответствующем значении геометрического погружения смесителя h (рис. 1.5).

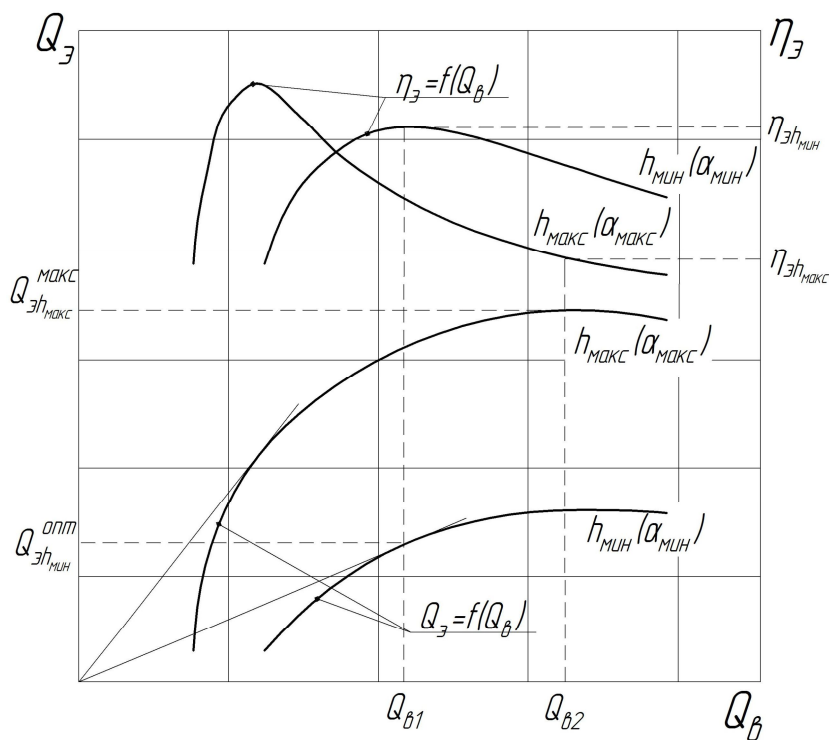


Рисунок 1.4 – Графические зависимости к обеспечению максимально возможного диапазона изменения подачи эрлифта

Диапазоны допустимых подач групповых и батарейных эрлифтных установок практически неограниченны из-за возможного многократного увеличения числа

работающих эрлифтов потребной подачи. При групповой схеме в состав установки входит необходимое количество эрлифтов, расположенных каждый в индивидуальном зумпфе. Батарейная схема предполагает расположение необходимого количества эрлифтов в одном зумпфе. Схема воздухоснабжения этих установок представляет собой сложный воздухопровод с обязательной системой регулирования расхода сжатого воздуха. При применении групповых и батарейных установок повышается вероятность заливания резервных эрлифтов, в том числе из-за низкой надежности работы запорных устройств в потоке, как правило, абразивной гидросмеси [1, 2, 24-34].

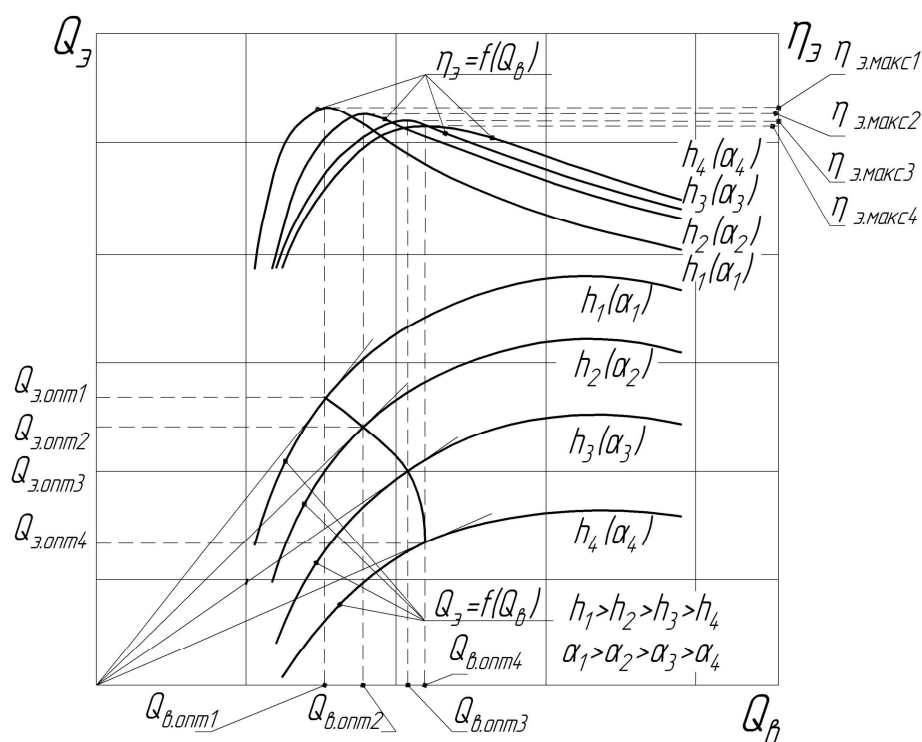


Рисунок 1.5 – Графические зависимости к энергетически оптимальному способу изменения подачи эрлифта

При первых трех выше изложенных способах изменения подачи эрлифт имеет неизменное конструктивное устройство, в том числе, неизменный диаметр подающей трубы d . Подающая труба в составе эрлифта предназначена для обеспечения транспортных скоростей $w_{n,m}$ несущего потока на входе в смеситель [1, 2, 17, 47, 48, 53-55] и предотвращения выбросов сжатого воздуха

в зумпф [44, 56-58]. На практике, как правило, принимают следующие значения транспортных скоростей потока в подающих трубах общепромышленных эрлифтов: в водоотливных установках - $w_{n.m} \geq 2,5 \div 3,0$ м/с, в гидроподъемных установках - $w_{n.m} \geq 3,5 \div 4,0$ м/с [1, 2, 24-34, 42, 43, 47, 57-63].

В условиях переменных притоков диаметр подающей трубы определяется из условия обеспечения надежного «уноса» твердого материала (содержащегося, как правило, в определенных количествах и в транспортируемой воде промышленных водоотливных установок) при минимально возможных расходах жидкости (гидросмеси). Увеличение ее расхода приводит к увеличению скорости в подающей трубе и, следовательно, к увеличению потерь давления (напора) в ней [44, 48, 53, 55, 65].

Повышение потерь давления (напора) в подающей трубе приводит к уменьшению давления в смесителе $p_{см}$ (или так называемого динамического относительного погружения смесителя α_d), что при прочих равных условиях приводит к снижению подачи эрлифта $Q_э$ [1, 2, 44, 48, 53, 64]. Компенсировать снижение подачи $Q_э$ из-за уменьшения давления в смесителе $p_{см}$ (динамического относительного погружения смесителя α_d) возможно, опять же, либо за счет увеличения геометрического погружения смесителя h , либо за счет увеличения расхода сжатого воздуха $Q_в$. Для более эффективной работы эрлифтов в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) необходимо стремиться к обеспечению постоянства давления в смесителе с ростом его подачи, что возможно обеспечить внесением определенных конструктивных изменений в существующие устройства.

Перечисленные способы изменения подачи эрлифта характеризуются также рядом особенностей, определяемых видом источника пневмоэнергии и схемой пневмоснабжения. В качестве источников пневмоэнергии для эрлифтов могут использоваться центробежные (радиальные) нагнетатели и источники пневмоэнергии неизменной производительности – объемные компрессоры (поршневые, винтовые и др.), струйные компрессоры при использовании на

предельных режимах работы и (условно) пневмосети со значительными расходом сжатого воздуха и его давлением.

Схема пневмоснабжения эрлифта может быть блочной либо коллекторной. Блочная схема предусматривает работу одного источника пневмоэнергии на один эрлифт, коллекторная (для одного эрлифта) - нескольких источников пневмоэнергии на один эрлифт. Для групповых и батарейных эрлифтных установок применяются коллекторные схемы воздухообеспечения с их разнообразием вариантов - один источник пневмоэнергии работает на несколько эрлифтов или несколько источников пневмоэнергии работают на несколько эрлифтов [1, 2, 42, 43].

Опыт использования эрлифтов, особенно в системах гидрозолошлакоудаления ТЭС, определил, как наиболее устойчивую и технически приемлемую, блочную схему пневмоснабжения газожидкостных подъемников от центробежных (радиальных) нагнетателей [24-34, 66]. Находят применение в блочных схемах пневмоснабжения также источники пневмоэнергии неизменной производительности - пароструйные компрессоры [55, 67, 68], воздушоструйные компрессоры [8, 69], поршневые компрессоры [17, 18-21], шахтные пневмосети [5-9, 71-79].

Согласно ДСТУ 3063-95 «Насоси. Класифікація. Терміни та визначення» гидродинамические машины, в которых поток в рабочем колесе движется в радиальном направлении, называются радиальными. Ранее в литературе такие машины было принято называть центробежными, поэтому в работе используется термин «центробежные (радиальные)».

Коллекторные схемы воздухообеспечения разрабатываются для особых вариантов эрлифтных установок, как правило, значительных подач и (или) высот подъема, как например, эрлифтные гидроподъемы гидрошахт «Красноармейская» ПО «Добропольеуголь» и им. 50-летия СССР ПО «Краснодонуголь» (компрессорные станции указанных гидрошахт содержали по 10 компрессоров К500-61-1, все работающие из которых обеспечивали сжатым воздухом один эрлифт) [11-15, 56, 62, 63], эрлифтные системы

гидрозолошлакоудаления Приморской ГРЭС и Экибастузской ГРЭС-1 (начальные варианты – ряд нагнетателей 360-22-1 работали на несколько эрлифтов) [24-34]. Такие схемы пневмоснабжения разрабатываются и исследуются индивидуально ввиду технических отличий каждой из них и особенности их работы в данной диссертационной работе не рассматриваются. К тому же многолетний опыт эксплуатации эрлифтных систем гидрозолошлакоудаления ТЭС, работающих на твердом топливе, доказал техническую и экономическую целесообразность, в этих условиях, блочных схем пневмоснабжения эрлифтов.

Исходя из изложенного и учитывая актуальность решаемой научной задачи, наиболее востребованными при работе в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) являются общепромышленные эрлифтные установки с блочным воздухомоснабжением центробежными (радиальными) нагнетателями и источниками пневмоэнергии неизменной производительности (объемные и струйные компрессоры, пневматические сети со значительными расходом и давлением сжатого воздуха).

1.2.2. Особенности блочного воздухомоснабжения эрлифтов от центробежных (радиальных) нагнетателей в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей)

Блочная схема воздухомоснабжения эрлифтов общепромышленного назначения центробежными (радиальными) нагнетателями без использования средств регулирования их производительности является широко используемой, в том числе, и в случае эксплуатации эрлифтных установок в условиях переменных во времени притоков жидкостей (гидросмесей) [31-33, 66]. При блочном воздухомоснабжении один источник сжатого воздуха - центробежный (радиальный) нагнетатель, обеспечивает пневмоэнергией один эрлифт. Такая схема исключает необходимость применения достаточно сложных систем

автоматического регулирования расхода воздуха (распределения между несколькими потребителями - что используется в групповых или секционных эрлифтах), которые, к тому же, в известной степени снижают надежность работы всей установки

Достаточно широкое использование центробежных (радиальных) нагнетателей для блочного воздухообеспечения эрлифтных установок общепромышленных систем водоотлива и гидродолива определяется наибольшим соответствием значений давления и производительности центробежных (радиальных) источников пневмоэнергии требуемым в рассматриваемых условиях [1]. Причем регулирование расхода сжатого воздуха [регулирование производительности центробежных (радиальных) нагнетателей] в большинстве случаев с целью упрощения и удешевления установок не осуществляется.

При перекачивании такими эрлифтными установками переменных во времени притоков жидкостей (гидросмесей) необходимо знать диапазоны возможных подач газожидкостных подъемников. В ряде случаев, особенно в эрлифтных системах гидрозолошлакоудаления тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, и при удалении золошлаков одним эрлифтом от двух котлов, величины притоков гидросмесей могут изменяться достаточно существенно, до двукратного значения [24-34].

Используемые в составе эрлифтных установок серийно производимые центробежные (радиальные) нагнетатели в зависимости от их параметров (давлений и производительностей) могут обеспечить определенные диапазоны подач эрлифтов при энергетически целесообразных высотах подъема, то есть определяют возможные области применения газожидкостных подъемников с блочным пневмоснабжением. Неточности в расчетных значениях диапазонов подач эрлифтов могут приводить, в том числе, и к аварийным ситуациям.

В составе общепромышленных эрлифтных установок целесообразно использовать ряд центробежных нагнетателей, производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (г. Хабаровск, РФ,

www.dalenergomash.ru), Lutos (Чехия, www.lutos.su) и Robuschi (Италия, www.robustchi.com) которые условно могут быть разделены на три классификационные группы – с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_n = 1,32 \div 1,65$ кгс/см² $[(1,29 \div 1,62) \cdot 10^5$ Па] и производительностью $Q_n = 40 \div 260$ м³/мин (0,667 ÷ 4,33 м³/с) (ЦНВ 60/1,4; ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,4; ЦНВ 100/1,6; ЦНВ 160/1,4; ЦНВ 160/1,6; ЦНВ 200/1,4; ЦНВ 200/1,6), с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_n = 1,57 \div 2,48$ кгс/см² $[(1,54 \div 2,43) \cdot 10^5$ Па] и производительностью $Q_n = 115 \div 890$ м³/мин (1,92 ÷ 14,8 м³/с) (RBS165, 175, 205, 225; ЦНВ 280/2,1; 360-21-1; 360-22-1; ЦНВ 750/2; DT100/552; DT120/1002; DT100/802) и с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_n = 2,73 \div 3,50$ кгс/см² $[(2,68 \div 3,43) \cdot 10^5$ Па] и производительностью $Q_n = 75 \div 226$ м³/мин (1,25 ÷ 3,77 м³/с) (ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 130/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3).

Для принятия обоснованных решений при проектировании эрлифтных установок, работающих в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей), необходимо иметь достоверные данные о технически и энергетически рациональных зонах применения установок с блочным воздухообеспечением центробежными (радиальными) нагнетателями, представляющими каждую из вышеприведенных групп. До настоящего времени возможные зоны рационального использования эрлифтных установок с блочным воздухообеспечением серийно производимыми центробежными (радиальными) нагнетателями без использования средств регулирования не установлены.

Так как условия эксплуатации эрлифтов с переменными притоками жидкостей (гидросмесей) являются достаточно распространенными, то установление возможного диапазона подач газожидкостных подъемников, высот подъема и показателей энергетической эффективности работы эрлифтных установок при блочном воздухообеспечении центробежными (радиальными) нагнетателями без использования средств регулирования является актуальным.

1.2.3 Особенности блочного воздухообеспечения эрлифтов источниками пневмоэнергии неизменной производительности в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей)

Одно из важнейших преимуществ эрлифтов – свойство саморегулирования, заключающееся в согласовании подачи с переменными (в определенном диапазоне) притоками жидкости (гидросмеси) за счет изменения геометрического погружения смесителя, в более полной мере, в сравнении с использованием центробежных (радиальных) нагнетателей, реализуется при обеспечении неизменного расхода воздуха не зависимо от давления в смесителе газожидкостного подъемника [повышение интенсивности подачи эрлифта при увеличении геометрического погружения смесителя также и увеличением расхода воздуха в данной работе не рассматривается, как требующее автоматического регулирования данного процесса]. Обеспечить близкий к постоянному расход воздуха (газообразного рабочего тела) при переменных притоках жидкости (гидросмеси) возможно при пневмоснабжении эрлифта либо от объемных (поршневых, винтовых и др.) или струйных (пароструйных, воздушоструйных газоструйных - на предельных режимах работы) компрессоров, либо от пневмосетей со значительными расходами сжатого воздуха и давлениями, существенно превышающими давление в смесителе и дросселированием воздушного потока.

Однако увеличение притоков и, соответственно, подачи эрлифта приводит к увеличению потерь давления (напора) в подающей трубе, уменьшению давления в смесителе и снижению возможной интенсивности увеличения подачи с ростом геометрического погружения смесителя. Соответственно снижается абсолютное значение максимально возможной подачи эрлифта.

Возможные режимы работы эрлифтов, в том числе с источниками пневмоэнергии неизменной производительности, при изменении величин

геометрических погружений смесителей из-за изменения значений притоков транспортируемых жидкостей (гидросмесей) рассмотрены в [1, 2, 48, 66] преимущественно с качественной стороны без надлежащей количественной оценки значений гидродинамических параметров, характеризующих рабочие процессы газожидкостных подъемников с переменными, в данном случае, давлениями в смесителях из-за переменных потерь давления (напора) в подающих трубах.

Востребованность промышленными системами водоотлива и гидроподъема эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности требует наличия данных о технически и энергетически рациональных зонах их применения в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей), что до настоящего времени не установлено.

Таким образом, установление возможного диапазона подач газожидкостных подъемников и показателей энергетической эффективности работы эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) также является актуальным.

1.3 Цель, задачи и методика исследований

Целью работы является повышение энергетической эффективности работы и расширение диапазона возможных подач эрлифтной установки в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы.

Выше изложенный анализ состояния научной задачи позволяет сформулировать следующие задачи исследований:

а) определить энергетически целесообразные и технически допустимые области эксплуатации, а также возможные диапазоны изменения подач традиционных эрлифтных установок с блочным воздухоснабжением серийно

производимыми центробежными (радиальными) нагнетателями и источниками пневмоэнергии неизменной производительности в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей);

б) разработать эрлифтную установку с возможностью эксплуатации в широком диапазоне подач без существенного увеличения потерь давления (напора) в подающей трубе и изменения давления в смесителе;

в) разработать математическую модель рабочего процесса эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы;

г) провести экспериментальные исследования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы с целью подтверждения адекватности разработанной математической модели;

д) разработать программу для численного решения математической модели эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы;

е) обосновать зоны энергетически целесообразного использования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы и определить рациональные параметры и характеристики рабочего процесса таких эрлифтов;

ж) привести рекомендации по разработке эрлифтных установок с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы.

2 РАБОЧИЕ РЕЖИМЫ ОБЩЕПРОМЫШЛЕННЫХ ЭРЛИФТОВ С БЛОЧНЫМ ПНЕВМОСНАБЖЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ПРИТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ (ГИДРОСМЕСЕЙ)

2.1 Блочное пневмоснабжение эрлифтов от серийно производимых центробежных (радиальных) нагнетателей

2.1.1. Теоретический диапазон подач эрлифтов

В составе общепромышленных эрлифтных установок, с нашей стороны достаточно широкое применение блочной схемой пневмоснабжения от центробежных (радиальных) нагнетателей, целесообразно использовать серийно производимые воздуходувные машины, так как разработка и изготовление таких машин по индивидуальным заказам с параметрами, отличающимися от параметров серийных нагнетателей, является дорогостоящей и может быть экономически целесообразным только для уникальных водоотливных (гидроподъемных) установок. Центробежные (радиальные) нагнетатели, параметры (производительность и давление) которых наиболее соответствуют требуемым для блочных источников пневмоэнергии общепромышленных эрлифтов, приведены в разделе 1.2.2.

Исходя из опыта применения водоотливных (гидроподъемных) эрлифтных установок, в частности, в технологических системах ТЭС, как в системах с одним из наиболее широких диапазонов величин притоков жидкостей (гидросмесей) и требуемых высот подъема [66], для анализа особенностей работы газожидкостных подъемников с блочной схемой воздуhosнабжения в качестве источников пневмоэнергии приняты пять нагнетателей производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (табл. 2.1), представляющие все три приведенные выше

Таблица 2.1 - Параметры эрлифтных установок при блочном воздухомоснабжении центробежными (радиальными) нагнетателями без использования средств регулирования

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
Давление нагнетателя (абсолютное): - максимально возможное $p_{н.макс} \cdot 10^{-5}$; - минимально допустимое $p_{н.мин} \cdot 10^{-5}$.	Па	1,60 1,51	2,43 2,01	3,34 2,50	3,43 2,66	3,06 2,70
Производительность нагнетателя Q_n при: - максимально возможном давлении $p_{н.макс}$; - минимально допустимом давлении $p_{н.мин}$.	м ³ /мин (м ³ /с)	56,5 (0,942)	260 (4,33)	82 (1,37)	122 (2,03)	168 (2,80)
Мощность нагнетателя $N_{потр}$ при: - максимально возможном давлении $p_{н.макс}$; - минимально допустимом давлении $p_{н.мин}$.	кВт	66,5 79,5	585 735	268 344	390 490	505 572
Геометрическое погружение смесителя эрлифта: - максимально возможное $h_{макс}$; - минимально допустимое $h_{мин}$.	м	6,30 5,35	14,8 10,5	24,0 15,5	25,0 17,1	21,2 17,5
Длина подъемной трубы эрлифта $H+h$ при $\alpha = 0,4$	м	13,38	26,25	38,75	42,75	43,75
Высота подъема эрлифтной установки H' относительно отметки 0.000	м	6,48	10,45	13,75	16,75	21,55

классификационные группы центробежных (радиальных) нагнетателей. Методику анализа работы такой эрлифтной установки рассмотрим на примере использования в качестве блочного источника пневмоэнергии центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2.

Решение рассматриваемой задачи в общем виде на настоящее время не представляется возможным как в связи с отсутствием достоверных аналитических характеристик центробежных (радиальных) нагнетателей (компрессора), так и из-за численных методов решения существующих математических моделей газожидкостных подъемников [35, 38, 40]. Объясняется это сложностью гидродинамических процессов, протекающих как в пневматических машинах (нагнетателях), так и в гидропневмоагрегатах (эрлифтах) и отсутствием возможности аналитического решения математических моделей рабочих процессов указанных пневмомашин и гидропневмоагрегата.

Для начального варианта анализа работы рассматриваемой эрлифтной установки (рис. 2.1) примем допущение об отсутствии потерь давления в пневмопроводе между нагнетателем и эрлифтом при расходе воздуха Q_v и равенстве избыточного давления, развиваемого нагнетателем, гидростатическому давлению $p_{н.с}$ геометрического погружения смесителя h . Примем также возможной работу гидроподъемника в режиме максимальных притоков жидкости (гидросмеси) Q_{np} с уровнем свободной поверхности в зумпфе, соответствующим уровню почвы (пола) – отм. 0.000. При принятых допущениях диапазон возможных подач эрлифта Q_v будем считать теоретическим.

Согласно опытной газодинамической характеристике принятого к рассмотрению нагнетателя ЦНВ 160/3,2 [приложение А1], устойчивая работа машины гарантируется в пределах параметров - $p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^5$ Па и $Q_n = 122$ м³/мин, $p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^5$ Па и $Q_n = 168$ м³/мин (ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, РФ, www.dalenergomash.ru). Тогда диапазон возможных геометрических погружений смесителя эрлифта с нагнетателем ЦНВ 160/3,2 определяется из соотношений [80, 81]:

- максимально возможное геометрическое погружение смесителя

$$h_{\max} = \frac{p_{H \max} - p_0}{\rho' \cdot g} = \frac{3,43 \cdot 10^5 - 1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 25,0 \text{ м};$$

- минимально допустимое геометрическое погружение смесителя

$$h_{\min} = \frac{p_{H \min} - p_0}{\rho' \cdot g} = \frac{2,66 \cdot 10^5 - 1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 17,1 \text{ м},$$

где p_0 - давление окружающей среды (атмосферное давление), принимаем $p_0 = 1,98110^4$ Па;

ρ' - плотность перекачиваемой жидкости (гидросмеси), принимаем $\rho' = 1000$ кг/м³;

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

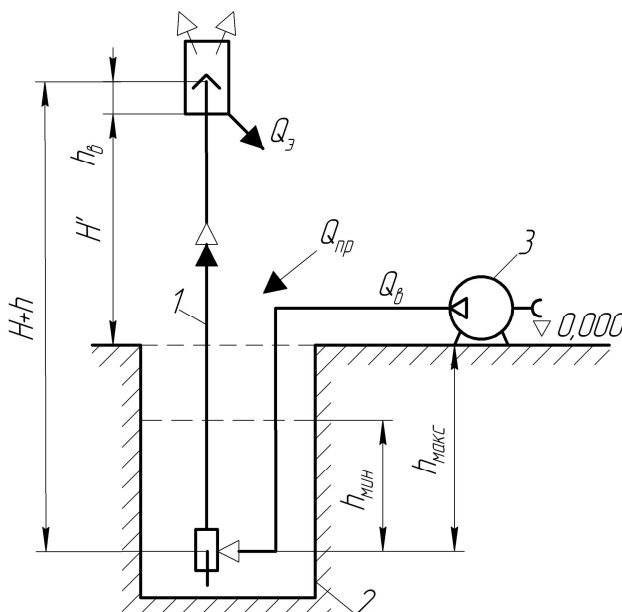


Рисунок 2.1 – Схема эрлифтной установки: 1 – эрлифт; 2 – зумпф; 3 – центробежный (радиальный) нагнетатель

Для максимально энергоэффективной работы эрлифта в подъемной трубе должна иметь место снарядная структура водовоздушной смеси, что обеспечивается при минимальном значении относительного погружения

смесителя $\alpha_{\min} = 0,40$ [50]. При этом условии длина подъемной трубы рассматриваемого эрлифта составит

$$H + h = \frac{h_{\min}}{\alpha_{\min}} = \frac{17,1}{0,40} = 42,75 \text{ м},$$

а максимальное относительное погружение смесителя

$$\alpha_{\max} = \frac{h_{\max}}{H + h} = \frac{25,0}{42,75} = 0,584.$$

Высота подъема эрлифтной установки относительно отметки 0.000 (рис. 2.1)

$$H' = (H + h) - h_{\max} - h_g = 42,75 - 25,0 - 1,0 = 16,75 \text{ м},$$

где h_g – высота переподачи жидкости (гидросмеси) в воздухоотделителе эрлифта, как правило $h_g \approx 1$ м [1, 2].

Для определения подачи эрлифта в приведенных условиях воспользуемся математической моделью рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси, в основу которой положены уравнения неразрывности движения и количества движения двухфазной жидкости, позволившие получить уравнение стационарного восходящего вертикального движения двухкомпонентного водовоздушного снарядного течения в подъемной трубе [40, 85]:

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

$$+ g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz, \quad (2.1)$$

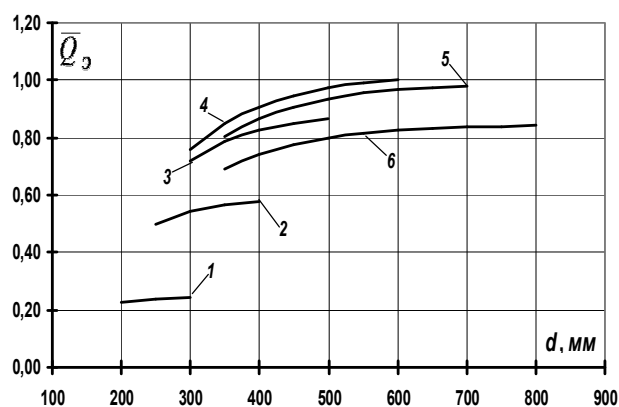
где p_{cm} – избыточное давление в смесителе; z – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы; $\tau_w(z)$ – касательное напряжение на стенке подъемной трубы; G – массовая скорость водовоздушной смеси; x –

массовое расходное газосодержание; $w'(z)$, $w''(z)$ - истинные скорости соответственно воды и воздуха; $\varphi(z)$ - истинное газосодержание водовоздушной смеси; $\rho''(z)$ - плотность воздуха в сечении z .

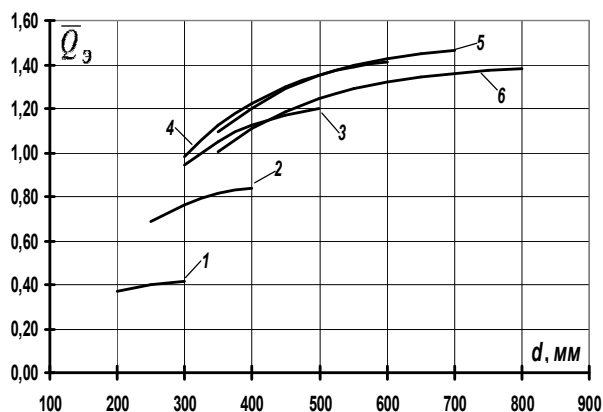
Решение приведенного уравнения численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы позволяет определять значения текущих гидродинамических параметров водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы и при заданном расходе воздуха Q_g [40, 84].

Для эрлифтной установки высотой подъема $H' = 16,75$ м с блочным нагнетателем ЦНВ 160/3,2 вычисления подач Q_g и скоростей жидкости (гидросмеси) $w_{n.m}$ в подающей трубе выполнены в диапазоне диаметров подъемных труб $D = 300 \div 800$ мм и подающих труб $d = 200 \div 800$ мм (как следует из полученных зависимостей рис. 2.2, 2.3, указанные диапазоны содержат энергетически оптимальный диаметр подающей трубы и максимально допустимый диаметр подающей трубы для данных условий), длине подъемной трубы $H+h = 42,75$ м и геометрических погружениях смесителя $h_{мин} = 17,1$ м и $h_{макс} = 25,0$ м [приложение А2, табл. А1]. Каждому из рассмотренных диаметров подъемных труб эрлифтов соответствует максимально возможный диаметр подающей трубы [с целью минимизации потерь напора (давления) в ней], при котором выполняются, с приемлемой точностью, требования по минимально допустимым скоростям воды (гидросмеси) в данной трубе (водоотливные установки - $w_{n.m} \geq 2,5 \div 3,0$ м/с, гидроподъемные установки - $w_{n.m} \geq 3,5 \div 4,0$ м/с [1, 5-9, 11-17]). При этом энергетически оптимальное значение диаметра подъемной трубы (при котором обеспечивается максимально возможная подача эрлифта в обоих гранично возможных режимах работы нагнетателя при прочих равных условиях) составляет $D = 600$ мм (рис. 2.2), а максимально допустимое значение диаметра подающей трубы при этом составляет для водоотливной установки $d = 500$ мм, а для гидроподъемной установки - $d = 400$ мм (рис. 2.3).

Из-за увеличения потерь давления в подающей трубе с уменьшением ее диаметра, подача водоотливного эрлифта [приложение А3] с тем же диаметром подъемной трубы и прочих равных условиях превышает подачу гидropодъемного эрлифта [приложение А4].

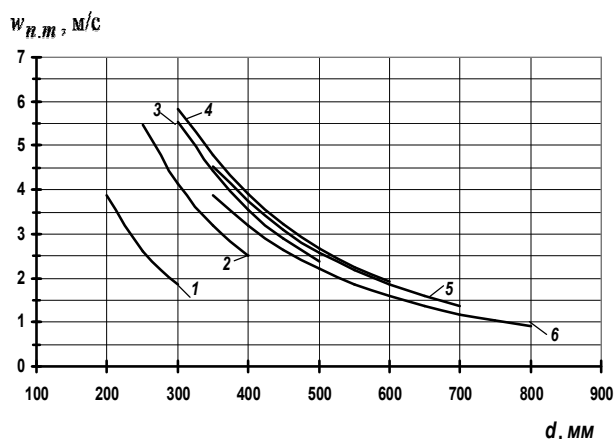


a)

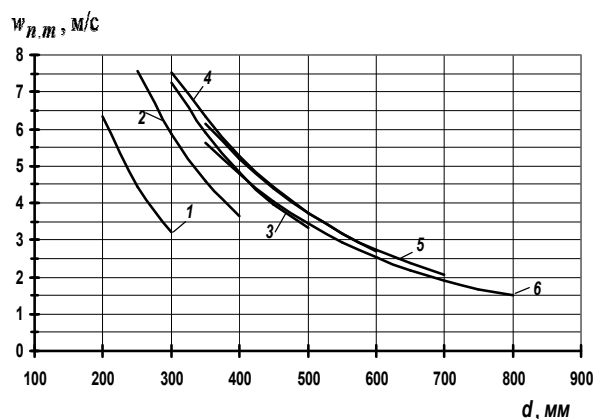


б)

Рисунок 2.2 - Зависимости $\bar{Q}_3 = f(D, d)$ при блочном воздушноснабжении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: а) - режим работы нагнетателя: $Q_H = 168 \text{ м}^3/\text{мин}$; $p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($h_{мин} = 17,1 \text{ м}$); б) - режим работы нагнетателя: $Q_H = 122 \text{ м}^3/\text{мин}$; $p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($h_{макс} = 25,0 \text{ м}$); 1 – $D = 300 \text{ мм}$; 2 – $D = 400 \text{ мм}$; 3 – $D = 500 \text{ мм}$; 4 – $D = 600 \text{ мм}$; 5 – $D = 700 \text{ мм}$; 6 – $D = 800 \text{ мм}$ (высота подъема $H' = 16,75 \text{ м}$; базисное значение $Q_{3 баз} = 1950,7 \text{ м}^3/\text{ч}$)



a)



б)

Рисунок 2.3 - Зависимости $w_{н.м} = f(D, d)$ при блочном воздушноснабжении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: а) - режим работы нагнетателя: $Q_H = 168 \text{ м}^3/\text{мин}$; $p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($h_{мин} = 17,1 \text{ м}$); б) - режим работы нагнетателя: $Q_H = 122 \text{ м}^3/\text{мин}$; $p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ ($h_{макс} = 25,0 \text{ м}$); 1 – $D = 300 \text{ мм}$; 2 – $D = 400 \text{ мм}$; 3 – $D = 500 \text{ мм}$; 4 – $D = 600 \text{ мм}$; 5 – $D = 700 \text{ мм}$; 6 – $D = 800 \text{ мм}$ (высота подъема $H' = 16,75 \text{ м}$)

Как следует из результатов расчетов [приложение А3], для условий водоотливной эрлифтной установки с диаметром подъемной трубы $D = 600$ мм и при $h_{мин} = 17,1$ м, и при $h_{макс} = 25,0$ м с достаточной степенью точности выполняются требования по значению транспортной скорости в подающей трубе ($w_{n.m} \geq 2,5 \div 3,0$ м/с) при диаметре подающей трубы $d = 500$ мм. Диапазон подач составляет $Q_{э} = 1895,5$ м³/ч (при $h_{мин} = 17,1$ м) и $Q_{эмакс} = 2634,4$ м³/ч (при $h_{макс} = 25,0$ м) (рис. 2.4), т.е. возможное увеличение подачи равно $k_Q = Q_{эмакс} / Q_{эмин} = 2634,4 / 1895,5 = 1,39$ раза. Мощность водоотливной установки, в соответствии с характеристикой $N_{потр} = f(Q_H)$ нагнетателя ЦНВ 160/3,2, составляет: $N_{потр} = 490$ кВт при $h_{мин} = 17,1$ м и $N_{э} = 390$ кВт при $h_{макс} = 25,0$ м, а удельное энергопотребление на транспортирование единицы объема жидкости на единичную высоту $n_{эмин} = N_{потр} / (Q_{эмин} \cdot H') = 490 / (1895,5 \times 16,75) = 0,0154$ кВт · ч/(м³ · м) при $h_{мин} = 17,1$ м, $n_{эмакс} = N_{потр} / (Q_{эмакс} \cdot H') = 390 / (2634,4 \times 16,75) = 0,0088$ кВт · ч/(м³ · м) при $h_{макс} = 25,0$ м, т.е. снижение удельного энергопотребления во втором случае достигает $k_{N_{э}} = n_{эмин} / n_{эмакс} = 1,54 \cdot 10^{-2} / 0,88 \cdot 10^{-2} = 1,75$ раза.

Для гидроподъемной эрлифтной установки с диаметром подъемной трубы $D = 600$ мм требование по значению транспортной скорости в подающей трубе ($w_{n.m} \geq 3,5 \div 4,0$ м/с) для обоих режимов работы обеспечивается в эрлифте с подающей трубой $d = 400$ мм [приложение А5]. Диапазон подач при этом составляет $Q_{эмин} = 1769,6$ м³/ч (при $h_{мин} = 17,1$ м) и $Q_{эмакс} = 2388,6$ м³/ч (при $h_{макс} = 25,0$ м), т.е. возможное увеличение подачи равно $k_Q = Q_{эмакс} / Q_{эмин} = 2388,6 / 1769,6 = 1,35$ раза. Удельное энергопотребление на транспортирование единицы объема гидросмеси на единичную высоту $n_{эмин} = N_{потр} / (Q_{эмин} \times H') = 490 / (1769,6 \cdot 16,75) = 0,0165$ кВтч/(м³ · м) при $h_{мин} = 17,1$ м и $n_{эмакс} = N_{потр} / (Q_{эмакс} \cdot H') =$

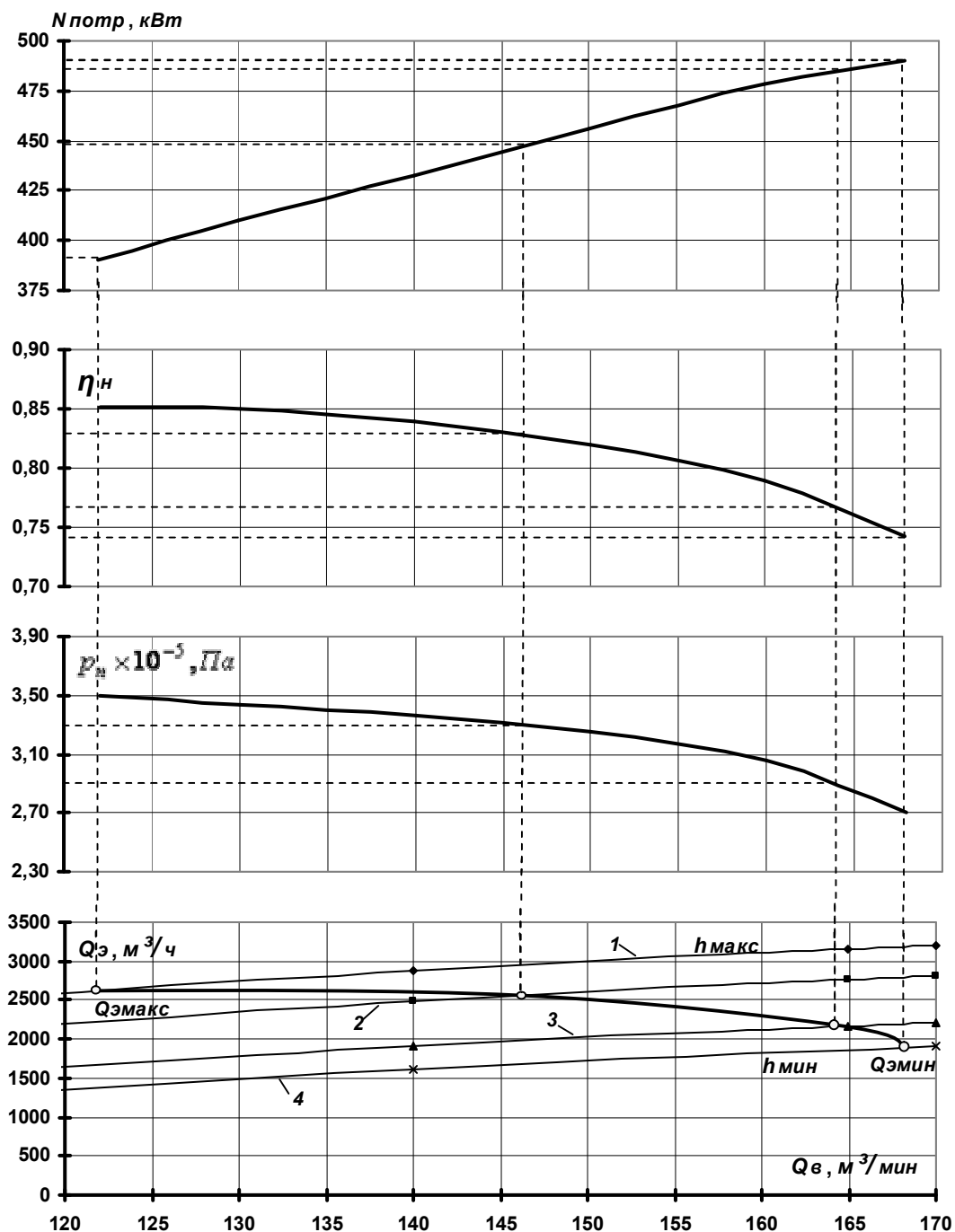


Рисунок 2.4 – Рабочий режим водоотливной эрлифтной установки с блочным воздухомоснабжением от центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2 ($H+h = 42,75$ м, $D = 600$, $d = 500$ мм): 1÷4 - $Q_{\text{э}} = f(Q_{\text{в}})$ при 1 - $h = h_{\text{макс}} = 25$ м; 2 - $h = 22,6$ м; 3 - $h = 19$ м; 4 - $h = h_{\text{мин}} = 17,1$ м

$$= 390 / (2388,6 \cdot 390 / (2388,6 \cdot 16,75)) = 0,0097 \text{ кВтч}/(\text{м}^3 \text{м}) \text{ при } h_{\text{макс}} = 25,0 \text{ м,}$$

снижение удельного энергопотребления во втором случае достигает

$$k_{N_{\text{э}}} = n_{\text{э мин}} / n_{\text{э макс}} = 1,65 \cdot 10^{-2} / 0,97 \cdot 10^{-2} = 1,70 \text{ раза.}$$

Повысить степень увеличения подачи k_Q рассматриваемых как водоотливной (рис. 2.5), так и гидроподъемной (рис. 2.6) установок с блочным воздухомоснабжением от нагнетателя ЦНВ 160/3,2 возможно за счет снижения энергоэффективности их работы. Так, при использовании подъемной трубы диаметром $D = 300$ мм коэффициент увеличения подачи указанных установок составит $k_Q = 1,63 \div 1,69$, однако энергоэффективность их работы снизится в $n_э/n_{э,мин} = 3,39 \div 7,18$ раза при уменьшении абсолютного значения подачи эрлифта в $3,34 \div 4,09$ раза [приложения А3, А4].

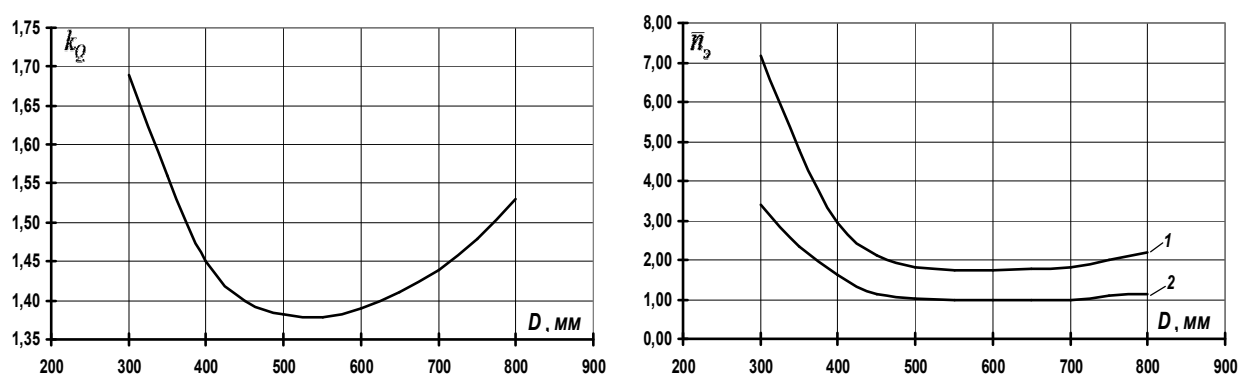


Рисунок 2.5 - Зависимости $k_Q = f(D)$, $\bar{n}_э = n_э/n_{э,мин} = f(D)$ при блочном воздухомоснабжении водоотливной установки от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: 1 – при $h_{мин} = 17,1$ м; 2 – при $h_{макс} = 25,0$ м (высота подъема $H' = 16,75$ м; базисное значение $n_э = 0,0088$ кВт·ч/м³·м)

Аналогичный анализ работы и характеризующих ее гидродинамических параметров выполнен для эрлифтных установок с другими, принятыми к рассмотрению, блочными центробежными (радиальными) нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 200/3. Результаты вычислений позволили установить условия максимальной энергоэффективности работы водоотливных и гидроподъемных эрлифтных установок высотами подъема H' , то есть определить обеспечивающие эти условия значения энергетически оптимальных диаметров подъемных труб D , максимально допустимых диаметров подающих труб d , подач эрлифтов $Q_э$ при граничных значениях геометрических

погружений смесителя $h_{мин}$ и $h_{макс}$, степень увеличения подачи k_Q и удельное энергопотребление эрлифтной установки $n_э$ [приложения А5, А6].

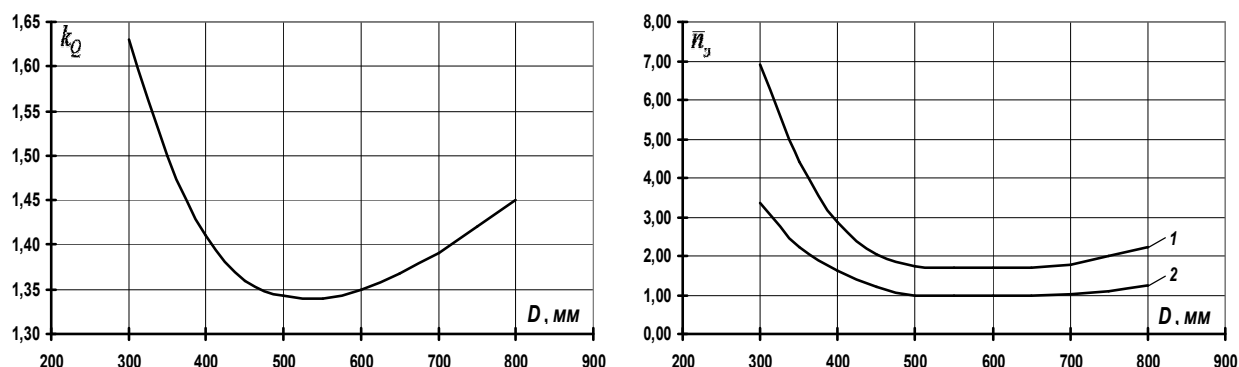


Рисунок 2.6 - Зависимости $k_Q = f(D)$, $\bar{n}_э = n_э/n_{э,мин} = f(D)$ при блочном воздухообеспечении гидropодъемной установки от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: 1 – при $h_{мин} = 17,1$ м; 2 – при $h_{макс} = 25,0$ м (высота подъема $H' = 16,75$ м; базисное значение $n_э = 0,0097$ кВт·ч/м³·м)

Как следует из результатов вычислений, в эрлифтных установках с высотами подъема H' и блочным воздухообеспечением центробежными (радиальными) нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3 в режимах максимальной энергоэффективности работы степень увеличения подачи водоотливных эрлифтов составляет $k_Q = 1,03 \div 1,49$, а гидropодъемных эрлифтов - $k_Q = 1,02 \div 1,45$, что зачастую не удовлетворяет практическим потребностям [приложения А5, А6].

Выполненный анализ работы эрлифтных установок с блочным воздухообеспечением от принятых центробежных (радиальных) нагнетателей позволил определить энергетически оптимальные высоты подъема H' , диаметры подъемных труб D эрлифтов и максимально возможные диаметры подающих труб d для условий водоотливных и гидropодъемных установок. Значения степеней увеличения подачи k_Q и удельного энергопотребления $n_э$, как критериев энергетической эффективности работы эрлифтных установок, следует считать предварительными и подлежащими уточнению, а диапазон возможных подач эрлифтов - теоретическим. Это вызвано тем, что при определении режимов совместной блочной работы нагнетателя и эрлифта из-за

громоздкости вычислений не учитывалось действительное давление в смесителе эрлифта $p_{см}$, как разница между гидростатическим давлением геометрического погружения смесителя $p_{н.с}$ и потерями давления в подающей трубе $\Delta p_{н.т}$. В действительности режим работы блочного центробежного (радиального) нагнетателя будет определяться именно этим, действительным давлением $p_{см}$, что может в известной мере привести к изменению как степени увеличения подачи k_Q эрлифта, так и удельного энергопотребления $n_э$, как критерия энергоэффективности работы установки в целом.

Ввиду принятых допущений о том, что давление смесителя равно гидростатическому давлению геометрического погружения смесителя, значения степени увеличения подачи k_Q и удельного энергопотребления $n_э$, как критерия энергетической эффективности работы эрлифтной установки, следует считать предварительными и подлежащими уточнению.

2.1.2. Диапазон подач эрлифтов с учетом влияния потерь напора (давления) в подающей трубе на рабочий режим нагнетателя сжатого воздуха

Обоснование энергетически целесообразных высот подъема эрлифтных установок, значений диаметров подъемной и подающей труб, теоретических диапазонов возможных подач эрлифтов и критериев энергетической эффективности работы установок в разделе 2.1.1 приведены исходя из допущений равенства избыточного давления, развиваемого блочным нагнетателем, гидростатическому давлению геометрического погружения смесителя. То есть, принято допущение об отсутствии потерь давления в пневмопроводе между нагнетателем и смесителем, а также влияния потерь напора (давления) в подающей трубе эрлифта на развиваемое нагнетателем давление, исходя из чего, полученный диапазон подач назван теоретическим. И если первое допущение исключить из состава рассматриваемой задачи достаточно проблематично из-за многообразия возможных вариантов

конструктивных решений пневмопроводов (длины, вида и количества местных сопротивлений и др.) и возможности соответствующим подбором диаметра воздухопровода минимизировать указанные потери давления, то допущение об отсутствии влияния потерь давления (напора) в подающей трубе эрлифта на режим работы нагнетателя в ряде случаев может существенно исказить результаты количественного анализа работы эрлифтной установки. Влияние сопротивления подающей трубы на работу как эрлифта, так и всей установки в целом, подтверждается также рядом исследований [44, 48, 53].

Таким образом, для уточнения диапазона возможных подач эрлифтов с блочным воздухомоснабжением серийно производимыми центробежными (радиальными) нагнетателями и энергоэффективности работы установок необходимо параметры рабочих режимов эрлифтных установок определять с учетом потерь давления в подающих трубах газожидкостных подъемников. При этом обоснованный в разделе 2.1.1 способ определения энергетически целесообразных высот подъема эрлифтных установок, значений диаметров подъемной и подающей труб, является правомочной и для случая анализа работы установки с учетом действительного давления в смесителе эрлифта.

Действительное избыточное давление в смесителе эрлифта $p_{см}$ определяется как разница между гидростатическим давлением геометрического погружения смесителя $p_{н.с}$ и потерями давления в подающей трубе $\Delta p_{н.м}$ и может быть вычислено по зависимости [2]

$$p_{см} = p_{н.с} - \Delta p_{н.м} = \rho' \cdot g(h - h_{н.м}), \quad (2.2)$$

где $h_{н.м}$ – потери напора в подающей трубе.

Тогда, с учетом принятого допущения о пренебрежении потерями в воздухопроводе между центробежным нагнетателем и смесителем эрлифта, режим работы нагнетателя, а, следовательно, и его производительность Q_n , будет определяться абсолютным давлением $p_n = p_{сма} = p_{см} + p_0$, где избыточное давление в смесителе $p_{см}$ вычисляется по зависимости (2.2).

Полный анализ уточненного режима работы эрлифтной установки (однако с учетом пренебрежения потерями давления в воздухопроводе) выполнен, как и в разделе 2.1.1, на примере водоотливной установки с блочным воздухомоснабжением от центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2 с подъемной трубой длиной $H+h = 42,75$ м и энергетически оптимальным диаметром $D = 600$ мм при потребном, максимально возможном, диаметре подающей трубы $d = 500$ мм. Высота подъема эрлифтной установки от уровня пола технологического помещения (отм. 0.000) $H' = 16,75$ м. Максимально возможное геометрическое погружение смесителя эрлифта составляет $h_{\max} = 25,0$ м исходя из условия возможности его запуска при полностью заполненном зумпфе от нагнетателя ЦНВ 160/3,2 с максимально возможным абсолютным давлением $p_{н.\max} = 3,43 \cdot 10^5$ Па.

В этих условиях максимально возможный приток воды $Q_{пр.\max}$, который должен удаляться эрлифтом $Q_{э.\max} = Q_{пр.\max}$, может быть таким, при котором, при блочном воздухомоснабжении нагнетателем ЦНВ 160/3,2 и условии равенства давления нагнетателя p_n абсолютному давлению в смесителе эрлифта $p_n = p_{сма}$, геометрическое погружение смесителя составит величину $h_{\max} = 25,0$ м.

Ввиду отсутствия достоверных аналитических характеристик центробежных (радиальных) воздушных нагнетателей $p_n = f(Q_n)$ и с учетом возможности представления графических заводских экспериментальных зависимостей в табличной форме (табл. 2.2), задачу целесообразно решать методом последовательного приближения.

Для выше приведенных геометрических параметров газожидкостного подъемника с использованием программы для решения на ПЭВМ математической модели рабочего процесс эрлифта со снаряженной структурой водовоздушного потока [84, 85] вычислены значения подачи $Q_э$ и давления в смесителе эрлифта $p_{сма}$ для заданных значений расхода воздуха $Q_в = Q_n$ (табл. 2.2). Как следует из результатов решения, условие $p_n = p_{сма} = 3,288 \cdot 10^5$ Па ($3,352$ кгс/см²) выполняется при расходе воздуха $Q_в = Q_n = 141$ м³/мин, что соответствует подаче эрлифта $Q_{э.\max} = 2895,5$ м³/ч ($0,804$ м³/с) [приложение А2,

табл. А2]. То есть, эрлифт с параметрами $H+h = 42,75$ м, $D = 600$ мм, $d = 500$ мм и блочном воздуходообеспечении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2 при максимально возможном геометрическом погружении $h_{\text{макс}} = 25,0$ м обеспечит подачу $Q_{\text{э.макс}} = Q_{\text{пр.макс}} = 2895,5$ м³/ч (0,804 м³/с). В указанном режиме работы установки давление нагнетателя ЦНВ 160/3,2 составляет $p_n = p_{\text{сма}} = 3,288 \cdot 10^5$ Па (3,352 кгс/см²), производительность $Q_n = Q_{\text{в}} = 141$ м³/мин, мощность $N_{\text{номр}} = 435$ кВт, КПД $\eta_n = 0,840$.

Таблица 2.2 – К определению режима работы эрлифтной установки с блочным нагнетателем ЦНВ 160/3,2 при величине геометрического погружения смесителя $h_{\text{макс}} = 25,0$ м ($H+h = 42,75$ м, $D = 600$, $d = 500$ мм)

Рабочие параметры нагнетателя ЦНВ 160/3,2:		Давление в смесителе эрлифта (абсолютное) $p_{\text{сма}}$, кгс/см ²	Подача эрлифта $Q_{\text{э}}$, м ³ /ч	
производительность Q_n , м ³ /мин	давление (абсолютное):			
		$p_n \cdot 10^{-5}$, Па	p_n , кгс/см ²	
122	3,434	3,500	3,377	-
126	3,414	3,480	3,372	-
130	3,375	3,440	3,366	-
134	3,355	3,420	3,361	-
138	3,316	3,380	3,356	-
139	3,306	3,370	3,354	-
140	3,296	3,360	3,353	-
141	3,288	3,352	3,352	2895,5
142	3,277	3,340	3,351	-
146	3,237	3,300	3,346	-
150	3,178	3,240	3,341	-
154	3,119	3,179	3,336	-
158	3,041	3,100	3,331	-
162	2,961	3,018	3,327	-
166	2,796	2,850	3,323	-
168	2,659	2,710	3,320	-

В столбце «Подача эрлифта $Q_{\text{э}}$, м³/ч» таблицы 2.2 заполнена только ячейка ($Q_{\text{э}} = 2895,5$ м³/ч), соответствующая производительности нагнетателя (расходу воздуха) $Q_n = Q_{\text{в}} = 141$ м³/мин, так как режимы работы установки с другими значениями $Q_n = Q_{\text{в}}$ при геометрическом погружении $h = h_{\text{макс}} = 25,0$ м неосуществимы и будут иметь место при иных величинах h .

Минимально возможная подача этого же эрлифта будет иметь место при минимально возможном геометрическом погружении смесителя $h_{мин}$, которое в рассматриваемых условиях будет определяться минимально допустимым (преимущественно из условия обеспечения мощности на валу нагнетателя мощностью приводного электродвигателя) давлением нагнетателя $p_{н.мин}$. Для нагнетателя ЦНВ 160/3,2 минимально допустимое абсолютное давление составляет $p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^5$ Па, что соответствует производительности воздуходувной машины $Q_n = 168$ м³/мин.

Таким образом, минимально возможная величина притока может быть такой, чтобы давление в смесителе эрлифта составляло $p_{сма.мин} = p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^5$ Па (2,712 кгс/см²), что, с учетом пренебрежения потерями давления в воздухопроводе, будет соответствовать производительности нагнетателя $Q_n = 168$ м³/мин.

И данная задача, то есть определение возможной величины $Q_{пр.мин} = Q_{э.мин}$, решается на ПЭВМ методом последовательного приближения с использованием той же выше описанной программы (программы для решения на ПЭВМ математической модели рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси [84, 85]). Условие $p_{сма.мин} = p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^5$ Па (2,712 кгс/см²) при $Q_n = 168$ м³/мин для рассматриваемого эрлифта выполняется при величине притока $Q_{пр.мин} = Q_{э.мин} = 2011,5$ м³/ч (0,559 м³/с), что, в свою очередь, обеспечит величину геометрического погружения смесителя $h_{мин} = 17,83$ м [приложение А2, табл. А3]. В данном режиме работы мощность нагнетателя ЦНВ 160/3,2 составляет $N_{номр} = 490$ кВт, КПД $\eta_n = 0,741$.

Таким образом, при блочном воздухоснабжении эрлифта с геометрическими параметрами $H+h = 42,75$ м, $D = 600$, $d = 500$ мм, нагнетатель ЦНВ 160/3,2 будет эксплуатироваться в диапазоне производительностей $Q_n = 141 \div 168$ м³/мин, что исключает возможность его работы в оптимальном режиме с производительностью $Q_{н.опт} = 122$ м³/мин (рис. 2.7).

Степень увеличения подачи рассмотренной эрлифтной водоотливной установки составляет $k_Q = Q_{э.макс}/Q_{э.мин} = 2895,5/2011,5 = 1,44$, что не

существенно отличается ($k_Q = Q_{э.макс}/Q_{э.мин} = 2634,4/1895,5 = 1,39$; $1,44/1,39=1,04$) от аналогичного показателя теоретического диапазона подач

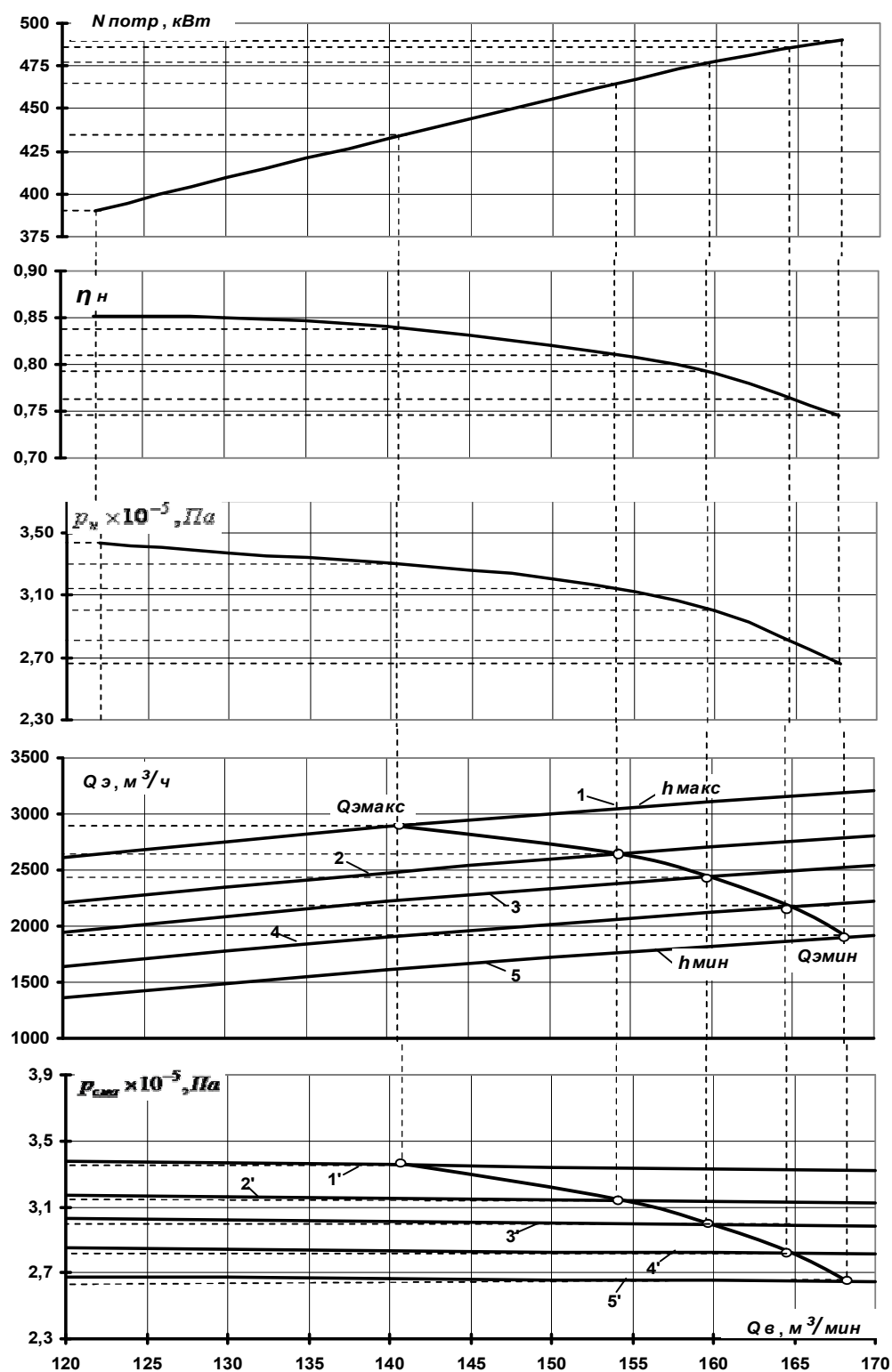


Рисунок 2.7 – Рабочий режим водоотливной эрлифтной установки с блочным воздухомоснабжением от центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2 ($H+h = 42,75$ м, $D = 600$, $d = 500$ мм) с учетом потерь напора в подающей трубе:

$1 \div 5 - Q_3 = f(Q_6)$, $1' \div 5' - p_{сма} = f(Q_6)$ при $1 - h = h_{макс} = 25$ м; $2 - h = 22,6$ м; $3 - h = 21$ м; $4 - h = 19$ м; $5 - h = h_{мин} = 17,83$ м.

эрлифта [без учета потерь напора (давления) в подающей трубе при определенном режиме работы блочного нагнетателя ЦНВ 160/3,2].

Следует отметить, что как максимально возможная расчетная подача $Q_{э.макс} = 2895,5$ м³/ч (0,804 м³/с), так и минимально возможная расчетная подача $Q_{э.макс} = 2011,5$ м³/ч (0,559 м³/с) эрлифта $H+h=42,75$ м, $D=600$ мм, $d = 500$ мм с учетом потерь напора (давления) в подающей трубе при определении параметров режима работы блочного нагнетателя ЦНВ 160/3,2 на 6÷10 % превышают аналогичные подачи [$Q_{э.макс} = 2634,4$ м³/ч (0,732 м³/с) и $Q_{э.мин} = 1895,5$ м³/ч (0,527 м³/с)] этого же эрлифта при определении параметров режима работы того же (ЦНВ 160/3,2) нагнетателя без учета потерь напора (давления) в подающей трубе. Объясняется это снижением потребного давления нагнетателя и, следовательно, обеспечением им большей производительности из-за учета потерь напора (давления) в подающей трубе и снижении при этом расчетного потребного давления воздуха на входе в смеситель в первом случае в сравнении со вторым (теоретическим) вариантом анализа работы установки. Из-за существенной «пологости» расходной характеристики нагнетателя $p_n = f(Q_3)$ влияние на изменение подачи эрлифта интенсивности изменения давления воздуха в сравнении с интенсивностью при этом изменения его производительности менее значительно.

КПД эрлифта с учетом гидравлических потерь в подающей трубе определяется выражением [41]

$$\eta_{эр} = \frac{H \cdot Q_3}{Q_6 \cdot \frac{P_0}{\rho' \cdot g} \cdot \ln \frac{P_{сма}}{P_0}} \quad (2.3)$$

В рассматриваемом случае принимаем $H = H' = 16,75$ м, заведомо занижая значение КПД эрлифта в режиме минимальной подачи.

Тогда значения КПД эрлифта (принимая $p_0 = 1,9,81 \cdot 10^4$ Па):

- в режиме максимальной подачи

$$\eta_{эp} = \frac{16,75 \cdot 2895,5 \cdot 60}{\frac{1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} \cdot 3600 \cdot 141 \cdot \ln \frac{3,288 \cdot 10^5}{1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}} = 0,474;$$

- в режиме минимальной подачи

$$\eta_{эp} = \frac{16,75 \cdot 2011,5 \cdot 60}{\frac{1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} \cdot 3600 \cdot 168 \cdot \ln \frac{2,660 \cdot 10^5}{1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}} = 0,335.$$

Значения КПД эрлифтной водоотливной установки:

- в режиме максимальной подачи

$$\eta_{э.у} = \eta_{эp} \cdot \eta_n = 0,474 \cdot 0,840 = 0,398;$$

- в режиме минимальной подачи

$$\eta_{э.у} = \eta_{эp} \cdot \eta_n = 0,335 \cdot 0,741 = 0,248.$$

КПД эрлифта и эрлифтной установки с блочным пневмоснабжением от рассматриваемых центробежных (радиальных) нагнетателей приведены для водоотливных установок в приложении А7, для гидроподъемных – в приложении А8.

Результаты изложенного анализа, а также данные вычислений рабочих параметров эрлифтных установок с блочным воздухомоснабжением от других анализируемых центробежных (радиальных) нагнетателей, представляющих все три приведенные выше классификационные группы центробежных (радиальных) нагнетателей ОАО «Дальневосточный завод энергетического

оборудования», приведены: для водоотливных установок – в приложении А9, для гидроподъемных установок – в приложении А10.

Таким образом, степень увеличения подачи эрлифтов с блочным воздухомоснабжением от наиболее технически целесообразных в использовании в составе данных установок серийно производимых центробежных (радиальных) нагнетателей (ЦНВ 60/1,6, 360-22-1, ЦНВ 100/3,2, ЦНВ 160/3,2, ЦНВ 200/3) составляет: при работе в режиме водоотливных установок - $k_Q = 1,05 \div 1,54$, при работе в режиме гидроподъемных установок - $k_Q = 1,09 \div 1,47$. Возможность более значительного увеличения подачи эрлифта с блочным воздухомоснабжением серийно производимыми центробежными (радиальными) нагнетателями, что зачастую востребовано условиями применения водоотливных (гидроподъемных) эрлифтных установок, не обеспечивается.

Максимальные и минимальные подачи эрлифтов при учете потерь напора (давления) в подающей трубе на рабочий режим нагнетателя превышают теоретически определенные значения на 5,5-18,8% для водоотливных установок [приложение А11] и 10,6-19,5% для гидроподъемных [приложение А12].

Фактором формирующим подачу эрлифта, является снижающееся с ростом расхода воздуха давление в смесителе [86]. Увеличить абсолютное значение максимально возможной подачи эрлифта $Q_{э, макс}$ и повысить степень увеличения подачи k_Q при прочих равных условиях возможно в газожидкостном подъемнике, устройство которого позволяет при увеличении притоков жидкости (гидросмеси) и, следовательно, требуемой подачи, поддерживать практически постоянное давление в смесителе $p_{см}$ на уровне давления, имеющего место при базовом притоке $Q_{пр б}$.

Предположим, что в эрлифте с конструктивными параметрами $H+h = 42,75$ м, $D = 600$, $d = 300$ мм и блочным воздухомоснабжением от центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2 давление в смесителе неизменно в

диапазоне подач от $Q_{\text{э}} = Q_{\text{пр.б}}$ до максимально возможной для данного газожидкостного подъемника величины $Q_{\text{э.макс}}$, обеспечиваемой при максимально допустимом погружении $h = h_{\text{макс}}$. Рассмотрим работу такого эрлифта при значении транспортной скорости в подающей трубе, равной $w_{n.m} = 2,5$ м/с (при диаметре подающей трубы $d = 300$ мм принятое значение транспортной скорости обеспечивает транспортирование глинистых фракций, песчаных фракций, рядового угля [87]).

Базовым притоком для рассматриваемого эрлифта (при значении транспортной скорости $w_{n.m} = 2,5$ м/с в подающей трубе $d = 300$ мм) является величина $Q_{\text{пр.б}} = w_{n.m} \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 2,5 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,3^2}{4} = 0,176 \text{ м}^3/\text{с} = 636 \text{ м}^3/\text{ч}$. Считаем, что в данном эрлифте в диапазоне притоков жидкости (гидросмеси) $Q_{\text{пр.б}} \leq Q_{\text{пр}} = Q_{\text{э.макс}}$ давление в смесителе $p_{\text{см}}$ не изменится и будет равно давлению в смесителе, имеющему место при подаче эрлифта $Q_{\text{э}} = Q_{\text{пр.б}} = 636 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Применив программу для численного решения на ПЭВМ математической модели рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси [84, 85] и решив ее при условии постоянства давления в смесителе $p_{\text{см}} = \text{const}$ (в отличие от применявшегося ранее решения $h = \text{const}$ - рис. 2.4), были получены характеристики газожидкостного подъемника при постоянном геометрическом погружении смесителя и с постоянным давлением в смесителе (имеющим место при базовом притоке $Q_{\text{э}} = Q_{\text{пр.б}} = 636 \text{ м}^3/\text{ч}$ и принятой скорости жидкости (гидросмеси) в подающей трубе $w_{n.m} = 2,5$ м/с) [рис. 2.8].

Из сравнения значений параметров работы эрлифтов $H+h = 42,75$ м, $D = 600$ мм, $d = 300$ мм, $w_{n.m} = 2,5$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = \text{const}$ и постоянным давлением в смесителе $p_{\text{см}} = \text{const}$ (табл. 2.3) следует, что степень увеличения подачи и, что в данном случае одно и то же, увеличение значений абсолютных подач эрлифта с постоянным давлением в смесителе $p_{\text{см}} = \text{const}$ в условиях блочного пневмоснабжения центробежным (радиальным) нагнетателем ЦНВ 160/3,2 превышает аналогичные показатели

эрлифта с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ в 1,27 ÷ 1,53 раза.

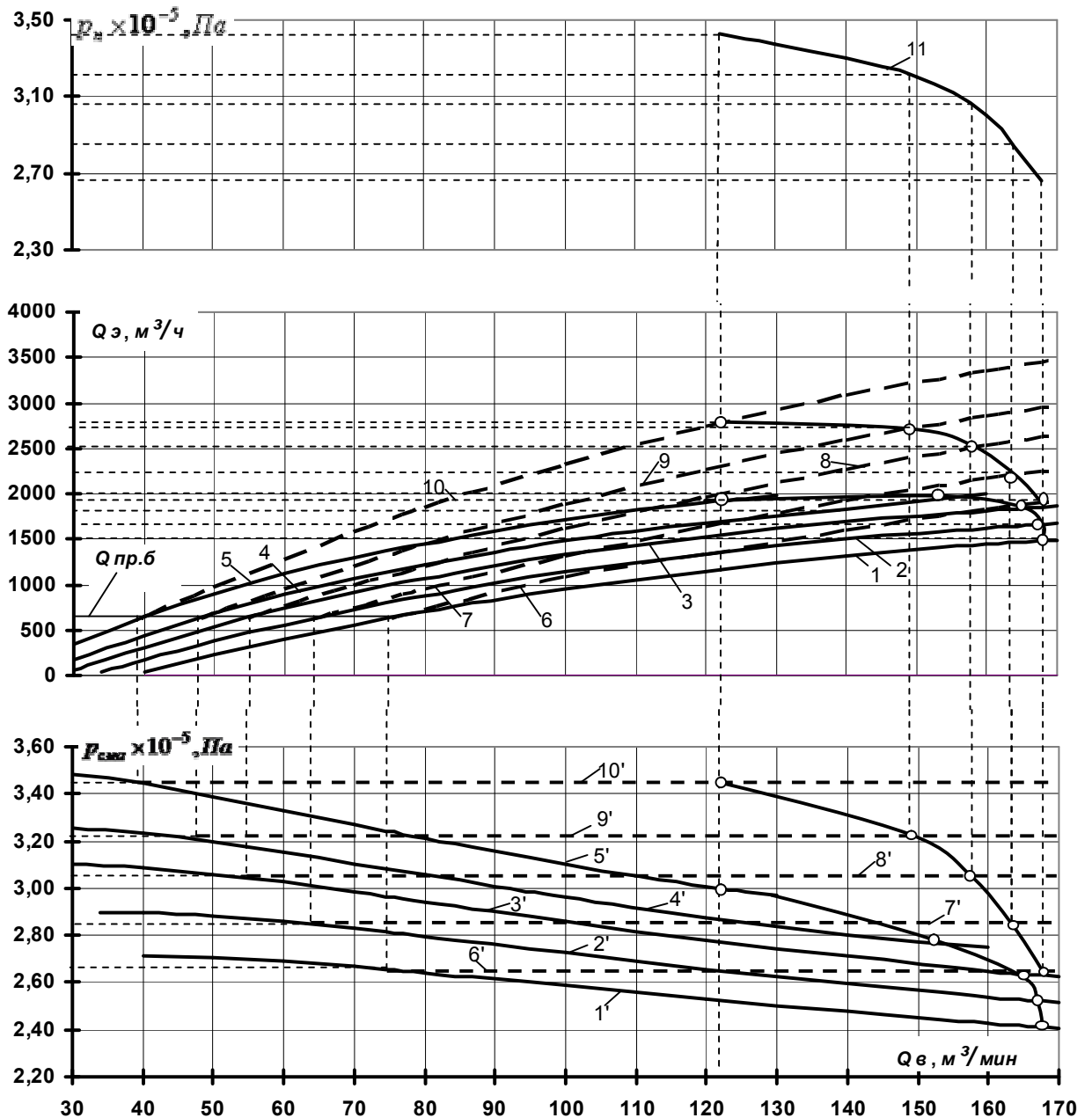


Рисунок 2.8 - Рабочий режим водоотливной установки ($H+h = 42,75$ м, $D = 600$ мм, $d = 300$ мм) с блочным воздушноснабжением от центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2: 1, 1' – зависимости подачи и давления в смесителе эрлифта от расхода воздуха при условии постоянства геометрического погружения смесителя $h = const$, при $h = 17,1$ м; 2, 2' - $h = 19$ м; 3, 3' - $h = 21$ м; 4, 4' - $h = 22,6$ м; 5, 5' - $h = 25$ м; 6, 6' - зависимости подачи и давления в смесителе эрлифта от расхода воздуха при постоянстве давления в смесителе $p_{cма} = const$, при $h = 17,1$ м; 7, 7' - $h = 19$ м; 8, 8' - $h = 21$ м; 9, 9' - $h = 22,6$ м; 10, 10' - $h = 25$ м; 11 – характеристика нагнетателя ЦНВ 160/3,2.

Таблица 2.3 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 42,75$ м, $D = 600$ мм, $d = 300$ мм, $w_{н.м} = 2,5$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ с блочным воздухомоснабжением от центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2 с учетом влияния потерь давления в смесителе на режим работы нагнетателя

Геометрическое погружение смесителя h , м	Минимально допустимая подача $Q_{э.мин}$, м ³ /ч	Подача эрлифта $Q_э$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение степеней увеличения подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_э$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_э$, м ³ /ч	k_{Qp}	
25,0	636	2000	3,14	2900	4,56	1,45
22,6	636	1800	2,83	2760	4,34	1,53
21,0	636	1850	2,91	2590	4,07	1,40
19,0	636	1620	2,55	2230	3,51	1,38
17,1	636	1500	2,36	1900	2,99	1,27

Аналогичные результаты были получены для диапазона диаметров подающих труб $d = 300 \div 500$ мм, которые свидетельствуют об увеличении отношения степени увеличения подачи при постоянном давлении в смесителе $p_{см} = const$ к степени увеличения подачи при условии постоянства геометрического погружения смесителя $h = const$ k_{Qp}/k_{Qh} при уменьшении диаметра подающей трубы (рис. 2.9). Диапазон минимальных значений отношения степени увеличения подачи (для всего диапазона возможных геометрических погружений смесителя при каждом диаметре подающей трубы, например при $d = 300$ мм, минимальное значение 1,27, максимальное – 1,53 [табл. 2.3]) k_{Qp}/k_{Qh} составляет $1,0047 \div 1,27$, максимальных – $1,029 \div 1,53$.

Таким образом, обеспечение постоянного давления в смесителе $p_{см} = const$ при увеличении подачи эрлифта с блочным воздухомоснабжением центробежными (радиальными) нагнетателями позволяет увеличить подачу в сравнении с эрлифтом с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ в 1,01 ÷ 1,53 раза.

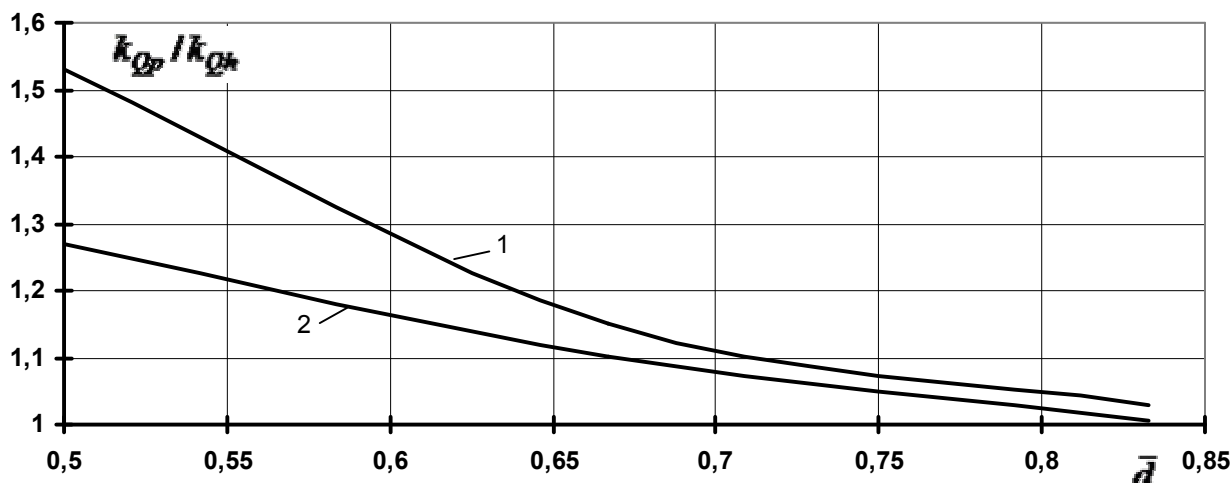


Рисунок 2.9 - Зависимость отношения степеней увеличения подачи эрлифта с постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ и эрлифта работающего при постоянном погружении смесителя $h = const$ от безразмерного диаметра подающей трубы \bar{d} ($\bar{d} = d/D$, базовое значение $D = 600$ мм) при пневмоснабжении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: 1 – максимальное отношение степеней увеличения подачи; 2 – минимальное отношение степеней увеличения подачи

2.2 Подача эрлифтных установок с блочными источниками пневмоэнергии неизменной производительности

Блочными источниками пневмоэнергии, которые обеспечивают постоянный (или близкий к такому) расход воздуха на эрлифт независимо от давления в смесителе, изменение которого может быть вызвано переменными притоками жидкостей (гидросмесей) или требуемыми переменными подачами газожидкостного подъемника, будем считать, как показано в разделе 1.2.3, объемные (поршневые, винтовые и др.) компрессоры, струйные (пароструйные, воздушоструйные, газоструйные - на предельных режимах работы) компрессоры и пневмосети с давлением, существенно превышающим давление в смесителе и дросселированием воздушного потока.

Решение задачи обоснования диапазонов возможных подач Q_3 , а также энергетической эффективности работы эрлифтов с источниками пневмоэнергии неизменной производительности в общем виде из-за сложности рассматриваемых процессов в настоящее время также, как и для случая пневмоснабжения эрлифтов блочными центробежными (радиальными) нагнетателями, не представляется возможным. Поэтому и для данных условий целесообразно использовать численный метод анализа работы эрлифтных установок [88].

Особенности рабочего процесса газожидкостного подъемника в условиях переменных притоков воды (гидросмеси) Q_{np} и обеспечения неизменного расхода воздуха Q_6 в смеситель независимо от давления в нем рассмотрим на примере эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и диаметрами подающих труб $d = 100, 125$ и 150 мм. Общепромышленные эрлифтные установки с источниками неизменной производительности и газожидкостными подъемниками с указанными и близкими к ним геометрическими параметрами находят применение в горной промышленности для вспомогательного водоотлива [5, 6] или чистки подземных технологических емкостей [7, 8], в составе эрлифтно-земснарядных комплексов [18-23], в металлургии [89], на ТЭС в качестве дренажных и водоотливных установок [66].

Целесообразность анализа работы эрлифта с одним заданным диаметром подъемной трубы (в данном случае $D = 200$ мм) и несколькими значениями диаметров подающих труб ($d = 100, 125$ и 150 мм) обосновывается необходимостью обеспечения разных транспортных скоростей в подающей трубе (табл. 2.4) энергоэффективного газожидкостного подъемника для выбранных условий его применения – водоотливная установка или гидроподъемная установка для транспортирования твердых материалов с отличающимися физическими свойствами.

Для эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и трех значений диаметров подающих труб $d = 100, 125$ и 150 мм

численным методом на ПЭВМ [84, 85] получены расходные характеристики газожидкостного подъемника (рис. 2.10 – пример характеристик эрлифта с $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм при значении $d = 100$ мм) в виде $Q_э = f(Q_в, \alpha)$ – кривые 1-5, а также зависимости изменения избыточного давления в смесителе $p_{см} = f(Q_в, \alpha)$ – кривые 1'-5', и гидростатического давления геометрического погружения

Таблица 2.4 – Величины минимально допустимых подач эрлифта $Q_{экр}$, обеспечивающих потребные транспортные скорости в подающей трубе $w_{н.м}$ при принятых значениях ее диаметра d

Транспортная скорость в подающей трубе $w_{н.м}$, м/с	Минимально допустимая подача $Q_{экр}$, м ³ /ч, при диаметре подающей трубы:		
	$d = 100$ мм	$d = 125$ мм	$d = 150$ мм
1,0	28,3	44,2	63,6
1,5	42,4	66,2	95,4
2,0	56,5	88,3	127,2
2,5	70,7	110,4	159,0
3,0	84,8	132,5	190,8
3,5	98,9	154,5	222,5
4,0	113,0	176,6	254,3

смесителя $p_{н.с} = f(Q_в, \alpha)$ – кривые 1"-5", при постоянных геометрических погружениях $h_1 = 20,0$ м; $h_2 = 25,0$ м; $h_3 = 30,0$ м; $h_4 = 35,0$ м; $h_5 = 40,0$ м, что обеспечивает значения относительных геометрических погружений $\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$. Принятый для анализа работы рассматриваемого эрлифта диапазон относительных погружений α [$\alpha = h/(H + h)$] обосновывается тем, что, как доказано в [50], наиболее энергоэффективная снарядная структура водовоздушной смеси имеет место в подъемной трубе при значениях $\alpha \geq 0,40$, а в соответствии с [40, 91] энергорациональные диапазоны работы эрлифтов с параметрами, аналогичными принятым к рассмотрению в данном случае, ограничиваются значениями $\alpha \leq 0,80 \div 0,85$.

Максимальным значением КПД $\eta_{эр.опт.макс} = 0,597$ в анализируемом диапазоне параметров характеризуется работа эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 150$ мм в оптимальном режиме при относительном погружении смесителя α

= 0,80 (рис. 2.11 - пример энергетической характеристики эрлифта с $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм при значении $d = 150$ мм).

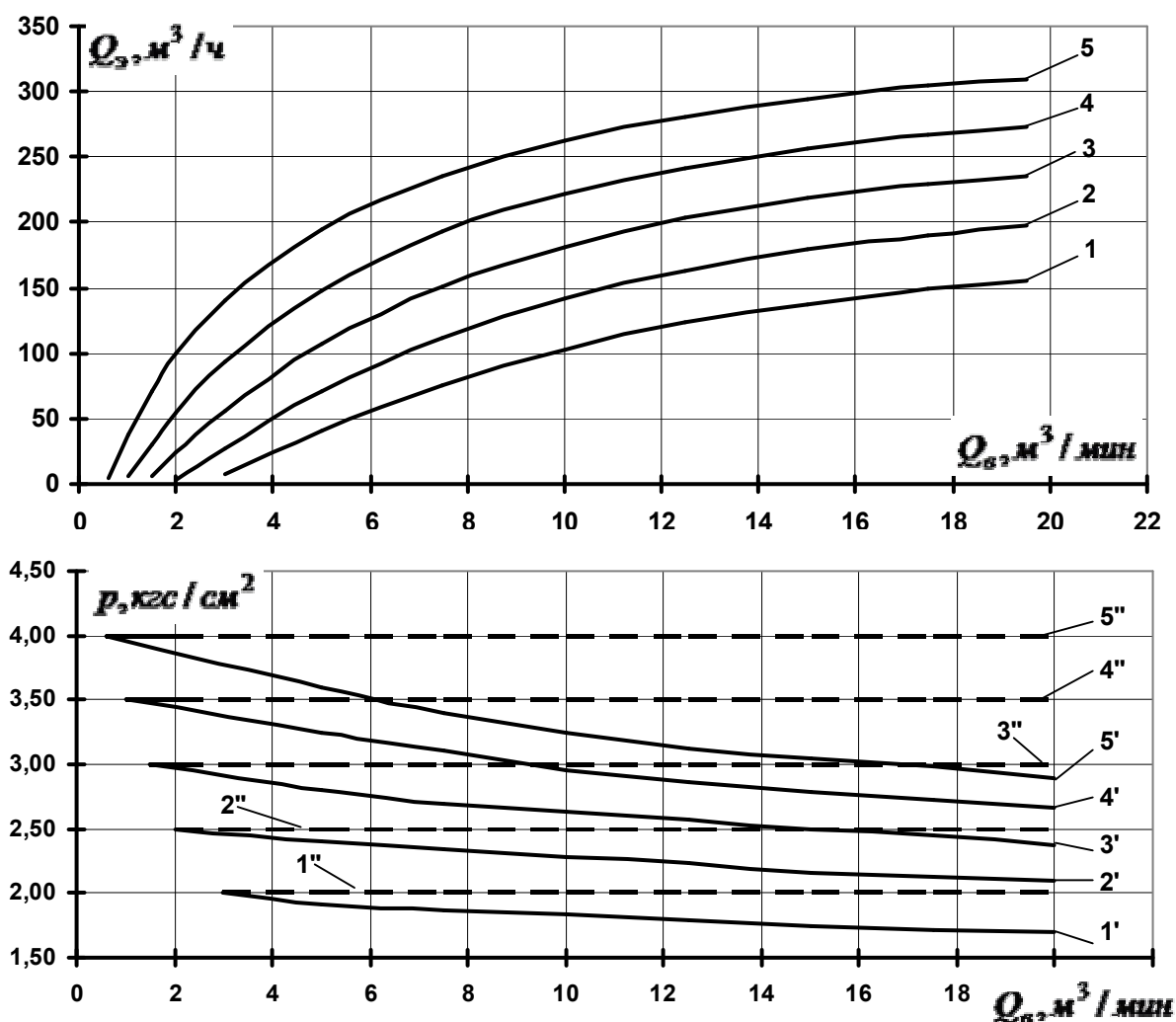


Рисунок 2.10 – Расчетные характеристики эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и подающей трубой диаметром $d = 100$ мм: $1 \div 5 - Q_3 = f(Q_6)$; $1' \div 5' - p_{см} = f(Q_6)$; $1'' \div 5'' - p_{н.с} = f(Q_6)$ [$\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$]

При построении энергетических характеристик газожидкостных подъемников (рис. 2.11) значения КПД эрлифтов $\eta_{эр}$ вычислены при действительных давлениях в смесителе, то есть с учетом потерь напора в подающей трубе [40, 41].

Приняв, что энергетически допустимыми режимами работы эрлифта являются режимы со значением минимально допустимого КПД $\eta_{эр.доп.мин} =$

$=0,8 \cdot \eta_{эр.опт.макс} = 0,8 \cdot 0,597 = 0,478$, определив [84, 85] параметры работы эрлифта при принятых значениях КПД $\eta_{эр.доп.мин} = 0,478$ (табл. 2.5) и нанеся

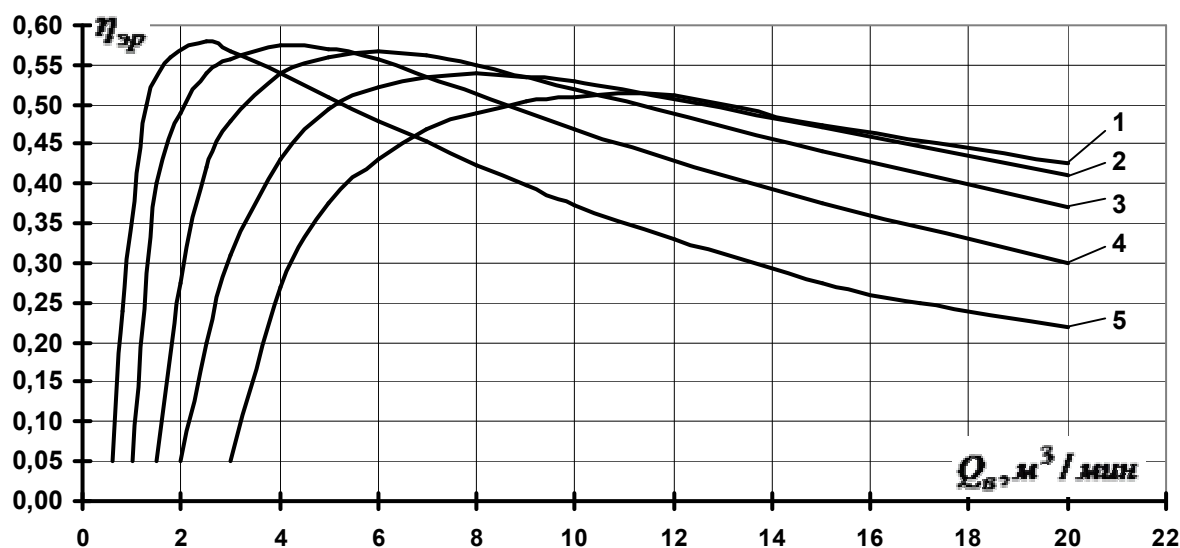


Рисунок 2.11 - Характеристики КПД $\eta_{эр} = f(Q_в)$ эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 150$ мм: 1 – при $\alpha_1 = 0,40$ м; 2 - $\alpha_2 = 0,50$ м; 3 - $\alpha_3 = 0,60$ м; 4 - $\alpha_4 = 0,70$ м; 5 - $\alpha_5 = 0,80$]

значения этих параметров на графики расходных характеристик эрлифтов (кривые 6 и 8, рис. 2.12), получена энергетически допустимая зона эксплуатации газожидкостного подъемника (рис. 2.12 – пример построения зоны энергетически допустимых режимов работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм). На эти же графики нанесены кривая 7, соответствующая параметрам работы эрлифта в оптимальном режиме при $\eta_{эр} = \eta_{эр.опт}$, и прямые 9, 10 и 11 минимально допустимых подач эрлифта $Q_{э.кр} = \text{const}$, обеспечивающих потребные транспортные скорости в подающей трубе $w_{н.т}$ (в соответствии с данными табл. 2.4).

Таким образом, режимы энергетически допустимо-возможной эксплуатации эрлифта определяются зоной (рис. 2.12), ограниченной: в нижней части – прямой (прямые 9, 10 или 11) $Q_{э.кр} = \text{const}$ (значение $Q_{э.кр}$ определяется потребной величиной транспортной скорости в подающей трубе $w_{н.т}$) или графической зависимостью (кривая 6) $Q_{э.восх} = f(Q_в \text{ восх})$ при значении $\eta_{эр.доп.мин} = 0,478$ на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_в)$ - если эта зависимость

Таблица 2.5 – Параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм со значением минимально допустимого КПД $\eta_{эр доп. мин} = 0,478$

Относительное погружение смесителя α	Диаметр подающей трубы d , мм	Параметры работы эрлифта при значении $\eta_{эр доп. мин} = 0,478$:			
		на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$:		на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$:	
		расход воздуха $Q_{в восх}$, м ³ /мин	подача $Q_{э восх}$, м ³ /ч	расход воздуха $Q_{в нисх}$, м ³ /мин	подача $Q_{э нисх}$, м ³ /ч
0,400	100	7,96	81,3	11,25	112,9
0,500	100	4,90	69,3	11,44	154,4
0,600	100	3,30	64,8	9,33	173,9
0,700	100	2,19	62,5	6,47	176,1
0,800	100	1,31	60,2	3,56	158,2
0,400	125	7,19	74,7	13,90	142,0
0,500	125	4,70	67,0	13,63	188,8
0,600	125	3,23	63,8	11,52	220,0
0,700	125	2,15	61,5	8,50	235,2
0,800	125	1,24	57,2	5,07	226,7
0,400	150	7,03	73,5	14,90	154,1
0,500	150	4,66	66,7	14,64	206,2
0,600	150	3,24	64,3	12,59	244,6
0,700	150	2,17	62,1	9,58	269,1
0,800	150	1,25	57,7	5,96	269,4

располагается на графике выше прямой $Q_{э.кр} = const$; с левой стороны – расходной характеристикой эрлифта (кривая 5) $Q_3 = f(Q_6)$ при максимально целесообразном (возможном) относительном погружении $\alpha_5 = 0,80$; с правой стороны - расходной характеристикой эрлифта (кривая 1) $Q_3 = f(Q_6)$ при минимально допустимом (целесообразном) относительном погружении $\alpha_1 = 0,40$; в верхней части – графической зависимостью (кривая 8) $Q_{э.нисх} = f(Q_{в.нисх})$ при значении $\eta_{эр. доп. мин} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$.

Учитывая, что для подавляющего большинства конструктивных и технологических вариантов применяемых в промышленности эрлифтов, количественный анализ работы которых выполнен, нижней границей зоны допустимо-возможной эксплуатации является прямая $Q_{э.кр} = const$, соответствующая минимально-допустимой транспортной скорости в подающей

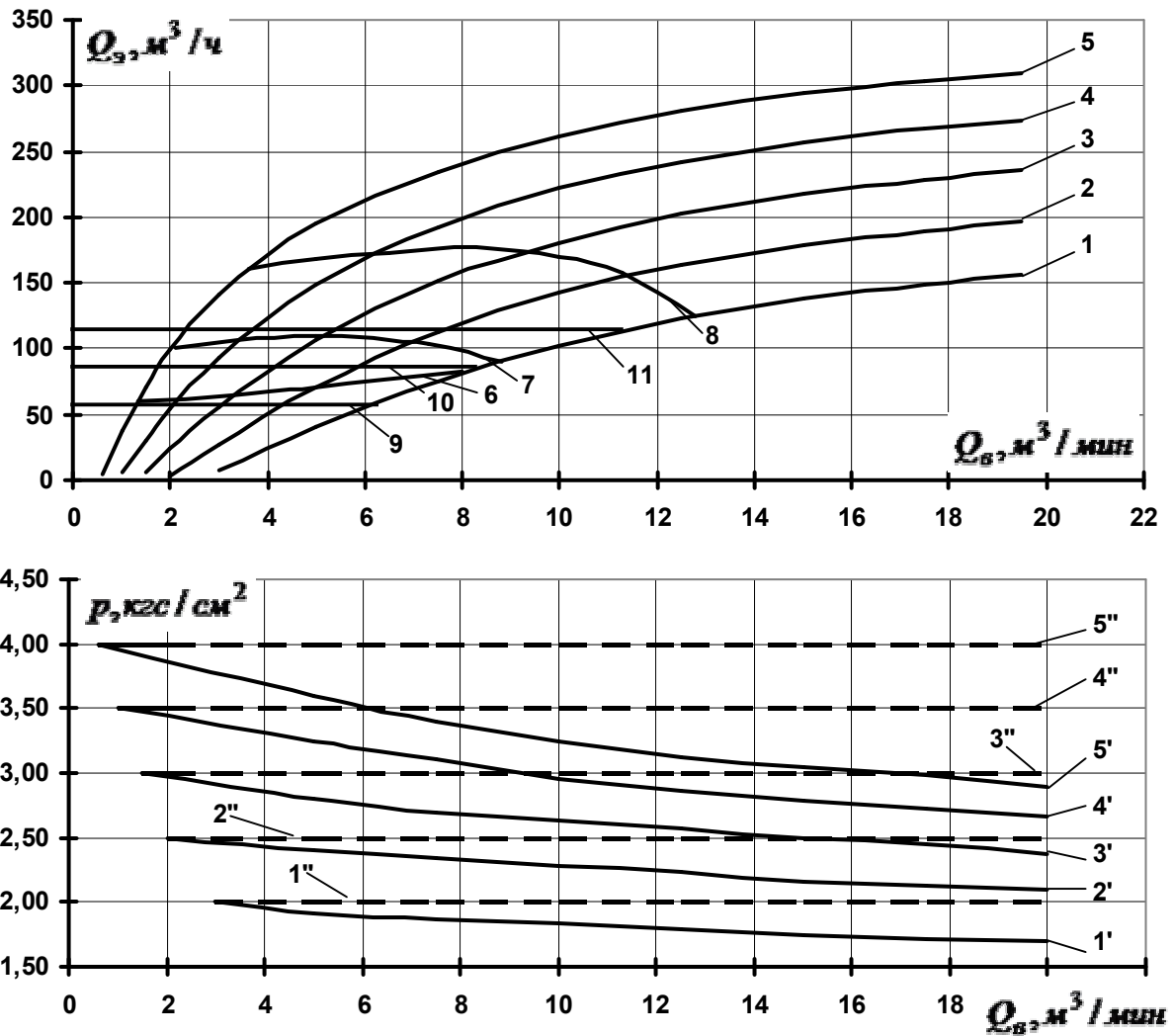


Рисунок 2.12 – Энергетически допустимо-возможная зона эксплуатации эрлифта ($H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм): 1÷5 - $Q_э = f(Q_в)$; 1' ÷ 5' - $p_{см} = f(Q_в)$; 1'' ÷ 5'' - $p_{н.с} = f(Q_в)$; 6 - $Q_э_{восх} = f(Q_в_{восх})$ при значении $\eta_{эр доп мин} = 0,478$ на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_в)$; 7 - $Q_э_{онт} = f(Q_в_{онт})$ при значении $\eta_{эр} = \eta_{эр онт}$; 8 - $Q_э_{нисх} = f(Q_в_{нисх})$ при значении $\eta_{эр доп мин} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_в)$; 9 - $Q_э = Q_э_{кр} = 56,5$ м³/ч ($w_{н.м} = 2,0$ м/с); 10 - $Q_э = Q_э_{кр} = 84,8$ м³/ч ($w_{н.м} = 3,0$ м/с); 11 - $Q_э = Q_э_{кр} = 113,0$ м³/ч ($w_{н.м} = 4,0$ м/с); [$\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$]

трубе (табл. 2.4), распространим это положение в дальнейших исследованиях для всех анализируемых установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности, заведомо завышая, в некоторых случаях, возможный диапазон подач газожидкостных подъемников традиционной конструкции.

Тогда возможная степень увеличения подачи эрлифта k_Q с рассматриваемой схемой воздухообеспечения при заданном расходе воздуха

определяется как отношение максимально возможной подачи эрлифта $Q_{\text{э макс}}$ в пределах границ зоны допустимо-возможной эксплуатации подъемника к подаче $Q_{\text{э кр}}$, обеспечивающей минимально допустимую транспортную скорость в подающей трубе $w_{n.m}$

$$k_Q = \frac{Q_{\text{э макс}}}{Q_{\text{э кр}}}. \quad (2.4)$$

Подачу превышающая значение критической (базовой) далее будем называть дополнительной подачей.

Вычисленная в соответствии с (2.4) степень увеличения подачи рассматриваемого эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м и диаметром $D = 200$ мм при работе в энергорациональной зоне эксплуатации в зависимости от потребных транспортных скоростей в подающей трубе $w_{n.m}$ изменяется в диапазонах: при диаметре подающей трубы $d = 100$ мм - $k_Q = 1,59 \div 3,18$ (при расходе воздуха $Q_{\text{с}} = 8$ м³/мин); при диаметра подающей трубы $d = 125$ мм - $k_Q = 1,32 \div 2,64$ (при расходе воздуха $Q_{\text{с}} = 8$ м³/мин); при диаметре подающей трубы $d = 150$ мм - $k_Q = 1,06 \div 2,12$ (при расходе воздуха $Q_{\text{с}} = 6$ м³/мин) (табл. 2.6). Таким образом, уменьшение диаметра подающей трубы при прочих равных условиях увеличивает степень увеличения подачи эрлифта k_Q , однако абсолютные значения подач при этом существенно уменьшаются, например от $Q_{\text{э макс}} = 269,2$ м³/ч при значении диаметра подающей трубы $d = 150$ мм до $Q_{\text{э макс}} = 179,4$ м³/ч при значении диаметра подающей трубы $d = 100$ мм, то есть в $\approx 1,5$ раза, что далеко не всегда приемлемо.

Энергетически допустимо-возможные зоны эксплуатации эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и подающей трубой диаметрами $d = 100$ мм, $d = 125$ мм, $d = 150$ мм представлены в приложении А13.

Существенно увеличить абсолютное значение максимально возможной подачи эрлифта $Q_{\text{э макс}}$ и повысить значение степени увеличения подачи k_Q при прочих равных условиях возможно в газожидкостном подъемнике, устройство

Таблица 2.6 – Степень увеличения подачи k_Q эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и подающими трубами $d = 100, 125$ и 150 мм с воздухопоснабжением от источника пневмоэнергии неизменной производительности

Расход воздуха $Q_в$, м ³ /мин	Максимально возможная подача $Q_{э макс}^{возм}$, м ³ /ч	Минимально допустимая подача $Q_{э кр}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при значениях транспортных скоростей в подающей трубе $w_{n.m}$:					
		$w_{n.m} = 2,0$ м/с		$w_{n.m} = 3,0$ м/с		$w_{n.m} = 4,0$ м/с	
		$Q_{э кр}$, м ³ /ч	k_Q	$Q_{э кр}$, м ³ /ч	k_Q	$Q_{э кр}$, м ³ /ч	k_Q
$D = 200$ мм, $d = 100$ мм							
2,0	99,6	56,5	1,76	84,8	1,17	-	-
4,0	160,8	56,5	2,85	84,8	1,90	113,0	1,42
6,0	172,8	56,5	3,06	84,8	2,04	113,0	1,53
8,0	179,4	56,5	3,18	84,8	2,12	113,0	1,59
10,0	171,6	56,5	3,04	84,8	2,02	113,0	1,52
12,0	138,6	56,5	2,45	84,8	1,63	118,6	1,17
14,0	-	-	-	-	-	-	-
$D = 200$ мм, $d = 125$ мм							
2,0	108,8	88,3	1,23	-	-	-	-
4,0	195,7	88,3	2,22	132,5	1,48	176,6	1,11
6,0	227,5	88,3	2,58	132,5	1,72	176,6	1,29
8,0	233,2	88,3	2,64	132,5	1,76	176,6	1,32
10,0	233,6	108,4	2,16	132,5	1,76	176,6	1,32
12,0	217,3	127,2	1,71	132,5	1,64	176,6	1,23
14,0	172,5	142,7	1,21	142,7	1,21	-	-
$D = 200$ мм, $d = 150$ мм							
2,0	-	-	-	-	-	-	-
4,0	210,3	127,2	1,65	190,8	1,10	-	-
6,0	269,2	127,2	2,12	190,8	1,41	254,3	1,06
8,0	268,0	127,2	2,11	190,8	1,40	254,3	1,05
10,0	268,0	127,2	2,11	190,8	1,40	254,3	1,05
12,0	255,7	131,0	1,95	190,8	1,34	254,3	1,01
14,0	218,8	147,6	1,48	190,8	1,15	-	-

которого позволяет при увеличении притоков жидкости (гидросмеси) и, следовательно, требуемой подачи, поддерживать практически постоянное давление в смесителе $p_{см}$ на уровне давления, имеющего место при базовом притоке $Q_{пр. б}$. Рассмотрим решение этой задачи на примере эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и подающей трубой диаметром $d = 100$ мм при условии необходимости обеспечения в

последней транспортной скорости $w_{n,m} = 4,0$ м/с, при этом базовы притоком является величина $Q_{np.б} = 113,0$ м³/ч (табл. 2.4)..

Примем, что в эрлифте с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы при увеличении притока жидкости (гидросмеси) $Q_{np} > Q_{np.б}$ давление в смесителе $p_{см}$ не изменится и будет равно давлению в смесителе, имеющем место при подаче эрлифта $Q_э = Q_{np.б} = 113,0$ м³/ч. Значения давлений в смесителе при подаче эрлифта $Q_э = 113,0$ м³/ч и каждом из рассматриваемых величин относительных погружений $\alpha = 0,40 \div 0,80$ определены (табл. 2.7), используя полученные зависимости $p_{см} = f(Q_э)$ (рис. 2.12).

Применив программу для численного решения на ПЭВМ математической модели рабочего процесса эрлифта со снаряженной структурой водовоздушной смеси [84, 85] и решив ее при условии $p_{см} = const$ (в отличие от решения $h = const$ при построении приведенных на рис. 2.10 расчетных характеристик), построены характеристики газожидкостного подъемника с

Таблица 2.7 – Параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм при значении транспортной скорости в подающей трубе $w_{n,m} = 4,0$ м/с и подаче $Q_э = 113,0$ м³/ч

Относительное погружение смесителя α	Расход воздуха $Q_в$, м ³ /мин	Избыточное давление в смесителе $p_{см}$, кгс/см ²	КПД $\eta_{эр}$
0,400	11,27	1,855	0,478
0,500	7,59	2,344	0,514
0,600	5,29	2,833	0,530
0,700	3,62	3,333	0,532
0,800	2,29	3,843	0,521

постоянным давлением в смесителе и нанесены дополнительно (рис. 2.13) на выше полученные характеристики (рис. 2.12) с постоянным геометрическим погружением смесителя и выделенной допустимо-возможной зоной эксплуатации подъемника. Кривые 11-15 (рис. 2.13) являются графическим отображением расходных характеристик эрлифта $Q_э = f(Q_в, \alpha)$ при условии $p_{см} =$

const. Используя выше изложенную методику, на эти же характеристики нанесена графическая зависимость (кривая 16) $Q_{э\text{ нисх}} = f(Q_{в\text{ нисх}})$ при значении $\eta_{эр\text{ доп мин}} = 0,478$ на нисходящих ветвях характеристик $\eta_{эр} = f(Q_{в})$ эрлифта с $p_{см} = const$ (табл. 2.8), что позволило установить, в том числе, энергетически допустимо-возможную зону эксплуатации данного газожидкостного подъемника.

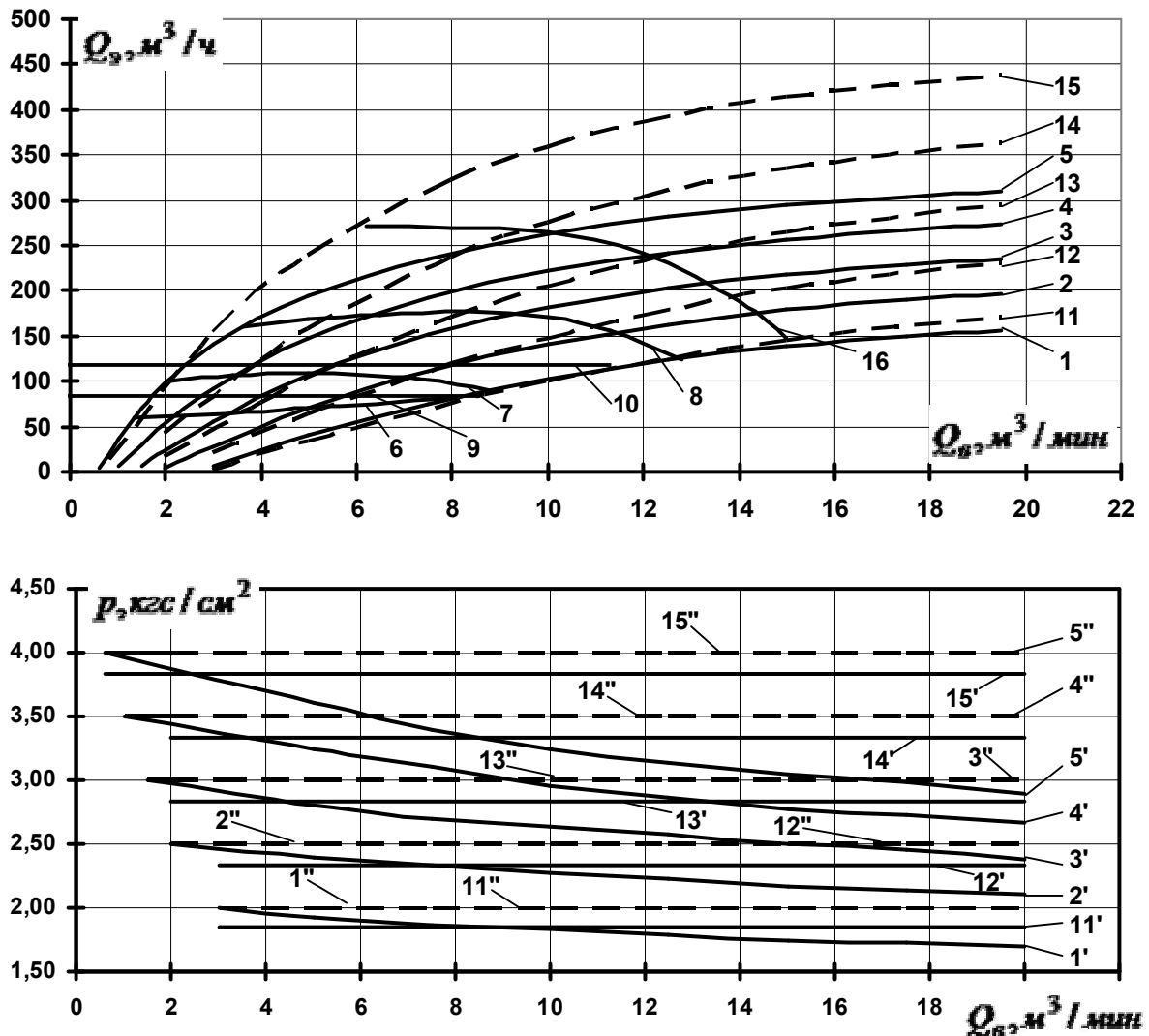


Рисунок 2.13 – Энергетически допустимо-возможные зоны эксплуатации эрлифтов с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм и подающей трубой диаметром $d = 100$ мм при $h = const$ и $p_{см} = const$: 1÷5; 11-15 - $Q_{э} = f(Q_{в})$; 1' ÷ 5'; 11'-15' - $p_{см} = f(Q_{в})$; 1" ÷ 5"; 11"-15" - $p_{н.с} = f(Q_{в})$; 6 - $Q_{э\text{ восх}} = f(Q_{в\text{ восх}})$ при значении $\eta_{эр\text{ доп мин}} = 0,478$ на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_{в})$ эрлифта с $h = const$; 7 - $Q_{э\text{ опт}} = f(Q_{в\text{ опт}})$ при значении $\eta_{эр} = \eta_{эр\text{ опт}}$ эрлифта с $h = const$; 8 - $Q_{э\text{ нисх}} = f(Q_{в\text{ нисх}})$ при значении $\eta_{эр\text{ доп мин}} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_{в})$ эрлифта с $h = const$; 9 - $Q_{э} = Q_{э\text{ кр}} = 84,8$ м³/ч

($w_{n.m} = 3,0$ м/с); 10 - $Q_{\varepsilon} = Q_{\varepsilon_{кр}} = 113,0$ м³/ч ($w_{n.m} = 4,0$ м/с); 16 - $Q_{\varepsilon_{нисх}} = f(Q_{\varepsilon_{нисх}})$ при значении $\eta_{\varepsilon p \text{ доп мин}} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{\varepsilon p} = f(Q_{\varepsilon})$ эрлифта с $p_{см} = const$ [$\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$]

Из сравнения значений параметров работы эрлифтов $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм, $w_{n.m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ (табл. 2.9) следует, что степень увеличения подачи и, что в данном случае одно и то же, увеличение значений абсолютных подач эрлифта с постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ в условиях воздухоснабжения от источников пневмоэнергии неизменной производительности превышает аналогичные показатели эрлифта при условии постоянства геометрического погружения смесителя в $1,25 \div 1,72$ раза.

Таблица 2.8 – Параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм $d = 100$ мм со значением минимально допустимого КПД $\eta_{\varepsilon p \text{ доп мин}} = 0,478$, на нисходящей ветви характеристики $\eta_{\varepsilon p} = f(Q_{\varepsilon})$ газожидкостного подъемника с $p_{см} = const$

Относительное погружение смесителя α	Расход воздуха $Q_{\varepsilon_{нисх}}$, м ³ /мин	Подача $Q_{\varepsilon_{нисх}}$, м ³ /ч
0,400	11,50	115,2
0,500	13,95	193,2
0,600	12,25	236,1
0,700	9,48	265,8
0,800	6,01	272,0

Аналогичные результаты получены и для эрлифтов с другими геометрическими параметрами - $H+h = 20, 30, 40$ м, $D = 200$ мм, $d = 100, 150, 200$ мм [приложение А14, табл. А8-А16].

Обеспечение постоянного давления в смесителе $p_{см} = const$ при увеличении подачи эрлифта с источниками пневмоэнергии неизменной производительности, позволяет увеличить подачу в сравнении с эрлифтом с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$, на примере

эрлифта с $H+h = 20, 30, 40$ м, $D = 200$ мм, $d = 100, 150, 200$ мм, $\alpha = 0,4 \div 0,8$ до 2,22 раз (рис. 2.14).

Таблица 2.9 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ с воздухоснабжением от источников пневмоэнергии неизменной производительности

Расход воздуха $Q_в$, м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{экр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение степеней увеличения подач k_{Qp} / k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2,0	-	99,6	-	-	-	-
4,0	113,0	160,8	1,42	200,6	1,78	1,25
6,0	113,0	172,8	1,53	271,7	2,40	1,57
8,0	113,0	179,4	1,59	269,2	2,38	1,50
10,0	113,0	171,6	1,52	263,7	2,33	1,54
12,0	113,0	138,6	1,17	241,5	2,01	1,72
14,0	113,0	-	-	189,0	1,37	-

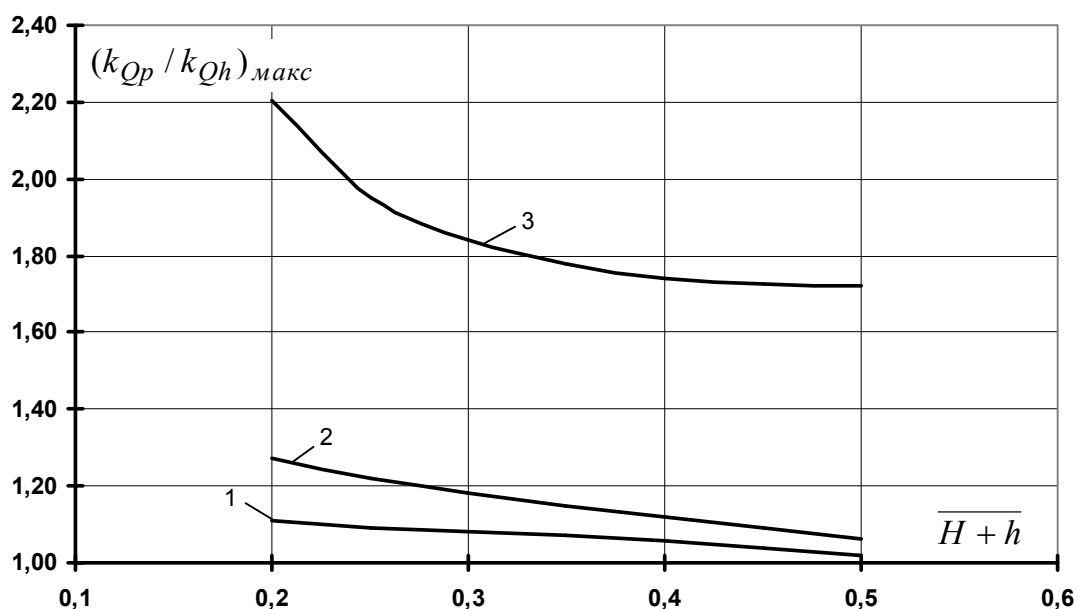


Рисунок 2.14 - Зависимость $(k_{Qp} / k_{Qh})_{макс} = f(\overline{H+h})$ эрлифтной установки с источником пневмоэнергии неизменной производительности ($D = 200$ мм, $\alpha = 0,4 \div 0,8$): 1 – при $d = 200$ мм; 2 - при $d = 150$ мм; при $d = 100$ мм (базисное значение высоты подъемной трубы $H+h = 100$ м)

2.3 Энергетически оптимальный способ изменения подачи эрлифта

Обеспечивать согласование подачи эрлифта с переменными во времени притоками жидкости (гидросмеси) наиболее энергетически рационально таким образом, чтобы при каждом значении притока газожидкостный подъемник эксплуатировался с максимально возможным коэффициентом полезного действия, то есть в энергетически оптимальном режиме. Для анализа такого способа изменения подачи примем, что наиболее энергетически эффективной работой эрлифта при каждом значении притока жидкости (гидросмеси) будет такая, при которой при каждом значении подачи эрлифта $Q_{пр.мин} \leq Q_э \leq Q_{пр.макс}$ последний работает с максимально возможным КПД при требуемом значении геометрического погружения смесителя $h_{мин} \leq h \leq h_{макс}$. Принятым допущением выводим за пределы рассматриваемого анализа возможные варианты достижения большего КПД, при одной и той же подаче эрлифта за счет перехода на расходную характеристику при большем геометрическом погружении смесителя то есть, рассматривается только работа при максимальном КПД для каждой расходной характеристики при соответствующем геометрическом погружении.

При работе эрлифта в оптимальном режиме (с максимальным КПД) при постоянных значениях геометрического погружения смесителя $h = const$, для эрлифта с подъемной трубой длиной $H+h = 50$ м, диаметром $D = 200$ мм, подающей трубой диаметром $d = 100$ мм, подача $Q_э$ составляет (рис. 2.15): для $h = 20$ м ($\alpha = 0,4$) - 88 м³/ч (кривая 1', точка a); для $h = 25$ м ($\alpha = 0,5$) - 91 м³/ч (кривая 2', точка b); для $h = 30$ м ($\alpha = 0,6$) - 90 м³/ч (кривая 3', точка c); для $h = 35$ м ($\alpha = 0,7$) - 79 м³/ч (кривая 4', точка d); для $h = 40$ м ($\alpha = 0,8$) - 74 м³/ч (кривая 5', точка e). Таким образом, диапазон изменения подачи эрлифта энергетически оптимальным способом составляет $Q_э = 74 \div 91$ м³/ч и степень увеличения подачи такого эрлифта $k_{Qh} = 91 / 74 = 1,23$.

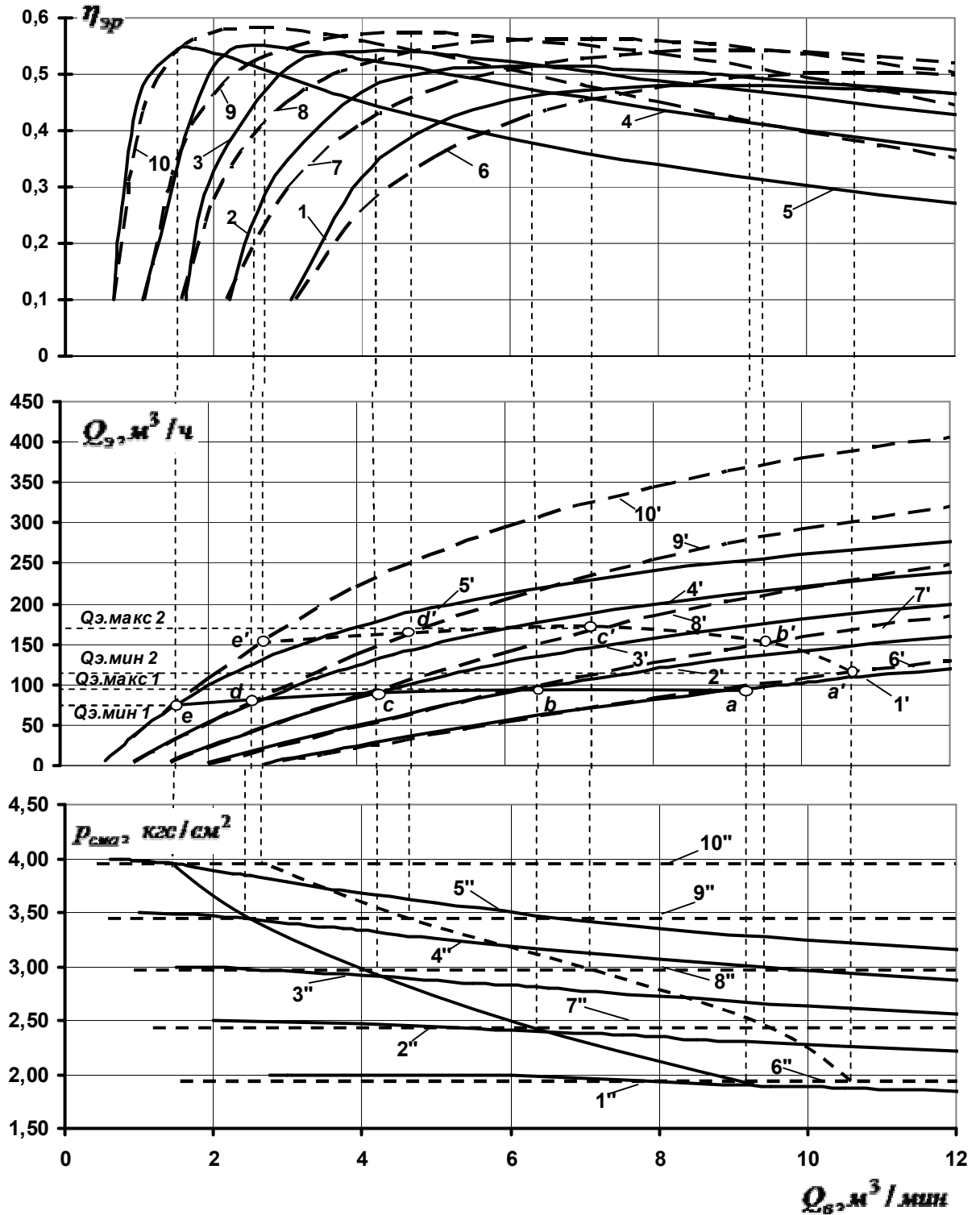


Рисунок 2.15 - Диапазоны подач при обеспечении энергетически оптимальных режимов работы эрлифта ($H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм, $\alpha = 0,4 \div 0,8$): 1÷5- $\eta_{\text{эп}} = f(Q_{\text{в}})$ при $h = \text{const}$ для $h = 20$ м ($\alpha = 0,4$), 25 м ($\alpha = 0,5$), 30 м ($\alpha = 0,6$), 35 м ($\alpha = 0,7$), 40 м ($\alpha = 0,8$); 1'÷5' - $Q_{\text{э}} = f(Q_{\text{в}})$ при $h = \text{const}$ для $h = 20$ м ($\alpha = 0,4$), 25 м ($\alpha = 0,5$), 30 м ($\alpha = 0,6$), 35 м ($\alpha = 0,7$), 40 м ($\alpha = 0,8$); 6'÷10'' - $Q_{\text{э}} = f(Q_{\text{в}})$ при $p_{\text{сма}} = \text{const}$ для $p_{\text{сма}} = 2,945$ кгс/см², 3,445 кгс/см², 3,945 кгс/см², 4,444 кгс/см², 4,945 кгс/см²; 1''÷5'' - $p_{\text{сма}} = f(Q_{\text{в}})$ при $h = \text{const}$ для $h = 20$ м (α

= 0,4), 25 м ($\alpha = 0,5$), 30 м ($\alpha = 0,6$), 35 м ($\alpha = 0,7$), 40 м ($\alpha = 0,8$); $6'' \div 10''$ - $p_{сма} = f(Q_в)$ при $p_{см} = const$ для $p_{сма} = 2,945$ кгс/см², 3,445 кгс/см², 3,945 кгс/см², 4,444 кгс/см², 4,945 кгс/см²

Аналогичные результаты получены для того же эрлифта ($H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $\alpha = 0,4 \div 0,8$) с подающей трубой диаметрами $d = 125$ мм и $d = 150$ мм. (табл. 2.10). Так, для эрлифта с подающей трубой $d = 125$ мм диапазон подачи эрлифта при ее изменении энергетически оптимальным способом составляет $Q_э = 90 \div 115$ м³/ч, степень увеличения подачи эрлифта $k_{Qh} = 115/90 = 1,28$. Для эрлифта с подающей трубой $d = 150$ мм диапазон подачи эрлифта при ее изменении энергетически оптимальным способом составляет $Q_э = 117 \div 151$ м³/ч, степень увеличения подачи эрлифта $k_{Qh} = 151/117 = 1,29$ (табл. 2.10).

Таблица 2.10 - Подачи эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм при постоянном геометрическом погружении смесителя $h = const$ и энергетически оптимальном способе изменения подачи

Относительное геометрическое погружение смесителя, α	Диаметр подающей трубы $d = 100$ мм			Диаметр подающей трубы $d = 125$ мм			Диаметр подающей трубы $d = 150$ мм		
	Подача эрлифта $Q_{э.опт}$, м ³ /ч	КПД эрлифта $\eta_{эрh}$	k_{Qh}	Подача эрлифта $Q_{э.опт}$, м ³ /ч	КПД	k_{Qh}	Подача эрлифта $Q_{э.опт}$, м ³ /ч	КПД	k_{Qh}
0,4	88	0,480	1,19	105	0,499	1,17	119	0,511	1,02
0,5	91	0,515	1,23	113	0,536	1,26	132	0,543	1,13
0,6	90	0,541	1,22	115	0,566	1,278	151	0,562	1,29
0,7	79	0,543	1,07	108	0,583	1,20	122	0,574	1,04
0,8	74	0,545	1,00	90	0,620	1,00	117	0,582	1,00

При условии постоянства давления в смесителе $p_{см} = const$ (при котором обеспечивается принятая транспортная скорость в подающей трубе $w_{n,m} = 2,5$ м/с) подача эрлифта $Q_э$ в режиме работы с максимальным КПД составляет (рис. 2.15): при $p_{сма} = 2,945$ кгс/см² - 118 м³/ч (точка a' на кривой $б'$); при $p_{сма} = 3,445$ кгс/см² - 152 м³/ч (точка b' на кривой $г'$); $p_{сма} = 3,945$ кгс/см² - 172 м³/ч

(точка c' на кривой 8'); $p_{сма} = 4,444 \text{ кгс/см}^2 - 169 \text{ м}^3/\text{ч}$ (точка d' на кривой 9');
 $p_{сма} = 4,945 \text{ кгс/см}^2 - 151 \text{ м}^3/\text{ч}$ (точка e' на кривой 10').

Таким образом, диапазон подач эрлифта ($H+h = 50 \text{ м}$, $D = 200 \text{ мм}$, $d = 100 \text{ мм}$) с постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ составляет $Q_э = 118 \div 172 \text{ м}^3/\text{ч}$, степень увеличения подачи $k_{Qp} = 172/118 = 1,46$. При диаметре подающей трубы $d = 125 \text{ мм}$ - $k_{Qp} = 162/123 = 1,32$, при $d = 150 \text{ мм}$ - $k_{Qp} = 171/118 = 1,45$ (табл. 2.11).

Таблица 2.11 - Подачи эрлифта $H+h = 50 \text{ м}$, $D = 200 \text{ мм}$ при постоянном давлении в смесителе $p_{см} = const$ и энергетически оптимальном способе изменения подачи (скорость жидкости (гидросмеси) в подающей трубе $w_{н.м} = 2,5 \text{ м/с}$)

Диаметр подающей трубы $d = 100 \text{ мм}$				Диаметр подающей трубы $d = 125 \text{ мм}$				Диаметр подающей трубы $d = 150 \text{ мм}$			
$p_{сма}$ кгс/см ²	Подача эрлиф- та $Q_{э.опт}$, м ³ /ч	КПД $\eta_{эр}$	k_{Qp}	$p_{сма}$ кгс/см ²	Подача эрлиф- та $Q_{э.опт}$, м ³ /ч	КПД $\eta_{эр}$	k_{Qp}	$p_{сма}$ кгс/см ²	Подача эрлиф- та $Q_{э.опт}$, м ³ /ч	КПД $\eta_{эр}$	k_{Qp}
2,945	118	0,504	1,00	2,978	123	0,511	1,00	2,989	118	0,514	1,00
3,445	152	0,543	1,13	3,478	131	0,549	1,07	3,489	132	0,552	1,12
3,945	172	0,563	1,46	3,978	162	0,573	1,32	3,989	163	0,577	1,38
4,444	169	0,574	1,43	4,478	157	0,546	1,28	4,489	164	0,604	1,39
4,945	151	0,582	1,28	4,978	158	0,607	1,28	4,989	171	0,611	1,45

Таким образом, диапазон изменения подачи энергетически оптимальным способом эрлифта с постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ превышает аналогичный показатель эрлифта с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ с одинаковыми конструктивными параметрами ($H+h = 50 \text{ м}$, $D = 200 \text{ мм}$) для $d = 100 \text{ мм}$ составляет в $k_{Qp} / k_{Qh} = 1,46 / 1,23 = 1,19$ раза; при $d = 125 \text{ мм}$ - $k_{Qp} / k_{Qh} = 1,32 / 1,28 = 1,03$ раза; при $d = 150 \text{ мм}$ - $k_{Qp} / k_{Qh} = 1,45 / 1,29 = 1,12$ раза.

2.4 Выводы

1. В эрлифтных установках с блочным воздухообеспечением серийно производимыми ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (г. Хабаровск, РФ, www.dalenergomash.ru) центробежными (радиальными) нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3, представляющими все три классификационные группы нагнетателей, рациональных в использовании в составе общепромышленных установок с энергетически целесообразными высотами подъема, степень увеличения подачи водоотливных эрлифта составляет $k_Q=1,03\div 1,49$, а гидроподъемных эрлифтов - $k_Q=1,02\div 1,45$, что определяет теоретические диапазоны возможных подач газожидкостных подъемников в режимах максимально энергоэффективной работы.

2. Степень увеличения подачи эрлифтов с учетом потерь напора (давления) в подающей трубе при определении режимов работы блочных центробежных (радиальных) нагнетателей не существенно отличается от теоретически определенной и составляет: водоотливных установок $k_Q=1,05\div 1,54$, гидроподъемных установок $k_Q=1,09\div 1,47$ однако значения абсолютных максимальных и минимальных подач эрлифтов при учете потерь напора (давления) в подающей трубе превышают теоретически определенные значения на $6\div 10\%$.

3. Обеспечение постоянного давления в смесителе $p_{см} = const$ при увеличении подачи эрлифта с блочным воздухообеспечением центробежными (радиальными) нагнетателями позволяет увеличить подачу в сравнении с эрлифтом с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ в $1,01\div 1,53$ раза.

4. В эрлифтных установках с источниками пневмоэнергии неизменной производительности и обеспечением постоянства давления в смесителе степень увеличения подачи в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси)

превышает аналогичный показатель эрлифта традиционной конструкции (в частности, при $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм) до 2,22 раз при тех же показателях энергоэффективности работы установки.

5. Диапазон изменения подачи энергетически оптимальным способом эрлифта с постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$ превышает аналогичный показатель эрлифта с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ с одинаковыми конструктивными параметрами ($H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм) в $k_{Qp} / k_{Qh} = 1,03 \div 1,19$.

6. Анализ работы эрлифтов с блочным пневмоснабжением центробежными (радиальными) нагнетателями, с источниками пневмоэнергии неизменной производительности, а также при изменении подачи энергетически оптимальным способом показал, что при обеспечении постоянства давления в смесителе максимальная подача выше, чем у эрлифта с аналогичными параметрами, но при неизменном геометрическом погружении смесителя.

3 ФИЗИЧЕСКАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ (ГИДРОСМЕСИ) В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ

3.1 Обоснование целесообразности разработки эрлифтной установки с близким к постоянному давлению в смесителе в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси)

Анализ режимов работы эрлифтной установки с блочным воздухообеспечением от центробежных (радиальных) нагнетателей и источников пневмоэнергии неизменной производительности (раздел 2) позволил установить достаточно ограниченные значения возможных диапазонов изменения подач, а также абсолютных подач газожидкостных подъемников, что зачастую не соответствует потребностям общепромышленных систем (раздел 1.1).

Во многих случаях значения притоков жидкостей (гидросмесей), подлежащих транспортированию, изменяются дискретно. Так, в условиях пиковой водогрейной котельной Кузнецкой ТЭЦ притоки золошлаковой гидросмеси на эрлифтную установку (эрлифтная установка предназначена для удаления золошлаков от одного до четырех работающих котлов) в зависимости от режима работы котельной могут изменяться от 150 м³/ч (при работе одного котла) до 600 м³/ч (при работе четырех котлов) с величиной приращения, близкой к 150 м³/ч (притоки гидросмеси от одного котла) [34]. Притоки шахтных вод в зависимости от времени года изменяются в диапазоне 1,1÷1,2 от величины базового значения [3-9], а изменения притоков этих же вод в условиях консервируемых шахт могут достигать девятикратного значения [10]. Существуют и другие водоотливные (гидроподъемные) системы с дискретным изменением притоков жидкостей (гидросмесей) [1, 11-23].

Одним из возможных способов расширения диапазонов подач с повышением энергетической эффективности работы эрлифтной установки в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) является обеспечение близкого к постоянному, равного давлению при базовом притоке, давления в смесителе эрлифта. Согласно ранее выполненным исследованиям обеспечение работы эрлифтной установки в таких условиях позволяет увеличивать подачу эрлифта при прочих равных условиях от $1,1 \div 1,2$ [64] до $1,52$ [40, 92] раз.

Обеспечение близкого к постоянному давлению в смесителе эрлифта в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей) и блочном пневмоснабжении позволит также эксплуатировать центробежный (радиальный) нагнетатель в значительно более узком диапазоне его давлений и производительностей с режимами работы, близкими к энергетически оптимальному.

Исходя из изложенного, разрабатываемая для условий переменных притоков жидкостей (гидросмесей) эрлифтная установка должна соответствовать следующим основным требованиям:

а) возможность эксплуатации установки в значительном диапазоне подач без существенного изменения потерь давления в подающей трубе и давлении в смесителе близком к неизменному;

б) возможность эксплуатации воздушного нагнетателя при блочной схеме воздухообеспечения газожидкостного подъемника при давлениях и производительностях, близких к номинальным, в широком диапазоне изменения подач эрлифта.

Сформулированным требованиям соответствует эрлифтная установка с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы [93, 94].

3.2 Гидравлическая схема и физическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

Основной особенностью разработанной эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы [93, 94] является возможность транспортирования основного (базового) притока с подачей Q_{np1} через традиционную подающую трубу в нижней части смесителя и дополнительного, периодически возникающего притока с подачей Q_{np2} - через дополнительный трубопровод в одно из промежуточных сечений подъемной трубы.

Указанная конструктивная особенность разработанной эрлифтной установки может быть реализована следующим образом (рис. 3.1).

Жидкость (гидросмесь), подлежащая транспортированию эрлифтом Q_{np} , направляется в приемную емкость 1, которая основным подводом трубопроводом 2 соединена с зумпфом 4. Причем гидравлическое сопротивление (возможно, регулирование) основного подводящего трубопровода 2 имеет такое значение, при котором величина уровня жидкости (гидросмеси) в приемной емкости 1 $l \leq l_{\max}$ обеспечивает расход в данном трубопроводе 2, не превышающий базовое значение Q_{np1} . Базовый приток Q_{np1} поступает в подающую трубу 5 и смешивается в смесителе 6 с воздухом, подаваемым в количестве Q_{e1} по основному воздухопроводу 7. Обеспечивается подача эрлифта $Q_3 = Q_{np1}$. При этом геометрическое погружение смесителя 6 составляет величину h , жидкость (гидросмесь) по подъемной трубе 10 поднимается на высоту H . Аэрогидросмесь в воздухоотделителе 11 разделяется на воздух, сбрасываемый в атмосферу, и жидкость (гидросмесь), отводимую по назначению.

Если приток жидкости (гидросмеси) в приемную емкость 1 превышает

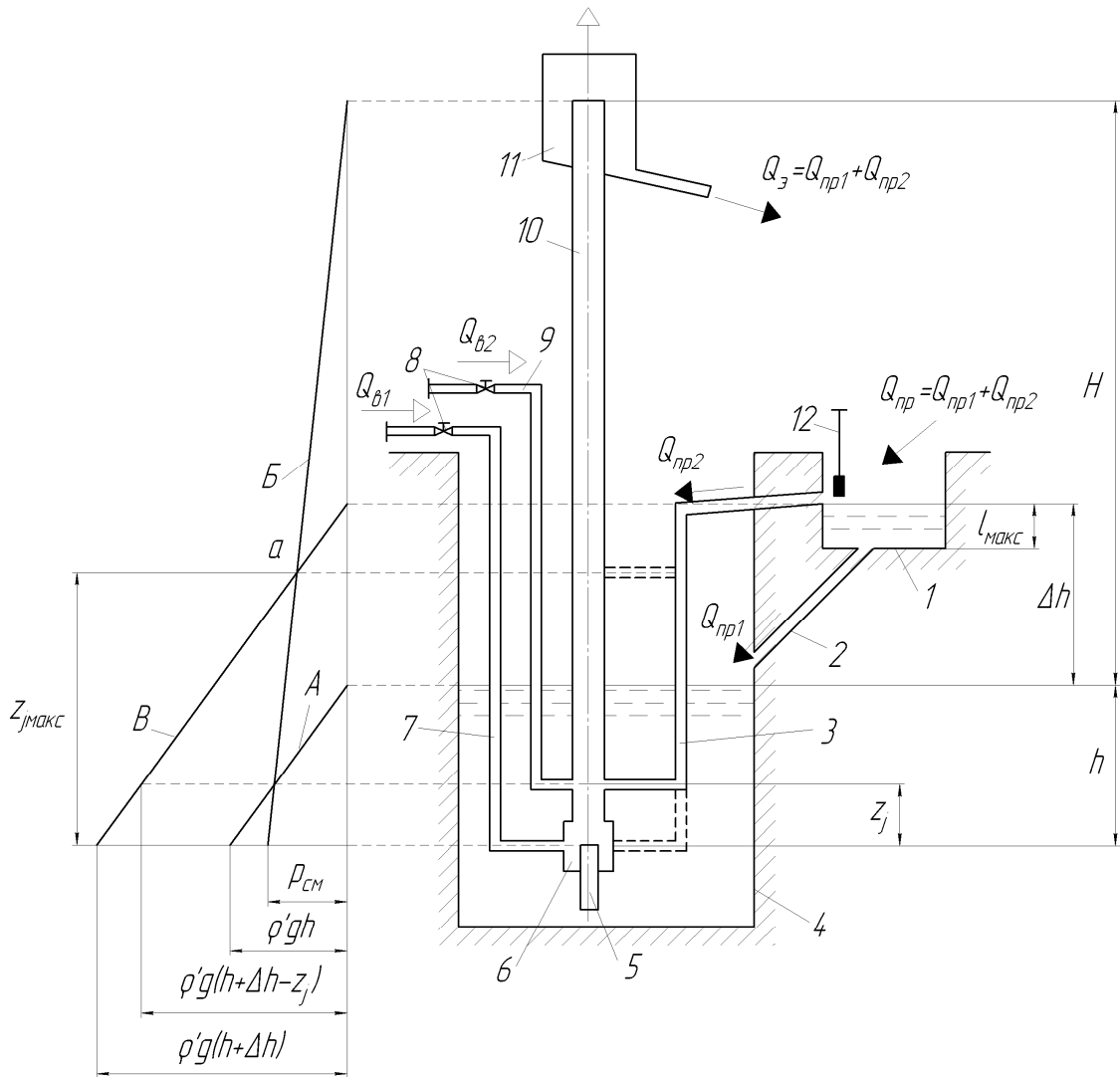


Рисунок 3.1 - Схема эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы: 1 - приемная емкость; 2 - основной подводящий трубопровод; 3 - дополнительный подводящий трубопровод; 4 - зумпф; 5 - подающая труба; 6 - смеситель; 7 - основной воздухопровод; 8 - задвижки; 9 - дополнительный воздухопровод; 10 - подъемная труба; 11 - воздухоотделитель; 12 - запорное устройство; *A* - эпюра давления жидкости (гидросмеси) в зумпфе 4; *B* - эпюра давления газожидкостной смеси (аэрогидросмеси) в подъемной трубе 10; *B'* - эпюра давления жидкости (гидросмеси) в дополнительном подводящем трубопроводе 3

базовое значение $Q_{пр} > Q_{пр1}$, уровень в ней повышается $l > l_{макс}$. Открывается запорное устройство 12 и дополнительный приток $Q_{пр2}$ направляется в промежуточное сечение подъемной трубы 10 по дополнительному

подводящему трубопроводу 3. При необходимости открывается задвижка 8 дополнительного воздухопровода 9 и воздух в количестве $Q_{\delta 2}$ также направляется в промежуточное сечение подъемной трубы 10. Также увеличение расхода воздуха в эрлифт возможно за счет обеспечения подвода его большего количества через основной воздухопровод 7 при закрытой задвижке 8 на дополнительном воздухопроводе 9. Выбор варианта воздухообеспечения эрлифта определяется по критерию минимальной энергоемкости газожидкостного подъемника. Подача эрлифта при этом составит величину $Q_9 = Q_{np1} + Q_{np2}$.

При уменьшении притока жидкости (гидросмеси) и, соответственно, подачи эрлифта до величины $Q_9 = Q_{np1}$, закрываются запорные устройства 12 и задвижка 8 дополнительного воздухопровода 9. Причем, запорное устройство 12, исключающее выброс аэрогидросмеси из подъемной трубы 10 в режиме работы эрлифта $Q_9 = Q_{np1}$, перед закрытием промывается технической водой. Это обеспечивает надежность и необходимую продолжительность его работы при транспортировании абразивных гидросмесей.

Источник пневмоэнергии в данной установке эксплуатируется при близком к постоянному номинальным давлению сжатого воздуха независимо от величины притока жидкости (гидросмеси), а его производительность в случае использования центробежной (радиальной) машины может регулироваться одним из наиболее экономичных способов – дросселированием всасывающего патрубка.

Потери давления $\Delta p_{n.m}$ в подающей трубе 5 существенно не изменяются с увеличением подачи эрлифта Q_9 и в пределах определяются величиной потребной транспортной скорости в ней для надежного транспортирования жидкости (гидросмеси) в количестве Q_{np1} .

Избыточное давление в смесителе 6 также практически неизменно во всех режимах работы, составляя величину $p_{cm} = \rho' gh - \Delta p_{n.m}$ и формирует начальное давление на входе в подъемную трубу 10. Эпюра давления жидкости

(гидросмеси) A в зумпфе 4 представляется линейной зависимостью. Допустимым также является линейный закон B изменения давления по высоте подъемной трубы 7 [83].

Ряд известных допущений [36, 38] позволяют также считать линейной эпюру B изменения давления в дополнительном подводящем трубопроводе 3. Тогда избыточное давление в нем на уровне входа в смеситель 6 (при значении вертикальной координаты промежуточного сечения подъемной трубы 10 $z_j = 0$) составляет величину [2] $p_{mp} = \rho' g(h + \Delta h) - \Delta p_{mp}$ [где Δh - превышение уровня жидкости (гидросмеси) в приемной емкости 1 над рабочим уровнем в зумпфе 3; Δp_{mp} - потери давления в дополнительном подводящем трубопроводе 10].

Вертикальная координата z_j промежуточного сечения подъемной трубы 10, где возможно осуществление подвода дополнительного притока Q_{np2} , не может превышать величину $z_{j.макс}$, соответствующую уровню точки a (точки пересечения эпюр B и B).

Ниже точки a давление на выходе из дополнительного подводящего трубопровода 3 превышает давление в данном сечении подъемной трубы 10, что и обеспечивает расход Q_{np2} . Давления в подъемной трубе 10 эрлифта и в дополнительном подводящем трубопроводе 3 на высоте $z_{j.макс}$ от смесителя 6 равны между собой

$$p_B = p_B \quad (3.1)$$

где p_B - избыточное давление в подъемной трубе эрлифта на высоте $z_{j.макс}$;

p_B - избыточное давление в дополнительном подводящем трубопроводе на высоте $z_{j.макс}$.

Давление в подъемной трубе на расстоянии $z_{j.макс}$ от смесителя [1, 2]

$$p_B = p_{см} \left(1 - \frac{z_{j.макс}}{H + h}\right), \quad (3.2)$$

где $p_{см}$ - избыточное давление в смесителе.

Давление в смесителе в установившемся режиме работы эрлифта [2]

$$p_{см} = \rho'g(h - h_{n.m}), \quad (3.3)$$

где $h_{n.m}$ - потери напора в подающей трубе при расходе через нее транспортируемой жидкости (гидросмеси) в количестве, равном Q_{np1} .

Гидростатическое давление в дополнительном подводящем трубопроводе на расстоянии $z_{j.макс}$ от смесителя

$$p_B = \rho'g(\Delta h + h - z_{j.макс}). \quad (3.4)$$

Решение уравнения (3.1) с учетом (3.2) и (3.3) и (3.4) относительно $z_{j.макс}$ позволяет получить выражение для максимально возможной координаты подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы

$$z_{j.макс} = \frac{(h_{n.m} + \Delta h) \cdot (H + h)}{H + h_{n.m}}. \quad (3.5)$$

При истечении дополнительного притока Q_{np2} в промежуточное сечение подъемной трубы z_j давление на выходе из трубопровода дополнительного притока p_B снижается на величину потерь на трение по длине, на преодоление местных сопротивлений и создание скоростного давления на выходе из дополнительного подводящего трубопровода в подъемную трубу

$$p_B = \rho'g(\Delta h + h - z_{j.макс} - \Delta h_{\partial.m} - h_{ск}), \quad (3.6)$$

где $\Delta h_{\partial.m}$ - суммарные потери напора притока Q_{np2} в дополнительном подводящем трубопроводе; $h_{ск}$ - скоростной напор на выходе из дополнительного подводящего трубопровода в подающую трубу.

Тогда максимально возможная координата подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

эрлифта с учетом потерь напора (давления) потока жидкости (гидросмеси) в дополнительном подводящем трубопроводе

$$z'_{j.макс} = \frac{(h_{n.m} + \Delta h - h_{ск} - \Delta h_{\partial.m}) \cdot (H + h)}{H + h_{n.m}}. \quad (3.7)$$

Так как значения $h_{ск}$ и $\Delta h_{\partial.m}$ зачастую не превышают 2÷3 % от значения члена выражения (3.7) $(h_{n.m} + \Delta h - h_{ск} - \Delta h_{\partial.m})$, то в дальнейшем для определения максимально возможной координаты подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы используется выражение (3.5).

При подводе дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в сечение подъемной трубы $z_j = 0$ м (смеситель), поддержание постоянства давления в смесителе обеспечивается за счет подвода дополнительного расхода сжатого воздуха $Q_{в2}$ вместе с основным расходом $Q_{в1}$.

Приведенное конструктивное решение эрлифтной установки с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы не является единственно возможным и может быть изменено в зависимости от технологических особенностей водоотливной (гидроподъемной) установки.

Кроме приведенных выше преимуществ разработанной эрлифтной установки с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы в ней исключается постоянная эксплуатация запорных устройств в потоке абразивной гидросмеси, что необходимо при применении групповых или батарейных эрлифтных установок. Невозможность очистки (промывки) запорной арматуры от абразивных твердых частиц перед отключением части эрлифтов групповой или батарейной схем приводит к потере герметичности данного узла и возможности заиливания резервных газожидкостных подъемников [24-34].

Кроме того известно, что энергетически целесообразной структурой водовоздушной смеси в эрлифте является снарядная, что должно обеспечиваться соответствующими значениями относительного погружения

смесителя α , конструктивными параметрами подъемника и гидродинамическими параметрами газожидкостного потока [84, 85]. Однако расширение сжатого воздуха по высоте подъемной трубы может превращать снарядную структуру газожидкостной смеси в эмульсионную и даже кольцевую [50, 51].

Подвод дополнительного количества жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы будет уменьшать значение истинного газосодержания водовоздушного потока и снижать вероятность перехода снарядной структуры в эмульсионную или кольцевую. А так как энергетические потери газожидкостного потока со снарядной структурой наименьшие в сравнении с эмульсионной и кольцевой, то высвобожденное количество энергии возможно использовать для транспортирования некоторого дополнительного количества жидкости (гидросмеси). Компенсировать недостающее количество этой энергии возможно дополнительным расходом сжатого воздуха Q_{61} .

Таким образом, предлагаемая эрлифтная установка соответствует требованиям, предъявляемым для работы в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси), и имеет существенные преимущества в сравнении с традиционной.

Для обеспечения максимальной энергоэффективности работы эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы водовоздушный поток в вертикальной подъемной трубе должен иметь структуру близкую к снарядной [50] (рис. 3.2).

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

жидкостной пленки с истинной скоростью $w'_n(z)$. Приведенная скорость водовоздушной смеси $w_{см}(z)$. В сечении подъемной трубы на высоте z_j подводится жидкость с расходом Q_{np2} (дополнительный приток). Возможный дополнительный расход воздуха $Q_{\delta 2}$, подводимый в подъемную трубу в сечении z_j , смешиваясь с основным водовоздушным потоком, обеспечивает транспортирование дополнительного притока Q_{np2} .

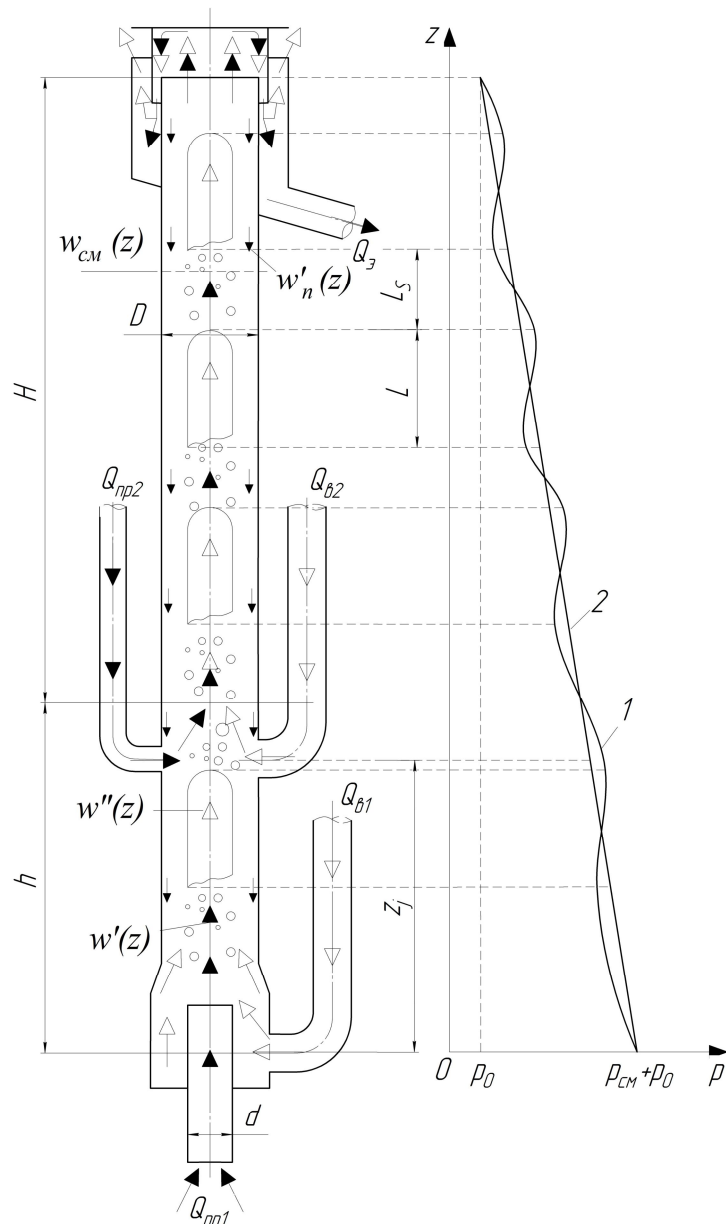


Рисунок 3.2 - Схема эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы со снарядной структурой водовоздушного потока: истинная 1 и усредненная 2 эпюры давления в подъемной трубе

При моделировании рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы приняты следующие допущения:

а) структура водовоздушного потока по всей высоте подъемной трубы снарядная;

б) течение квазиодномерное осесимметричное стационарное;

в) скорости компонентов водовоздушной смеси в любой точке сечения подъемной трубы параллельны вертикальной оси, а поперечные составляющие скоростей и ускорений пренебрежимо малы по сравнению с их продольными значениями;

г) в каждой точке любого сечения подъемной трубы давление одинаково, в том числе и в фазах, и изменяется по высоте по линейному закону;

д) изменение состояния воздуха в подъемной трубе происходит по изотермическому процессу;

3.3 Математическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

Основой математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы, как и других гидравлических аппаратов и машин, являются дифференциальные уравнения количества движения и неразрывности движения жидкой сплошной среды (в нашем случае под жидкой сплошной средой будем понимать газожидкостную смесь для водоотливных установок и газожидкостную смесь с включением твердых частиц для гидроподъемных установок) [95, 96]. Интегрирование дифференциальных уравнений движения для рассматриваемого случая требует условий однозначности - начальных и граничных условий.

В соответствии с [97, 98] при плотностях гидросмеси $\rho \leq 1200 \text{ кг/м}^3$, что имеет место во многих гидротранспортных системах [2, 7, 8, 17, 66], результаты исследований, проведенных на двухфазных потоках (вода - воздух), с приемлемой точностью могут быть использованы для описания трехфазных потоков (вода – воздух - твердые частицы). Учитывая это, математическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы разработана исходя из двухфазного (вода – воздух) потока сплошной жидкой среды как для условий водоотливных, так и гидроподъемных установок.

В связи со сложностью процессов восходящего движения газожидкостных потоков в вертикальных каналах и многообразием структур водовоздушных смесей (пузырьковая, снарядная, эмульсионная, кольцевая и др.) [40, 84, 85, 99-103, 104-110] на сегодняшний день универсальный метод количественного описания данных процессов отсутствует и разрабатываются математические модели движения для каждой из имеющих место структур двухфазных потоков [40, 50, 111-113].

Для энергетически рациональной в эрлифте снарядной структуры водовоздушного потока [создание условий существования для которой является основой энергоэффективной работы и эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы] наиболее рационально использование двухкомпонентной модели сплошной среды [40, 114-116], в которой газосодержание водовоздушной смеси определяется его истинным значением φ [114, 117-119], а вязкостные гидравлические потери – осредненным значением касательных напряжений на твердой стенке канала τ_w [114, 118-120].

Для принятых условий и снарядного восходящего вертикального водовоздушного потока основные исходные уравнения сохранения наиболее целесообразно представить в виде [40, 116]:

- уравнение количества движения

$$\frac{\partial}{\partial t} (R_1 \rho_1 w_1 + R_2 \rho_2 w_2) + \frac{\partial}{\partial z} (R_1 \rho_1 w_1^2 + R_2 \rho_2 w_2^2) -$$

$$- (R_1 \rho_1 + R_2 \rho_2) F_z + \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{1}{\omega} \sum_{k=1,2} \int_{c_k(z,t)} n_z \cdot (n_k \cdot \tau_k) \frac{dc}{n_k \cdot n_{kc}}; \quad (3.6)$$

- уравнение неразрывности движения

$$\frac{\partial}{\partial t} (R_1 \rho_1 + R_2 \rho_2) + \frac{\partial}{\partial z} (R_1 \rho_1 w_1 + R_2 \rho_2 w_2) = 0, \quad (3.7)$$

где R_1 - относительная часть площади поперечного сечения вертикальной трубы, занимаемая жидкой фазой; R_2 - относительная часть площади поперечного сечения вертикальной трубы, занимаемая газообразной фазой; ρ_1 - плотность жидкой фазы; ρ_2 - плотность газообразной фазы; w_1 - компонента вектора скорости жидкости v_1 по вертикальной оси z ; w_2 - компонента вектора скорости газа v_2 по вертикальной оси z ; F_z - проекция единичной массовой силы на ось z ; p - давление; n_z - единичный вектор по направлению оси z ; n_k - единичный вектор нормали в заданной точке поверхности $\Omega_k(t)$, направленный наружу; τ_k - единичный вектор по направлению оси z ; $c_k(z,t)$ - границы между фазами и стенкой трубы в поперечном сечении ω ; 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 поперечного сечения $\omega_k(z,t)$.

После обозначения: $R_1 \equiv 1 - \varphi$, $R_2 \equiv \varphi$ (индекс 1 - жидкая фаза, индекс 2 - газообразная фаза), единичная массовая сила $F_z \equiv -g$, а член правой части уравнения (3.6), выражающий гидравлические потери на преодоление сил вязкого трения через $(-\frac{\chi}{\omega} \tau_w)$ уравнения (3.6) и (3.7) для установившихся условий преобразуется к виду:

- уравнение количества движения

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{\chi}{\omega} \tau_w - \frac{d}{dz} [(1-\varphi)\rho'(w')^2 + \varphi\rho''(w'')^2] - [(1-\varphi)\rho' + \varphi\rho'']g \quad (3.8)$$

- уравнение неразрывности движения

$$(1-\varphi)\rho'w' + \varphi\rho''w'' = G = const \quad (3.9)$$

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

Уравнение (3.8) для придания ему физической смысловой нагрузки можно представить в виде [117, 119, 122]

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{yck} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_g, \quad (3.10)$$

где dp/dz - полные потери давления;

$(dp/dz)_{mp}$ - потери давления вследствие трения;

$(dp/dz)_{yck}$ - динамическая составляющая потерь давления;

$(dp/dz)_g$ - гидростатическая составляющая потерь давления.

Приведенные скорости газообразной и жидкой фаз [118, 121]

$$w_0''(z) = w''(z) \cdot \varphi(z) \quad (3.11)$$

$$w_0'(z) = w'(z) \cdot (1 - \varphi(z)) \quad (3.12)$$

Массовые скорости газообразной и жидкостной фаз [118, 121]

$$G''(z) = \frac{Q_g(z) \cdot \rho_0''}{\omega \cdot \varphi(z)} = \frac{G(z) \cdot x}{\varphi(z)}, \quad (3.13)$$

$$G'(z) = \frac{Q_3(z) \cdot \rho'}{\omega \cdot [1 - \varphi(z)]} = \frac{G(z) \cdot (1 - x)}{1 - \varphi(z)}, \quad (3.14)$$

где; ρ_0'' - плотность воздуха при нормальных (технических) условиях; $Q_e(z)$ - объемный расход воздуха в подъемной трубе эрлифта; $Q_3(z)$ - расход жидкости в z -м сечении подъемной трубы; ω - площадь сечения подъемной трубы; $G(z)$ – массовая скорость водовоздушной смеси [118, 121]

$$G(z) = w_{см}(z) \cdot \rho_{см\beta}(z) \quad (3.15)$$

$w_{см}(z)$ - приведенная скорость водовоздушной смеси; $\rho_{см\beta}(z)$ - плотность водовоздушной смеси, вычисленная по объемному расходу газосодержанию β .

Объемное расходное газосодержание [118, 121]

$$\beta = \frac{Q_e^0(z)}{Q_3(z) + Q_e^0(z)} \quad (3.16)$$

Массовое расходное воздухосодержание [118, 121]

$$x = \frac{Q_e^0(z) \cdot \rho_0''}{Q_3(z) \cdot \rho' + Q_e^0(z) \cdot \rho_0''} \quad (3.17)$$

где $Q_e^0(z)$ - расход воздуха при нормальных (технических) условиях, который увеличивается в месте ввода дополнительного расхода воздуха z_j ; $Q_3(z)$ - расход восходящего потока жидкости (подача эрлифта), значение которого изменяется в сечении z_j ввода дополнительного притока Q_{np2} в подъемную трубу

$$Q_3(z) = \begin{cases} Q_{np1}, & \text{при } 0 \leq z \leq z_j; \\ Q_{np1} + Q_{np2}, & \text{при } z_j < z \leq H + h. \end{cases} \quad (3.18)$$

Расход воздуха при нормальных (технических) условиях

$$Q_{\epsilon}^0(z) = \begin{cases} Q_{\epsilon 1}, & \text{при } 0 \leq z \leq z_j; \\ Q_{\epsilon 1} + Q_{\epsilon 2}, & \text{при } z_j < z \leq H + h. \end{cases} \quad (3.19)$$

Объемный расход воздуха в подъемной трубе эрлифта [40]

$$Q_{\epsilon}(z) = Q_{\epsilon}^0(z) \frac{P_0}{p_a(z)}. \quad (3.20)$$

Плотность смеси $\rho_{см}(z)$ в модели двухкомпонентного течения описывается выражением [119, 120, 122-124]

$$\rho_{см}(z) = \varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'. \quad (3.21)$$

При допущении линейности изменения давления по высоте абсолютное давление в сечении z подъемной трубы [2, 83]

$$p_a(z) = p_0 + p_{см} \left(1 - \frac{z}{H + h}\right). \quad (3.22)$$

Исходя из уравнений (3.8) и (3.9) с учетом выражений (3.11)÷(3.21) получено уравнение стационарного восходящего вертикального движения двухфазного снарядного течения для эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4\tau_w(z)}{D} + \frac{d}{dz} \left\{ G'(z) \left[\left(\frac{x \cdot (1 - \varphi(z))}{\varphi(z) \cdot (1 - x)} \right) \cdot w_0''(z) + w_0'(z) \right] \right\} + \rho_{см}(z) \cdot g, \quad (3.23)$$

где $G'(z)$ - массовая скорость жидкости; $\rho_{см}(z)$ - плотность водовоздушной смеси; D - диаметр подъемной трубы; $w_0'(z)$ и $w_0''(z)$ - приведенные скорости жидкой и газообразной фаз соответственно; x - массовое расходное газосодержание.

Проинтегрировав выражение (3.23) для участка подъемной трубы эрлифта длиной z_i (где $0 \leq z_i \leq h + H$), получаем

$$- \int_{p_{acc}}^{p_a(z_i)} dp(z) = \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz + \int_0^{z_i} dz \left\{ G'(z) \cdot \left[\frac{x(1-\varphi(z))}{\varphi(z)(1-x)} \right] w_0''(z) + w_0'(z) \right\} + g \int_0^{z_i} \rho_{cm} dz. \quad (3.24)$$

Решение уравнения (3.23) целесообразно в данном случае выполнять численным методом при помощи ПЭВМ.

Зависимости для определения истинного газосодержания и касательного напряжения на стенке трубы приняты в соответствии с рекомендациями [40, 85].

Адекватность математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы подтверждена данными экспериментальных исследований (раздел 4).

3.4 Особенности рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

Целью анализа гидродинамических параметров рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы является сравнение его энергоэффективности с аналогичным показателем традиционного эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси), а также установление области целесообразности использования предлагаемой схемы вместо традиционной.

Решение математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы выполнено с использованием разработанной программы на ПЭВМ при помощи языка программирования Delphi [приложение Б1 - фрагмент текста программы].

Численное решение математической модели эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы рассмотрим на примере газожидкостного подъемника с диаметрами подъемной трубы $D = 300$ мм, подающей трубы $d = 120$ мм, длиной подъемной трубы $H+h = 30$ м, геометрическим погружением смесителя $h = 12$ м, превышение уровня жидкости в приемной емкости над уровнем жидкости в зумпфе $\Delta h = 2$ м, как востребованного с такими параметрами в промышленности [1, 66].

Максимальная координата подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы в соответствии с (3.5) составила $z_{j..макс} = 3,14$ м.

Для приведенных данных безразмерная расходная характеристика эрлифта традиционной конструкции (без подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы) в виде зависимости $\bar{Q}_9 = f(\bar{Q}_6)$ имеет вид кривой 1 (рис. 3.3). При этом безразмерная зависимость давления в смесителе от расхода воздуха эрлифта $\bar{p}_{см} = f(\bar{Q}_6)$ представляется кривой 2 и свидетельствует об уменьшении давления с увеличением подачи эрлифта из-за увеличивающихся потерь в подающей трубе.

Увеличение гидравлических потерь в подающей трубе приводит к снижению энергоэффективности эрлифта и, следовательно, к снижению его подачи. Если при увеличении притока гидросмеси сверх величины, которая соответствует подаче эрлифта традиционной схемы в оптимальном режиме $\bar{Q}_{э.опт1} = \bar{Q}_{np1}$ (рис. 3.3), дополнительный приток Q_{np2} подводить в промежуточное сечение подъемной трубы, то характеристика такого эрлифта будет соответствовать кривой 3. Данная характеристика получена для значения $z_j = 0$ м (приложение Б2).

В рассматриваемом случае увеличение подачи эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы обеспечивается за счет снижения потерь в подающей трубе и обеспечения

постоянного давления в смесителе $p_{см} = p_{см.онт}$ при расходе воздуха $Q_в > Q_{в.онт1}$ (линия 4, рис. 3.3).

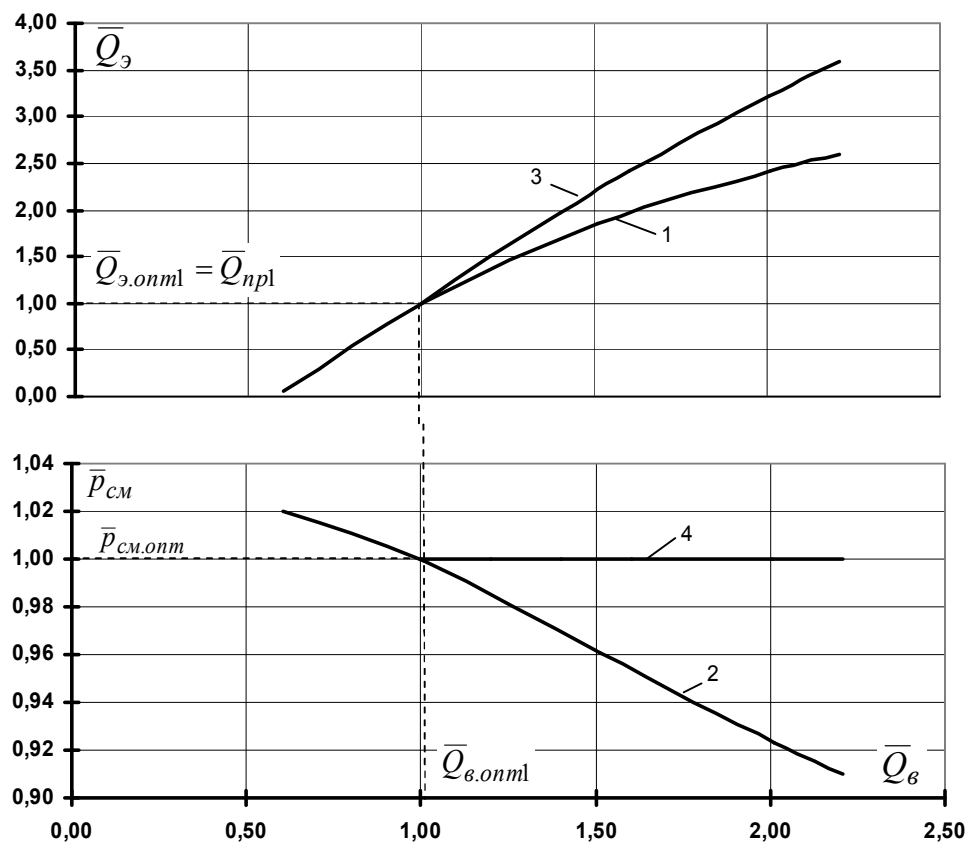


Рисунок 3.3 - Безразмерные характеристики эрлифтов $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_в)$ и $\bar{p}_{см} = f(\bar{Q}_в)$: 1, 2 - традиционной схемы; 3, 4 - предлагаемой схемы (базисные значения $Q_3 = 0,0222 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_в = 0,166 \text{ м}^3/\text{с}$; $p_{см} = 212 \text{ кПа}$)

Изменение значения вертикальной координаты точки подвода дополнительного притока в подъемную трубу z_j при прочих равных условиях приводит к изменению подачи эрлифта и вида его расходных характеристик (рис. 3.4). Установлено, что чем выше от смесителя производится подвод дополнительного притока в подъемную трубу, тем больший дополнительный расход воздуха необходим (рис. 3.4). Это объясняется тем, что по высоте подъемной трубы давление в ней уменьшается и энергия несущего потока снижается. Таким образом, для подъема дополнительного притока с более высокой точки в подъемной трубе необходимо подводить больший дополнительный расход воздуха.

Но мощность $N_{\epsilon 2}$ дополнительного расхода воздуха $Q_{\epsilon 2}$ снижается при подводе его в более высокое сечение подъемной трубы

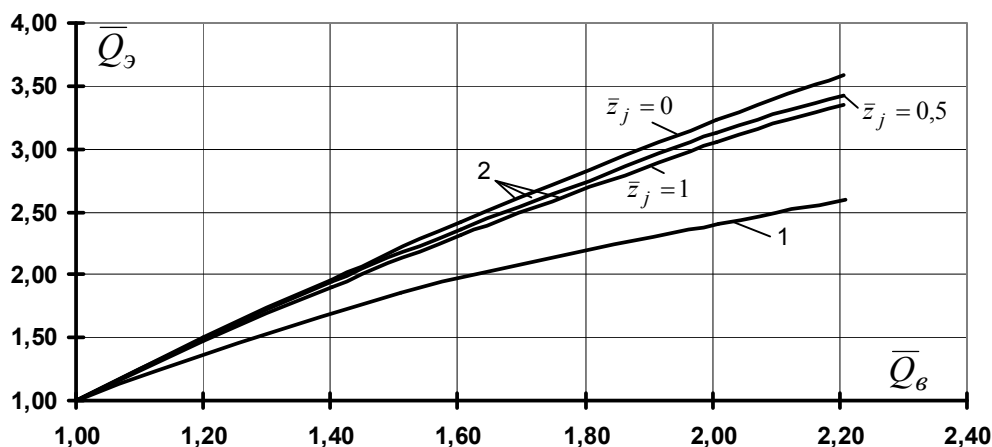


Рисунок 3.4 - Безразмерные расходные характеристики эрлифта $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_6)$ традиционной 1 и предлагаемой 2 (для разных \bar{z}_j) схем (базисные значения $z_j = z_{j \max} = 3,14$ м; $Q_3 = 0,0222$ м³/с; $Q_6 = 0,166$ м³/с)

z_j (рис. 3.5). Хотя при этом дополнительный расход воздуха $Q_{\epsilon 2}$ и

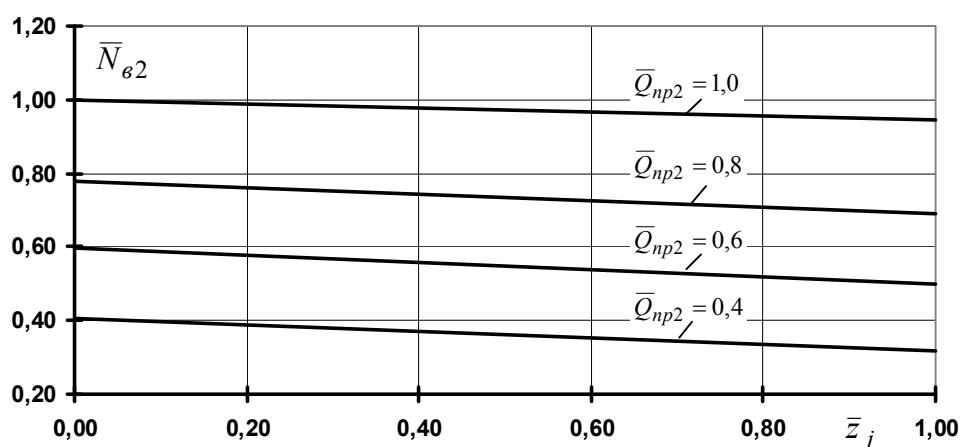


Рисунок 3.5 - Зависимость безразмерной мощности дополнительного расхода воздуха от безразмерной координаты подвода $\bar{N}_{\epsilon 2} = f(\bar{z}_j)$ (базисные значения $N_{\epsilon 2} = 7,92$ кВт, $z_j = 3,14$ м и $Q_{np2} = 0,0222$ м³/с)

увеличивается, но уменьшение давления в подъемной трубе ведет к снижению мощности потока воздуха.

Увеличение дополнительного притока Q_{np2} , подводимого в промежуточное сечение подъемной трубы с вертикальной координатой z_j ,

требует соответствующего увеличения мощности потока дополнительного расхода воздуха $N_{\epsilon 2}$ (рис. 3.6).

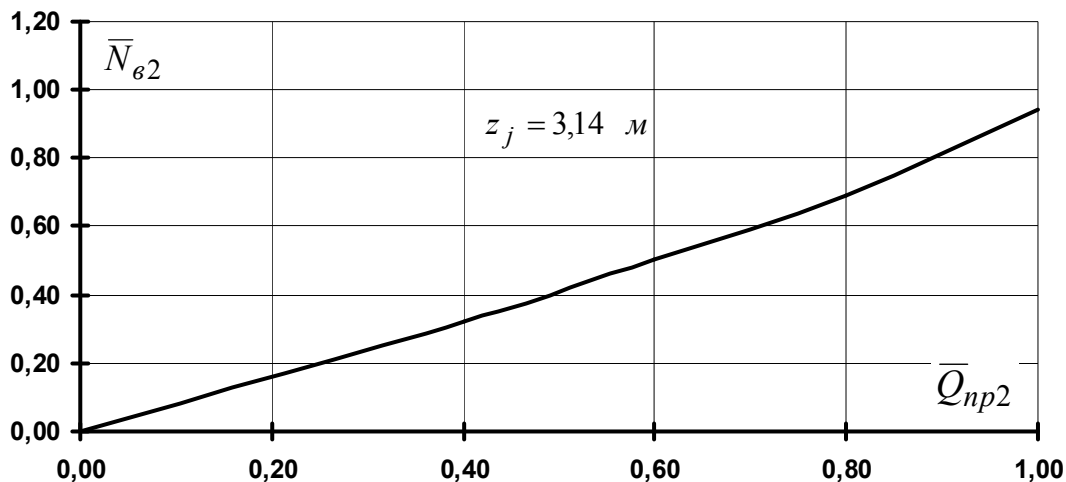


Рисунок 3.6 - Зависимость безразмерной мощности дополнительного расхода воздуха от безразмерного дополнительного притока \bar{Q}_{np2} при $z_j = 3,14$ м (базисные значения $Q_{np2} = 0,0222$ м³/с; $N_{\epsilon 2} = 7,92$ кВт)

При достижении безразмерной суммарной мощности потока воздуха $\bar{N}_{\epsilon \Sigma}$ подводимого в подъемную трубу эрлифта, значения 1,5, безразмерная подача эрлифта предлагаемой схемы при $\bar{z}_j = 1$ на 20% больше подачи эрлифта традиционной схемы (рис. 3.7)

Подтверждение более высокой энергоэффективности эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы в сравнении с эрлифтом традиционной конструкции выполнено также на основе данных, полученных при анализе работы эрлифта для ряда значений безразмерного параметра $(H + h)/D$, относительного геометрического погружения смесителя α , безразмерного диаметра подающей трубы \bar{d} ($\bar{d} = d/D$) при различных координатах подвода дополнительного притока z_j , в пределах $0 \leq z_j \leq H + h$ (в соответствии с принятым допущением $z_{j, \max} = H + h$, раздел 3.2).

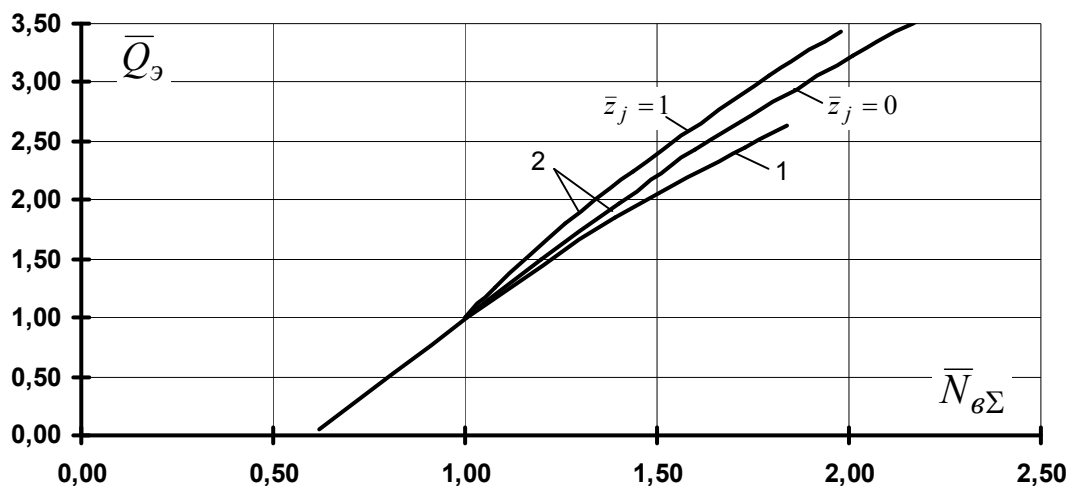


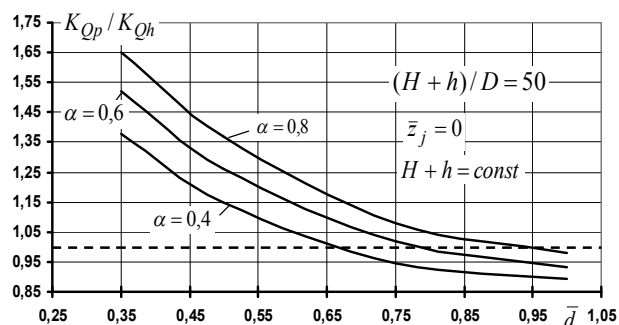
Рисунок 3.7 - Зависимость безразмерной подачи эрлифта от безразмерной суммарной мощности потока воздуха для эрлифта традиционной 1 и предлагаемой 2 схем (базисные значения $Q_{\Sigma} = 0,0222 \text{ м}^3/\text{с}$; $N_{\Sigma} = 18,95 \text{ кВт}$; $z_j = 3,14 \text{ м}$)

Как известно, безразмерный параметр $(H + h)/D$ характеризует длину эрлифта [1, 2]. Эрлифты с $(H + h)/D < 200$ принято называть короткими, при $(H + h)/D > 200$ - длинными. Проведенные расчеты охватывали как короткие, так и длинные эрлифты - $(H + h)/D = 50 \div 270$.

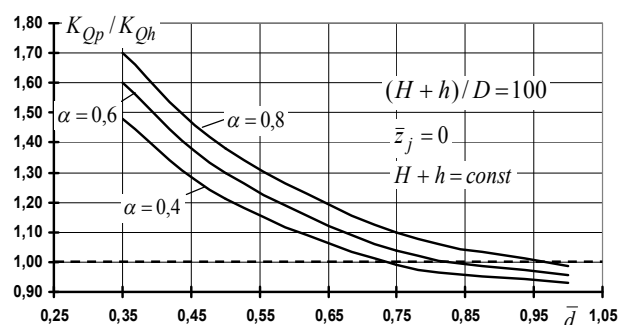
Принятый для анализа работы эрлифта диапазон относительных погружений $\alpha = 0,4 \div 0,8$ обосновывается тем, что, как доказано в [50], наиболее энергоэффективная снарядная структура водовоздушной смеси имеет место в подъемной трубе при значениях $\alpha \geq 0,40$, а в соответствии с [40, 90] энергорациональные диапазоны работы эрлифтов с параметрами, аналогичными принятым к рассмотрению в данном случае, ограничиваются значениями $\alpha \leq 0,80 \div 0,85$.

Рассматриваемый диапазон диаметров подающих труб ограничивался значениями безразмерного диаметра $\bar{d} = d/D = 0,35 \div 1$, что обосновывается опытом применения эрлифтов [1, 65]. Расход жидкости в подающей трубе Q_{np1} принимался таким, чтобы при определенном d в подающей трубе обеспечивалась транспортная скорость потока жидкости 3 м/с.

Анализ данных полученных в результате расчетов показал, что максимальная подача предлагаемого эрлифта больше максимальной подачи эрлифта традиционной конструкции при определенных значениях их конструктивных параметров. Так, для эрлифта с безразмерным параметром $(H + h)/D = 50$ целесообразность применения конструкции с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы с координатой $\bar{z}_j = 0$ (базисное значение $z_j = 20$ м) обеспечивается: для $\alpha = 0,4$ при безразмерном диаметре подающей трубы $\bar{d} < 0,65$, а максимальное отношение степеней увеличения подачи (отношение максимальных подач предлагаемого и традиционного эрлифтов) составило $K_{Qp} / K_{Qh} = 1,37$ при $\bar{d} = 0,35$; для $\alpha = 0,6$ при безразмерном диаметре подающей трубы $\bar{d} < 0,78$, максимальное отношение $K_{Qp} / K_{Qh} = 1,52$ при $\bar{d} = 0,35$; для $\alpha = 0,8$ при $\bar{d} < 0,95$, максимальное отношение $K_{Qp} / K_{Qh} = 1,65$ при $\bar{d} = 0,35$ (рис. 3.8, а).



а)



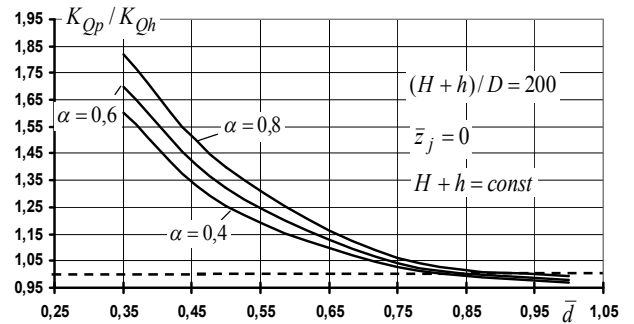
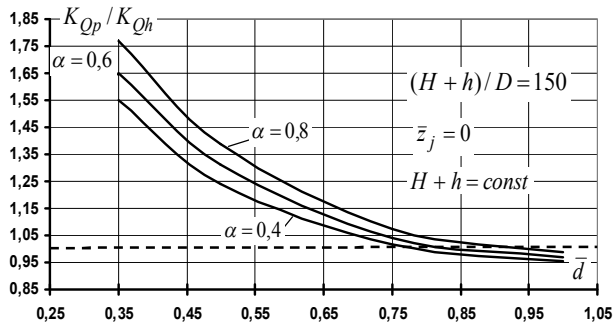
б)

Рисунок 3.8 - Зависимости $K_{Qp} / K_{Qh} = f(\bar{d})$ при $\bar{z}_j = 0$, $\alpha = 0,4 \div 0,8$, $H + h = 20$ м: а) - для $(H + h)/D = 50$; б) - для $(H + h)/D = 100$ (базисное значение $z_j = 20$ м)

Аналогичный анализ проведен и для других значений безразмерного параметра $(H + h)/D = 100, 150, 200, 270$, диапазон которых охватывает как короткие так и длинные эрлифты. Установлено, что с ростом $(H + h)/D$ целесообразность использования предлагаемого эрлифта достигается при

больших \bar{d} (рис. 3.8, 3.9, 3.10 а), а также отношения степеней увеличения подачи K_{Qp} / K_{Qh} возрастают при $(H + h) / D = 270$ до значения: для $\alpha = 0,4 - 1,65$; для $\alpha = 0,6 - 1,75$; $\alpha = 0,8 - 1,85$ (рис. 3.10 а).

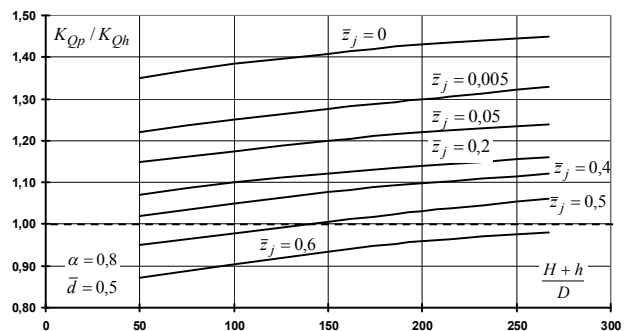
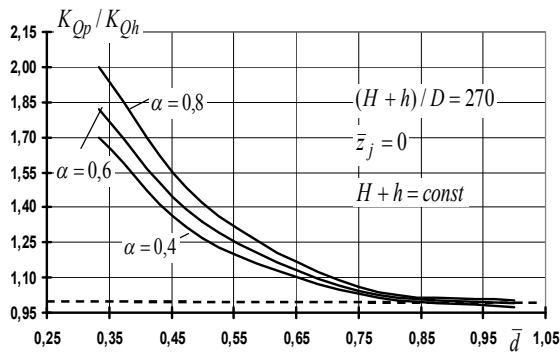
Подвод дополнительного притока жидкости в более высокое сечение подъемной трубы приводит к снижению максимальной подачи предлагаемого эрлифта и соответственно снижается показатель K_{Qp} / K_{Qh} (рис. 3.10, б).



а)

б)

Рисунок 3.9 - Зависимости $K_{Qp} / K_{Qh} = f(\bar{d})$ при $\bar{z}_j = 0$, $\alpha = 0,4 \div 0,8$, $H + h = 20$ м: а) - при $(H + h) / D = 150$; б) - при $(H + h) / D = 200$ (базисное значение $z_j = 20$ м)



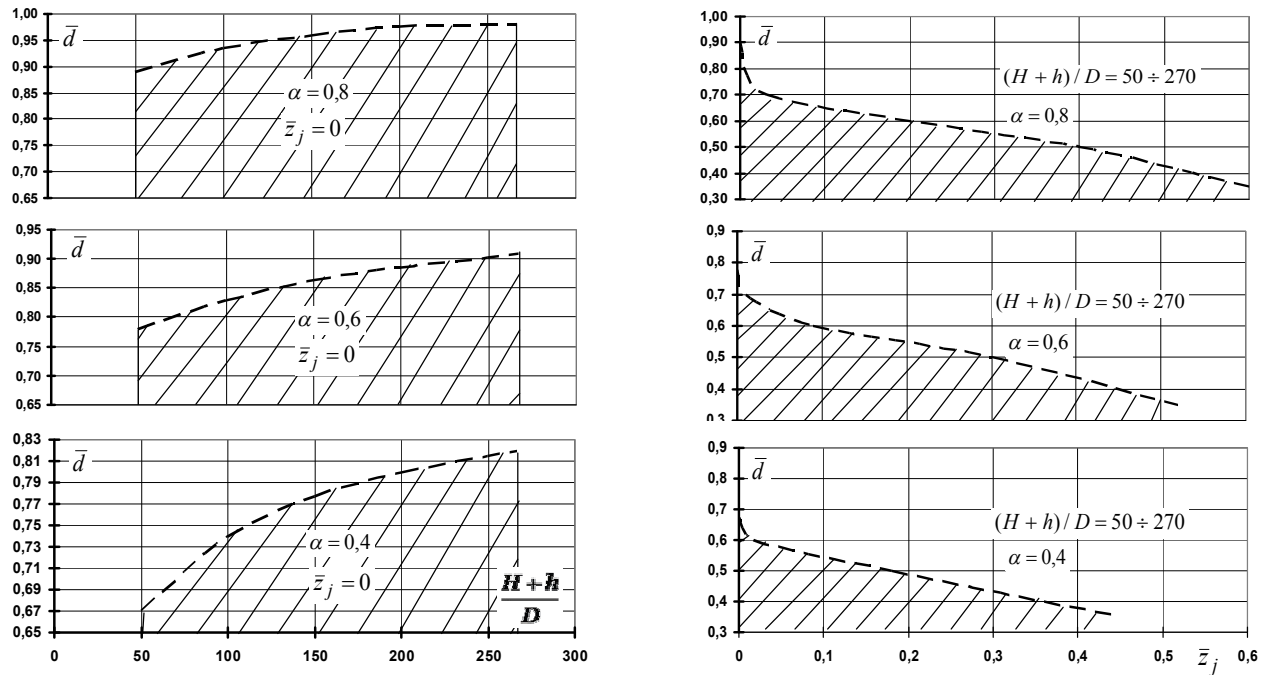
а)

б)

Рисунок 3.10 - Зависимости K_{Qp} / K_{Qh} от: а) - \bar{d} при $(H + h) / D = 270$, $H + h = 20$ м, $\bar{z}_j = 0$, $\alpha = 0,4 \div 0,8$; б) - $(H + h) / D$, при $H + h = 20$ м, $\alpha = 0,8$, $\bar{d} = 0,5$, $\bar{z}_j = 0; 0,005; 0,05; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6$ (базисное значение $z_j = 20$ м)

Анализ и обобщение полученных результатов позволили построить зоны целесообразного использования эрлифтов с подводом дополнительного

притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы (рис. 3.11).



а)

б)

Рисунок 3.11 - Зоны целесообразного использования эрлифтов с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы: а) - при $\bar{z}_j = 0$, $\alpha = 0,4; 0,6; 0,8$; б) - при $(H + h) / D = 50 \div 270$, $\alpha = 0,4; 0,6; 0,8$

Коэффициент полезного действия эрлифта с подводом дополнительного в промежуточное сечение подъемной трубы определяется зависимостью

$$\eta_{\text{э}} = \frac{(Q_{np1} + Q_{np2}) \cdot H}{\frac{p_0}{\rho'g} \left[Q_{\text{е1}} \cdot \ln\left(\frac{p_{\text{сма}}}{p_0}\right) + Q_{\text{е2}} \cdot \ln\left(\frac{p_{z_j a}}{p_0}\right) \right]}, \quad (3.25)$$

где $p_{z_j a}$ - абсолютное давление в подъемной трубе эрлифта в сечении z_j ввода дополнительного потока воздуха $Q_{\text{е2}}$.

Хотя дополнительный расход воздуха $Q_{\text{е2}}$ необходимый для транспортирования дополнительного притока Q_{np2} при подводе в более

высокие сечения подъемной трубы z_j увеличивается, суммарная мощность потока воздуха N_{Σ} снижается за счет снижения необходимого давления дополнительного потока воздуха при подводе в более высокие сечения подъемной трубы z_j (рис. 3.12).

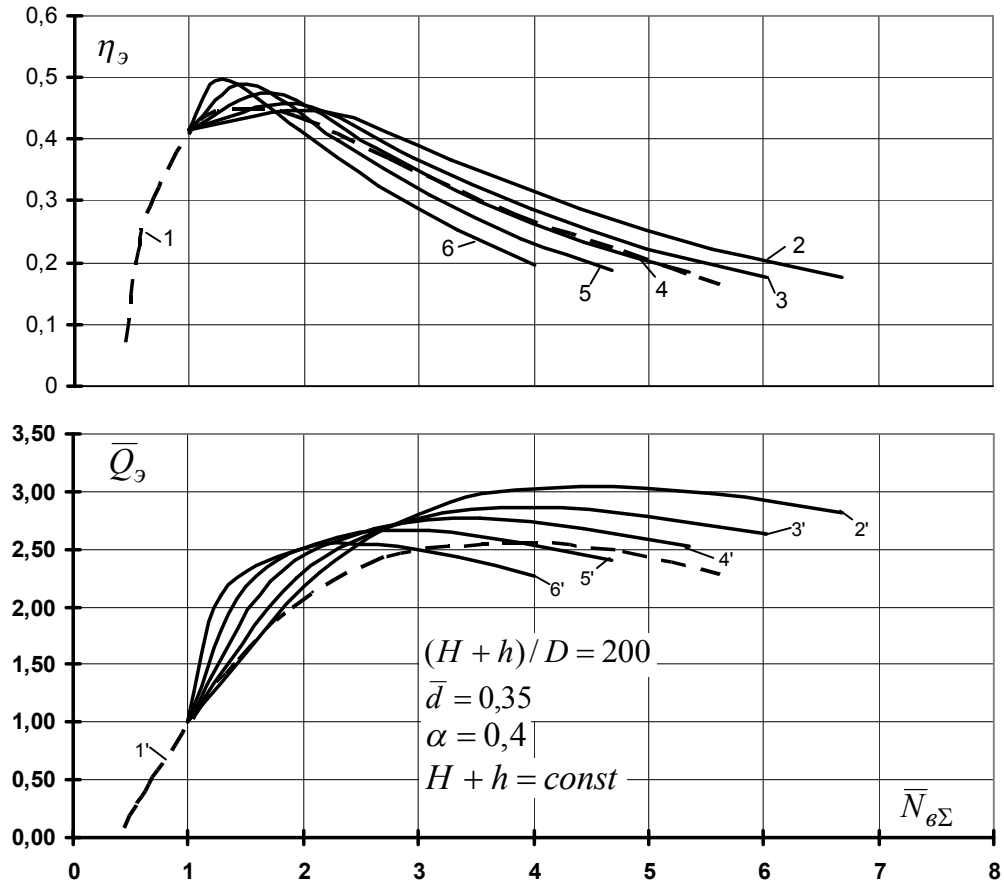


Рисунок 3.12 - Зависимости $\eta_9 = f(\bar{N}_{\Sigma})$ и $\bar{Q}_9 = f(\bar{N}_{\Sigma})$ эрлифтов ($(H+h)/D=200$, $\bar{d}=0,35$, $\alpha=0,4$, $H+h=20$ м): 1, 1' - традиционной конструкции; предлагаемого: 2, 2' - при $\bar{z}_j = 0$; 3, 3' - при $\bar{z}_j = 0,1$; 4, 4' - при $\bar{z}_j = 0,2$; 5, 5' - при $\bar{z}_j = 0,3$; 6, 6' - при $\bar{z}_j = 0,4$ (базисные значения $N_{\Sigma} = 1048$ Вт, $Q_9 = 10$ м³/ч)

Отношение максимального КПД предлагаемого и традиционного эрлифта составили от $\eta_{\Sigma.n} / \eta_{\Sigma.m} = 0,447 / 0,450 = 0,993$ при $\bar{z}_j = 0$ до $\eta_{\Sigma.n} / \eta_{\Sigma.m} = 0,498 / 0,450 = 1,11$ при $\bar{z}_j = 0,4$ (рис. 3.12).

Таким образом, целесообразной является работа эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) последовательно в несколько

сечений подъемной трубы z_j при изменении дополнительного притока Q_{np2} , что позволяет поддерживать более высокое значение КПД. Так, например, для эрлифта с безразмерным параметром $H+h/D=200$, длиной подъемной трубы $H+h=20$ м, относительным геометрическим погружением смесителя $\alpha=0,4$, безразмерным диаметром подающей трубы $\bar{d}=0,35$ транспортирование дополнительного притока в диапазоне $Q_{np2} = 0 \div 23,6$ м³/ч осуществляется подводом его в сечение $\bar{z}_j = 0,4$, в диапазоне дополнительного притока $Q_{np2} = 23,6 \div 25$ м³/ч - подвод в сечение $\bar{z}_j = 0,2$, в диапазоне дополнительного притока $Q_{np2} = 25 \div 30$ м³/ч - подвод в сечение $\bar{z}_j = 0,4$.

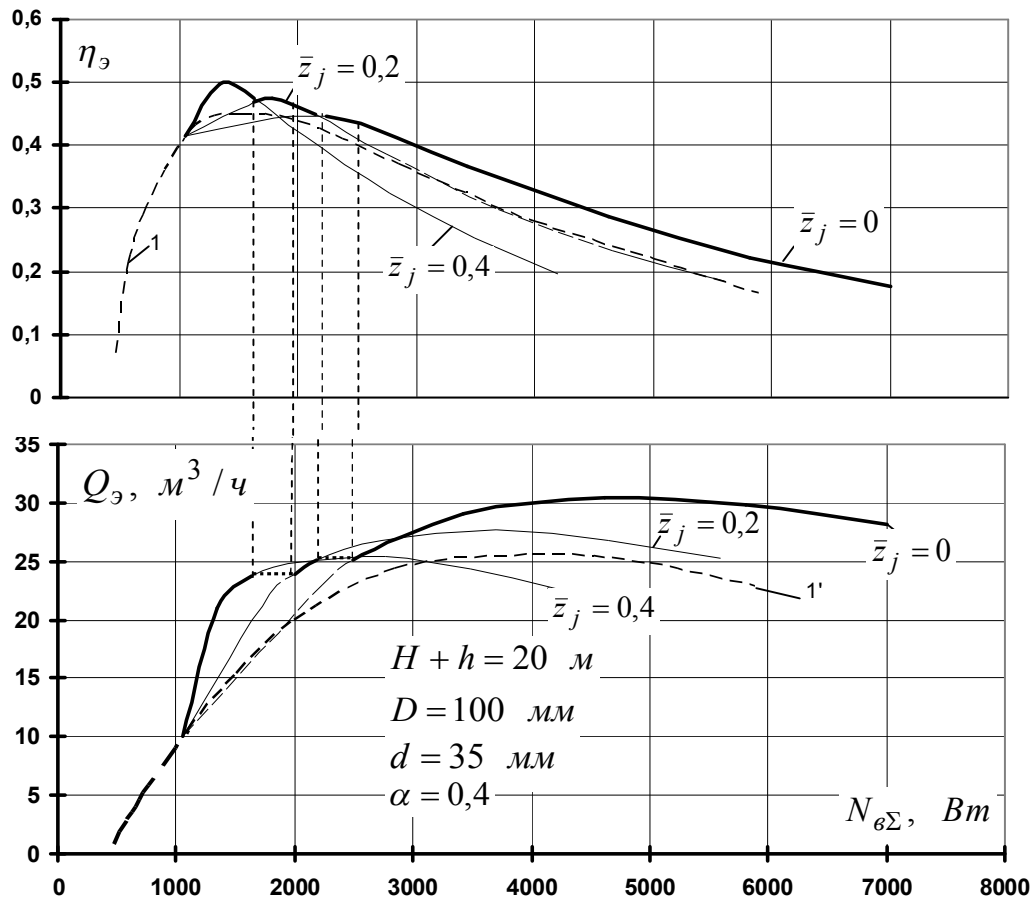


Рисунок 3.13 - Зависимости $\eta_{\Sigma} = f(N_{\Sigma})$ и $Q_{\Sigma} = f(N_{\Sigma})$ эрлифтов $[(H+h)/D=200, \bar{d} = d/D = 0,35, H+h=20$ м, $\alpha=0,4]$ с последовательным подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в сечения подъемной трубы $\bar{z}_j = 0,4; 0,2; 0$ и традиционной конструкции – 1, 1'

Подвод дополнительного притока в сечения подъемной трубы с координатой $\bar{z}_j > 0,4$ нецелесообразен (рис. 3.10, б). Использование больше трех подводов, позволяет незначительно увеличить КПД установки в процессе ее работы, но при этом существенно усложняется эксплуатация такого эрлифта.

Последовательный ввод дополнительного притока в несколько сечений подъемной трубы z_j позволяет не только повысить подачу эрлифта в сравнении с традиционной схемой, но и увеличить КПД установки во всем диапазоне дополнительных притоков $Q_{np2} = 0 \div (Q_{np.макс} - Q_{np1})$ на 8÷10 % (рис. 3.13).

3.5 Выводы

1. Разработана эрлифтная установка с обеспечением практически постоянного давления в смесителе при увеличении подачи за счет подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы. Для разработанной конструкции установки приведена зависимость для определения максимальной координаты подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) $z_{j.макс}$.

2. На основе уравнений количества движения и неразрывности движения водовоздушного потока разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы.

3. На языке программирования Delphi разработана программа для численного решения математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы на ПЭВМ.

4. Проведенный анализ расчетных данных, полученных в результате решения разработанной математической модели, показал, что факторами определяющими целесообразность использования предлагаемого эрлифта в

сравнении с традиционным (по критериям увеличения подачи и КПД) являются: безразмерный диаметр подающей трубы \bar{d} ; относительное геометрическое погружение смесителя α и координата подвода дополнительного притока z_j , менее значимым является параметр $(H+h)/D$. Получены зоны целесообразности использования предлагаемого эрлифта при $(H+h)/D = 50 \div 270$, $\alpha = 0,4; 0,6; 0,8$.

Установлено, что максимальная степень увеличения подачи предлагаемого эрлифта в сравнении с традиционным достигается при подводе дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в сечение подъемной трубы $\bar{z}_j = 0$ при $\bar{d} = 0,35$ и составляет в диапазоне $(H+h)/D = 50 \div 270$: при $\alpha = 0,4$ - $K_{Qp}/K_{Qh} = 1,65 \div 1,95$; при $\alpha = 0,6$ - $K_{Qp}/K_{Qh} = 1,51 \div 1,80$; при $\alpha = 0,8$ - $K_{Qp}/K_{Qh} = 1,37 \div 1,62$ (табл. 3.1). При этом, в некотором начальном диапазоне дополнительных притоков их транспортирование обеспечивается меньшим расходом сжатого воздуха при подводе в более высокие сечения подъемной трубы из допустимого диапазона.

Таблица 3.1 - Показатели работы предлагаемого эрлифта при $\bar{z}_j = 0$

$(H+h)/D$	$\alpha = 0,8$		$\alpha = 0,6$		$\alpha = 0,4$	
	$\frac{K_{Qp}}{K_{Qh}}$ при $\bar{d} = 0,35$	Целесообразность использования при $\bar{d} <$	$\frac{K_{Qp}}{K_{Qh}}$ при $\bar{d} = 0,35$	$\bar{d} <$	$\frac{K_{Qp}}{K_{Qh}}$ при $\bar{d} = 0,35$	$\bar{d} <$
50	1,65	0,92	1,51	0,79	1,37	0,65
100	1,70	0,95	1,60	0,85	1,48	0,75
150	1,76	0,91	1,65	0,82	1,55	0,78
200	1,82	0,94	1,67	0,86	1,60	0,80
270	1,95	0,95	1,80	0,88	1,62	0,82

5. Доказана энергетическая целесообразность подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в более высокие сечения подъемной трубы при уменьшении значения дополнительного притока Q_{np2} , что позволяет увеличить

КПД в сравнении с традиционным эрлифтом на 8÷10 % во всем диапазоне подач до $Q_{np1} + Q_{np2}$.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ

4.1 Задачи и обоснование выбора объекта экспериментальных исследований

В задачи экспериментальных исследований входило подтверждение адекватности математической модели рабочего процесса эрлифта для условий:

- работы по традиционной схеме;
- подвода дополнительного притока жидкости в промежуточное сечение подъемной трубы.

Основными критериями подобия эрлифтов согласно [124-126] являются относительное (динамическое) погружение смесителя α (α_0), отношение длины подъемной трубы к ее диаметру $(H+h)/D$ и автомодельная зона числа Рейнольдса Re для газожидкостного потока в подъемной трубе. При испытании эрлифтов, которые относятся к натурным, критерий подобия $(H+h)/D$ позволяет установить геометрические размеры газожидкостных подъемников, на которые правомерно распространить получаемые результаты исследований. При этом не рекомендуется принимать для моделей диаметры подъемных труб $D < 30$ мм для исключения существенного влияния сил поверхностного натяжения [124, 125]. Из-за изменения давления в смесителе при изменении расхода сжатого воздуха выполнение постоянства критерия подобия α_0 затруднительно, поэтому применяется α .

Экспериментальные исследования проводились при относительном геометрическом погружении смесителя $\alpha = 0,4$, что позволяет обеспечить снарядную структуру восходящего водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта [50]. Конструкция эрлифтной установки позволяла осуществлять ввод

дополнительного притока на 34% высоты подъемной трубы от уровня смесителя.

4.2 Экспериментальная установка и измерительный комплекс

Экспериментальная установка была создана в условиях лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГВУЗ «ДонНТУ».

Сообщение эрлифта с основной емкостью 1 объемом 2,5 м³ (рис. 4.1, 4.2) происходило посредством подающей трубы 2 с участком длиной 1,5 м, диаметром $\varnothing 60 \times 4$ мм ($d = 52$ мм) и с измерительным участком $\varnothing 116 \times 8$ мм, длиной 2 м, на котором устанавливался ультразвуковой расходомер 15. Для моделирования работы эрлифта при разных сопротивлений подающей трубы, на ней была установлена задвижка А1.

Источник пневмоэнергии – компрессор К10/8 ($p_n = 8$ ат, $Q_n = 1$ м³/мин) подавал сжатый воздух по трубопроводу $\varnothing 60 \times 4$ мм в смеситель 3 (рис. 4.3, 4.4) – основной поток, и в одно из двух сечений подъемной трубы отстоящих на 0,5 м и 1,25 м от смесителя эрлифта – дополнительный поток. Расход подводимого воздуха регулировался тремя вентилями А2, А3, А4. Измерение расхода основного и дополнительного потока воздуха осуществлялось с помощью диафрагм I и II (рис. 4.5).

В смесителе подводимый сжатый воздух, взаимодействовал с жидкостью и образовывалась водовоздушная смесь, которая поднималась по подъемной трубе 4 $\varnothing 76 \times 4$ мм ($D = 68$ мм), длиной 5 м и поступала в воздухоотделитель 5 (рис. 4.6, 4.9). В воздухоотделителе происходило разделение потока – воздух уходил в атмосферу, а жидкость сливалась в треугольный водослив Томсона 6 ($\gamma = 90^\circ$) (рис. 4.7), откуда вода поступала в емкость дополнительного притока 7 (рис. 4.8), имеющую перелив в основную 1. При открытии одного из вентилях А5, А6 или А7 дополнительный приток подводился от емкости 7 по трубопроводу $\varnothing 32 \times 2,5$ мм в одно из трех сечений

подъемной трубы, отстоящих от смесителя на расстоянии – 0 м, 0,5 м и 1,25 м (рис. 4.10).

Максимальная координата подвода дополнительного притока при превышении уровня жидкости в приемной емкости над уровнем в основной $\Delta h = 1$ м равнялась $z_{j.макс} = 1,7$ м, что составляет 34% высоты подъемной трубы от уровня смесителя.

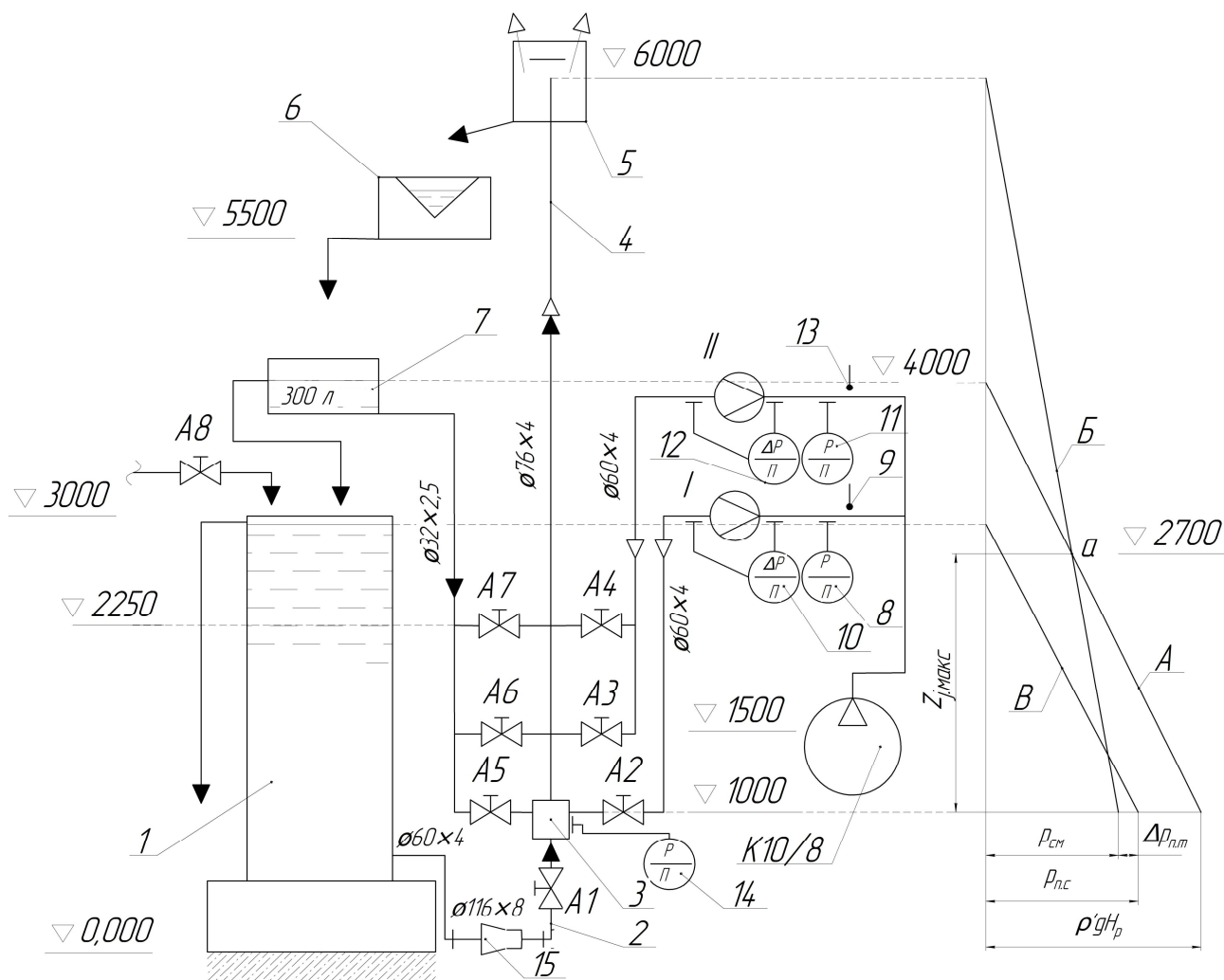


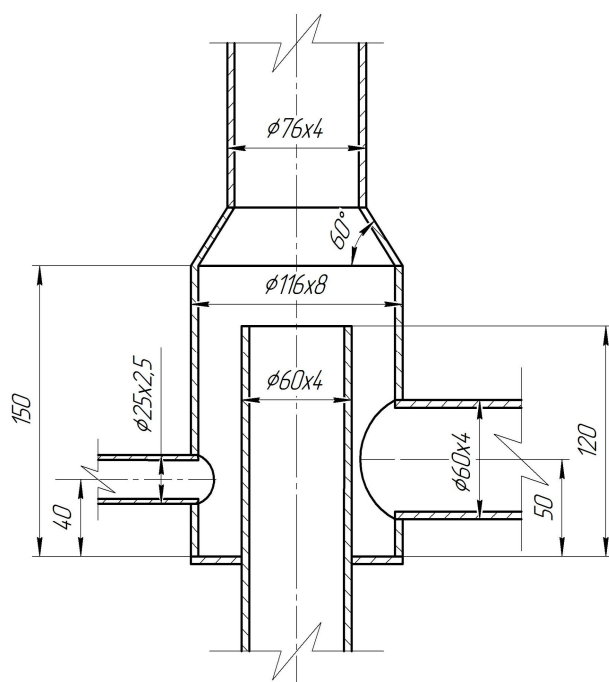
Рисунок 4.1 - Схема экспериментальной установки эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости в промежуточное сечение подъемной трубы

Измерение основного расхода сжатого воздуха обеспечивалось расходомером в составе:

а) диафрагма I (диаметр отверстия $d_{20} = 26$ мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой $D_{20}=52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,25$);



Рисунок 4.2 - Основная емкость экспериментальной эрлифтной установки



а)

б)

Рисунок 4.3 - Смеситель экспериментального эрлифта: а) схема смесителя; б) конструктивное исполнение смесителя

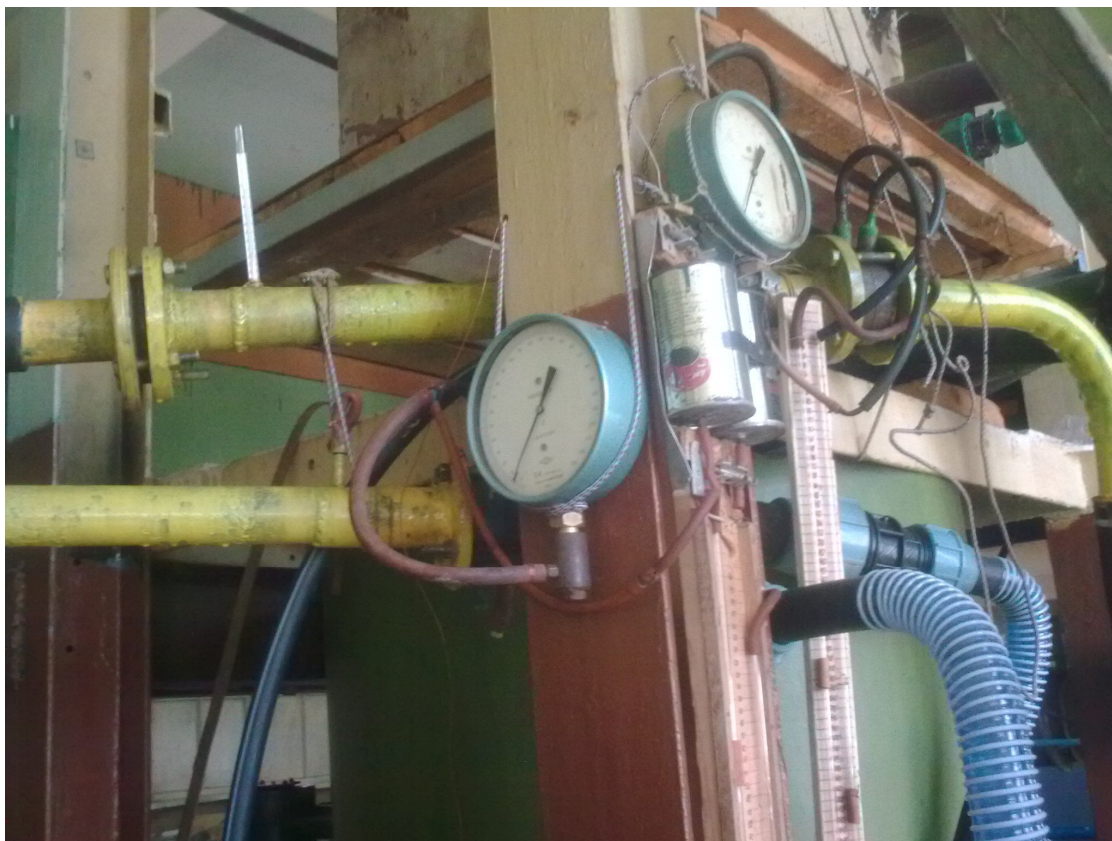
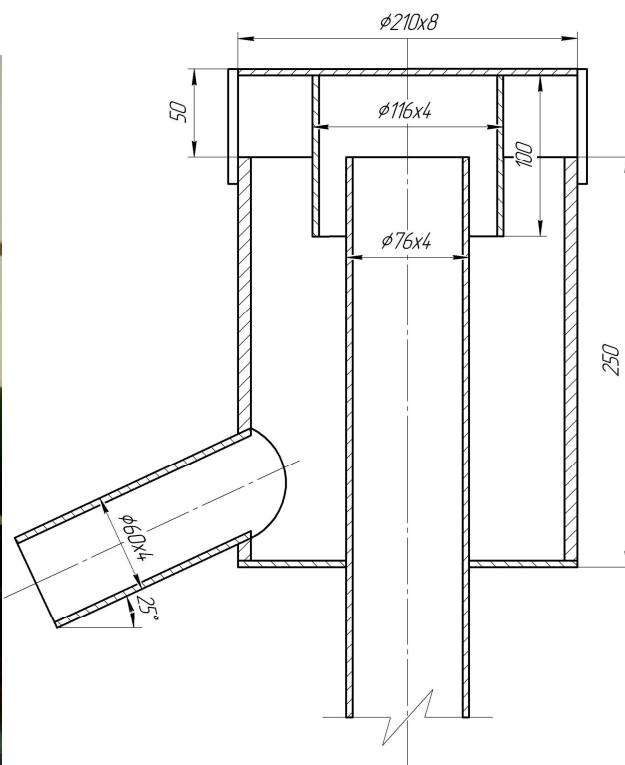


Рисунок 4.5 - Измерительные узлы основного и дополнительного расходов сжатого воздуха



а)

б)

Рисунок 4.6 - Воздухоотделитель экспериментального эрлифта: а) конструктивное исполнение воздухоотделителя; б) схема воздухоотделителя

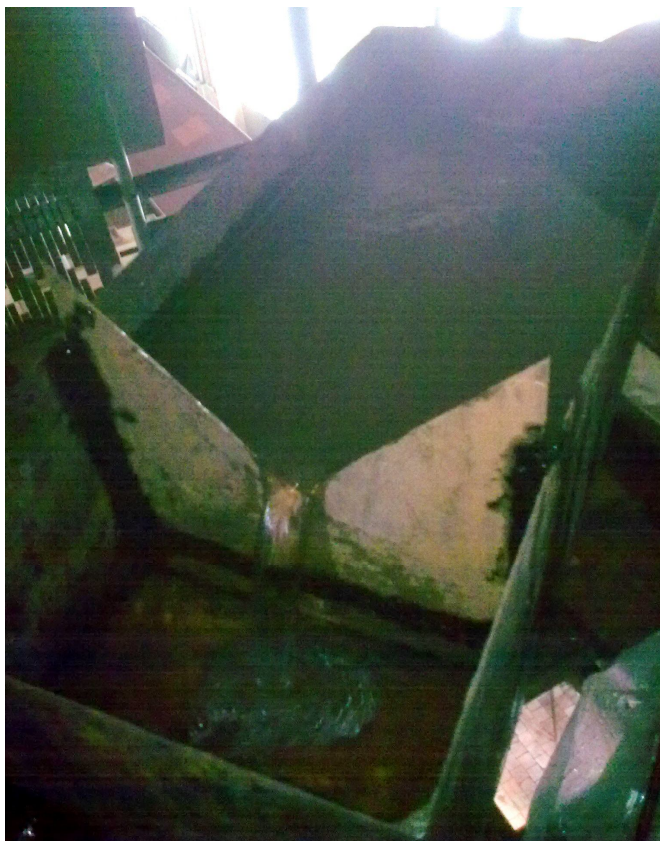


Рисунок 4.7 - Треугольный водослив



Рисунок 4.8 - Емкость дополнительного притока



Рисунок 4.10 - Нижняя часть экспериментального эрлифта

б) манометр 8 установленный перед диафрагмой ($p = 0 \div 0,6 \text{ кгс/см}^2$), термометр 9 ($t = 0 \div 100 \text{ } ^\circ\text{C}$), дифференциальный манометр 10 (уравновешивающая жидкость – вода, $\Delta p_{\text{max}} = 500 \text{ мм. вод. ст.}$).

Состав расходомера для измерения дополнительного расхода сжатого воздуха:

а) диафрагма II (диаметр отверстия диафрагмы $d_{20} = 35$ мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,453$);

б) манометр 11 ($p = 0 \div 0,6$ кгс/см²), дифференциальный манометр 12 (уравновешивающая жидкость – вода, $\Delta p_{max} = 500$ мм. вод. ст.), термометр 13 ($t = 0 \div 100$ °С).

Давление в смесителе измерялось манометром 14 ($p = 0 \div 1$ кгс/см²). Для осреднения измеряемого давления среды в смесителе, отбор в манометр дросселировался через кольцо с тремя входами в смеситель.

Расход жидкости в подающей трубе эрлифта измерялся ультразвуковым расходомером «Эргомера 120-Н2» 15 (рис. 4.11), установленным на измерительном участке трубы длиной 2 м диаметром $\varnothing 116 \times 8$, что соответствует требованиям по выбору измерительного участка для расходомера [127]. Монтаж и эксплуатация ультразвукового расходомера были выполнены в соответствии с требованиями [127].

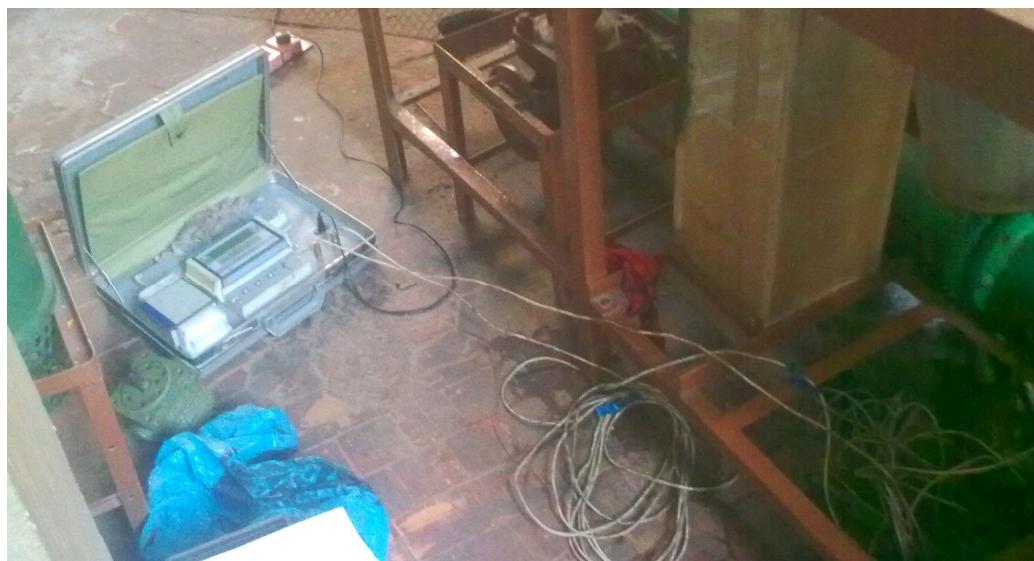


Рисунок 4.11 - Ультразвуковой расходомер «Эргомера 120-Н2»

При монтаже и установке нормальной диафрагмы, измерительного коллектора и контрольно-измерительных приборов учтены требования и рекомендации, изложенные в [128].

Среднеквадратичная относительная погрешность измерений расходов основного и дополнительного потоков сжатого воздуха составили $0,86 \div 2,69$ %, среднеквадратичная относительная погрешность измерения геометрического напора жидкости над водосливом - 0,45 %, погрешность измерения избыточного давления в смесителе – $3,75 \div 5,00$ %, погрешность измерения расхода жидкости в подающей трубе ультразвуковым расходомером «Эргомера 120-Н2» - 2 % [приложение В1].

4.3 Объем, методика и результаты экспериментальных исследований

Испытания эрлифтной установки с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы проведены в следующем объеме и последовательности:

а) получение расходной характеристики эрлифта при работе только на основном расходе воздуха и без подвода дополнительного притока (традиционная схема);

б) получение расходной характеристики эрлифта при подводе дополнительного притока воды в смеситель (через вентиль А5);

в) получение расходной характеристики эрлифта при подводе дополнительного притока воды и дополнительного расхода воздуха в среднее сечение подъемной трубы с отметкой 1,5 м;

г) получение расходной характеристики эрлифта при подводе дополнительного притока воды и дополнительного расхода воздуха в верхнее сечение подъемной трубы с отметкой 2,25 м;

д) получение расходной характеристики эрлифта при подводе дополнительного притока жидкости в верхнее сечение подъемной трубы с отметкой 2,25 м и подвода дополнительного расхода сжатого воздуха в среднее сечение с отметкой 1,5 м.

Необходимое количество опытов на каждом из этапов исследований определялось согласно рекомендаций [129-131] исходя из потребной точности

измерения режимных параметров. Для достижения относительной погрешности результатов $5 \div 10$ % при доверительной вероятности $0,9 \div 0,95$ необходимо производить не менее 5 и не более 18 измерений на одном уровне контролируемых факторов.

Для получения расходной характеристики традиционного эрлифта, геометрическое погружение смесителя $h = 2$ м обеспечивалось полным заполнением (до перелива) основной емкости 1. Исходное положение задвижек: А1, А2 – полностью открыты; А3÷А8 – закрыты. Перед пуском установки в работу производились измерения атмосферного давления, влажности воздуха и температуры окружающей среды. После подготовки установки к проведению экспериментов производился пуск компрессора. Закрытием вентиля, установленного после ресивера (на схеме не показан), в последнем создавалось избыточное давление значением $1,5 \text{ кгс/см}^2$ после чего плавно открывалась задвижка, установленная после ресивера и сжатый воздух поступал в общий воздухопровод. После установления постоянства давления на ресивере (постоянства расхода сжатого воздуха) и постоянства уровня воды в треугольном водосливе, производились измерения давления в смесителе, разности уровней воды в U – образной трубке на диафрагме I, избыточного давления и температуры сжатого воздуха в трубопроводе перед диафрагмой I, напора перед водосливом (протокол 1, приложение В2).

Для уменьшения расхода воздуха поступающего в смеситель, открывалась задвижка А9 на сбросном трубопроводе, после установления уровня воды в треугольном водосливе записывались показания приборов, как и для первого опыта (протокол №1, приложение В2). Далее последовательно уменьшался расход воздуха поступающего в смеситель закрытием вентиля А2 и производилось снятие показаний приборов (протокол №1, приложение В2).

Для получения достоверных данных расходной характеристики эрлифта традиционной схемы было выполнено 5 измерений при приблизительно равных расходах сжатого воздуха (протоколы №1÷5, приложение В2).

Так, было получено при расходе сжатого воздуха $Q_g = 0,15$ м³/мин пять значений подачи эрлифта: $Q_э = 1; 1,2; 1,5; 1,7; 1,4$ м³/ч.

Математическое ожидание подачи эрлифта полученной в 5-ти параллельных опытах

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4.1)$$

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

Тогда

$$\bar{x} = \frac{1 + 1,2 + 1,5 + 1,7 + 1,4}{5} = 1,32 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Среднеквадратичное отклонение

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n - 1}}, \quad (4.2)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{(1 - 1,32)^2 + (1,2 - 1,32)^2 + (1,5 - 1,32)^2 + (1,7 - 1,32)^2 + (1,4 - 1,32)^2}{5 - 1}} = 0,274 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Дисперсия

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n - 1}, \quad (4.3)$$

$$S_x^2 = \frac{(1,1 - 1,3)^2 + (1,28 - 1,3)^2 + (1,35 - 1,3)^2 + (1,3 - 1,3)^2 + (1,4 - 1,3)^2}{5 - 1} = 0,013 \text{ м}^6/\text{ч}^2.$$

Минимальные и максимальные значение результата измерения на границе доверительного интервала

$$x_{\text{мин}} = \bar{x} - h \cdot S_x,$$

$$x_{\text{макс}} = \bar{x} + h \cdot S_x.$$

Параметр h выбираем из таблицы [132] в зависимости от объема выборки $n = 5$, с вероятностью $P = 0,95$ ($\alpha = 0,05$) - $h = 1,67$, при $n = 4$ - $h = 1,46$.

$$x_{\min} = 1,32 - 1,67 \cdot 0,274 = 0,862 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$x_{\max} = 1,32 + 1,67 \cdot 0,274 = 1,78 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта при других значениях расхода сжатого воздуха приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта

Расход сжатого воздуха Q_v , м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_э$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ /ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{\min} \div x_{\max}$, м ³ /ч
0,15	1; 1,2; 1,5; 1,4; 1,7	1,32	0,274	0,075	0,862÷1,78
0,53	6,3; 6,0; 6,4; 5,8; 5	5,9	0,557	0,31	4,97÷6,83
0,64	7,6; 7,1; 7,6; 8; 7,3	7,5	0,343	0,117	6,93÷8,01
0,85	7,7; 7,9; 7,4; 7,1; 7,5	7,5	0,304	0,093	7,00÷8,01
0,962	7,7; 8,3; 7,8; 7,4; 7,4	7,7	0,371	0,138	7,10÷8,30
0,94	7,3; 7,9; 8,1; 7,9; 7,7	7,8	0,304	0,093	7,29÷8,31
0,23	2,1; 2,6; 2; 2,3; 2,7	2,3	0,308	0,095	6,6÷8,4

Расчетный критерий Фишера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{S_{\text{мин}}^2}, \quad (4.5)$$

$$F_{\text{расч}} = \frac{0,31}{0,075} = 4,3.$$

Табличное значение критерия Фишера [132] по степеням свободы $f_{\max} = n_{\max} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\min} = n_{\min} - 1 = 4 - 1 = 3$ составило $F_{\text{табл}} = 9,12$.

При условии $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($9,12 > 4,3$), сравниваемые дисперсии однородны.

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,62%

$$Q_3 = -1,11 + 14,6x + 0,325x^2 - 2,68x^3 - 3,85x^4 + 0,0312/x. \quad (4.4)$$

Расчетные значения подачи эрлифта Q_3 при соответствующем расходе сжатого воздуха Q_6 приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Расчетные значения подачи эрлифта

Расход сжатого воздуха Q_6 , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_3 , м ³ /ч	Отклонение расчетных данных от экспериментальных Δ , %
0,20	3,4	26
0,40	6,0	15
0,6	7,5	7,1
0,8	8,1	6,6
0,9	8,4	6,3

Результат проведенной обработки экспериментальных и расчетных данных эрлифта традиционной конструкции позволил построить расходные характеристики (рис. 4.12).

Среднее отклонение значений в точках характеристики полученной аналитически, от значений в точках регрессионной характеристики

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{26 + 15 + 7,1 + 6,6 + 6,3}{5} = 12,2\%.$$

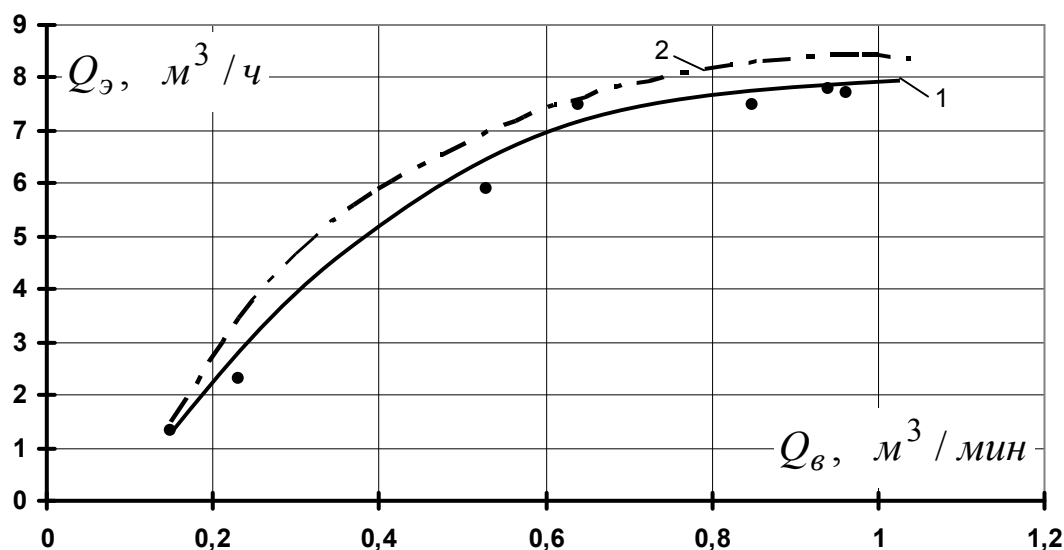


Рисунок 4.12 - Расходные характеристики эрлифта ($H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $l_{n.m} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м) при включении по традиционной схеме: 1 – экспериментальная расходная характеристика; 2 – расчетная расходная характеристика [приложение В3, табл. В3.1]

При получении расходной характеристики эрлифта с подводом дополнительного притока воды в смеситель, в процессе работы емкость дополнительного притока была заполнена жидкостью до уровня перелива. Исходное положение задвижек: А1 – полностью открыта; А2 – закрыта так, что обеспечивался расход воздуха при котором избыточное давление в смесителе составляло $0,190$ кгс/см²; А3-А8 - закрыты. После чего на несколько оборотов открывалась задвижка А5, показание манометра смесителя повышалось. Для обеспечения транспортирования дополнительного притока поступающего в смеситель, задвижка А2 открывалась до тех пор, пока давление в смесителе не возвращалось на прежний уровень – до момента подвода дополнительного притока (открытия задвижки А5). Далее записывались показания приборов: манометра смесителя, U – образной трубки на диафрагме I, манометра и термометра перед диафрагмой I, ультразвукового расходомера, пьезометра на

треугольном водосливе (протокол №6, приложение В2). Последующее открытие задвижки А5 еще на несколько оборотов также приводило к увеличению давления в смесителе, и для поддержания постоянного значения давления, соответствующим образом регулировалось уменьшалось сопротивление задвижки А2. Далее записывались показания приборов (протокол №6, приложение 3). При дальнейшем открытии А2 опыт повторялся (протокол №6, приложение 3). Максимальный дополнительный приток подводимый в смеситель обеспечивался при полном открытии А2.

Для данного опыта и всех последующих, также как при получении расходной характеристики традиционного эрлифта, были проведены по пять параллельных опытов, но в приложении представлены только по одному протоколу для соответствующего эксперимента.

Результаты эксперимента эрлифта с подводом дополнительного притока воды в смеситель, после их обработки (приложение В4, табл. В4.1), позволили построить его расходную характеристику (рис. 4.13).

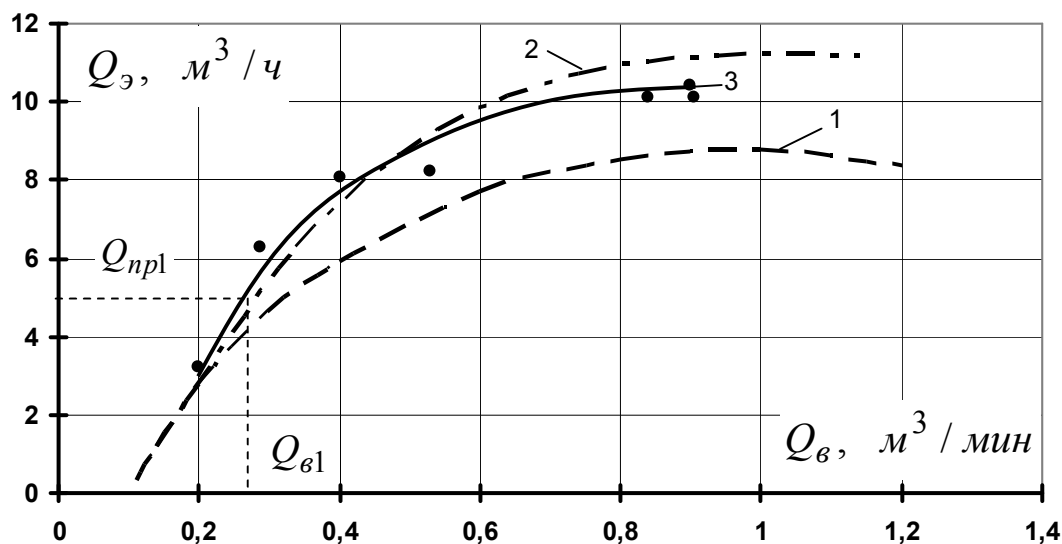


Рисунок 4.13 - Расходные характеристики эрлифта ($H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $l_{n.m} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $p_{см} = 0,190$ кгс/см²) при подводе дополнительного притока в смеситель: 1 – расчетная расходная характеристика традиционной схемы; 2 – расчетная характеристика эрлифта с подводом дополнительного притока воды в смеситель [приложение В3, табл. В3.2]; 3 – экспериментальная расходная характеристика эрлифта с подводом дополнительного притока воды в смеситель

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 0,94%

$$Q_3 = 20,02 - 1,996x + 1,694x^3 + 2,779x^4 - 2,648/x - 0,467 \ln(x) - 8,52x^{1/2} \quad (4.6)$$

При этом среднее отклонение значений в точках характеристики полученной аналитически, от значений в точках регрессионной характеристики (приложение В4, табл. В4.2)

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,2 + 12,5 + 5,4 + 10 + 9}{5} = 9\%.$$

Исходное положение задвижек при эксперименте с подводом дополнительного притока воды в сечение подъемной трубы, отстоящее на 0,5 м от смесителя: А1 – полностью открыта; А2 – закрыта, так что обеспечивался расход воздуха при котором избыточное давление в смесителе составляет 0,190 кгс/см²; А3-А8 - закрыты. Далее на два оборота открывалась задвижка А6 и производилось открытие А3, так чтобы давление в смесителе оставалось неизменным. Записывались показания приборов: манометра смесителя, U – образных трубок на диафрагме I и II, манометров и термометров перед диафрагмами I и II, ультразвукового расходомера, пьезометра на треугольном водосливе (протокол №7, приложение В2). Далее опыт повторялся при последовательном открытии А6 и соответствующем регулировании А3 (протокол №7, приложение В2).

Результаты эксперимента эрлифта с подводом дополнительного притока воды в сечение подъемной трубы, отстоящее на 1 м от смесителя, после обработки данных (приложение В4, табл. В4.3), позволили построить его расходную характеристику (рис. 4.14).

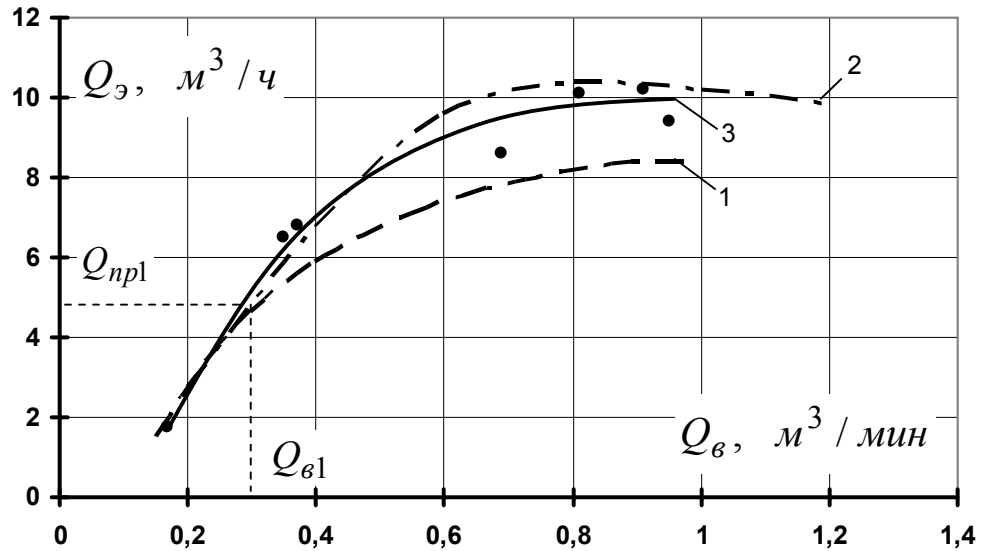


Рисунок 4.14 - Расходные характеристики эрлифта ($H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $l_{n.m} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $p_{см} = 0,190$ кгс/см²) при подводе дополнительного притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5$ м ($\bar{z}_j = 0,1$): 1 – расчетная расходная характеристика традиционной схемы; 2 – расчетная характеристика эрлифта с подводом дополнительного притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5$ м; 3 – экспериментальная расходная характеристика эрлифта с подводом дополнительного притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5$ м

Уравнения регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,60%

$$Q_э = 10,22 - 0,2803x + 1,568x^2 + 5,997x^3 - 6,32x^4 - 1,42/x. \quad (4.7)$$

При этом среднее отклонение значений в точках характеристики полученной аналитически, от значений в точках регрессионной характеристики составило (приложение В4, табл. В4.4)

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,4 + 9,5 + 5,5 + 2 + 6,1}{5} = 6,3\%$$

Исходное положение задвижек при эксперименте с подводом дополнительного притока воды в сечение подъемной трубы, отстоящее на 1,25 м от смесителя: А1 – полностью открыта; А2 – закрыта, так что обеспечивался расход воздуха при котором избыточное давление в смесителе составляет 0,180 кгс/см²; А3-А8 - закрыты. Далее на два оборота открывалась задвижка А7 и производилось открытие А4, так чтобы давление в смесителе оставалось неизменным. Записывались показания приборов: манометра смесителя, U – образных трубок на диафрагме I и II, манометров и термометров перед диафрагмами I и II, ультразвукового расходомера, пьезометра на треугольном водосливе (протокол №7, приложение В2). Далее опыт повторялся при последовательном открытии А7 и соответствующем регулировании А4 (протокол №7, приложение В2).

Результаты эксперимента эрлифта с подводом дополнительного притока воды в сечение подъемной трубы, отстоящее на 1 м от смесителя, после обработки данных (приложение В4, табл. В4.5) позволили построить его расходную характеристику (рис. 4.15).

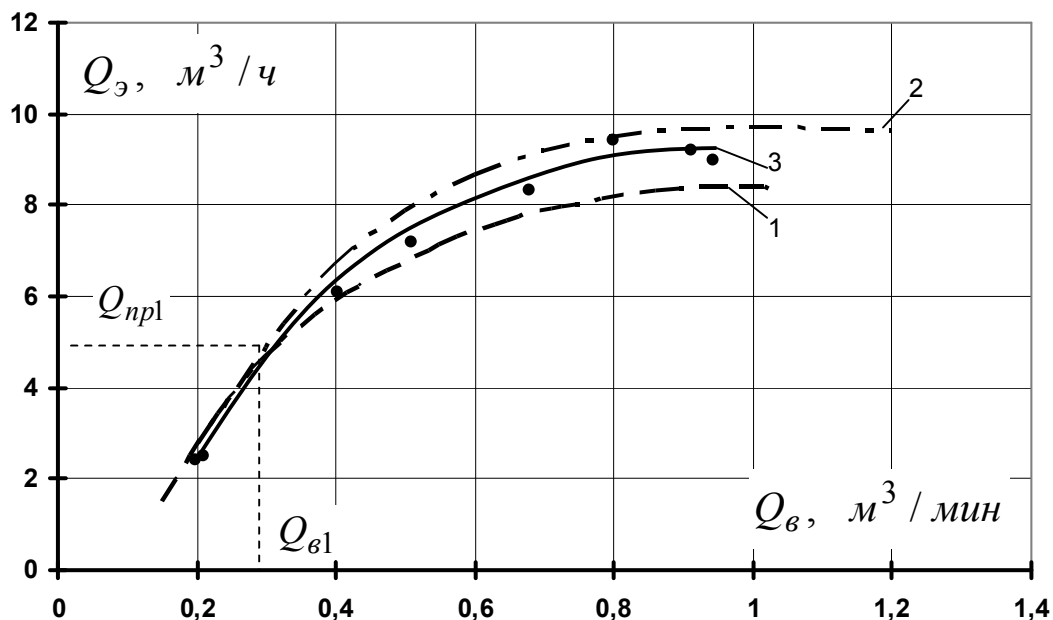


Рисунок 4.15 - Расходные характеристики эрлифта ($H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $l_{n.m} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $p_{см} = 0,180$ кгс/см²) при подводе дополнительного притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы

$z_j = 1$ м ($\bar{z}_j = 0,2$): 1 – расчетная расходная характеристика традиционной схемы; 2 – расчетная характеристика эрлифта с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 1,25$ м; 3 – экспериментальная расходная характеристика эрлифта с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 1,25$ м

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 0,77%

$$Q_3 = 5,097 + 7,297x + 0,847x^2 + 0,601x^3 - 3,78x^4 - 0,847/x. \quad (4.8)$$

При этом среднее отклонение значений в точках характеристики полученной аналитически, от значений в точках регрессионной характеристики составило (приложение В4, табл. В4.6)

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{7,4 + 3 + 7,4 + 5,6 + 6,7}{5} = 6\%.$$

Исходное положение задвижек при эксперименте с подводом дополнительного притока воды в сечение подъемной трубы, отстоящее на 1,25 м от смесителя и подвода дополнительного расхода воздуха в сечение 0,5 м от смесителя: А1 – полностью открыта; А2 – закрыта, так что обеспечивался расход воздуха, при котором избыточное давление в смесителе составляет 0,180 кгс/см²; А3-А8 - закрыты. Далее на два оборота открывалась задвижка А7 и производилось открытие А3, так чтобы давление в смесителе оставалось неизменным. Записывались показания приборов: манометра смесителя, U – образных трубок на диафрагме I и II, манометров и термометров перед диафрагмами I и II, ультразвукового расходомера, пьезометра на треугольном водосливе (протокол №8, приложение В2). Далее опыт повторялся при

последовательном открытии А7 и соответствующем регулировании А3 (протокол №8, приложение В2).

Результаты эксперимента эрлифта с подводом дополнительного притока воды в сечение подъемной трубы, отстоящее на 1 м от смесителя, а дополнительного расхода воздуха в сечение отстоящее на 0,5 м от смесителя, после обработки данных (приложение В4, табл. В4.7) позволили построить его расходную характеристику (рис. 4.16).

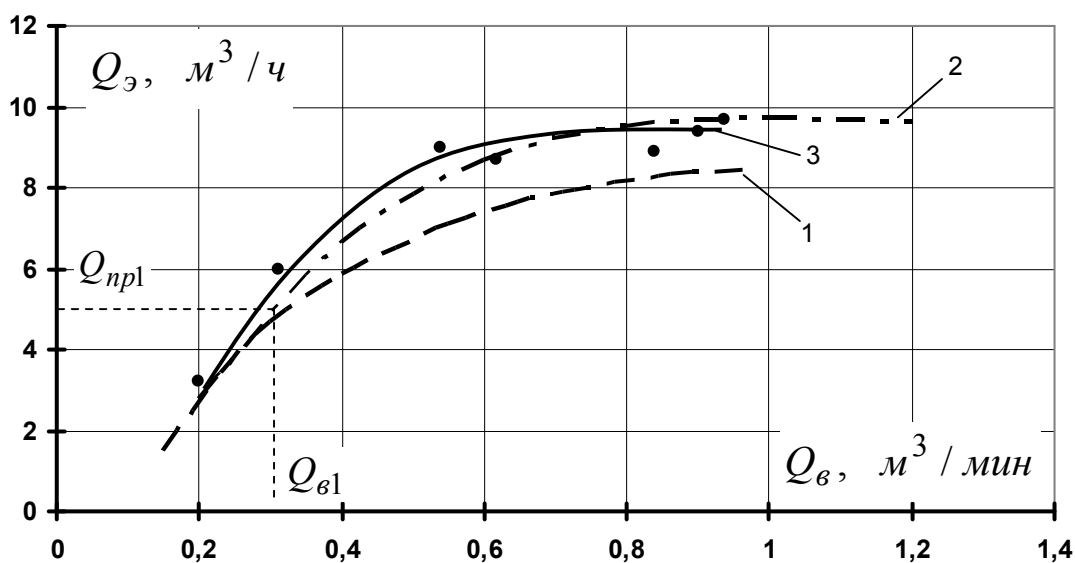


Рисунок 4.16 - Расходные характеристики эрлифта ($H+h = 5$ м, $h = 2$ м, $l_{n.m} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $p_{см} = 0,180$ кгс/см²) при подводе дополнительного притока воды в сечение $z_j = 1$ м, а дополнительного расхода воздуха в сечение $z_j = 0,5$ м: 1 – расчетная расходная характеристика традиционной схемы; 2 – расчетная характеристика эрлифта с подводом дополнительного притока воды и воздуха в сечение $z_j = 1,25$ м; 3 – экспериментальная расходная характеристика эрлифта с подводом дополнительного притока воды в сечение $z_j = 1,25$ м, а дополнительного расхода воздуха в сечение $z_j = 0,5$ м

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов со среднеквадратичной погрешностью 1,32%

$$Q_9 = 11,5 + 2,50x - 1,86x^2 - 6,405x^3 + 5,76x^4 - 1,76/x. \quad (4.9)$$

При этом среднее отклонение значений в точках характеристики полученной аналитически, от значений в точках регрессионной характеристики составило (приложение В4, табл. В4.8)

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{20 + 7,5 + 3,3 + 2,2 + 7,7}{5} = 8\%.$$

Таким образом, для всего объема полученных экспериментальных данных (для всех рассматриваемых условий работы экспериментальной установки) суммарные отклонения расчетных данных от экспериментальных составили $6 \div 12,2$ %, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости в промежуточное сечение подъемной трубы эксперименту.

4.4 Выводы

1. В условиях лаборатории кафедры «Энергомеханические системы» ГВУЗ ДонНТУ создана экспериментальная эрлифтная установка ($H+h = 5$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $\alpha = 0,4$) с возможностью подвода дополнительного притока воды в сечения, отстоящие от смесителя на 0 м, 0,5 м и 1,25 м.

2. Экспериментально получены расходные характеристики эрлифта традиционной схемы, с подводом дополнительного притока воды и воздуха в сечения подъемной трубы, отстоящие на 0 м, 0,5 м и 1,25 м от смесителя.

2. Сопоставление расчетных данных с экспериментальными показало, что их отклонение по всем рассматриваемым характеристикам составило $6 \div 12,2$ %, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С ПОДВОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ (ГИДРОСМЕСИ) В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

5.1 Определение параметров эрлифтов с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

Технологические условия эрлифтных установок с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы определяют два вида системы подвода дополнительного притока:

- с емкостью дополнительного притока;
- с дополнительной подающей трубой.

Первый вид применим при возможности подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) выше уровня зумпфа, в котором установлен газожидкостный подъемник. Второй вид системы подвода дополнительного притока применяется при отсутствии такой возможности, если базовый и дополнительный притоки разделить затруднительно и дополнительный приток отбирается из зумпфа через дополнительную подающую трубу.

Исходными данными при проектировании эрлифтов с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы являются:

- значение притоков – основного Q_{np1} и дополнительного Q_{np2} ;
- максимально возможное геометрическое погружение смесителя эрлифта h ;
- необходимая высота подъема жидкости (гидросмеси) эрлифтом H ;
- параметры возможных источников сжатого воздуха: p_n, Q_n .

Расчет эрлифтов с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы проводится в два этапа – предварительный и уточненный.

Предварительный расчет проводится по методике изложенной в [1, 2], в следующей последовательности.

1. Определение длины подъемной трубы эрлифта $H + h$.
2. Определение относительного геометрического погружения смесителя

[2]

$$\alpha = \frac{h}{H + h}; \quad (5.1)$$

3. Расчет безразмерного параметра $(H + h)/D$. Задаваясь рядом возможных диаметров подъемной трубы $D = D_1, D_2, D_3, \dots, D_n$ для каждого диаметра рассчитывается безразмерный параметр $(H + h)/D$, по которому определяется тип эрлифта: $(H + h)/D < 200$ - короткие эрлифты, $(H + h)/D > 200$ - длинные [47].

4. Определение удельного расхода сжатого воздуха q . Удельный расход сжатого воздуха для коротких эрлифтов определяется по графической зависимости рис. 5.1, а, для длинных – рис. 5.1, б.

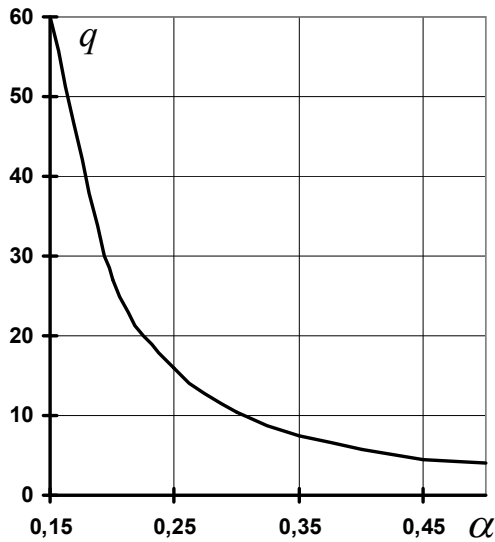
5. Расчет необходимого расхода сжатого воздуха [2]

$$Q_в = q \cdot Q_э, \quad (5.2)$$

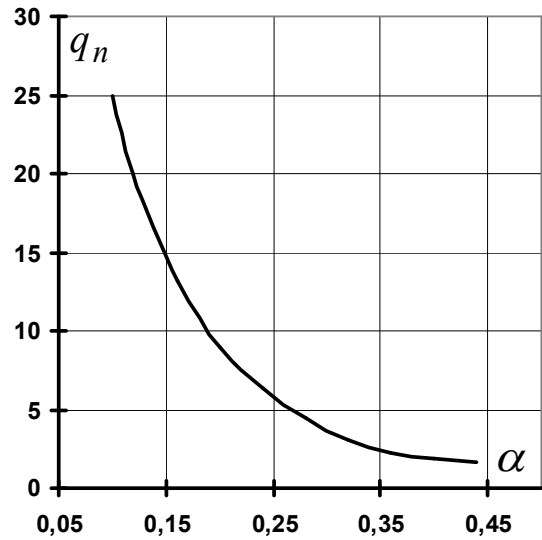
где подача эрлифта $Q_э$ равна сумме базового и дополнительного притоков $Q_{np1} + Q_{np2}$.

6. Определение коэффициента подачи эрлифта c для длинных эрлифтов по зависимости [47]

$$c = 5\sqrt{\alpha} \frac{\sqrt{q_n + (1 - \frac{1}{\alpha})}}{1 + q_n}, \quad (5.3)$$



а)



б)

Рисунок 5.1 - Зависимости удельного расхода сжатого воздуха от относительного геометрического погружения смесителя $q = f(\alpha)$ [47]: а) – для коротких эрлифтов; б) – для длинных эрлифтов

для коротких эрлифтов по зависимости [47]

$$c = 3,68\sqrt{\alpha} \frac{\sqrt{q + (1 - \frac{1}{\alpha})}}{1 + q} \quad (5.4)$$

Значения коэффициентов подачи для оптимального режима на основании экспериментальных исследований у коротких эрлифтов – 0,078, у длинных – 0,04 [47].

7. Расчет диаметра подъемной трубы по зависимости [2]

$$D = 2,5\sqrt{\frac{Q_{\text{э}}}{c}}. \quad (5.5)$$

8. Определение диаметра подающей трубы d . Для ряда возможных значений диаметров подающей трубы $d = d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$ определяются транспортные скорости [96]

$$v = \frac{4 \cdot Q_3}{\pi d^2} \quad (5.6)$$

для диапазона подач эрлифта $Q_3 = Q_{np1} \div Q_{np1} + Q_{np2}$ (табл. 5.1)

Полученный ряд скоростей жидкости для каждого диаметра d сравнивается с транспортными скоростями необходимыми для водоотливных установок - $v = 2,5 \div 3$ м/с или гидropодъемных - $v = 3,5 \div 4$ м/с и выбирается наиболее подходящий диаметр подающей трубы.

Таблица 5.1 - Скорости жидкости в подающей трубе эрлифта при диапазоне подач $Q_3 = Q_{np1} \div Q_{np1} + Q_{np2}$, диаметрах подающей трубы $d = d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$

Q_3	v				
	d_1	d_2	d_3	...	d_n
Q_{np1}	$\frac{4 \cdot Q_{np1}}{\pi d_1^2}$	$\frac{4 \cdot Q_{np1}}{\pi d_2^2}$	$\frac{4 \cdot Q_{np1}}{\pi d_3^2}$...	$\frac{4 \cdot Q_{np1}}{\pi d_n^2}$
...
$Q_{np1} + Q_{np2}$	$\frac{4 \cdot (Q_{np1} + Q_{np2})}{\pi d_1^2}$	$\frac{4 \cdot (Q_{np1} + Q_{np2})}{\pi d_2^2}$	$\frac{4 \cdot (Q_{np1} + Q_{np2})}{\pi d_3^2}$...	$\frac{4 \cdot (Q_{np1} + Q_{np2})}{\pi d_n^2}$

Далее расчет проводится в зависимости от вида установки.

Для установок с дополнительной подающей трубой далее определяется диаметр этой трубы d_2 .

Диаметр дополнительной подающей трубы рассчитывается исходя из необходимости обеспечения расхода жидкости в ней Q_{np2} при геометрическом погружении смесителя h . Движение жидкости в дополнительном подающем трубопроводе происходит под действием разности гидростатического напора жидкости на уровне смесителя h и напора жидкости в смесителе эрлифта $h_{см}$

$$d_2 = 4 \sqrt{\frac{8Q_{np2}^2}{\pi^2 \mu^2 g (h - h_{см})}}, \quad (5.7)$$

где μ - коэффициент подачи дополнительной подающей трубы.

Для установок с емкостью дополнительного притока расчет проводится в следующем порядке.

9. Расчет максимальной координаты подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы

$$z_{j.макс} = \frac{(h_{n.m} + \Delta h) \cdot (H + h)}{H + h_{n.m}}. \quad (5.8)$$

10. Определение диапазона целесообразных координат подвода жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы. Целесообразный диапазон координат подвода жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы по полученным данным α , соотношению диаметров $\bar{d} = d/D$ определяется из полученных ранее зон раздела 3.4, рис. 3.11, б. В случае если определенное максимальное значение координаты подвода дополнительного притока z_j из диапазона целесообразных значений больше рассчитанного максимального $z_{j.макс}$ (5.8), то для проектирования принимается расчетное значение, если же максимальное значение из диапазона целесообразных координат меньше расчетного, то для проектирования принимается максимальное значение из диапазона.

11. Определение геометрических параметров системы подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси).

В системе подвода дополнительного притока жидкость (гидросмеси) из емкости дополнительного притока по трубопроводу диаметром d_n , длиной l_n , суммарным коэффициентом местных сопротивлений $\sum \zeta_n$, коэффициентом Дарси λ под действием разницы располагаемого напора H_p и напора в сечении ввода $p_{z_j} / \rho'g$ жидкость (гидросмесь) истекает в промежуточное сечение подъемной трубы z_j с расходом Q_{np2} (рис. 5.2).

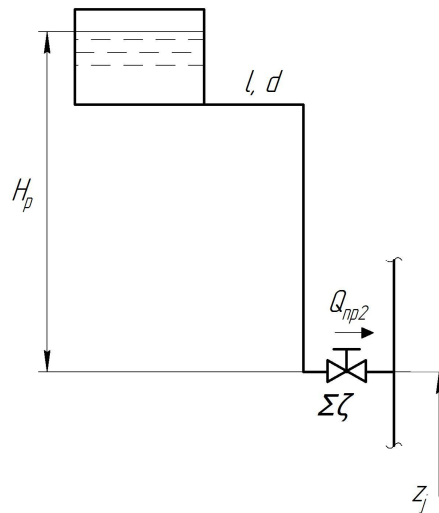


Рисунок 5.2 - К определению геометрических параметров системы подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси)

Диаметр дополнительного подводящего трубопровода определяется по зависимости

$$d = \sqrt[4]{\frac{8Q_{np2}^2 \left(\lambda \frac{l_n}{d_n} + \sum \zeta_n + 1 \right)}{\pi^2 g \left(H_p - \frac{p_{zj}}{\rho'g} \right)}}. \quad (5.7)$$

Для минимизации сопротивления движению водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта, создаваемого при подводе дополнительных притока жидкости и расхода воздуха, данный подвод необходимо осуществлять под некоторым углом β к основному водовоздушному потоку (рис. 5.3). При этом чем больший угол входа струи β и скоростной напор струи относительно скоростного напора сносящего потока тем больший изгиб струи и соответственно тем большее сопротивление оказывается сносящему потоку [133].

Траектория струи может быть определена по эмпирической формуле полученной Г.С. Шандоровым [134]

$$\frac{x}{d} = \frac{q_{01}}{q_{02}} \left(\frac{y}{d} \right)^{2,55} + \frac{y}{d} \left(1 + \frac{q_{01}}{q_{02}} \right) ctg\beta, \quad (5.8)$$

где x, y – координаты точек (рис. 5.3); d, β – диаметр подводящего трубопровода и угол ввода в подъемную трубу; $q_{01} = \rho_{см} \frac{\omega^2}{2}$, $q_{02} = \rho \frac{v^2}{2}$ – скоростные напоры соответственно в сносящем потоке и в начальном сечении струи.

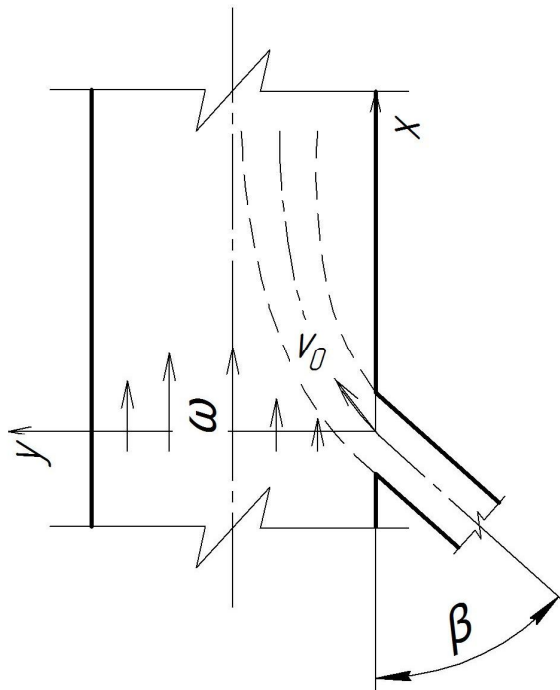


Рисунок 5.3 - Схема струи в боковом сносящем потоке

При подводе дополнительного притока жидкости с твердыми включениями (гидросмеси) необходимо исключить застойные зоны в подводящем трубопроводе, где могут скапливаться твердые частицы.

12. Выбор координаты подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы эрлифта.

С точки зрения энергоэффективности рабочего процесса, как было установлено ранее (раздел 3.4), наиболее выгодной является эрлифтная установка с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) последовательно в три сечения подъемной трубы:

- сечение верхнего ввода – максимальное принятое (пункт 10);
- среднее сечение располагается посередине между верхним подводом и смесителем;
- нижний ввод осуществляется в смеситель эрлифта.

Уточненный расчет выполняется на ПЭВМ по разработанной программе (раздел 3.4), исходными данными являются: геометрическое погружение смесителя h , высота подъема жидкости $H+h$ диаметр подъемной трубы D , диаметр d и длина подающей трубы l , координата подвода дополнительного притока жидкости и дополнительного расхода сжатого воздуха z_j , значение основного (базового) притока Q_{np1} , начальное Q_{np2}^1 и конечное Q_{np2i} значения дополнительного притока с шагом ΔQ_{np2} .

5.2 Опытно-промышленная эрлифтная установка удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго»

5.2.1. Общие положения и исходные данные

Опытно-промышленная установка разработана для удаления дренажных и случайных стоков, поступающих в систему гидрозолошлакоудаления при выводе из работы энергоблоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго». Работа выполнена на основании договора о сотрудничестве между ГВУЗ «ДонНТУ» и Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго» [приложение Г1].

В базовом варианте при остановке энергоблоков дренажные и случайные стоки в количестве, изменяющемся от 20 до 100 м³/ч удаляются штатно установленными багерными (грунтовыми) насосами 12ГРТ-8 с номинальной подачей 1300 м³/ч, что приводит к существенной энергетической неэффективности процесса откачки. К тому же, в зависимости от вида проводимых ремонтно-технологических работ на неработающих энергоблоках, величина дренажных и случайных стоков может изменяться в широком диапазоне, однако не превышая значения 100 м³/ч. Удаление случайных стоков необходимо обеспечивать в существующие золопроводы станции.

В рассматриваемых условиях удаление поступающей жидкости целесообразно обеспечить эрлифтной установкой с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы.

Исходные данные для разработки эрлифтной установки:

- значения притоков: основного (базового) $Q_{np1} = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$, максимальный общий приток $Q_{np.макс} = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- максимально возможное геометрическое погружение смесителя эрлифта при установке его в канале гидрозолошлакоудаления глубиной 2,5 м $h = 2 \text{ м}$;
- высота от уровня пола до продольной оси симметрии золошлакопроводов - 2 м;
- источник сжатого воздуха – общестанционная пневмосеть с абсолютным давлением 5 кгс/см².

5.2.2. Определение основных параметров эрлифтной установки для удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС

Предварительный расчет проводится в соответствии с методикой представленной в разделе 5.1.

С учетом максимально допустимого уровня жидкости в канале гидрозолошлакоудаления 2,3 м и необходимостью, во избежания заиливания канала, обеспечения расстояния от дна канала до входа в подающую трубу 0,2 м максимальное геометрическое погружение смесителя составляет $h = 2 \text{ м}$ (рис. 5.4).

Принимая значение гидравлического уклона $i = 0,02$, переподем жидкости от воздухоотделителя до входа в золошлакопровод длиной трубопровода $l = 40 \text{ м}$ составляет 0,8 м. Тогда высота подъема жидкости $H = 3 \text{ м}$.

Необходимая длина подъемной трубы эрлифта $H + h = 3 + 2 = 5 \text{ м}$.

Для ряда возможных диаметров подъемной трубы $D = 100, 150, 200, 250,$

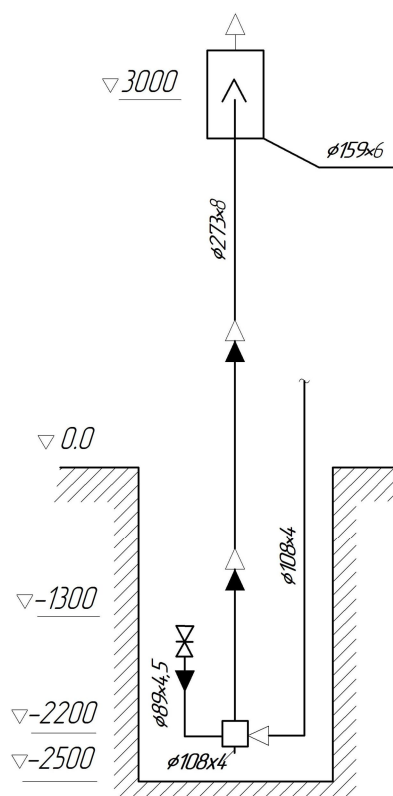


Рисунок 5.4 - Схема опытно-промышленной эрлифтной установки удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС

300 мм определяем безразмерный параметр $H + h / D$, характеризующий длину эрлифта (при $H + h / D < 200$ - короткие эрлифты, $H + h / D > 200$ - длинные эрлифты) [табл. 5.2].

Таблица 5.2 - Параметр характеризующий длину эрлифта в зависимости от диаметра подъемной трубы

D , м	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$H + h / D$	50,0	33,3	25,0	20,0	16,7

При всех рассматриваемых диаметрах подъемной трубы, эрлифт с $H+h = 2+3 = 5$ м является коротким (табл. 5.2).

Для значения относительного геометрического погружения смесителя эрлифта

$$\alpha = \frac{h}{H + h} = \frac{2}{3 + 2} = 0,4,$$

по графической зависимости удельного расхода воздуха от относительного геометрического погружения смесителя для коротких эрлифтов (рис. 5.1) значение удельного расхода воздуха составляет $q = 6$.

Необходимый для обеспечения подачи эрлифта $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ расход сжатого воздуха

$$Q_e = q \cdot Q_э = 6 \cdot \frac{100}{60} = 10 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Коэффициент подачи эрлифта принимаем $c = 0,078$, тогда диаметр подъемной трубы [2]

$$D = 2,5 \sqrt{\frac{Q_э}{c}} = 2,5 \sqrt{\frac{100}{0,078}} = 17,5 \text{ см} = 175 \text{ мм.}$$

При создании эрлифта был принят больший диаметр подъемной трубы.

Диаметр подающей трубы выбираем исходя из условия обеспечения в ней транспортной скорости потока. Для диапазона возможных диаметров подающей трубы $d_1 = 50 \div 200$ мм рассчитываем скорости $v = 4 \cdot Q_e / \pi d^2$ жидкости в ней для возможного диапазона подач эрлифта $20 \div 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ (табл. 5.3).

Из ряда рассматриваемых диаметров подающей трубы наиболее приемлемым является $d_1 = 100$ мм, при котором обеспечиваются транспортные скорости $0,71 \div 3,54$ м/с для всего возможного диапазона подач, что наиболее отвечает требованиям к водоотливным установкам, для которых $v = 2,5 \div 3$ м/с. При $d_1 = 50$ мм значения скоростей превышают требуемые, что существенно увеличивает потери напора (давления) в подающей трубе, ведущие к снижению возможной подачи эрлифта. При $d_1 = 150, 200$ мм требуемые транспортные скорости не обеспечиваются.

Для рассматриваемых условий удаления дренажных и случайных стоков эрлифтом, установленным в канале гидрозолошлакоудаления, переподъем

Таблица 5.3 - Скорости жидкости в подающей трубе эрлифта при диапазоне подач $20 \div 100 \text{ м}^3/\text{ч}$, диаметрах подающей трубы $d_1 = 50 \div 200 \text{ мм}$

$Q_3, \text{ м}^3/\text{ч}$	$v, \text{ м/с}$			
	$d_1 = 50 \text{ мм}$	$d_1 = 100 \text{ мм}$	$d_1 = 150 \text{ мм}$	$d_1 = 200 \text{ мм}$
20	2,83	0,71	0,31	0,18
40	5,66	1,42	0,63	0,35
60	8,49	2,12	0,94	0,53
80	11,3	2,83	1,26	0,71
100	14,2	3,54	1,57	0,88

притока выше канала трудно осуществим, т.е. подвод дополнительного притока жидкости в промежуточное сечение подъемной трубы от емкости дополнительного притока невозможен. Поэтому эрлифт оборудуется дополнительной подающей трубой, вход в которую располагается выше уровня смесителя (рис. 5.4). Диаметр дополнительной подающей трубы выбирается исходя из необходимости обеспечения расхода в диапазоне $20 \div 60 \text{ м}^3/\text{ч}$ при геометрическом погружении смесителя $h = 2 \text{ м}$.

$$d = 4 \sqrt{\frac{8Q^2}{\pi^2 \mu^2 g(h - h_{см})}}, \quad (5.9)$$

где μ - коэффициент подачи дополнительной подающей трубы, принимаем $\mu = 0,76$ [38]; $h_{см}$ - напор жидкости в смесителе, с учетом потерь напора в подающей трубе при расходе через нее $80 \text{ м}^3/\text{ч}$ - $h_{н.т} = 0,151 \text{ м}$, составляет $h_{см} = 1,85 \text{ м}$.

Тогда диаметр дополнительной подающей трубы при большем значении $h_{см}$

$$d_2 = 4 \sqrt{\frac{8(20/3600)^2}{\pi^2 0,76^2 g(2 - 1,85)}} = 0,074 \text{ м}.$$

Принимаем $d_2 = 80 \text{ мм}$.

Оборудование эрлифта дополнительной подающей трубой позволяет при обеспечении необходимых транспортных скоростей обеспечить близкое к постоянному давлению в смесителе при увеличении подачи эрлифта. При этом эквивалентный диаметр подающего трубопровода

$$d_э = \sqrt{\frac{4(\pi \frac{(d^2 + d_2^2)}{4})}{\pi}} = \sqrt{(0,1^2 + 0,08^2)} = 0,128 \text{ м.}$$

После определения основных конструктивных параметров эрлифта необходимо провести расчет и выбор основных узлов газожидкостного подъемника. Смеситель принимаем цилиндрической формы, являющийся одним целым с подъемной трубой (рис. 5.5, 5.6). Длина основной подающей трубы во избежание выброса сжатого воздуха из смесителя принята 400 мм.

Проточная часть воздухоотделителя (рис. 5.5, 5.7) рассчитывается исходя из необходимости обеспечения скорости водовоздушного и воздушного потоков не более 2 м/с, для исключения уноса воздухом части поднимаемой жидкости в атмосферу. При максимальной подаче эрлифта 100 м³/ч и расходе сжатого воздуха 10 м³/мин скорости потоков в воздухоотделителе:

- нисходящего водовоздушного в сечении между подъемной трубой и трубой внешним диаметром $\varnothing 500$ мм, площадь сечения

$$F_1 = \frac{\pi}{4} (0,480^2 - 0,273^2) = 0,122 \text{ м}^2 \text{ (рис. 5.5)}$$

$$v = \frac{(Q_в + Q_э)}{F_1} = \frac{(10 / 60) + (100 / 3600)}{0,122} = 1,59 \text{ м/с;}$$

- восходящего воздушного в сечении между внутренней трубой диаметром $\varnothing 500$ мм и внешней трубой диаметром $\varnothing 650$ мм, площадь сечения

$$F_2 = \frac{\pi}{4} (0,650^2 - 0,5^2) = 0,135 \text{ м}^2$$

$$v = \frac{Q_6}{F_2} = \frac{(10/60)}{0,135} = 1,23 \text{ м/с};$$

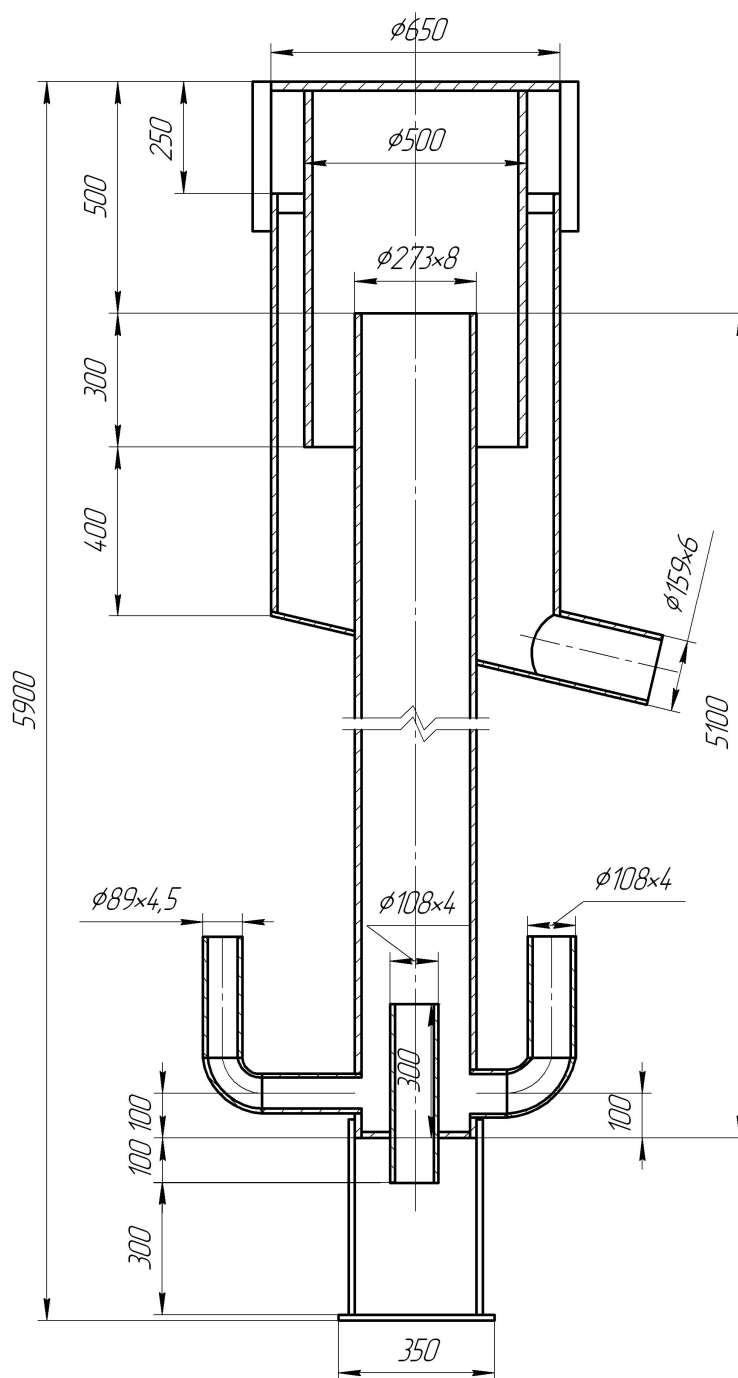


Рисунок 5.5 - Эрлифт Старобешевской ТЭС

- воздушного через поверхность между крышкой воздухоотделителя диаметром $\phi 650$ мм и внешней трубой диаметром $\phi 650$ мм, площадь сечения $F_3 = \pi \cdot 0,65 \cdot 0,25 = 0,51 \text{ м}^2$ (рис. 5.5)



Рисунок 5.6 - Нижняя часть газожидкостного подъемника Старобешевской ТЭС

$$v = \frac{Q_g}{F_3} = \frac{(10/60)}{0,51} = 0,327 \text{ м/с.}$$

Т.е условие выполняется – скорости потоков во всех сечениях проточной части воздухоотделителя не превышают 2 м/с.

Диаметр трубопровода, отводящего поднятую в воздухоотделитель жидкость, должен удовлетворять условию $d_o \geq d_g$, для данных условий принят диаметр $d_o = 150$ мм, что больше $d_g = 128$ мм.

Для уменьшения потребляемого расхода сжатого воздуха из пневмосети станции на воздухопроводе эрлифта устанавливается струйный аппарат. Исходные данные для расчета струйного аппарата:

- абсолютное давление на входе (рабочего потока) – 5 кгс/см²;
- абсолютное давление инжектируемого потока – 1 кгс/см²;
- необходимое абсолютное давление смешанного потока (на выходе из аппарата), принимается исходя из максимального давления в смесителе и с учетом потерь в воздухопроводе на участке от выхода из аппарата до смесителя – 1,4 кгс/см².



Рисунок 5.7 - Воздухоотделитель эрлифта Старобешевской ТЭС

В соответствии с существующей методикой расчета струйных аппаратов [135] значение достижимого коэффициента инжекции аппарата $U = 0,88$.

Коэффициент инжекции – отношение массовых расходов инжектируемого и рабочего потоков воздуха [135]

$$U = G_n / G_p, \quad (5.8)$$

выражая из (5.8) массовый расход инжектируемого потока

$$G_n = U \cdot G_p,$$

а массовый расход смешанного потока [135]

$$G_c = G_n + G_p. \quad (5.9)$$

После подстановки получаем

$$G_p = G_c / (1 + U). \quad (5.10)$$

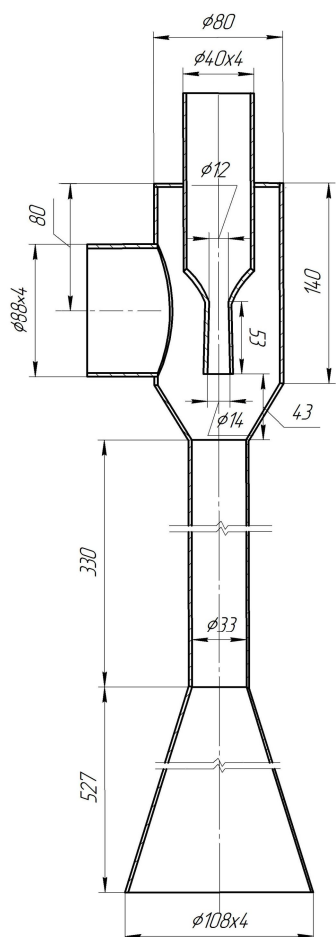
Зная, что потребный максимальный расход сжатого воздуха эрлифтом 10 м³/мин (на выходе из струйного аппарата) получим расход воздуха отбираемый из пневмосети

$$G_p = 10 / (1 + 0,88) = 5,32 \text{ м}^3/\text{мин},$$

т.е. потребляемый расход воздуха снижается в 1,88 раза.

Расчет геометрических параметров струйного аппарата выполняется согласно методике [135], а расчет сопла согласно [136] (рис. 5.8).

Проводим поверочный расчет данной эрлифтной установки по разработанной программе на ПЭВМ [приложение Г2] для следующих исходных данных: $h = 2$ м, $H+h = 5$ м, $D = 257$ мм, $d = 100$ мм, $l = 0,4$ м, $z_j = 0$ м, $Q_{np1} = 80$ м³/ч, $Q_{np2}^1 = 6$ м³/ч, $Q_{np2i} = 20$ м³/ч, $\Delta Q_{np2} = 2$ м³/ч. По полученным в результате расчета данным уточненные данные расходной характеристики – подача эрлифта 100 м³/ч достигается при расходе сжатого воздуха 7 м³/мин (рис. 5.9).



а)



б)

Рисунок 5.8 - Струйный аппарат эрлифта: а) – схема струйного аппарата; б) – конструктивное исполнение струйного аппарата

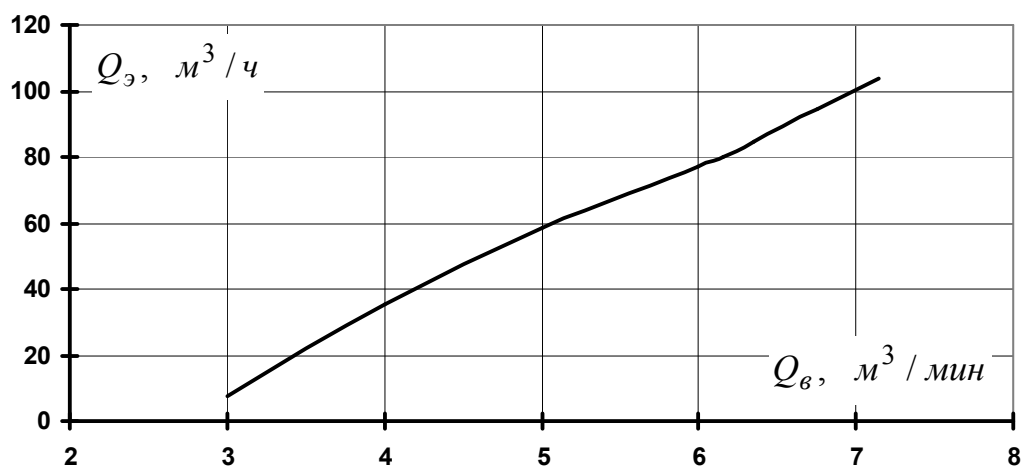


Рисунок 5.9 - Расчетная расходная характеристика эрлифта удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго» построенная по данным расчета на ПЭВМ

5.2.3. Методика приемочных испытаний

Для проведения приемочных испытаний эрлифтную установку необходимо оборудовать измерительной аппаратурой. В состав расходомера сжатого воздуха входит (рис. 5.10):

а) термометр 1, манометр 2 установленный перед струйным аппаратом, дифференциальные манометры 4 подключенные параллельно к коллектору 3 (рис. 5.6);

б) измерительный коллектор 3 (рис. 5.11);

Подача эрлифта измеряется с помощью водослива 5.

Для проведения приемочных испытаний необходимо заполнить канал, в котором установлен эрлифт, на начальный уровень с геометрическим

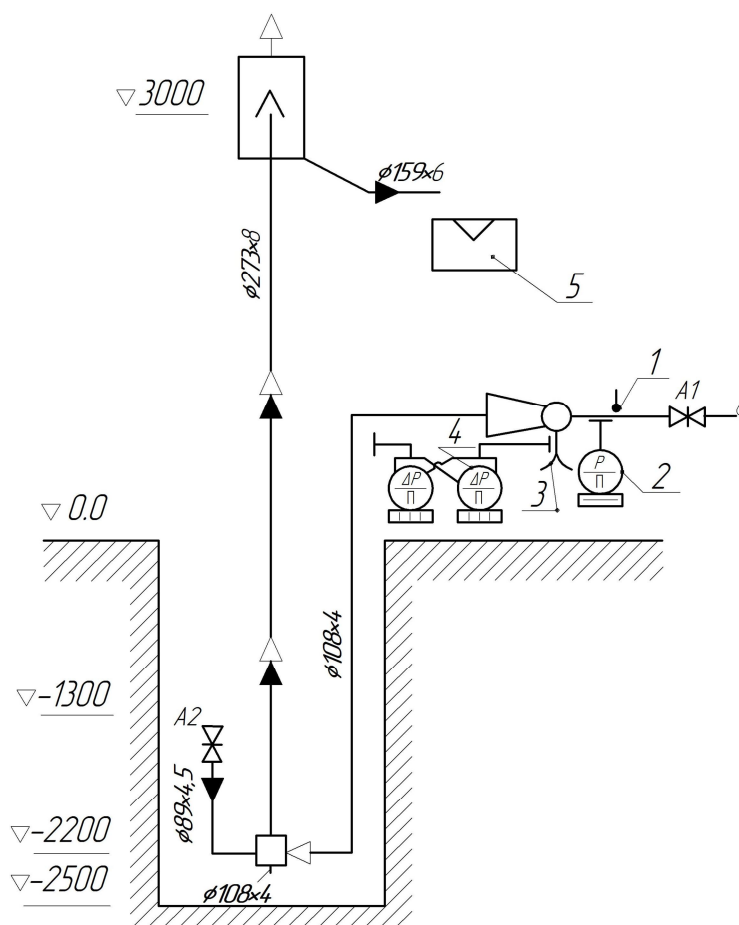


Рисунок 5.10 - Схема опытно-промышленной эрлифтной установки удаления случайных стоков 4-й багерной котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС с измерительным комплексом

погружении смесителя 2 м. При увеличении общего притока жидкости в канал соответствующее изменение подачи эрлифта, обеспечивающее постоянство уровне жидкости в канале, достигается регулированием поступающего расхода сжатого воздуха при помощи открытия задвижки А1 (рис. 5.10). После этого записываются показания приборов. При дальнейшем увеличении притока жидкости соответствующим образом регулируется расход воздуха, что обеспечивает неизменный уровень в канале и записываются показания приборов.

По полученным экспериментальным данным строится расходная характеристика эрлифта и сравнивается с расчетной характеристикой.

Ожидаемый годовой экономический эффект от применения эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) для удаления случайных стоков в нерабочий период энергоблока котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго» составил 67,168 тыс. грн. [приложение Г3]

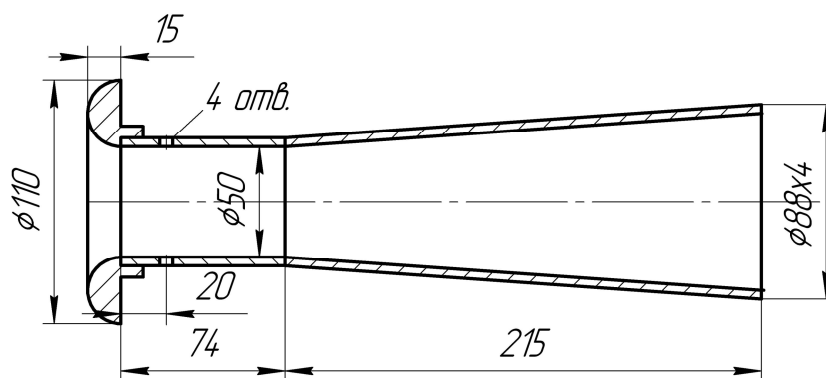


Рисунок 5.11 - Коллектор измерения расхода воздуха инжектируемого струйным аппаратом

5.3 Выводы

1. Приведена методика инженерного расчета эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы при наличии емкости дополнительного притока и при

дополнительной подающей трубе. Даны рекомендации по выбору координаты подвода дополнительного притока и угла ввода в подъемную трубу.

2. Приведена методика расчета эрлифта с емкостью дополнительного притока, а также с дополнительной подающей трубой на примере установки удаления дренажных и случайных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, состоящая в повышении энергетической эффективности работы и расширении диапазона возможных подач эрлифтной установки в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) обоснованием рациональных параметров рабочего процесса подъемника при подводе дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы, что позволяет повысить максимальную подачу до двух раз в сравнении с эрлифтом традиционной конструкции при увеличении КПД рабочего процесса на $8 \div 10\%$.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Определены энергетически целесообразные и технически допустимые области эксплуатации [высоты подъема и диапазоны подач жидкости (гидросмеси)] эрлифтных установок традиционной конструкции, при которых достигается: при блочном воздухообеспечении серийно производимыми центробежными (радиальными) нагнетателями [в частности, нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3, как представляющими группы наиболее целесообразных в составе эрлифтных установок] - степень увеличения подачи эрлифтов: водоотливных - $k_Q = 1,05 \div 1,54$, гидроподъемных - $k_Q = 1,09 \div 1,47$, при этом обеспечение постоянства давления в смесителе позволяет повысить подачу до 1,5 раз; при пневмоснабжении источниками неизменной производительности - степень увеличения подачи эрлифтов: водоотливных - $k_Q = 1,10 \div 2,12$, гидроподъемных - $k_Q = 1,06 \div 1,59$ при этом обеспечение постоянства давления в смесителе позволяет повысить подачу до 2,22 раз.

2. Разработана эрлифтная установка с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы, которая позволяет поддерживать близкое к постоянному давление в смесителе при увеличении подачи газожидкостного подъемника до двукратного значения.

Установлена максимально возможная вертикальная координата подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы $z_{j.макс}$.

3. На основе уравнений количества движения и неразрывности движения, с учетом принятых допущений, разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительных притока жидкости (гидросмеси) и расхода воздуха в промежуточное сечение подъемной трубы, позволяющая определить гидродинамические параметры газожидкостного потока в подъемной трубе рассматриваемого эрлифта.

4. Доказана адекватность математической модели рабочего процесса эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы результатами экспериментальных исследований опытной установки, при обеспечении равенства критериев подобия относительного геометрического погружения смесителя α , параметра $(H + h)/D$, и обеспечения автомодельной зоны числа Рейнольдса Re водовоздушного потока в подъемной трубе, - аналогичным критериям натуральных установок.

Среднеквадратичная относительная погрешность измерений расходов сжатого воздуха и воды не превысили 3%.

Экспериментальные данные обработаны методом наименьших квадратов, полученные уравнения регрессии описуют экспериментальные точки со среднеквадратичной погрешностью не превышающей 2%.

Средние отклонения значений в точках расходных характеристик, определенных аналитически, от значений в точках характеристик, полученных в результате регрессионной обработки экспериментальных данных, в отдельных рассмотренных режимах работы эрлифта не превысили 12%, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

5. Разработана программа на языке программирования Delphi для численного анализа математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительных притока жидкости (гидросмеси) и расхода воздуха в

промежуточное сечение подъемной трубы, которая позволяет определить параметры газожидкостной смеси (подача подъемника, давление, плотность смеси и др.) по высоте подъемной трубы при заданном расходе воздуха.

6. Численный анализ математической модели позволил обосновать зоны энергетически целесообразного использования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы из условия превышения подачи предлагаемого эрлифта над подачей традиционного при прочих равных условиях.

Установлено, что для транспортирования дополнительного притока жидкости (гидросмеси), подведенного в промежуточное сечение подъемной трубы, требуемый дополнительный расход сжатого воздуха, увеличивается с увеличением вертикальной координаты его подвода, но мощность этого воздушного потока снижается из-за уменьшения давления по высоте подъемной трубы.

Обоснован наиболее энергоэффективный способ работы предлагаемого эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) путем последовательного, по мере увеличения дополнительного притока, его подвода в минимум два сечения подъемной трубы - от наивысшей целесообразной координаты подвода до нулевой. Данный способ обеспечивает увеличение КПД на 8÷10%, в сравнении с традиционным эрлифтом.

7. Приведены рекомендации по разработке и методика расчета эрлифтов с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы, которая включает в себя предварительный расчет [геометрические параметры установки, выбор типа установки, расчет системы подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси)] и расчет на ПЭВМ с целью уточнения параметров установки.

8. Разработана и передана рабочая документация, изготовлены основные узлы и элементы эрлифтной установки для удаления дренажных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ПАО «Донбассэнерго». Ожидаемый годовой экономический эффект 67,168 тыс. грн.

Результаты исследований использованы в ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» в учебном процессе в курсах «Специальные средства и схемы транспортирования жидкостей», «Гидромеханизация, гидро- и пневмотранспорт», при курсовом и дипломном проектировании.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко. - М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
2. Эрлифтные установки: Учебное пособие / В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, Я.К. Антонов. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
3. Гейер В.Г. Шахтные вентиляторные и водоотливные установки: Учебник для вузов / В.Г. Гейер, Г.М. Тимошенко. - М: Недра, 1987.-272 с.
4. Матлак Е.С. Снижение загрязненности шахтных вод в подземных условиях / Е.С. Матлак, В.Б. Малеев. – К.: Техника, 1991. – 136 стр.
5. Создать, освоить в производстве и внедрить новые схемы и средства водоотливного комплекса шахт, обеспечивающие исключение тяжелого неквалифицированного труда: Отчет о НИР Х-77-36 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – №ГР81014088; Инв. №02890036452.- Донецк, 1988. – 232 с. – Отв. исполнитель Малеев В.Б.
6. Гейер В.Г. Перекачной эрлифтный водоотлив шахты имени Гаевого / В.Г. Гейер, В.Б. Малеев, В.И. Мизерный, А.П. Швед // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 64. - Киев: Техніка. – 1983. - С. 72 -76.
7. Малыгин С.С. Применение эрлифтов для зумпфового водоотлива шахт и механизация чистки зумпфов скиповых стволов / С.С. Малыгин, А.И. Быков // В кн.: Гидравлическая добыча угля. - М.: Недра, 1965. - № 6. - С. 7-11.
8. Малеев В.Б. Специальные средства водоотлива и гидромеханизированной очистки шахтных водосборных емкостей: Учебн. пособие. / В.Б. Малеев, Е.И. Данилов, В.М. Яковлев.– Донецк: ДПИ, 1986. – 36 с.
9. Малеев В.Б. Развитие научных основ системы шахтного водоотлива: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДонНТУ, 2003. – 317 с.

10. Алиев Н.А. Проблемы безопасности при мокрой консервации закрывающихся шахт / Н.А. Алиев // Безопасность в техносфере – Москва: Русский журнал. – 2007. - №6.– С. 44-49.
11. Разработка усовершенствованных и новых схем и конструкций эрлифтных установок для гидроподъемов (в условиях реконструкции гидрошахты «Красноармейская»): Отчет о НИР Х-75-30 (заключительн.)/ ДПИ. Руководитель темы Гейер В. Г. - №ГР75042677; Инв. №5498530. - Донецк, 1975. – 106 с. - Отв. исполнитель Антонов Я.К.
12. Разработать типовые элементы и схемы автоматизированного эрлифтного гидроподъема: Отчет о НИР Х-76-30 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель темы Гейер В. Г. - №ГР76085379; Инв. №Б568295 - Донецк, 1976. - 117 с. - Отв. исполнитель Антонов Я.К.
13. Создать, освоить в производстве и внедрить эрлифтные подъемы типа ЭО-С-1 и ЭС-3-2. Т. 1: Отчет о НИР (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – Шифр темы Х-77-30; №ГР76085379; Инв. №02860040824. – Донецк, 1985. – 94 с. - Отв. исполнитель Антонов Я. К.
14. Создать, освоить в производстве и внедрить эрлифтные подъемы типа ЭО-С-1 и ЭС-3-2. Т. 2: Отчет о НИР (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – Шифр темы Х-77-30; №ГР76085379; Инв. №02860040824. – Донецк, 1985. – 60 с. - Отв. исполнитель Антонов Я. К.
15. Создать, освоить в производстве и внедрить эрлифтные подъемы типа ЭО-С-1 и ЭС-3-2: Отчет о НИР (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г.- Шифр темы Х-77-30; №ГР81014087; Инв. №02890034798. – Донецк, 1988. – 106 с. - Отв. исполнитель Антонов Я. К.
16. 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.

17. Бойко М.Г. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди: Навчальний посібник. / М.Г. Бойко, Л.М. Козиряцький, А.П. Кононенко. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – 296 с.
18. Михайлов В.И. Совершенствование гидравлической добычи песка и гравия эрлифтными земснарядами. Обзор. Всесоюзный научно-исследовательский институт научно-технической информации и экономики промышленности строительных материалов. М., 1972.
19. Холмогоров А.П., Козыряцкий Л.Н., Антонов Я.К. Эрлифтно-земснарядный способ разработки песка со дна водоемов Западной Сибири. – Механизация строительства, 1990, №6.
20. Холмогоров А.П., Козыряцкий Л.Н., Антонов Я.К. Эрлифтно-земснарядные комплексы для добычи песка. – Строительство трубопроводов, 1988, №5.
21. Эксплуатация эрлифтно-земснарядных комплексов в Западной Сибири. А.П. Холмогоров, Л.Н. Козыряцкий и др. – Строительство трубопроводов, 1990, №4.
22. Эрлифтно-гидроэлеваторный комплекс по добычи гравия со дна водоемов. Козыряцкий Л.Н. и др. Деп. в ЦНИЭИуголь, №9, 1990.
23. Разработать и внедрить технологию добычи сыпучих строительных материалов эрлифтно-земснарядными комплексами со дна рек и водоемов: Отчет о НИР Х-86-67 (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. - №ГР01860064246; Инв. №92890009469. – Донецк, 1988. - 167с. – Отв. исполнитель Антонов Я.К.
24. Совершенствование систем гидротранспорта золы и шлака Приморской ГРЭС: Отчет о НИР Х-76-174 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – №ГР74058912; Инв. №0284.0006765. – Донецк, 1983. – 93 с. – Отв. исполнитель Кононенко А. П.
25. Совершенствование эрлифтных систем ГЗУ, авторский надзор за монтажом и эксплуатацией эрлифтов Нерюнгринской ГРЭС: Отчет о НИР Х-83-67 (заключительн.) / ДПИ. Руководитель Гейер В.Г. – №ГР01830070356;

Инв. №02850051960. – Донецк, 1984. – 39 с. – Отв. исполнитель Кононенко А.П.

26. Совершенствование эрлифтных систем ГЗУ, авторский надзор за монтажом и эксплуатацией эрлифтов Экибастузской ГРЭС-1: Отчет о НИР Х-81-72 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В.Г. – №ГР81051696; Инв. №02860016668. – Донецк, 1985. – 100с. – Отв. исполнитель Кононенко А. П.

27. Исследование и разработка экспериментального образца внутрицеховой автоматизированной эрлифтной системы гидрозолошлакоудаления Приморской ГРЭС: Отчет о НИР Х-84-65 (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. - №ГР01840062857; Инв. №02870011158. – Донецк, 1986. – 32 с. – Отв. исполнитель Кононенко А. П.

28. Разработка и внедрение гидропневматической системы сбора очаговых остатков для условий Калининской ТЭЦ –4: Отчет о НИР Х-82-65 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – №ГР01825013772; Инв. №02870011751. – Донецк, 1986. – 103 с. – Отв. исполнитель Кононенко А. П.

29. Исследование и разработка внутрицеховой эрлифтной системы гидрозолошлакоудаления Приморской ГРЭС (а. с. №705206): Отчет о НИР Х-84-65 (заключительн.) / ДПИ. Руководитель Гейер В.Г. - №ГР01840062857; Инв. №02890007536. - Донецк, 1988. – 79 с. – Отв. исполнитель Кононенко А.П.

30. Исследование и освоение систем пневмогидравлического транспорта твердого материала в условиях Экибастузской ГРЭС-1 (а.с. №1423861): Отчет о НИР Х-89-65 (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Кононенко А. П. – №ГР01890001355; –Донецк, 1991. – 148 с. – Отв. исполнитель Глухман Л.Л.

31. Исследование, разработка и освоение системы пневмогидравлического удаления золы и шлака в условиях Экибастузской ГРЭС-2 (а. с. №1257300): Отчет о НИР Х-88-65 (промежуточн.)/ДПИ. Руководитель Кононенко А. П. – №ГР01880001412; Инв. №02910002146. – Донецк, 1990. – 152 с. – Отв. исполнитель Глухман Л.Л.

32. Исследование, разработка и освоение системы пневмогидравлического удаления золы и шлака в условиях Экибастузской ГРЭС-2 (а. с. №1257300):

Отчет о НИР Х-88-65 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Кононенко А. П. – №ГР01880001412; Инв. №02929001370. – Донецк, 1992. – 205 с. – Отв. исполнитель Глухман Л.Л.

33. Исследование и разработка системы пневмогидравлического удаления золошлаков в условиях Новосибирской ТЭЦ-5: Отчет о НИР Х-87-66 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Кононенко А. П. – №ГР01870006335; Инв.№02900056181. – Донецк, 1990. – 155 с. – Отв. исполнитель Мизерный В.И.

34. Пояснительная записка к рабочему проекту С649.00.00.000С3 «Эрлифтная установка Кузнецкой ТЭЦ. Водогрейная котельная». Минвуз УССР, ПКБ ДПИ. Руководитель проекта Кононенко А.П. – 1985 г.

35. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. / В.М. Черкасский. – М: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

36. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

37. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции: Учебник для вузов / В.Я. Карелин, А.В. Минаев.— 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Стройиздат, 1986. — 320 с.

38. Грабовский А.А., Цабиев О.Н. Гидравлика и нагнетатели: Учебное пособие для вузов / А.А. Грабовский, О.Н. Цабиев. – К.: УМК ВО, 1992. – 288 с.

39. Центробежные насосы и трубопроводные сети в горной промышленности. Справочное пособие / Ф.А. Папаяни, Н.Б. Трейнер, В.И. Никитин, Ю.И. Чернышев, В.М. Оверко – Донецк: ООО «Східний видавничий дім», 2011. – 334 с.

40. Кононенко, А. П. Теория и рабочий процесс эрлифтов: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.17 - Донецк : ДНТУ, 2007. - 565 с.

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

42. Усков Е.В. Исследование эрлифтов как средств водоотлива из глубоких шахт: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.173. - Донецк: ДПИ, 1972. – 220 с.
43. Логвинов Н.Г. Исследование динамики эрлифтов с целью создания автоматизированных гидроподъемов шахт большой глубины: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.173. - Донецк: ДПИ, 1970. - 370 с.
44. Стегниенко А.П. Исследование и разработка методов управления режимами работы шахтных эрлифтов: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1978. – 242 с.
45. Макари С.М. Регулирование режимов работы газлифтных скважин / С.М. Макари // Известия ВУЗов. Нефть и газ. – 1988. - №6. - С. 44-48.
46. Малыгин С.С. Применение эрлифтов для водоотлива шахт: Дисс. ... канд. техн. наук: - Донецк: ДПИ, 1966. – 264 с.
47. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1976. – 197 с.
48. Шевченко В.Ф. Исследование и разработка узла подвода пневматической энергии в эрлифте: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.173. - Донецк: ДПИ, 1974. – 183 с.
49. Малеев В.Б. Сходственные режимы эрлифтных установок / В.Б. Малеев // В сб.: Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГАУ. – 1999. - №2(61). – С. 168-173.
50. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов / А.П. Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2005. - №12(84). - С. 38-48.
51. Кононенко А.П. Границы структур вертикальных водовоздушных потоков в эрлифтах / А.П. Кононенко // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції "СУЧАСНІ НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ - 2006". Том 16. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. - 2006. - С. 67-71.
52. Кононенко А.П. Условия реализации газожидкостных структур и потери трения эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе

эрлифта / А.П. Кононенко, Н.Г. Бойко // 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.

53. 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.

54. Антонов Я.К. Совершенствование эрлифтных подъемов для выдачи горной массы из глубоких шахт: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1985. – 198 с.

55. Кононенко А.П. Разработка эрлифтных установок с пароструйными компрессорами: Дисс. ...канд. техн. наук: 05.05.06; 05.14.19. – Донецк: ДПИ, 1988. – 381 с.

56. Усков Е.В. Первые результаты эксплуатации эрлифтной установки шахты «Самсоновская №1» / Е.В. Усков, В.Г. Миргородский, А.П. Стегниенко // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 31. - Киев: Техніка. – 1973. - С. 111-115.

57. Винда Е.В. Исследование процесса всасывания и пусковых режимов эрлифтного гидроподъема гидрошахт: Дис. ... канд. техн. наук: – Донецк: ДПИ, 1967, том I – 160 с., том II - 68 с.

58. Игнатов Н.Н. Откачка шахт при восстановлении Донбасса. / Н.Н. Игнатов, В.Г. Гейер, Н.Н. Чернавкин.- М.-Л.: Углетехиздат, 1950. - 195 с.

59. Гейер В.Г. Практика откачки воды из уклонных полей и водоотлива при проходке уклонов. / В.Г. Гейер. – Сталино: Сталинское областное книжно-газетное издательство, 1947. - 23 с.

60. Гейер В.Г. Воздушные подъемники (эрлифты) как водоотливные средства при проходке вертикальных стволов / В.Г. Гейер // Уголь.- 1953.- №11.- С.23-26.

61. Молоков А.И. Использование эрлифтных установок и водоулавливающих колец при проходке шахтных стволов на железных рудниках Урала / А.И. Молоков // Горный журнал. – 1957. - №8. - С. 73-74.
62. Гейер В.Г. Эрлифтный гидроподъем гидрошахты «Красноормейская №2» / В.Г. Гейер, В.С. Костанда, Н.Г. Логвинов, В.И. Груба, В.Д. Килимник, Е.В. Винда, А.Г. Костенко // В реф. сб.: Гидравлическая добыча угля. – 1969. - №1. - С. 30-32;
63. Логвинов Н.Г. Расчет и результаты испытаний гидравлической модели эрлифтного гидроподъема гидрошахты "Самсоновская №1" / Н.Г. Логвинов, В.С. Костанда, Е.В. Винда, Е.В. Усков // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 20. - Киев: Техніка. – 1970. - С. 123-130.
64. Скорынин Н.И. Исследование и разработка глубоководных многосмесительных эрлифтных установок для подъема горных масс: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06: – Донецк: ДПИ, 1983. - 277 с.
65. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта / А.П. Кононенко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць: "Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва". Випуск 2005-7(55). – Макіївка: ДНАБА – 2005. - С. 71-81.
66. Кононенко А.П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС / А.П. Кононенко, В.И. Мизерный, Л.Л. Глухман // Энергетика та електрифікація. – Київ. - 2006. - №11. - С. 8-12.
67. Исследование, разработка и внедрение системы аварийного воздухообеспечения эрлифтных установок Экибастузской ГРЭС-1 на базе пароструйных компрессоров: Отчет о НИР X-83-65 (заключительн.)/ДПИ. Руководитель Гейер В. Г. – №ГР01830025632; Инв. №02860024873. – Донецк, 1985. – 65 с. – Отв. исполнитель Кононенко А. П.
68. Исследование, разработка и внедрение системы аварийного воздухообеспечения эрлифтных установок Экибастузской ГРЭС – 1 на базе пароструйных компрессоров: Отчет о НИР X-83-65 (заключительн.)/ДПИ.

Руководитель Гейер В. Г.– №ГР01830025632; Инв. №02890007537. – Донецк, 1988. – 116 с. – Отв. исполнитель Кононенко А. П.

69. Малеев В.Б. Совместная работа эрлифтной установки с эжектором / В.Б. Малеев, С.С. Малыгин, Е.А. Комисова. – Деп. в УкрНИИНТИ №575, 1986. – 23 с.

70. Гейер В.Г. Опыт механизации чистки зумпфов и применение эрлифтов на вспомогательных водоотливах шахт Донбасса. / В.Г. Гейер, С.С. Малыгин, А.И. Быков. - М.: Недра, 1965. - 25 с.

71. Малыгин С.С. Сравнение схем насосного и эрлифтного водоотлива шахт и методика определения области экономичного применения эрлифтного водоотлива / С.С. Малыгин // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 1. - Киев: Техніка. – 1964. - С. 73-83.

72. Малыгин С.С., Усков Е.В. Эрлифты как средство шахтного водоотлива / С.С. Малыгин, Е.В. Усков // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 29. - Киев: Техніка. – 1972. - С. 93-97.

73. Гейер В.Г. Эрлифты для участкового и вспомогательного водоотлива / В.Г. Гейер, С.С. Малыгин // Уголь Украины. – 1965. - №1. - С. 26-27.

74. Гейер В.Г. Эрлифтный водоотлив стволов глубоких шахт / В.Г. Гейер, В.Г. Миргородский, Е.В. Усков // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 24. - Киев: Техніка. – 1971. - С. 42-45.

75. Малыгин С.С. Применение эрлифтов для зумпфового водоотлива шахт и механизация чистки зумпфов скиповых стволов / С.С. Малыгин, А.И. Быков // В кн.: Гидравлическая добыча угля. - М.: Недра, 1965. - № 6. - С. 7-11.

76. Гейер В.Г. Наклонные эрлифты для очистки зумпфов и водоотливы из них / В.Г. Гейер, А.А. Каплюхин, Е.И. Данилов, В.И. Дергач // Уголь Украины. –1979. - № 5. - С. 28-29.

77. Трейгер А.В. Применение эрлифтов для откачки воды из ствола при углубке / А.В. Трейгер, С.И. Степных // Уголь Украины. – 1982. - № 10. - С. 19-20.

78. Гейер В.Г. Эрлифтный зумпфовой водоотлив с малой относительной глубиной погружения / В.Г. Гейер, Е.И. Данилов // Уголь Украины. – 1978. - № 9. - С. 19-20.
79. Малеев В.Б. Работа эрлифта при постоянном расходе сжатого воздуха / В.Б. Малеев, А.В. Игнатов // Наукові праці ДНТУ. Серія: «Гірничо-геологічна». – Випуск 7(135). - Донецьк: ДонНТУ. – 2008. - С. 108-113
80. Карпушин М.Ю. О согласовании подачи эрлифта с притоком жидкости (гидросмеси). / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. - № 4 (26) - С. 32 - 38. (по материалам доклада на Международной научно-технической конференции АС ПГП «Промышленная гидравлика и пневматика», г. Львов, 14-15 октября 2009 г.)
81. Карпушин М.Ю. Теоретические диапазоны возможных подач эрлифтов с блочным воздухомоснабжением центробежными нагнетателями./ А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – Вип. 22 (195). -2011.– С. 116-134.
82. Карпушин М.Ю. Подача эрлифтов с блочным воздухомоснабжением центробежными нагнетателями. / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – Вип. 23 (126). -2012.– С. 110-123.
83. Данилов Е.И. Исследование и разработка эрлифта для гидромеханизированной очистки водоотливных емкостей: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1979. – 298 с.
84. Бойко Н.Г. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси / Н.Г. Бойко, А.П. Кононенко // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 104. - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. - С. 17-29.
85. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. - №1 (11). - С. 34-37.

86. Карпушин М.Ю. Рабочий режим и особенности формирования подачи эрлифта в условиях переменных притоков гидросмесей (жидкостей). / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Motrol: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2010. – Vol. 12. – pp. 300-308.
87. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. Учебник для вузов. / Г.А. Нурок.– М.: Недра, 1979.
88. Кононенко А.П. Опыт эксплуатации и перспективы использования эрлифтов на тепловых электростанциях / А.П. Кононенко // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции по завершённым научно-исследовательским работам. - Донецк: ДПИ. – 1991. - С. 57.
89. Липкин Я.Н. К вопросу об использовании эрлифтов при химической обработке труб / Я.Н. Липкин, Т.С. Девяткина и др. // Трубное производство Урала. Сборник статей. Вып 4. Челябинск, Южно-Уральское кн. изд-во, 1975. – С. 59-63.
90. Гейер В.Г. Опыт откачки шахты им. Ворошилова эрлифтами / В.Г. Гейер // Вестник Сталинугля. – 1945. - №1. - С. 9-14.
91. Кононенко А.П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников / А.П. Кононенко, Т.А. Устименко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. - № 3 (29) - С. 51-53.
92. Карпушин М.Ю. Экспериментальное обоснование энергетической целесообразности подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы эрлифта. / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Наукові праці ДонНТУ. Випуск 20 (176), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – С. 51-60.
93. Карпушин М.Ю. Модель рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 16(142), серія гірничо-електромеханічна. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. - с. 149-158.

94. Карпушин М.Ю. Характеристики эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технологія машинобудування. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - 54. - С. 62 - 70.
95. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. / Л.Г. Лойцянский. М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 676 с.
96. Бойко А.В. Гидрогазодинамика: Учебное пособие. / А.В. Бойко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 413 с.
97. Гейер В.Г. Эксплуатационные характеристики эрлифтного гидроподъема при работе на пульпе / В.Г. Гейер, В.И. Груба, В.С. Костанда, Н.Г. Логвинов, Е.В. Винда, В.В. Хубаев // В кн.: Гидравлическая добыча угля. - М.: ЦНИИТЭИ угля, 1966. - № 6(39). - С. 37-39.
98. Гейер В.Г. Гидравлический подъем пульпы эрлифтными и углесосно-эрлифтными установками / В.Г. Гейер, В.С. Костанда // Механизация и автоматизация производства. – 1959. - №9. - С. 52-56.
99. Кононенко А.П. Математическая модель барботажного режима эрлифта / А.П. Кононенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 83. - Донецьк: ДонНТУ. – 2004. - С. 156-169.
100. Кононенко А.П. Количественный анализ гидродинамических параметров барботажного режима эрлифта / А.П. Кононенко // Збірник наукових праць «Вісник Донбаської державної машинобудівної академії». – Краматорськ: ДДМА. – 2006. - №1(3). – С. 217-223.
101. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 101. - Донецьк: ДонНТУ. – 2005. - С. 58-67.

102. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси. / А.П. Кононенко // Науковий журнал "Вісник Донецького університету". Серія А, «Природничі науки». – Донецьк: ДонНУ. – 2006. - №2. - С. 143-150.
103. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2006. - №27. – С. 113-121.
104. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси / А.П. Кононенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2006. - №5/1 (23). – С. 58-61.
105. Бергльс А.И. Исследование режимов течения кипящей воды при высоком давлении / А.И. Бергльс, М. Сю // Сб. ст.: Достижения в области теплообмена. - М.: Мир. – 1970. - С. 30-35.
106. Хаббард М.Д. Характеристики режимов течения горизонтального двухфазного потока / М.Д. Хаббард, А.Э. Даклер // Сб. ст.: Достижения в области теплообмена. - М.: Мир. – 1970. - С. 7-29.
107. Исследование турбулентных течений двухфазных сред / Под ред. Кутателадзе С.С. - Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1973. – 315 с.
108. Лукомский С.М. Исследование структуры течения пароводяной смеси в вертикальной необогреваемой трубе при высоких давлениях / С.М. Лукомский, П.И. Поварнин, Р.И. Шнеерова // Сб. тр.: Гидравлика и теплообмен в элементах энергетического оборудования. Выпуск 101. - Л.: Труды ЦКТИ. – 1970. - С. 217-225.
109. Hewitt G.F. (1982) Chapter 2, Handbook of Multiphase Systems (Ed. G. Hetsroni), Hemisphere Publishing Corporation, New York.
110. Dukler, A.E. and Taitle, W. (1986) Flow Pattern Transitions in Gas – Liquid Systems: Measurement and Modelling, Chapter 1 of Multiphase Science and

Technology, Vol.2 (Ed. G.F. Hewitt, J.M. Delhaye and N. Zuber), Hemisphere Publishing Corporation, New York.

111. Уоллис Г. Теоретические модели газожидкостных течений (обзор) / Г. Уоллис // Труды американского общества инженеров-механиков, Теоретические основы инженерных расчетов. - Том 104. – 1982. - №3. - С. 94-99.

112. Dukler, E.A. and Fabre, J. (1992) Gas-Liquid Slug Flow: knots and loose ends. In Multiphase Science and Technology. Two phase flow fundamentals. Vol.8, 345-470, Eds. Hewitt, G.F. et al., Begell Home.

113. Teitel, Y. and Barnea, D. (1990) Two-phase slug flow. Adv. Heat Transfer, 20, 83-132.

114. 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.

115. Гриценко А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. / А.И. Гриценко, О.В. Клапчук, Ю.А. Харченко.- М.:Недра, 1994.– 238 с.

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

117. Субботин В.И. К расчету газосодержания смеси при пузырьковом течении по данным измерения резистивным и емкостным методами / В.И. Субботин, Ю.Е. Похвалов, Л.Е. Михайлов, И.В. Кронин, В.А. Леонов // Теплоэнергетика. – 1975. - №4. - С. 70-75.

118. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. / Г. Уоллис. - М.: Мир, 1972. – 440 с.

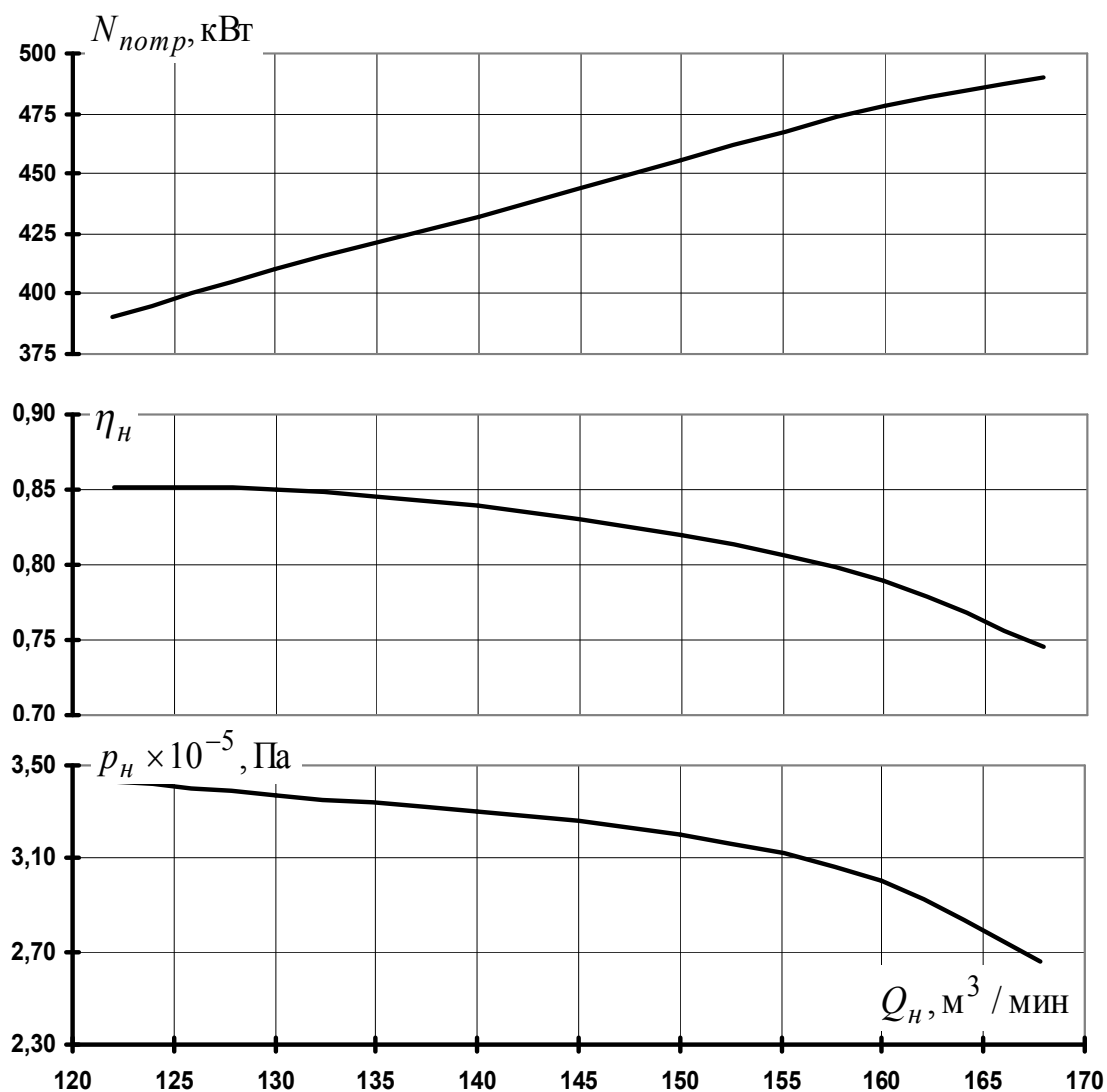
119. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред: в 2 кн. / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. кн. 2– 360 с.

120. Гриценко А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. / А.И. Гриценко, О.В. Клапчук, Ю.А. Харченко.- М.:Недра, 1994.– 238 с.
121. Кутепов А.М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании: Учеб. пособие для вузов. / А.М. Кутепов, А.С. Стерман, Н.Г. Стюшин. – 3-е изд. испр. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.: ил.
122. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. - М.: Энергия, 1976, - 296 с.
123. Делайе Дж. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике. / Дж. Делайе, М. Гио, М. Ритмюллер. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
124. Малеев В.Б. Основы подобия и моделирования эрлифтов / В.Б. Малеев, Д.А. Лисицын, Г.Л. Локтионов // Наука-практика: Научно-метод. сб. Выпуск 4. - Донецк: ДонГТУ. – 1999. - С. 173-192.
125. Малыгин С.С. Подобие эрлифтов / С.С. Малыгин // В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Выпуск 88. - Киев: Техніка. – 1991. - С. 51-58.
126. Малеев В.Б. Сходственные режимы эрлифтных установок / В.Б. Малеев // В сб.: Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: НГАУ. – 1999. - №2(61). – С. 168-173.
127. Счетчики жидкости ультразвуковые накладные «Эргомера-120-Н2». Инструкция по монтажу ЭУС120.00.Н2 ИМ. 2003 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ergomera.dp.ua. – Дата доступа: апрель 2012. – Название с экрана.
128. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. РД 50-213-80. - М.: Изд-во стандартов, 1982. - 320 с.
129. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. / Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

130. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химической технологии. / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев: Вища школа, 1976. – 184 с.
131. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов. / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1974. – 264 с.
132. Тимошенко Г.М. Теория инженерного эксперимента: Учебное пособие. / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Зима. – К.: УМК ВО, 1991. – 124 с.
133. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.
134. Шандоров Г.С. Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду. / Г.С. Шандоров // ЖТФ, т. XXVII, вып. 1. – 1957 г.
135. Соколов Е.Я. Струйные аппараты. / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
136. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. Изд. 3-е, перераб. / М.Е. Дейч. - М., «Энергия», 1974. – 592 с.

Приложение А – К разделу «Рабочие режимы общепромышленных эрлифтов с блочным пневмоснабжением в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей)»

Приложение А1 – Газодинамические характеристики центробежного (радиального) нагнетателя ЦНВ 160/3,2



Приложение А2 – К расчету эрлифта при при блочном воздухообеспечении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2

Таблица А1 - Расчетная подача эрлифта $Q_э$ и скорость $w_{п.т}$ в подающей трубе эрлифтной установки с центробежным нагнетателем ЦНВ 160/3,2

Диаметры труб, мм:		Режим работы нагнетателя: $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{мин} = 17,1 \text{ м}$)			Режим работы нагнетателя: $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{макс} = 25,0 \text{ м}$)			Возможный тип установки*
подъемной D	подающей d	Подача эрлифта $Q_э$, $\text{м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе w $\text{н.т.}, \text{м/с}$	Безразмерная подача эрлифта $Q_э/Q_э_{макс}$, ($Q_э_{макс} = 1950,7 \text{ м}^3/\text{ч}$)	Подача эрлифта $Q_э$, $\text{м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе w $\text{н.т.}, \text{м/с}$	Безразмерная подача эрлифта $Q_э/Q_э_{макс}$, ($Q_э_{макс} = 1950,7 \text{ м}^3/\text{ч}$)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
300	300	473,7	1,86	0,243	810,2	3,19	0,415	
300	250	463,2	2,62	0,237	780,7	4,42	0,400	1
300	200	437,9	3,87	0,224	715,8	6,33	0,367	2
400	400	1130,5	2,50	0,580	1640,3	3,63	0,841	1
400	350	1104,1	3,19	0,566	1586,0	4,58	0,813	
400	300	1056,3	4,15	0,541	1493,0	5,87	0,765	2
400	250	968,6	5,48	0,497	1336,7	7,57	0,685	
500	500	1685,5	2,39	0,864	2340,5	3,31	1,200	1
500	450	1655,4	2,89	0,849	2280,0	3,98	1,169	
500	400	1607,5	3,56	0,824	2188,0	4,84	1,122	2
500	350	1530,2	4,42	0,784	2049,1	5,92	1,050	
500	300	1406,2	5,53	0,721	1845,1	7,25	0,946	
600	600	1950,7	1,92	1,000	2754,6	2,71	1,412	
600	550	1928,6	2,26	0,989	2705,1	3,16	1,387	
600	500	1895,5	2,68	0,972	2634,4	3,73	1,350	1
600	450	1845,7	3,23	0,946	2532,9	4,43	1,298	
600	400	1769,6	3,91	0,907	2388,6	5,28	1,224	2
600	350	1654,2	4,78	0,848	2187,8	6,32	1,122	
600	300	1484,3	5,84	0,761	1918,9	7,54	0,984	
700	700	1914,8	1,38	0,982	2856,5	2,06	1,464	
700	650	1902,8	1,59	0,975	2824,6	2,37	1,448	
700	600	1885,7	1,85	0,967	2780,5	2,73	1,425	
700	550	1860,9	2,18	0,954	2719,0	3,18	1,394	
700	500	1824,4	2,58	0,935	2632,8	3,73	1,350	1
700	450	1769,9	3,09	0,907	2512,8	4,39	1,288	
700	400	1688,2	3,73	0,865	2348,0	5,19	1,204	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
700	350	1567,7	4,53	0,804	2127,8	6,15	1,091	
800	800	1642,5	0,91	0,842	2690,7	1,49	1,379	
800	750	1637,5	1,03	0,839	2673,7	1,68	1,371	
800	700	1630,6	1,18	0,836	2650,7	1,91	1,359	
800	650	1620,9	1,36	0,831	2619,4	2,19	1,343	
800	600	1607,0	1,58	0,824	2576,2	2,53	1,321	
800	550	1586,9	1,86	0,814	2516,3	2,94	1,290	
800	500	1557,1	2,20	0,798	2432,8	3,44	1,247	
800	450	1512,6	2,64	0,775	2317,2	4,05	1,188	1
800	400	1445,5	3,20	0,741	2159,8	4,78	1,107	
800	350	1345,7	3,89	0,690	1951,3	5,64	1,000	2

*Возможный тип установки: 1 – водоотливная установка ($w_{n,m} \geq 2,5 \div 3,0$ м/с); 2 – гидроподъемная установка ($w_{n,m} \geq 3,5 \div 4,0$ м/с).

Таблица А2 - Пример расчета эрлифта при блочном воздухообеспечении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2 (режим максимальной подачи эрлифта)

Расчет от 10.01.2011 г. 10:39:19 — вариант Б

Параметры расчета:

Касат. напряжения и коэф-ты сопротивл. по формулам:	Уоллиса Г. [118]
Истинное газосодержание по формулам: поправки...) [118]	Уоллиса Г. (учет поправки...)
Касат. напряжения и коэф-ты сопротивл. по формулам:	формулам № 1
Вид процесса изменения состояния воздуха:	изотермический
Подающая труба:	насадок

Исходные данные:

Плотность воды ρ' , кг/м ³	1000
Плотность воздуха при нормальных условиях ρ_0'' , кг/м ³	1,2
Атмосферное давление p_0 , Па	98100
Динамическая вязкость воды μ' , Пае	0,001
Динамическая вязкость воздуха μ'' , Пае	1,79E-5
Коэффициент поверхностного натяжения σ , Н/м	0,0723
Показатель политропы n	1
Показатель степени в формуле Арманда	1,53
Расход воздуха при нормальных условиях Q_0 , м ³ /мин	141 - 142 - 10
Длина подъемной трубы $H+h$, м	42,75
Диаметр подъемной трубы D , м	0,6
Эквивалентная шероховатость трубы Δ_3 , м	0,0002
Ускорение свободного падения g , м/с ²	9,81
Относительная длина жидкой пробки D/L	2
Геометрическое погружение смесителя h , м	25
Диаметр подающей трубы d , м	0,5
Длина подающей трубы l , м	1
Коэффициент расхода подающей трубы $\mu_{n,m}$	0,76
Сумма коэф-тов местных сопротивлений подающей трубы $\sum \zeta_{n,m}$	1,5

$Q_v = 141,000 \text{ м}^3/\text{мин}$; $Q_e = 0,804314 \text{ м}^3/\text{с}$ (2896 $\text{м}^3/\text{ч}$)

Значения z , м:	0,000	10,688	21,375	32,063	42,750
Давление $p_a(z)$ в сечении z , кг/см ² :	3,352	2,764	2,176	1,588	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	4,022	3,317	2,611	1,906	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	607,5	561,4	503,1	426,8	322,1
Объемное расходное воздуходоержание $\beta(z)$:	0,466	0,514	0,573	0,648	0,745
Массовое расходное воздуходоержание x :	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Пае:	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839
Площадь сечения трубы $\omega \cdot 10^3$, м ² :	0,283	0,283	0,283	0,283	0,283
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	5,324	5,852	6,664	8,079	11,16
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	2,845	2,845	2,845	2,845	2,845
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	2,480	3,007	3,820	5,234	8,311
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	4,695	5,080	5,669	6,683	8,855
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	6,292	6,834	7,667	9,113	12,24
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	2313	2349	2397	2465	2569
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² с:	2854	2854	2854	2854	2854
Давление, обусл. трением $p_{mpi} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	24,95	53,34	87,40	132,7
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	11,22	28,38	57,93	121,2
Давление, обусл. силой тяжести $p_{gi} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	625,5	1195	1694	2097
Давление (сумма) $p_{\Sigma i} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	661,7	1277	1839	2351
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	23,51	23,51	23,51	23,51	23,51
Относительное геометр. погруж. смес. α :	0,585	0,585	0,585	0,585	0,585
Относительное динамич. погруж. смес. α_d :	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	32,59	36,37	42,26	52,65	75,71
Коэффициент сопротивления λ :	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Истинное газодержание $\varphi(z)$:	0,394	0,440	0,498	0,574	0,679
$Nf(z) / 1000000$:	1452	1453	1453	1454	1454
$Re_{\Gamma} / 1000000$:	580,9	589,6	601,9	620,8	653,5
$w0/w''$:	1,159	1,176	1,200	1,237	1,302
$b(z)/D$:	0,033	0,034	0,034	0,035	0,036
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,588	1,176	1,764	2,352
Средний расход водовозд. смеси $Q_{срi} \cdot 10^3$, м ³ /с:—		1379	1447	1542	1694
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, кВт:	—	79,58	166,9	266,8	391,0
Мощность комп. потерь на трение N_{mpi} , кВт:—		3,378	7,572	13,22	22,06
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{уски}$, кВт:—		1,519	4,029	8,766	20,15
Мощность преод. силы тяжести N_{gi} , кВт: —		84,66	169,7	256,4	348,8
Мощность потока сжатого воздуха N''_i , кВт:	0,000	44,46	99,60	172,2	278,8
Мощность потока воды N' , кВт:	185,5	185,5	185,5	185,5	185,5
Мощность, подведенная к трубе $N_{подi}$, кВт:	185,5	230,0	285,1	357,7	464,4
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ски}$, кВт:	185,5	150,4	118,2	90,90	73,35
Ср. плотность по расх. воздуходоерж. $\rho_{ср\beta i}$, кг/м ³ :—		512,7	485,9	454,7	417,8
Ср. плотность по ист. воздуходоерж. $\rho_{ср\varphi i}$, кг/м ³ :—		585,3	559,4	528,5	490,7

Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срpi}$, кг/м ³ :	536,1	513,1	487,8	459,7	428,3
Объемный расх. возд. при ср. давл. $Q_{срi}''$, м ³ /мин:	42,06	46,11	51,01	57,08	64,79
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}$, м:	1,481	1,481	1,481	1,481	1,481
Сопrotивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	2,051	2,051	2,051	2,051	2,051
Коэффициент сопrotивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}$, м/с:	4,097	4,097	4,097	4,097	4,097
Поправочный множ. к формуле Шевелева k_l :	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Таблица А3 - Пример расчета эрлифта при блочном воздухопонабжении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2 (режим минимальной подачи эрлифта)

Расчет от 10.01.2011 г. 11:01:40 — вариант Б

Параметры расчета:

Касат. напряжения и коэф-ты сопrotивл. по формулам:	Уоллиса Г. [118]
Истинное газосодержание по формулам: поправки...) [118]	Уоллиса Г. (учет
Касат. напряжения и коэф-ты сопrotивл. по формулам:	формулам № 1
Вид процесса изменения состояния воздуха:	изотермический
Подающая труба:	насадок

Исходные данные:

Плотность воды ρ' , кг/м ³	1000
Плотность воздуха при нормальных условиях ρ_0'' , кг/м ³	1,2
Атмосферное давление p_0 , Па	98100
Динамическая вязкость воды μ' , Пае	0,001
Динамическая вязкость воздуха μ'' , Пае	1,79E-5
Коэффициент поверхностного натяжения σ , Н/м	0,0723
Показатель политропы n	1
Показатель степени в формуле Арманда	1,53
Расход воздуха при нормальных условиях Q_0 , м ³ /мин	168 - 169 - 10
Длина подъемной трубы $H+h$, м	42,75
Диаметр подъемной трубы D , м	0,6
Эквивалентная шероховатость трубы Δ_s , м	0,0002
Ускорение свободного падения g , м/с ²	9,81
Относительная длина жидкой пробки D/L	2
Геометрическое погружение смесителя h , м	17,83
Диаметр подающей трубы d , м	0,5
Длина подающей трубы l , м	1
Коэффициент расхода подающей трубы $\mu_{n,m}$	0,76
Сумма коэф-тов местных сопrotивлений подающей трубы $\sum \zeta_{n,m}$	1,5

$Q_v = 168,00$ м³/мин: $Q_e = 0,558753$ м³/с (2011 м³/ч)

Значения z , м:	0,000	10,688	21,375	32,063	42,750
Давление $p_a(z)$ в сечении z , кг/см ² :	2,712	2,284	1,856	1,428	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	3,254	2,740	2,227	1,713	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	448,8	408,1	360,8	305,0	237,9
Объемное расходное воздухопонабжение $\beta(z)$:	0,649	0,687	0,730	0,778	0,834

Массовое расходное воздухо содержание x :	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Пас:	0,753	0,753	0,753	0,753	0,753
Площадь сечения трубы $\omega \cdot 10^3$, м ² :	0,283	0,283	0,283	0,283	0,283
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	5,628	6,313	7,312	8,912	11,87
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	1,976	1,976	1,976	1,976	1,976
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	3,652	4,336	5,336	6,935	9,903
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	4,421	4,861	5,498	6,504	8,338
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	6,605	7,307	8,330	9,962	12,97
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	2012	2052	2102	2165	2251
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² с: 1988	1988	1988	1988	1988	1988
Давление, обусл. трением $p_{мрi} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	20,89	45,21	74,82	113,7
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	8,960	21,91	42,37	79,69
Давление, обусл. силой тяжести $p_{gi} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	458,4	870,0	1226	1518
Давление (сумма) $p_{\Sigma i} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	488,3	937,2	1343	1711
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	17,11	17,11	17,11	17,11	17,11
Относительное geometr. погруж. смес. α :	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417
Относительное динамич. погруж. смес. α_d :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	26,95	30,81	36,54	45,85	63,49
Коэффициент сопротивления λ :	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Истинное газосодержание $\varphi(z)$:	0,553	0,593	0,641	0,696	0,763
$Nf(z) / 1000000$:	1453	1453	1454	1454	1455
$Re_{г} / 1000000$:	586,1	596,8	610,9	630,6	659,9
w_0/w'' :	1,169	1,190	1,218	1,257	1,315
$\bar{b}(z)/D$:	0,034	0,034	0,035	0,035	0,036
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,428	0,856	1,284	1,712
Средний расход водовозд. смеси $Q_{срi} \cdot 10^3$, м ³ /с:—		1311	1386	1486	1633
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, кВт:	—	55,04	116,3	187,2	274,2
Мощность комп. потерь на трение $N_{мрi}$, кВт:—		2,688	6,149	10,91	18,22
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{ускi}$, кВт:—		1,153	2,981	6,181	12,77
Мощность преод. силы тяжести N_{gi} , кВт: —		58,97	118,3	178,9	243,2
Мощность потока сжатого воздуха N''_i , кВт: 0,000	0,000	47,17	104,1	176,1	273,9
Мощность потока воды N' , кВт:	93,81	93,81	93,81	93,81	93,81
Мощность, подведенная к трубе $N_{подi}$, кВт: 93,81	140,9	197,9	269,9	367,8	
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{скi}$, кВт: 93,81	85,94	81,59	82,72	93,55	
Ср. плотность по расх. воздухо содерж. $\rho_{ср\beta i}$, кг/м ³ :—	334,4	314,1	292,0	268,0	
Ср. плотность по ист. воздухо содерж. $\rho_{ср\varphi i}$, кг/м ³ :—	428,9	407,0	382,6	355,1	
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срpi}$, кг/м ³ : 353,2	334,6	314,9	294,0	271,8	
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q''_{срi}$, м ³ /мин: 619567,26		73,56	81,17	90,52	
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}$, м:	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715
Сопротивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	2,051	2,051	2,051	2,051	2,051
Коэффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}$, м/с:	2,846	2,846	2,846	2,846	2,846
Поправочный множ. к формуле Шевелева k_I :	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Приложение А3 – Гидродинамические параметры водоотливной эрлифтной установки высотой подъема $H'=16,75$ м при блочном воздухообеспечении центробежным (радиальным) нагнетателем ЦНВ 160/3,2

Диаметр трубы, мм:		Режим работы нагнетателя: $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}; N_{потр} = 490 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{мин} = 17,1 \text{ м}$)				Режим работы нагнетателя: $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}; N_{потр} = 390 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{макс} = 25,0 \text{ м}$)				Коэффициент увеличения подачи k_Q	Коэффициент снижения удельного энергопотребления $k_{N_э}$
подъемной D	подающей d	Подача эрлифта $Q_э, \text{ м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе $w_{п.т}, \text{ м/с}$	Удельное энергопотребление $n_э, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_{э,мин}$ ($n_{э,мин} = 0,0088 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$)	Подача эрлифта $Q_э, \text{ м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе $w_{п.т}, \text{ м/с}$	Удельное энергопотребление $n_э, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_{э,мин}$ ($n_{э,мин} = 0,0088 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$)		
300	250	463,2	2,62	0,0632	7,18	780,7	4,42	0,0298	3,39	1,69	2,12
400	400	1130,5	2,50	0,0259	2,94	1640,3	3,63	0,0142	1,61	1,45	1,82
500	500	1685,5	2,39	0,0174	1,97	2340,5	3,31	0,0099	1,13	1,39	1,74
600	500	1895,5	2,68	0,0154	1,75	2634,4	3,73	0,0088	1,00	1,39	1,75
700	500	1824,4	2,58	0,0160	1,82	2632,8	3,73	0,0088	1,00	1,44	1,81
800	450	1512,6	2,64	0,0193	2,20	2317,2	4,05	0,0100	1,14	1,53	1,92

Приложение А4 – Гидродинамические параметры гидроподъемной эрлифтной установки высотой подъема $H'=16,75$ м при блочном воздухообеспечении центробежным (радиальным) нагнетателем ЦНВ 160/3,2

Диаметр трубы, мм:		Режим работы нагнетателя: $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}; N_{номр} = 490 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{мин} = 17,1 \text{ м}$)				Режим работы нагнетателя: $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}; N_{номр} = 390 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{макс} = 25,0 \text{ м}$)				Коэффициент увеличения подачи k_Q	Коэффициент снижения удельного энергопотребления $k_{N_э}$
подъемной D	подающей d	Подача эрлифта $Q_э, \text{ м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе $w_{н.т}, \text{ м/с}$	Удельное энергопотребление $n_э, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_э_{мин} (n_э_{мин} = 0,0097 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м})$	Подача эрлифта $Q_э, \text{ м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе $w_{н.т}, \text{ м/с}$	Удельное энергопотребление $n_э, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_э_{мин} (n_э_{мин} = 0,0097 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м})$		
300	200	437,9	3,87	0,0668	6,89	715,8	6,33	0,0325	3,35	1,63	2,05
400	300	1056,3	4,15	0,0277	2,86	1493,0	5,87	0,0156	1,61	1,41	1,78
500	400	1607,5	3,56	0,0182	1,88	2188,0	4,84	0,0106	1,10	1,36	1,71
600	400	1769,6	3,91	0,0165	1,70	2388,6	5,28	0,0097	1,00	1,35	1,70
700	400	1688,2	3,73	0,0173	1,79	2348,0	5,19	0,0099	1,02	1,39	1,75
800	350	1345,7	3,89	0,0217	2,24	1951,3	5,64	0,0119	1,23	1,45	1,82

Приложение А5– Параметры эрлифтных водоотливных установок с блочным воздухомоснабжением от центробежных (радиальных) нагнетателей при работе в режиме максимальной энергоэффективности

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
1	2	3	4	5	6	7
Диаметр трубы: - подъемной (энергетически оптимальный), D ; - подающей (максимально допустимый), d .	мм	500 350	900 800	500 400	600 500	700 600
Подача эрлифта Q , при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально возможном $h_{макс}$.	$м^3/ч$ ($м^3/с$)	984,0 (0,273) 1027,9 (0,286)	4590,5 (1,275) 6043,4 (1,679)	1316,9 (0,366) 1958,6 (0,544)	1895,5 (0,527) 2634,4 (0,732)	2561,8 (0,712) 2626,1 (0,729)
Степень увеличения подачи, k_Q	-	1,04	1,32	1,49	1,39	1,03
Удельное энергопотребление эрлифтной установки n , при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально возможном $h_{макс}$.	$\frac{кВт \cdot ч}{м^3 \cdot м}$	0,0125 0,0100	0,0153 0,0093	0,0190 0,0100	0,0154 0,0088	0,0104 0,0089

Приложение А6 – Параметры эрлифтных гидроподъемных установок с блочным воздухомоснабжением от центробежных (радиальных) нагнетателей при работе в режиме максимальной энергоэффективности

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
1	2	3	4	5	6	7
Диаметр трубы: - подъемной (энергетически оптимальный), D ; - подающей (максимально допустимый), d .	мм	500 300	900 650	500 350	600 400	700 500
Подача эрлифта Q , при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально возможном $h_{макс}$;	$м^3/ч$ ($м^3/с$)	865,2 (0,240) 904,8 (0,251)	4198,8 (1,166) 5392,7 (1,498)	1261,2 (0,350) 1833,2 (0,509)	1769,6 (0,492) 2388,6 (0,663)	2443,0 (0,679) 2503,4 (0,695)
Степень увеличения подачи, k_Q	-	1,05	1,28	1,45	1,35	1,02
Удельное энергопотребление эрлифтной установки n , при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально возможном $h_{макс}$.	$\frac{кВт \cdot ч}{м^3 \cdot м}$	0,0142 0,0113	0,0168 0,0104	0,0198 0,0106	0,0165 0,0097	0,0109 0,0094

Приложение А7 - КПД эрлифтной водоотливной установки с блочным воздухомоснабжением от центробежных (радиальных) нагнетателей

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
Абсолютное давление в смесителе при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	кгс/см ² (МПа)	1,552 (0,152) 1,465 (0,144)	2,382 (0,234) 1,993 (0,196)	3,235 (0,317) 2,475 (0,243)	3,352 (0,329) 2,712 (0,266)	3,061 (0,300) 2,694 (0,264)
КПД нагнетателя при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	-	0,755 0,745	0,788 0,690	0,814 0,695	0,840 0,741	0,815 0,790
КПД эрлифта при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	-	0,420 0,407	0,437 0,338	0,427 0,302	0,474 0,335	0,498 0,420
КПД эрлифтной установки при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	-	0,317 0,303	0,344 0,233	0,348 0,210	0,398 0,248	0,406 0,332

Приложение А8 - КПД эрлифтной гидроподъемной установки с блочным воздухомоснабжением от центробежных (радиальных) нагнетателей

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
Абсолютное давление в смесителе при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	кгс/см ² (МПа)	-	2,241 (0,220) 2,049 (0,201)	3,082 (0,302) 2,55 (0,250)	3,179 (0,312) 2,711 (0,266)	2,968 (0,291) 2,752 (0,270)
КПД нагнетателя при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	-	-	0,750 0,690	0,785 0,695	0,810 0,741	0,819 0,790
КПД эрлифта при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	-	-	0,398 0,338	0,398 0,302	0,427 0,335	0,476 0,420
КПД эрлифтной установки при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$; - максимально допустимом $h_{мин}$.	-	-	0,299 0,233	0,312 0,210	0,347 0,248	0,390 0,332

Для нагнетателя ЦНВ 60/1,6 условия совместной работы выполняются за пределами заводской (графической) характеристики нагнетателя

Приложение А9 – Параметры эрлифтных водоотливных установок с блочным воздухомоснабжением от центробежных (радиальных) нагнетателей ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» с учетом потерь напора в подающих трубах эрлифтов

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22- 1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
1	2	3	4	5	6	7
Длина подъемной трубы эрлифта $H+h$	м	13,38	26,25	38,75	42,75	43,75
Высота подъема эрлифтной установки H' относительно отметки 0.000	м	6,48	10,45	13,75	16,75	21,55
Диаметры труб: - подъемной, D - подающей, d	мм	500 350	900 800	500 400	600 500	700 600
Геометрическое погружение смесителя эрлифта: - максимально возможное h_{\max} - минимально допустимое h_{\min} - в оптимальном режиме работы нагнетателя $h_{\text{опт}}$	м	6,30 6,02 -	14,8 11,17 -	24,0 16,37 -	25,0 17,83 -	21,2 18,14 20,72
Давление (абсолютное) нагнетателя $p_n \cdot 10^{-5}$ (равное абсолютному давлению в смесителе эрлифта $p_{\text{сма}} = p_n$) при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном h_{\max} - минимально допустимом h_{\min} - оптимальном $h_{\text{опт}}$	Па	1,491 1,473 1,580	2,308 2,010 2,420	3,133 2,500 3,335	3,288 2,660 3,434	2,987 2,700 2,940
Производительность нагнетателя Q_n при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном h_{\max} - минимально допустимом h_{\min} - оптимальном $h_{\text{опт}}$	м ³ /мин	75 76 62,5	320 360 290	101 115 82	141 168 122	192 228 200

Продолжение приложения А9

1	2	3	4	5	6	7
Мощность нагнетателя $N_{номр}$ при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	кВт	80,5 81,5 70,8	685 735 635	315 344 268	435 490 390	540 572 550
КПД нагнетателя η_n при при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	-	0,755 0,745 0,816	0,788 0,690 0,810	0,814 0,695 0,845	0,840 0,741 0,850	0,815 0,790 0,820
Подача эрлифта $Q_э$ при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	м ³ /ч	1220,8 1163,4 -	6870,3 5015,3 -	2183,9 1417,2 -	2895,5 2011,5 -	2963,5 2702,0 2958,6
КПД эрлифта $\eta_{эр}$ при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	-	0,420 0,407 -	0,437 0,338 -	0,427 0,302 -	0,474 0,335 -	0,498 0,420 0,485
КПД эрлифтной установки $\eta_{э.у}$ при при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	-	0,317 0,303 -	0,344 0,233 -	0,348 0,210 -	0,398 0,248 -	0,406 0,332 0,398
Степень увеличения подачи, k_O	-	1,05	1,37	1,54	1,44	1,10

Приложение А10 – Параметры эрлифтных гидроподъемных установок с блочным воздухомоснабжением от центробежных (радиальных) нагнетателей ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» с учетом потерь напора в подающих трубах

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
1	2	3	4	5	6	7
Длина подъемной трубы эрлифта $H+h$	м	13,38	26,25	38,75	42,75	43,75
Высота подъема эрлифтной установки H' относительно отметки 0.000	м	6,48	10,45	13,75	16,75	21,55
Диаметры труб: - подъемной, D - подающей, d	мм	500 300	900 650	500 350	600 400	700 500
Геометрическое погружение смесителя эрлифта: - максимально возможное h_{\max} - минимально допустимом h_{\min} - в оптимальном режиме работы нагнетателя $h_{\text{опт}}$	м	-	14,8 12,05 -	24,0 16,98 -	25,0 18,85 -	21,2 18,81 -
Давление (абсолютное) нагнетателя $p_n \cdot 10^{-5}$ (равное абсолютному давлению в смесителе эрлифта $p_{\text{сма}} = p_n$) при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном h_{\max} - минимально допустимом h_{\min} - оптимальном $h_{\text{опт}}$	Па	-	2,198 2,010 2,420	3,023 2,500 3,335	3,119 2,660 3,434	2,912 2,700 2,940
Производительность нагнетателя Q_n при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном h_{\max} - минимально допустимом h_{\min} - оптимальном $h_{\text{опт}}$	м ³ /мин	-	337 360 290	106,5 115 82	154 168 122	204 228 200

Продолжение приложения А10

1	2	3	4	5	6	7
Мощность нагнетателя $N_{номр}$ при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	кВт	-	710 735 635	330 344 268	465 490 390	558 572 550
КПД нагнетателя η_n при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	-	-	0,750 0,690 0,810	0,785 0,695 0,845	0,810 0,741 0,850	0,819 0,790 0,820
Подача эрлифта $Q_э$ при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	м ³ /ч	-	6212,3 5016,6 -	2079,3 1417,0 -	2727,1 2010,2 -	2938,6 2702,5 -
КПД эрлифта $\eta_{эр}$ при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	-	-	0,398 0,338 -	0,398 0,302 -	0,427 0,335 -	0,476 0,420 -
КПД эрлифтной установки $\eta_{э.у}$ при при геометрическом погружении смесителя: - максимально возможном $h_{макс}$ - минимально допустимом $h_{мин}$ - оптимальном $h_{опт}$	-	-	0,299 0,233 -	0,312 0,210 -	0,347 0,248 -	0,390 0,332 -
Степень увеличения подачи, k_O	-	-	1,24	1,47	1,36	1,09

Для нагнетателя ЦНВ 60/1,6 условия совместной работы выполняются за пределами заводской (графической) характеристики нагнетателя.

Приложение А11 - Подачи водоотливной эрлифтной установки определенные с учетом влияния потерь напора (давления) в подающей трубе на рабочий режим нагнетателя и теоретически

Подача эрлифта	Ед. измерения	ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
при максимально возможном h_{\max} : -теоретическая; -определенная с учетом потерь напора (давления) в подающей трубе. при минимально допустимом h_{\min} : -теоретическая; -определенная с учетом потерь напора (давления) в подающей трубе.	М ³ /ч	1027,9	6043,4	1958,6	2634,4	2626,1
		1220,8	6870,3	2183,9	2895,5	2963,5
		984,0	4590,5	1316,9	1895,5	2561,8
		1163,4	5015,3	1417,2	2011,5	2702,0
Увеличение подачи: - при максимально возможном h_{\max} ; - при минимально допустимом h_{\min} .	%	18,8	13,7	11,5	9,91	12,8
		18,2	9,25	7,62	6,12	5,5

Приложение А12 - Подачи гидроподъемной эрлифтной установки определенные с учетом влияния потерь напора (давления) в подающей трубе на рабочий режим нагнетателя и теоретически

Подача эрлифта	Ед. измерения	ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
при максимально возможном h_{\max} :	м ³ /ч	904,8	5392,7	1833,2	2388,6	2503,4
-теоретическая;		-	6212,3	2079,3	2727,1	2938,6
-определенная с учетом потерь напора (давления) в подающей трубе.		-	-	-	-	-
при минимально допустимом h_{\min} :		865,2	4198,8	1261,2	1769,6	2443,0
-теоретическая;	%	-	5016,6	1417,0	2010,2	2702,5
-определенная с учетом потерь напора (давления) в подающей трубе.		-	-	-	-	-
Увеличение подачи:	%	-	15,2	13,4	14,2	17,4
- при максимально возможном h_{\max} ;		-	19,5	12,4	13,6	10,6
- при минимально допустимом h_{\min} .						

Приложение А13 - Результаты численного исследования параметров рабочего процесса эрлифтной установки с воздухомоснабжением от источников пневмоэнергии неизменной производительности

Таблица А4 – Оптимальные параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм при значениях относительных погружений смесителя $\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$

Относительное погружение смесителя α	Диаметр подающей трубы d , мм	Расход воздуха Q_6 <i>опт</i> , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_9 <i>опт</i> , м ³ /ч	Избыточное давление в смесителе $p_{см\ опт}$ кгс/см ²	КПД $\eta_{эр\ опт}$
0,400	100	8,88	91,3	1,895	0,484
0,500	100	6,76	101,2	2,369	0,514
0,600	100	4,92	105,2	2,851	0,529
0,700	100	3,32	103,9	3,355	0,532
0,800	100	1,92	95,7	3,886	0,523
0,400	125	9,62	104,3	1,944	0,502
0,500	125	7,46	118,7	2,420	0,539
0,600	125	5,49	125,7	2,901	0,561
0,700	125	3,76	126,9	3,399	0,570
0,800	125	2,22	121,1	3,900	0,573
0,400	150	9,89	109,8	1,969	0,510
0,500	150	7,74	126,6	2,458	0,549
0,600	150	5,78	136,6	2,947	0,574
0,700	150	4,05	142,1	3,432	0,590
0,800	150	2,36	135,2	3,935	0,597

Таблица А5 – Параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм со значением минимально допустимого КПД $\eta_{эр доп мин} = 0,8 \cdot \eta_{эр опт макс} = 0,8 \cdot 0,597 = 0,478$, при относительных погружениях смесителя $\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$

Относительное погружение смесителя α	Диаметр подающей трубы d , мм	Параметры работы эрлифта при значении $\eta_{эр доп мин} = 0,478$:			
		на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_в)$:		на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_в)$:	
		расход воздуха $Q_{в восх}$, М ³ /мин	подача $Q_{э восх}$, М ³ /ч	расход воздуха $Q_{в нисх}$, М ³ /мин	подача $Q_{э нисх}$, М ³ /ч
0,400	100	7,96	81,3	11,25	112,9
0,500	100	4,90	69,3	11,44	154,4
0,600	100	3,30	64,8	9,33	173,9
0,700	100	2,19	62,5	6,47	176,1
0,800	100	1,31	60,2	3,56	158,2
0,400	125	7,19	74,7	13,90	142,0
0,500	125	4,70	67,0	13,63	188,8
0,600	125	3,23	63,8	11,52	220,0
0,700	125	2,15	61,5	8,50	235,2
0,800	125	1,24	57,2	5,07	226,7
0,400	150	7,03	73,5	14,90	154,1
0,500	150	4,66	66,7	14,64	206,2
0,600	150	3,24	64,3	12,59	244,6
0,700	150	2,17	62,1	9,58	269,1
0,800	150	1,25	57,7	5,96	269,4

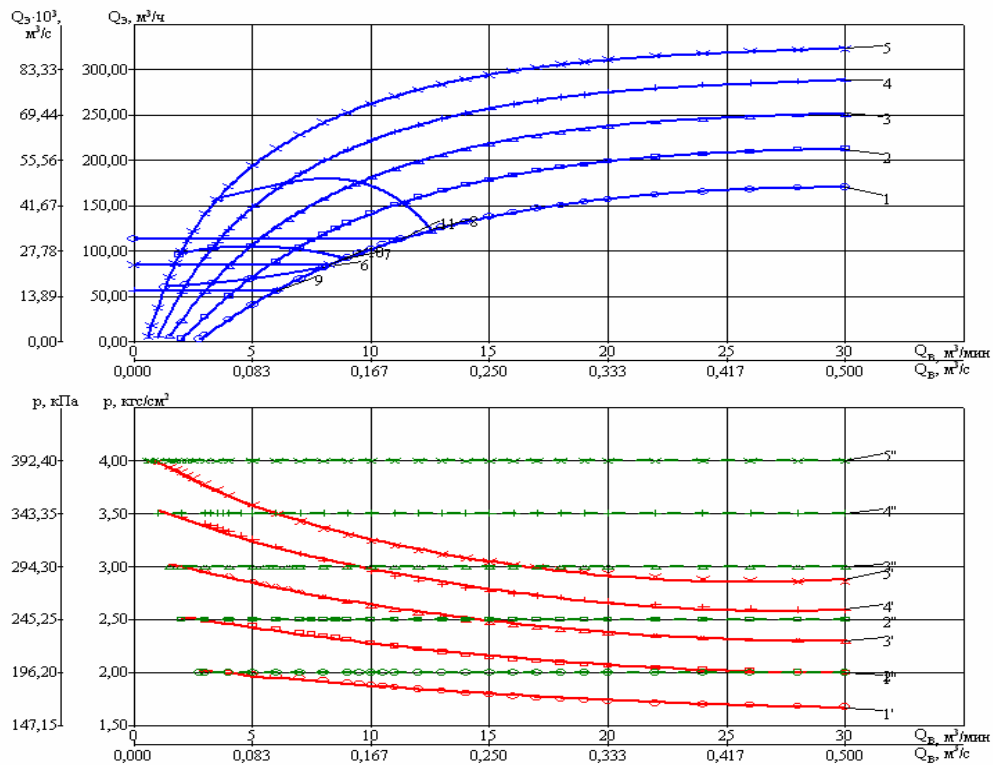


Рисунок А1 – Энергетически допустимая зона эксплуатации эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 200$ мм, длиной $H+h = 50$ м и подающей

трубой диаметром $d = 100$ мм: $1 \div 5 - Q_3 = f(Q_6)$; $1' \div 5'' - p_{с.м} = f(Q_6)$; $1'' \div 5'' - p_{н.с} = f(Q_6)$; $6 - Q_{3 \text{ восх}} = f(Q_{6 \text{ восх}})$ при значении $\eta_{эр \text{ доп мин}} = 0,478$ на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$; $7 - Q_{3 \text{ опт}} = f(Q_{6 \text{ опт}})$ при значении $\eta_{эр} = \eta_{эр \text{ опт}}$; $8 - Q_{3 \text{ нисх}} = f(Q_{6 \text{ нисх}})$ при значении $\eta_{эр \text{ доп мин}} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$; $9 - Q_3 = Q_{3 \text{ кр}} = 56,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($w_{н.м} = 2,0 \text{ м/с}$); $10 - Q_3 = Q_{3 \text{ кр}} = 84,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($w_{н.м} = 3,0 \text{ м/с}$); $11 - Q_3 = Q_{3 \text{ кр}} = 113,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($w_{н.м} = 4,0 \text{ м/с}$); [$\alpha_1 = 0,40 \text{ м}$; $\alpha_2 = 0,50 \text{ м}$; $\alpha_3 = 0,60 \text{ м}$; $\alpha_4 = 0,70 \text{ м}$; $\alpha_5 = 0,80$]

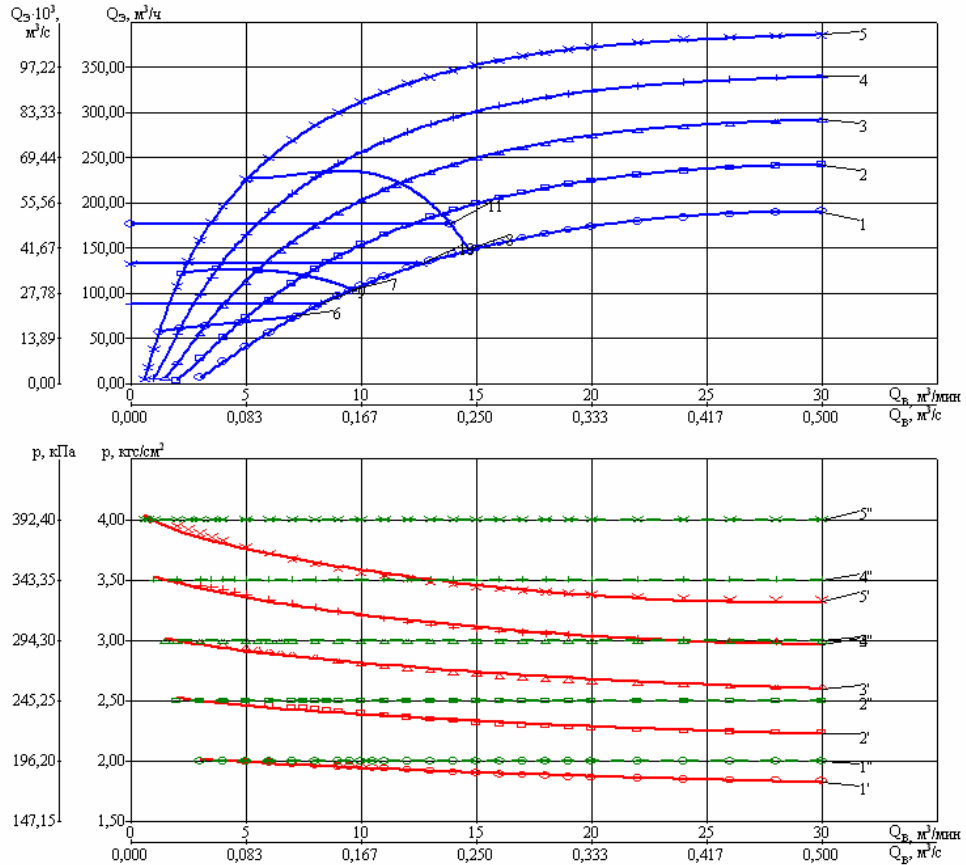


Рисунок А2 – Энергетически допустимая зона эксплуатации эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 200$ мм, длиной $H+h = 50$ м и подающей трубой диаметром $d = 125$ мм: $1 \div 5 - Q_3 = f(Q_6)$; $1' \div 5' - p_{с.м} = f(Q_6)$; $1'' \div 5'' - p_{н.с} = f(Q_6)$; $6 - Q_{3 \text{ восх}} = f(Q_{6 \text{ восх}})$ при значении $\eta_{эр \text{ доп мин}} = 0,478$ на восходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$; $7 - Q_{3 \text{ опт}} = f(Q_{6 \text{ опт}})$ при значении $\eta_{эр} = \eta_{эр \text{ опт}}$; $8 - Q_{3 \text{ нисх}} = f(Q_{6 \text{ нисх}})$ при значении $\eta_{эр \text{ доп мин}} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_6)$; $9 - Q_3 = Q_{3 \text{ кр}} = 88,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($w_{н.м} = 2,0 \text{ м/с}$); $10 - Q_3 = Q_{3 \text{ кр}} = 132,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($w_{н.м} = 3,0 \text{ м/с}$); $11 - Q_3 = Q_{3 \text{ кр}} = 176,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($w_{н.м} = 4,0 \text{ м/с}$); [$\alpha_1 = 0,40 \text{ м}$; $\alpha_2 = 0,50 \text{ м}$; $\alpha_3 = 0,60 \text{ м}$; $\alpha_4 = 0,70 \text{ м}$; $\alpha_5 = 0,80$]

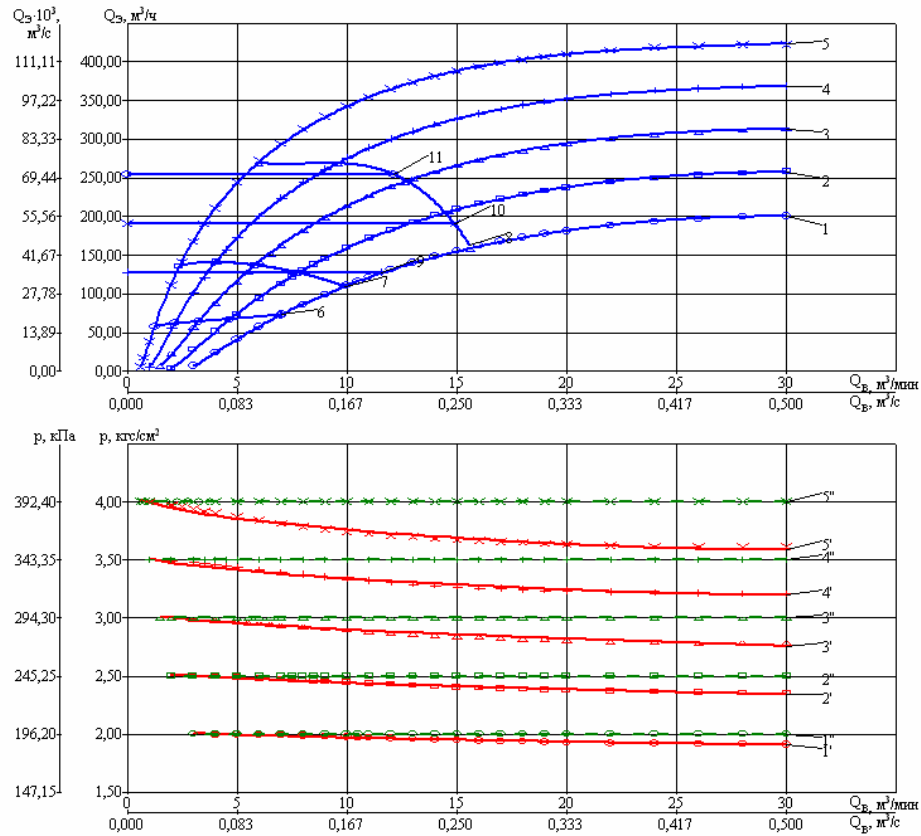


Рисунок А3 – Энергетически допустимая зона эксплуатации эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 200$ мм, длиной $H+h = 50$ м и подающей трубой диаметром $d = 150$ мм: 1÷5 - $Q_{\text{э}} = f(Q_{\text{в}})$; 1'÷5' - $p_{\text{см}} = f(Q_{\text{в}})$; 1''÷5'' - $p_{\text{н.с}} = f(Q_{\text{в}})$; 6 - $Q_{\text{э вост}} = f(Q_{\text{в вост}})$ при значении $\eta_{\text{эр доп мин}} = 0,478$ на восходящей ветви характеристики $\eta_{\text{эр}} = f(Q_{\text{в}})$; 7 - $Q_{\text{э опт}} = f(Q_{\text{в опт}})$ при значении $\eta_{\text{эр}} = \eta_{\text{эр опт}}$; 8 - $Q_{\text{э нисх}} = f(Q_{\text{в нисх}})$ при значении $\eta_{\text{эр доп мин}} = 0,478$ на нисходящей ветви характеристики $\eta_{\text{эр}} = f(Q_{\text{в}})$; 9 - $Q_{\text{э}} = Q_{\text{э кр}} = 127,2$ м³/ч ($w_{\text{н.м}} = 2,0$ м/с); 10 - $Q_{\text{э}} = Q_{\text{э кр}} = 190,8$ м³/ч ($w_{\text{н.м}} = 3,0$ м/с); 11 - $Q_{\text{э}} = Q_{\text{э кр}} = 254,3$ м³/ч ($w_{\text{н.м}} = 4,0$ м/с); [$\alpha_1 = 0,40$ м; $\alpha_2 = 0,50$ м; $\alpha_3 = 0,60$ м; $\alpha_4 = 0,70$ м; $\alpha_5 = 0,80$]

Таблица А6 – Параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм при значении транспортной скорости в подающей трубе $w_{\text{н.м}} = 4,0$ м/с и подаче $Q_{\text{э}} = 113,0$ м³/ч

Относительное погружение смесителя α	Расход воздуха $Q_{\text{в}}$, м³/мин	Избыточное давление в смесителе $p_{\text{см}}$, кгс/см²	КПД $\eta_{\text{эр}}$
0,400	11,27	1,855	0,478
0,500	7,59	2,344	0,514
0,600	5,29	2,833	0,530
0,700	3,62	3,333	0,532
0,800	2,29	3,843	0,521

Таблица А7 – Параметры работы эрлифта $H+h = 50$ м, $D = 200$ мм $d = 100$ мм со значением минимально допустимого КПД $\eta_{эр доп.мин} = 0,478$, на нисходящей ветви характеристики $\eta_{эр} = f(Q_в)$ газожидкостного подъемника с $p_{см} = const$

Относительное погружение смесителя α	Расход воздуха $Q_{в нисх}$, м ³ /мин	Подача $Q_{э нисх}$, м ³ /ч
0,400	11,50	115,2
0,500	13,95	193,2
0,600	12,25	236,1
0,700	9,48	265,8
0,800	6,01	272,0

Приложение А14– Результаты расчета на ПЭВМ эрлифтов с параметрами $H+h = 20, 30, 40$ м, $D = 200$ мм, $d = 100, 150, 200$ мм с воздухообеспечением от источников пневмоэнергии неизменной производительности

Таблица А8 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 20$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм, $w_{н.м} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха $Q_в$, м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подачи k_{Qp} / k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	140,2	1,24	308,2	2,73	2,2
6	113	142,7	1,26	308,7	2,73	2,17
8	113	140,1	1,24	309,8	2,74	2,21
10	113	134,9	1,19	296,9	2,63	2,21
12	113	128,2	1,13	253	2,24	1,98
14	113	-	-	-	-	-

Таблица А9 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 20$ м, $D = 200$ мм, $d = 150$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	248,4	2,2	271,7	2,4	1,09
6	113	252,4	2,23	282	2,5	1,12
8	113	243,6	2,16	280	2,48	1,15
10	113	221,7	1,96	281	2,49	1,27
12	113	177,5	1,57	215	1,9	1,21
14		-	-	--	-	-

Таблица А10 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 20$ м, $D = 200$ мм, $d = 200$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	113	170,6	1,51	173,1	1,53	1,013
4	113	276,7	2,45	299	2,57	1,08
6	113	281,2	2,49	312	2,65	1,11
8	113	282,2	2,5	299	2,65	1,06
10	113	253	2,24	264	2,34	1,045
12	113	-	--	-	-	
14	113	-	-	--	-	-

Таблица А11 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 30$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{нн} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	165,5	1,46	253,2	2,24	1,53
6	113	170,5	1,51	313,8	2,78	1,84
8	113	179,6	1,59	312,4	2,76	1,74
10	113	178,3	1,58	312	2,76	1,75
12	113	163,7	1,45	280	2,48	1,71
14	113	-	-	--	-	-

Таблица А12 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 30$ м, $D = 200$ мм, $d = 150$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	243,8	2,16	251	2,22	1,03
6	113	256	2,27	310	2,74	1,21
8	113	263,7	2,33	302	2,67	1,15
10	113	256,8	2,27	300,3	2,66	1,17
12	113	223,6	1,98	262	2,32	1,17
14	113	-	-	-	-	-

Таблица А13 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 30$ м, $D = 200$ мм, $d = 200$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	113	-	-	-	-	-
4	113	260,1	2,3	269,9	2,39	1,039
6	113	284,5	2,52	307	2,72	1,08
8	113	289,6	2,56	311,2	2,75	1,07
10	113	282,7	2,5	298,5	2,64	1,056
12	113	231,1	2,05	240,9	2,13	1,039
14	113	-	-	-	-	-

Таблица А14 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 40$ м, $D = 200$ мм, $d = 100$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	107,5	-	115,9	1,02	-
6	113	175,4	1,55	247,3	2,19	1,41
8	113	188,5	1,67	328,0	2,90	1,74
10	113	205,0	1,81	340,3	3,01	1,66
12	113	199,4	1,76	315,1	2,79	1,58
14	113	-	-	-	-	-

Таблица А15 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 40$ м, $D = 200$ мм, $d = 150$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{см} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	223,8	1,98	237,7	2,1	1,06
6	113	261,2	2,31	306,0	2,71	1,17
8	113	266,4	2,36	314	2,79	1,18
10	113	272,3	2,41	319	2,82	1,17
12	113	258,6	2,29	301,1	2,66	1,16
14	13	-	-	-	-	-

Таблица А16 – Сравнение степеней увеличения подачи k_Q эрлифтов $H+h = 40$ м, $D = 200$ мм, $d = 200$ мм, $w_{n,m} = 4,0$ м/с с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = const$ и постоянным давлением в смесителе $p_{см} = const$

Расход воздуха Q_v , м ³ /мин	Минимально допустимая подача $Q_{э.кр}$, м ³ /ч	Максимально возможная подача $Q_{э.макс}^{возм}$ и степень увеличения подачи k_Q эрлифта при:				Отношение Степеней Увеличения Подач k_{Qp}/k_{Qh}
		$h = const$		$p_{\tilde{n}} = const$		
		$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qh}	$Q_{э.макс}^{возм}$, м ³ /ч	k_{Qp}	
2	-	-	-	-	-	-
4	113	240,9	2,13	247,9	2,19	1,03
6	113	295,6	2,62	314,0	2,79	1,06
8	113	296	2,62	311,0	2,75	1,069
10	113	298,8	2,64	312,2	2,76	1,045
12	113	275,8	2,44	279,8	2,48	1,02
14	13	-	-	-	-	-

Приложение Б – К численному анализу математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы эрлифта

Приложение Б1 – Фрагмент текста программы для численного анализа математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы эрлифта на ПЭВМ

Program equations

uses

Forms,

Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1},

Unit2 in 'Unit2.pas' {Form2},

Unit3 in 'Unit3.pas' {Form3},

Unit4 in 'Unit4.pas' {Form4},

Unit5 in 'Unit5.pas' {Form5},

Unit6 in 'Unit6.pas' {Form6},

Unit7 in 'Unit7.pas' {Form7},

Unit8 in 'Unit8.pas' {Form8},

Unit9 in 'Unit9.pas' {Form9},

Unit10 in 'Unit10.pas' {Form10};

{SR *.res}

begin

Application.Initialize;

Application.CreateForm(TForm1, Form1);

Application.CreateForm(TForm2, Form2);

Application.CreateForm(TForm3, Form3);

Application.CreateForm(TForm4, Form4);

Application.CreateForm(TForm5, Form5);

Application.CreateForm(TForm6, Form6);

Application.CreateForm(TForm7, Form7);

Application.CreateForm(TForm8, Form8);

Application.CreateForm(TForm9, Form9);

Application.CreateForm(TForm10, Form10);

Application.Run;

end.

unit Unit1;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, jpeg, Math, MPlayer, ComCtrls, Buttons;

type

```
TForm1 = class(TForm)
  Panel1: TPanel;
  GroupBox1: TGroupBox;
```

```
  Label_01: TLabel;
  Label_02: TLabel;
  Label_03: TLabel;
  Label_04: TLabel;
  Label_05: TLabel;
  Label_06: TLabel;
  Label_07: TLabel;
  Label_08: TLabel;
  Label_09: TLabel;
  Label_10: TLabel;
  Label_11: TLabel;
  Label_12: TLabel;
  Label_13: TLabel;
  Label_14: TLabel;
  Label_15: TLabel;
  Label_16: TLabel;
  Label_17: TLabel;
```

```
  Label01: TLabel;
  Label02: TLabel;
  Label03: TLabel;
  Label04: TLabel;
  Label05: TLabel;
  Label06: TLabel;
  Label07: TLabel;
  Label08: TLabel;
  Label09: TLabel;
  Label10: TLabel;
  Label11: TLabel;
  Label12: TLabel;
  Label13: TLabel;
  Label14: TLabel;
  Label15: TLabel;
  Label16: TLabel;
  Label17: TLabel;
```

...

```
  ProgressBar1: TProgressBar;
  ProgressBar2: TProgressBar;
  Animate1: TAnimate;
  Panel2: TPanel;
  GroupBox2: TGroupBox;
  UpDown1: TUpDown;
  Label2: TLabel;
  Label1: TLabel;
  GroupBox3: TGroupBox;
  Editq3: TEdit;
```

```

Label18: TLabel;
Button3: TButton;
Button5: TButton;
Editw3: TEdit;
Label38: TLabel;
Button2: TButton;
Button4: TButton;
Label39: TLabel;
ComboBox1: TComboBox;
RadioGroup1: TRadioGroup;
Button1: TButton;
Label40: TLabel;
ComboBox2: TComboBox;
Label59: TLabel;
Label58: TLabel;
ComboBox3: TComboBox;
GroupBox4: TGroupBox;
Label20: TLabel;
Label19: TLabel;
Label8: TLabel;
Label9: TLabel;
Editq1: TEdit;
Editq2: TEdit;
Editw1: TEdit;
Editw2: TEdit;
BitBtn1: TBitBtn;
BitBtn2: TBitBtn;

procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Edit17Exit(Sender: TObject);
procedure UpDown1Click(Sender: TObject; Button: TUDBtnType);
procedure Editq1Exit(Sender: TObject);

procedure ZapEdits;
procedure ZapVars;
procedure Calcul;
procedure CalGr;
procedure Spline;
procedure Findpy;
function spi(x0si: real): real;
function y1: real;
function y2: real;
function w_st(z: real): real;
function p_i(z: real): real;
function w_pp_0(z: real): real;
function w_c(z: real): real;
function k_v(z: real): real;
function Integral_11_1(z: real): real;
function Integral_11_2(z: real): real;
function Integral_11_3(z: real): real;

```

```

function Integral_11_4(z: real): real;
function Integral_33: real;
function Integral_34: real;
function Integral_19: real;
function Integral_20: real;
function ro_pp(z: real): real;
function D_np(z: real): real;
function fi_sr(z: real): real;
function fi_c(z: real): real;
function k_n(z: real): real;
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
function Vyb_z: real;
procedure BitBtn1Click(Sender: TObject);
procedure BitBtn2Click(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  Form1: TForm1;
  // Исходные данные
  ro_p, ro_n_pp, mu_p, p_a, nu_p, nu_pp, sigma, nu_b, r_0, eta_v, eta_n, H_h, D, h, g, eps, n: real;
  PrnType: integer;
  par: array[1..17, 0..2] of real;
  // Промежуточные переменные
  d_ekv_v, d_ekv_n, Re_v, Re_n, lam_v, lam_n: real;
  w_c0, w_pp_00, p_i0, k_v0, k_n0, fi_c0, fi_sr0, D_np0, ro_pp0: real;
  f10, f11, f12, f20, f21, f22, dwst: real;
  w1, w2, delw, q1, q2, delq, py1, py2, dpy0, dpy1, dpy2: real;
  wst, ok, ok1, ok2: boolean;
  w_sr_v_, ro_sr_v_, w_sr_n_, ro_sr_n_: real;
  w_sr_v, w_sr_n: real;
  w0_0, w1_0, w2_0, q0_0, q1_0, q2_0: real;
  w0_r, w1_r, w2_r, q0_r, q1_r, q2_r: real;
  delta_xq, delta_xw: real;
  ff, fv: string;
  zav: array[1..100, 0..21] of real;
  kol_p, np, npp: integer;

implementation

uses Unit2, Unit3, Unit4, Unit5, Unit7, Unit8;

{$R *.dfm}

procedure TForm1.Button5Click(Sender: TObject);
begin
  Panel1.Enabled := False;

```

```

Panel2.Enabled := False;
ZapVars;
Panel3.Left := (Panel1.Width - Panel3.Width) div 2;
Panel3.Top := (Panel1.Height - Panel3.Height) div 2;
Panel3.Visible := True;
ProgressBar1.Visible := True;
ProgressBar1.Position := 0;
ProgressBar1.Max := 10 * Form1.UpDown1.Position;
ProgressBar2.Visible := True;
ProgressBar2.Position := 0;
ProgressBar2.Max := 10 * Form1.UpDown1.Position;
// Label7.Caption:='Поиск начального приближения!';
Animate1.Visible := True;
Panel3.Refresh;
Calcul;
CalGr;
Form2.ShowModal;
Panel1.Enabled := True;
Panel2.Enabled := True;
end;

```

...

Полный текст программы размещается на 620 страницах.

Приложение Б2 – Результат расчета эрлифта ($D = 300$ мм, $d = 120$ мм, $H+h = 30$ м, $h = 12$ м, $z_j = 0$ м, $\Delta h = 2$ м)

Параметры:

Касат. напряжения и коэф-ты сопротивл. по формулам:	Уоллиса Г. [118]
Истинное газосодержание по формулам:	Уоллиса Г. (учет поправки...)
[118]	
Расчет газосодержания по:	формулам № 1
Вид процесса изменения состояния воздуха:	изотермический
Подающая труба:	насадок
Исходные данные:	
Плотность воды ρ' , кг/м ³	1000
Плотность воздуха при нормальных условиях ρ_0'' , кг/м ³	1,2
Атмосферное давление p_0 , Па.....	98100
Динамическая вязкость воды μ' , Пас.....	0,001
Динамическая вязкость воздуха μ'' , Пас.....	1,79Е-5
Коэффициент поверхностного натяжения σ , Н/м.....	0,0723
Показатель политропы n	1
Показатель степени в формуле Арманда.....	1,53
Длина подъемной трубы $H+h$, м.....	30
Диаметр подъемной трубы D , м.....	0,3
Эквивалентная шероховатость трубы Δ_s , м.....	0,0002
Ускорение свободного падения d , м.....	9,81
Относительная длина жидкой пробки D/L , м.....	2
Верт. координата подвода доп. притока.....	0
Приток, подводимый в зумпф $Q_{пр1}$, м ³ /ч.....	258,9
Приток, подводимый в промежуточное сечение подъемной трубы $Q_{пр2}$, м ³ /ч	1 - 3 - 1
Геометрическое погружение смесителя h , м.....	12
Диаметр подающей трубы d , м.....	0,12

Длина подающей трубы l , м..... 0,8
 Коэффициент расхода подающей трубы $\mu_{n,m}$ 0,76
 Сумма коэф-тов местных сопротивлений подающей трубы $\sum \zeta_{n,m}$ 1,5

=====

Qв1 = 10,000000 м³/мин, Qв2 = 0,000000 м³/мин: Qnp1 = 0,022523 м³/с (81,08 м³/ч)

Значения z , м:	0,000	7,500	15,00	22,50	30,00
Давление $p_d(z)$ в сечении z , кг/см ² :	2,165	1,874	1,583	1,291	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	2,598	2,249	1,899	1,550	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	459,4	425,7	387,4	343,4	292,3
Объемное расходное воздуходоержание $\beta(z)$:	0,774	0,798	0,824	0,851	0,881
Массовое расходное воздуходоержание x :	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Па·с:	0,674	0,674	0,674	0,674	0,674
Площадь сечения трубы $\omega 10^3$, м ² :	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	1,408	1,577	1,809	2,145	2,676
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	0,319	0,319	0,319	0,319	0,319
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	1,089	1,258	1,490	1,826	2,358
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	0,696	0,751	0,825	0,930	1,093
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	2,009	2,186	2,428	2,777	3,328
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	287,7	298,6	311,7	327,7	348,1
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² ·с:	321,4	321,4	321,4	321,4	321,4
Давление, обусл. трением $p_{мп} 10^3$, кг/см ² :	0,000	2,373	5,164	8,562	12,91
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,184	0,432	0,785	1,329
Давление, обусл. силой тяжести $p_{г} 10^3$, кг/см ² :	0,000	332,2	637,4	911,9	1150
Давление (сумма) $p_{\Sigma} 10^3$, кг/см ² :	0,000	334,7	643,0	921,3	1165
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	11,65	11,65	11,65	11,65	11,65
Относительное геометр. погруж. смес. α :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. α_0 :	0,388	0,388	0,388	0,388	0,388
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	2,163	2,510	2,996	3,724	4,920
Nf(z) / 1000000:	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
Истинное газосодержание $\phi(z)$:	0,542	0,576	0,614	0,658	0,708
Nf(z) / 1000000:	513,9	514,0	514,1	514,2	514,3
Re _г / 1000000:	180,5	182,8	185,7	189,7	195,4
w0/w'':	1,018	1,031	1,047	1,069	1,102
б(z)/D:	0,031	0,031	0,031	0,032	0,032
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,291	0,583	0,874	1,165
Средний расход водовозд. смеси $Q_{ср} \cdot 10^3$, м ³ /с:	--	51,32	53,59	56,45	60,206
Суммарная мощность, N_{Σ} кВт:	-----	1,467	3,063	4,840	6,882
Мощность комп. потерь на трение, $N_{мп}$ кВт:	-----	0,012	0,027	0,047	0,076
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{уск}$, кВт:	-----	0,001	0,002	0,004	0,008
Мощность преод. силы тяж ести $N_{г}$, кВт:	-----	1,673	3,352	5,050	6,798
Мощность потока сжатого воздуха N''_i , кВт:	0,000	2,362	5,125	8,451	12,63
Мощность потока воды N' , кВт:	2,498	2,498	2,498	2,498	2,498
Мощность, подведенная к трубе $N_{под}$, кВт:	2,498	4,860	7,622	10,94	15,12
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ск}$, кВт:	2,499	3,393	4,559	6,109	8,246
Ср. плотность по расх. воздуходоерж. $\rho_{ср\beta}$, кг/м ³ :----		216,2	203,5	190,3	176,5
Ср. плотность по ист. воздуходоерж. $\rho_{ср\phi}$, кг/м ³ :----		442,9	424,9	405,3	383,6
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срp}$, кг/м ³ : 228,3		216,3	203,8	191,0	177,7
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q_{ср}''$, м ³ /мин: 4,619		4,952	5,336	5,786	6,319
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}$, м:	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348
Сопротивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	703,3	703,3	703,3	703,3	703,3
Коэффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}$, м/с:	1,986	1,986	1,986	1,986	1,986
Поправочный множ. к формуле Шевелова k_f :	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Qв1 = 10,000000 м³/мин, Qв2 = 2,000000 м³/мин: Qnp1 = 0,0225 м³/с (81,08 м³/ч); Qnp2 = 0,0110 м³/с (39,58 м³/ч)

Значения z , м:	0,000	7,500	15,00	22,50	30,00
Давление $p_d(z)$ в сечении z , кг/см ² :	2,165	1,874	1,583	1,291	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	2,598	2,249	1,899	1,550	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	499,8	422,8	384,4	340,3	289,1

Объемное расходное воздухосодержание $\beta(z)$:	0,697	0,761	0,790	0,822	0,856
Массовое расходное воздухосодержание x :	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Па·с:	0,754	0,719	0,719	0,719	0,719
Площадь сечения трубы $\omega 10^3$, м ² :	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	1,563	1,984	2,262	2,665	3,304
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	0,474	0,474	0,474	0,474	0,474
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	1,089	1,510	1,788	2,191	2,829
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	0,951	1,125	1,237	1,398	1,645
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	2,172	2,610	2,899	3,317	3,975
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	310,7	349,8	362,6	378,2	398,3
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² ·с:	477,0	477,5	477,5	477,5	477,5
Давление, обусл. трением $p_{мп} 10^3$, кг/см ² :	0,000	3,716	8,036	13,22	19,78
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,868	1,421	2,210	3,429
Давление, обусл. силой тяжести $p_{г} 10^3$, кг/см ² :	0,000	330,0	633,0	905,2	1141
Давление (сумма) $p_{\Sigma} 10^3$, кг/см ² :	0,000	334,6	642,5	920,6	1165
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	11,65	11,65	11,65	11,65	11,65
Относительное геометр. погруж. смес. a :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. a_0 :	0,388	0,388	0,388	0,388	0,388
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	2,890	3,909	4,610	5,654	7,359
Nf(z) / 1000000:	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
Истинное газосодержание $\varphi(z)$:	0,501	0,578	0,617	0,661	0,712
Nf(z) / 1000000:	513,9	514,0	514,1	514,2	514,3
Re _г / 1000000:	182,6	187,8	191,0	195,3	201,6
w0/w'':	1,030	1,059	1,077	1,101	1,136
б(z)/D:	0,031	0,031	0,032	0,032	0,033
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,291	0,583	0,874	1,165
Средний расход водовозд. смеси $Q_{срi} \cdot 10^3$, м ³ /с:	-----	76,75	80,18	84,50	90,19
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, кВт:	-----	2,193	4,582	7,243	10,30
Мощность комп. потерь на трении $N_{мпi}$, кВт:	-----	0,028	0,063	0,110	0,175
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{ускi}$, кВт:	-----	0,007	0,011	0,018	0,030
Мощность преод. силы тяж ести $N_{гi}$, кВт:	-----	2,485	4,980	7,504	10,10
Мощность потока сжатого воздуха N''_i , кВт:	0,000	2,362	5,124	8,450	12,62
Мощность потока воды N' , кВт:	3,716	3,716	3,716	3,716	3,716
Мощность, подведенная к трубе $N_{подi}$, кВт:	3,716	6,078	8,840	12,16	16,34
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{скi}$, кВт:	3,717	3,885	4,258	4,922	6,037
Ср. плотность по расх. воздухосодерж. $\rho_{ср\beta i}$, кг/м ³ :----		254,5	240,3	225,3	209,5
Ср. плотность по ист. воздухосодерж. $\rho_{ср\phi i}$, кг/м ³ : ----		440,0	422,0	402,3	380,5
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срp i}$, кг/м ³ :	305,1	290,5	275,3	259,4	242,8
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q''_{срi}$, м ³ /мин:4,619		4,952	5,337	5,787	6,319
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{н.м}$, м:	0,350	0,350	0,350	0,350	0,350
Сопrotивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	703,3	703,3	703,3	703,3	703,3
Коеффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{н.м}$:	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
Скорость воды в подающей трубе $w'_{н.м}$, м/с:	1,992	1,992	1,992	1,992	1,992
Поправочный множ. к формуле Шевелева k_i :	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Приложение В – К разделу экспериментального исследования рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы

Приложение В1 - Погрешность измерений расхода воздуха, подачи эрлифта, давления в смесителе, расхода в подающей трубе

Расход сжатого воздуха, измеренный с помощью стандартной диафрагмы, вычисляется по зависимости [128]:

$$Q_s = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_\varphi \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{ном} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (\text{В.1})$$

где Q_s - объемный расход воздуха, приведенный к нормальным условиям ($p_{ном} = 1,0332 \text{ кг/см}^2$ и $T_{ном} = 293,15 \text{ К}$);

α – коэффициент расхода;

ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды (коэффициент расширения);

k_t – поправочный множитель на тепловое расширение материала сужающего устройства;

k_φ – коэффициент коррекции расхода на влажность воздуха;

d_{20} – диаметр отверстия сужающего устройства при температуре 20°C , мм;

$\Delta p'$ - перепад давления на сужающем устройстве, кг/м^2 ;

p – абсолютное давление перед сужающим устройством, кгс/см^2 ;

$\rho_{ном}$ – плотность воздуха при нормальных условиях, $\rho_{ном} = 1,2046 \text{ кг/м}^3$;

T – температура воздуха, К;

K – коэффициент сжатости воздуха.

1. Для измерения расхода сжатого воздуха дополнительного потока использовалась диафрагма со следующими геометрическими параметрами: диаметр отверстия при температуре $t = 20^\circ\text{C}$ $d_{20} = 35$ мм, внутренний диаметр

трубопровода перед диафрагмой при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,453$.

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода сжатого воздуха равна

$$\sigma_{Q_e} = \left[\sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_{k_{\varphi}}^2 + 0,25(\sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_{\rho_{ном}}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_T^2 + \sigma_K^2) \right]^{0,5}, \quad (\text{B.2})$$

где σ_{α} , σ_{ε} , $\sigma_{k_{Re}}$, $\sigma_{k_{\varphi}}$, $\sigma_{\Delta p}$, $\sigma_{\rho_{ном}}$, σ_p , σ_T , σ_K - средне квадратичные относительные погрешности α , ε , k_{Re} , k_{φ} , Δp , $\rho_{ном}$, p , T , K .

Соответственно с [128] составляющие погрешности $\sigma_{d_{20}}^2$ и $\sigma_{k_t}^2$ опущены из-за их малости.

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расхода

$$\sigma_{\alpha} = \left[\sigma_{\alpha'}^2 + \sigma_{k_{и}}^2 + \sigma_{k_n}^2 \right]^{0,5}, \quad (\text{B.3})$$

где для диафрагмы с $m = 0,453$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[(0,5m)^2 + \sigma_{\alpha_d}^2 + \sigma_{\alpha_D}^2 \right]^{0,5}. \quad (\text{B.4})$$

Относительная площадь сужающего устройства

$$m = \left(\frac{d}{D} \right)^2, \quad (\text{B.6})$$

где d – диаметр отверстия диафрагмы при рабочей температуре, мм;

D – внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой при рабочей температуре, мм.

Используется диафрагма с $m = 0,453$.

Погрешности

$$\sigma_{\alpha_d} = 2\sigma_d \left(1 + \frac{m^2}{\alpha} \right), \quad (\text{B.7})$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2\sigma_D \frac{m^2}{\alpha}. \quad (\text{B.8})$$

Согласно [128] при $m \geq 0,4$ значения $\sigma_d = 0,025$ и $\sigma_D = 0,15$.

Для оценки погрешности принимаем расчетное значение коэффициента расхода $\alpha = 0,661$ [36, 38].

Тогда согласно (B.7), (B.8) и (B.5)

$$\sigma_{\alpha_d} = 2 \cdot 0,025 \left(1 + \frac{0,453^2}{0,661} \right) = 0,066,$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2 \cdot 0,15 \frac{0,453^2}{0,661} = 0,093,$$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[(0,5 \cdot 0,453)^2 + 0,066^2 + 0,093^2 \right]^{0,5} = 0,238.$$

Соответственно с [128] для условий проведения эксперимента поправочный множитель на шероховатость трубопровода $k_{ш} = 1$ (используются новые, не бывавшие в эксплуатации с $k = 0,02 \div 0,10$ мм) и поправочный множитель на притупление входной кромки отверстия диафрагмы $k_n = 1$. Тогда погрешности $\sigma_{k_{ш}} = 0$ и $\sigma_{k_n} = 0$.

Таким образом, средняя квадратичная относительная погрешность соответственно с (B3) равна:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha'} = 0,238.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[\sigma_{\chi}^2 + \sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_p^2 \right]^{0,5} + \sigma_0, \quad (\text{B.9})$$

где для диафрагмы с $0,4 < m \leq 0,64$

$$\sigma_0 = 4 \frac{\Delta p}{p}. \quad (\text{B.10})$$

Погрешность определения показателя адиабаты воздуха

$$\sigma_{\chi} = 50 \frac{\Delta K}{K}, \quad (\text{B.11})$$

где ΔK – максимальная абсолютная погрешность величины K (показателя адиабаты), равна половине единицы розряда последней значащей цифры в табличном значении K .

Показатель адиабаты для воздуха $K = 1,400$, тогда $\Delta K = 0,5 \cdot 10^{-4}$ и в соответствии с (B.11)

$$\sigma_{\chi} = 50 \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{1,400} = 0,002.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность дифманометра

$$\sigma_{\Delta p} = 0,5 \frac{\Delta p_{np}}{\Delta p} S_{\Delta p} \quad (\text{B.12})$$

где Δp_{np} - наибольший измеряемый перепад давлений;

Δp - диапазон измеряемых давлений;

$S_{\Delta p}$ - класс точности прибора.

Для U-образного дифманометра, в котором уравновешивающая жидкость вода (наибольший измеряемый перепад давлений 500 мм. вод. ст., цена деления шкалы - 1 мм)

$$S_{\Delta p} = \frac{1}{500} 100 = 0,2.$$

Значения средней квадратичной относительной погрешности дифманометра составляют:

– для U-образного дифманометра при $\Delta p_{np} = 500$ мм. вод. ст. и $\Delta p = 30 \div 120$ мм. вод. ст. согласно (B.12) $\sigma_{\Delta p} = 0,25 \div 1,66$.

Погрешность измерения абсолютного давления

$$\sigma_p = \left[\sigma_{p_0}^2 + \left(\sigma_{p_u} \frac{p_u}{p} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (\text{B.13})$$

Погрешность измерения барометрического давления

$$\sigma_{p_0} = 50 \frac{\Delta p_0}{p}, \quad (\text{B.14})$$

где Δp_0 – максимальная абсолютная погрешность измерения барометрического давления, $\Delta p_0 = 0,5$ мм. рт. ст. = $0,68 \cdot 10^{-3}$ кгс/см²; p – абсолютное давление измеряемой среды, $p = 1,021 \div 1,028$ кгс/см².

Тогда согласно с (B.13) $\sigma_{p_0} = 0,033$.

Погрешность измерения избыточного давления манометром

$$\sigma_{p_u} = 0,5 \frac{p_{np}}{p_u} S_{p_u}, \quad (\text{B.15})$$

где p_{np} – значение верхней границы шкалы измерений манометра, $p_{np} = 0,6$ кгс/см²; p_u – значение измеряемого избыточного давления значения вимірюваного надлишкового тиску, $p_u = 0,1 \div 0,5$ кгс/см²; S_{p_u} – класс точности прибора $S_{p_u} = 1,5$.

Тогда в соответствии с (B.15) $\sigma_{p_u} = 0,9 \div 4,5$.

Из выражения (B.13) погрешность измерения абсолютного давления $\sigma_p = 0,78 \div 0,79$.

Согласно (B.11) $\sigma_\theta = 0,6 \div 2,4$.

Значение коэффициента расширения $\varepsilon = 0,961 \div 0,995$.

Тогда средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды согласно с (B.9) $\sigma_\varepsilon = 0,63 \div 2,49$.

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха

$$\sigma_{k_\varphi} = \left[\left(\frac{1 - k_\varphi}{k_\varphi} \right)^2 (\sigma_\varphi^2 + \sigma_{p_{\text{ен. max}}}^2 + \sigma_p^2) \right]^{0,5}, \quad (\text{B.16})$$

где σ_φ - погрешность определения относительной влажности воздуха,

$$\sigma_\varphi = [\sigma_{p_{\text{ен}}}^2 + \sigma_{p_{\text{ен. max}}}^2]^{0,5}; \quad (\text{B.17})$$

$\sigma_{p_{\text{ен}}}$ - погрешность определения давления водного пара;

$\sigma_{p_{\text{ен. max}}}$ - погрешность определения наибольшего возможного давления водного пара.

Значения

$$\sigma_{p_{\text{ен. max}}} = [\sigma_t^2 + \sigma_{p_{\text{ен}}}^2]^{0,5}. \quad (\text{B.18})$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения температуры атмосферного воздуха

$$\sigma_t = 50 \frac{\Delta t}{t}, \quad (\text{B.19})$$

где t – значение границы шкалы измерения термометра; Δt – максимальная абсолютная погрешность измерения температуры.

Для данного случая $t = 50$ °С, $\Delta t = 0,1$ °С. Тогда

$$\sigma_t = 50 \frac{0,1}{50} = 0,1.$$

Значение

$$\sigma_{p_{\text{ен}}} = 50 \frac{\Delta p_{\text{ен}}}{p_{\text{ен}}}, \quad (\text{B.20})$$

где Δp_{en} – максимальная абсолютная погрешность величины p_{en} , равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении p_{en} .

Для рассматриваемых условий $p_{en} = 0,0200 \div 0,1000$ кгс/см², $\Delta p_{en} = 5 \cdot 10^{-5}$ кгс/см².

Тогда в соответствии с (В.20) $\sigma_{p_{en}} = 0,025 \div 0,125$, и в соответствии с (В.18) $\sigma_{p_{en}.max} = 0,103 \div 0,160$.

Величина погрешности определения относительной влажности воздуха (В.17) $\sigma_{\varphi} = 0,105 \div 0,203$.

Величина коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха $k_{\varphi} = 0,994 \div 0,995$.

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха (В.16) $\sigma_{k_{\varphi}} = 0,003 \div 0,008$.

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольдса

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re})\sigma_{\mu}, \quad (\text{В.21})$$

где σ_{μ} - погрешность определения вязкости измеряемой среды.

Расход воздуха при действительных рабочих параметрах и допущении, что $Re = 10^6$:

$$Q_6^* = 0,2109 \cdot \alpha^* \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_{\varphi} \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{ном} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (\text{В.22})$$

где α^* - значение коэффициента расхода α при $Re = 10^6$.

В соответствии с зависимостью

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \left[0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,1840 \cdot m^4 + 0,0029 \cdot m^{1,25} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} \right] \quad (\text{В.23})$$

при $Re = 10^6$ коэффициент расхода $\alpha^* = 0,661$.

Для расчетов принимаем $d_{20} = 35$ мм; $\varepsilon = 0,995$; $k_t^2 = 1,001$; $k_\varphi = 0,995$;
 $\Delta p' = 120$ кгс/м²; $p = 0,30$ кгс/см²; $\rho_{ном} = 1,2046$ кгс/м³; $T = 378,15$ К; $K = 1,0$;

При принятых значениях переменных $Q_6^* = 48$ м³/ч.

Критерий Рейнольдса при расходе воздуха Q_6^*

$$Re^* = 0,353 \frac{Q_6^* \cdot \rho_{ном}}{D \cdot \mu}, \quad (B.24)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха в рабочих условиях, $\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ кгс/м².

Значение критерия Рейнольдса при расходе воздуха Q_6^*

$$Re^* = 0,353 \frac{48 \cdot 1,2046}{52 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 1,8 \cdot 10^5.$$

Действительное число Рейнольдса

$$Re = \frac{Re^* \cdot C}{\alpha^* \left\{ 1 - S \left[1 - S(1 - S)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}}, \quad (B.25)$$

где вспомогательные величины

$$B = \frac{0,0029m^{1,25}}{\sqrt{1 - m^2}}, \quad (B.26)$$

$$C = \left(0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 \right) \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}, \quad (B.27)$$

$$S_1 = B \frac{Re^*}{\alpha^* \cdot 10^6}, \quad (B.28)$$

$$S_2 = C \frac{Re^*}{\alpha^* \cdot 10^6}, \quad (B.29)$$

$$S = \frac{S_1}{S_2^{1,75}}. \quad (B.30)$$

Результаты расчетов:

$$B = \frac{0,0029 \cdot 0,25^{1,25}}{\sqrt{1 - 0,25^2}} = 0,53 \cdot 10^{-3},$$

$$C = (0,5959 + 0,0312 \cdot 0,25^{1,05} - 0,184 \cdot 0,25^4) \frac{1}{\sqrt{1 - 0,25^2}} = 0,62,$$

$$S_1 = 0,53 \cdot 10^{-3} \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,661 \cdot 10^6} = 0,095 \cdot 10^{-3},$$

$$S_2 = 0,62 \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,661 \cdot 10^6} = 0,17$$

$$S = \frac{0,095 \cdot 10^{-3}}{0,17^{1,75}} = 2,1 \cdot 10^{-3},$$

$$Re = \frac{1,8 \cdot 10^5 \cdot 0,62}{0,661 \left\{ 1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \left[1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \left(1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \right)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}} = 1,69 \cdot 10^5;$$

Коэффициент коррекции на число Рейнольдса

$$k_{Re} = \frac{C + B \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75}}{C + B}, \quad (B.31)$$

$$k_{Re} = \frac{0,62 + 0,53 \cdot 10^{-3} \left(\frac{10^6}{1,69 \cdot 10^5} \right)^{0,75}}{0,62 + 0,53 \cdot 10^{-3}} = 1,002.$$

Тогда средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольда

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re}) \sigma_{\mu} = (1 - 1,004) \sigma_{\mu} = 0.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения температуры

$$\sigma_T = 0,5 \frac{N_T}{273,15 + t} S_t, \quad (B.32)$$

где N_T – диапазон шкалы измерения термометра, $N_T = 100 + 273,15 = 373,15$ К;

S_t – класс точности термометра,

$$S_t = \frac{1}{100} 100 = 1;$$

t – диапазон измеряемых температур, $t = 23 \div 27^\circ\text{C}$.

Тогда в соответствии с (В.32) $\sigma_T = 0,62 \div 0,63$.

Средняя квадратичная относительная погрешность определения плотности сухого воздуха в нормальных условиях

$$\sigma_{\rho_{ном}} = 50 \frac{\Delta\rho_{ном}}{\rho_{ном}}, \quad (\text{В.33})$$

где $\Delta\rho_{ном}$ – максимальная абсолютная погрешность величины $\rho_{ном}$, равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении $\rho_{ном}$, $\Delta\rho_{ном} = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³.

Тогда

$$\sigma_{\rho_{ном}} = 50 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1,2046} = 0,01.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости воздуха

$$\sigma_K = 50 \frac{\Delta K}{K}, \quad (\text{В.34})$$

где ΔK – максимальная абсолютная погрешность величины K , равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении K , $\Delta K = 5 \cdot 10^{-3}$.

Тогда

$$\sigma_K = 50 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 0,25.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода воздуха в соответствии с (В.2) равна:

$$\sigma_{Q_g} = \left\{ 0,238^2 + (0,63 \div 2,49)^2 + 0^2 + (0,003 \div 0,008)^2 + \right. \\ \left. + 0,25 \left[(0,25 \div 1,66)^2 + 0,01^2 + (0,78 \div 0,79)^2 + (0,62 \div 0,63)^2 + 0,25^2 \right] \right\}^{0,5} = \\ = 0,86 \div 2,69.$$

2. Для измерения расхода сжатого воздуха основного потока используется диафрагма со следующими геометрическими параметрами: диаметр отверстия диафрагмы при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ $d_{20} = 26$ мм, внутренний диаметр трубопровода перед диафрагмой при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$ $D_{20} = 52$ мм, относительная площадь сужающего устройства $m = 0,25$

Согласно [128] при $m < 0,4$ значение $\sigma_d = 0,05$ и $\sigma_D = 0,15$.

Для оценки погрешности принимаем расчетное значение коэффициента расхода $\alpha = 0,661$ [36, 38].

Тогда согласно (В.7), (В.8) и (В.5)

$$\sigma_{\alpha_d} = 2 \cdot 0,05 \left(1 + \frac{0,25^2}{0,661} \right) = 0,109,$$

$$\sigma_{\alpha_D} = 2 \cdot 0,15 \frac{0,25^2}{0,661} = 0,028,$$

$$\sigma_{\alpha'} = \left[(0,3)^2 + 0,109^2 + 0,028^2 \right]^{0,5} = 0,32.$$

Таким образом, средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расхода в соответствии с (В.3) равна:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{\alpha'} = 0,32.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[\sigma_{\chi}^2 + \sigma_{\Delta p}^2 + \sigma_p^2 \right]^{0,5} + \sigma_0,$$

где для диафрагм с $m \leq 0,56$

$$\sigma_0 = 2 \frac{\Delta p}{p}.$$

Погрешность определения показателя адиабаты воздуха

$$\sigma_\chi = 50 \frac{\Delta K}{K},$$

где ΔK – максимальная абсолютная погрешность величины K (показателя адиабаты), равна 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 (В.11)

$$\sigma_\chi = 50 \frac{0,5 \cdot 10^{-4}}{1,400} = 0,002.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения дифманометром

$$\sigma_{\Delta p} = 0,5 \frac{\Delta p_{np}}{\Delta p} S_{\Delta p}$$

Для U-образного дифманометра, в котором уравновешивающая жидкость вода (наибольший измеряемый перепад давлений 500 мм. вод. ст., цена деления шкалы - 1 мм)

$$S_{\Delta p} = \frac{1}{500} 100 = 0,2.$$

Значение средней квадратичной относительной погрешности дифманометров составляет:

– для U-образного дифманометра при $\Delta p_{np} = 500$ мм. вод. ст. і $\Delta p = 100 \div 400$ мм. вод. ст. згідно (В.12) $\sigma_{\Delta p} = 0,125 \div 0,5$.

Погрешность измерения абсолютного давления

$$\sigma_p = \left[\sigma_{p_0}^2 + \left(\sigma_{p_u} \frac{p_u}{p} \right)^2 \right]^{0,5}.$$

Погрешность измерения барометрического давления

$$\sigma_{p_0} = 50 \frac{\Delta p_0}{p},$$

где максимальная абсолютная погрешность измерения барометрического давления $\Delta p_0 = 0,5$ мм. рт. ст. $= 0,68 \cdot 10^{-3}$ кгс/см²; абсолютное давление измеряемой среды $p = 1,021 \div 1,028$ кгс/см².

Тогда согласно (В.14) $\sigma_{p_0} = 0,033$.

Погрешность измерения избыточного давления манометром

$$\sigma_{p_u} = 0,5 \frac{p_{np}}{p_u} S_{p_u},$$

где значение верхней границы шкалы измерения термометра $p_{np} = 1,6$ кгс/см²; значение измерения избыточного давления $p_u = 0,1 \div 0,3$ кгс/см²; класс точности прибора $S_{p_u} = 1$.

Тогда согласно (В.15) $\sigma_{p_u} = 2,7 \div 8$.

С выражения (В.13) погрешность измерения абсолютного давления $\sigma_p = 0,78 \div 0,79$.

Согласно (В.11) $\sigma_0 = 0,6 \div 2,4$.

Значение коэффициента расширения $\varepsilon = 0,961 \div 0,995$.

Тогда средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента расширения измеряемой среды в соответствии с (В.9) $\sigma_\varepsilon = 0,63 \div 2,49$.

Средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха

$$\sigma_{k_\varphi} = \left[\left(\frac{1 - k_\varphi}{k_\varphi} \right)^2 (\sigma_\varphi^2 + \sigma_{p_{\text{en.max}}}^2 + \sigma_p^2) \right]^{0,5},$$

где σ_φ - погрешность определения относительной влажности воздуха,

$$\sigma_\varphi = [\sigma_{p_{\text{en}}}^2 + \sigma_{p_{\text{en.max}}}^2]^{0,5};$$

$\sigma_{p_{\text{en}}}$ - погрешность определения давления водного пара;

$\sigma_{p_{\text{en.max}}}$ - погрешность определения наибольшего возможного давления водного пара.

Значения

$$\sigma_{p_{\text{en.max}}} = [\sigma_t^2 + \sigma_{p_{\text{en}}}^2]^{0,5}.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения температуры атмосферного воздуха

$$\sigma_t = 50 \frac{\Delta t}{t},$$

Для данного случая $t = 50$ °С, $\Delta t = 0,1$ °С. Тогда

$$\sigma_t = 50 \frac{0,1}{50} = 0,1.$$

Значение

$$\sigma_{p_{\text{en}}} = 50 \frac{\Delta p_{\text{en}}}{p_{\text{en}}},$$

где Δp_{en} – максимальная абсолютная погрешность величины p_{en} , равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении p_{en} .

Для рассматриваемых условий $p_{\text{вн}} = 0,0200 \div 0,1000$ кгс/см², $\Delta p_{\text{вн}} = 5 \cdot 10^{-5}$ кгс/см².

Тогда в соответствии с (В.20) $\sigma_{p_{\text{вн}}} = 0,025 \div 0,125$, и в соответствии с (В.18) $\sigma_{p_{\text{вн. max}}} = 0,103 \div 0,160$.

Величина погрешности определения относительной влажности воздуха (В.17) $\sigma_{\varphi} = 0,105 \div 0,203$.

Величина коэффициента коррекции рас хода на влажность воздуха $k_{\varphi} = 0,994 \div 0,995$.

Средне квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции расхода на влажность воздуха (В.16) $\sigma_{k_{\varphi}} = 0,003 \div 0,008$.

Средне квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольда

$$\sigma_{k_{\text{Re}}} = (1 - k_{\text{Re}}) \sigma_{\mu},$$

где σ_{μ} - погрешность определения вязкости измеряемой среды.

Расход воздуха при действительных рабочих параметрах и допущении, что $Re = 10^6$:

$$Q_e^* = 0,2109 \cdot \alpha^* \cdot \varepsilon \cdot k_t^2 \cdot k_{\varphi} \cdot d_{20}^2 \sqrt{\frac{\Delta p' \cdot p}{\rho_{\text{ном}} \cdot T \cdot K}}, \text{ м}^3/\text{год},$$

В соответствии с зависимостью

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \left[0,5959 + 0,0312 \cdot m^{1,05} - 0,1840 \cdot m^4 + 0,0029 \cdot m^{1,25} \left(\frac{10^6}{\text{Re}} \right)^{0,75} \right]$$

при $Re = 10^6$ коэффициент расхода $\alpha^* = 0,661$.

Для расчетов принимаем $d_{20} = 26$ мм; $\varepsilon = 0,995$; $k_t^2 = 1,001$; $k_{\varphi} = 0,995$; $\Delta p' = 400$ кгс/м²; $p = 0,30$ кгс/см²; $\rho_{\text{ном}} = 1,2046$ кгс/м³; $T = 378,15$ К; $K = 1,0$;

При принятых значениях переменных $Q_e^* = 48$ м³/ч.

Критерий Рейнольдса при расходе воздуха Q_6^*

$$Re^* = 0,353 \frac{Q_6^* \cdot \rho_{ном}}{D \cdot \mu},$$

где μ – динамическая вязкость воздуха в рабочих условиях, $\mu = 2,2 \cdot 10^{-6}$ кгс/м².

Значения критерия Рейнольдса при расходе воздуха Q_6^*

$$Re^* = 0,353 \frac{48 \cdot 1,2046}{52 \cdot 2,2 \cdot 10^{-6}} = 1,8 \cdot 10^5.$$

Действительное число Рейнольдса

$$Re = \frac{Re^* \cdot C}{\alpha^* \left\{ 1 - S \left[1 - S(1 - S)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}},$$

где вспомогательные величины

$$B = \frac{0,0029 \cdot 0,25^{1,25}}{\sqrt{1 - 0,25^2}} = 0,53 \cdot 10^{-3},$$

$$C = (0,5959 + 0,0312 \cdot 0,25^{1,05} - 0,184 \cdot 0,25^4) \frac{1}{\sqrt{1 - 0,25^2}} = 0,62,$$

$$S_1 = 0,53 \cdot 10^{-3} \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,661 \cdot 10^6} = 0,095 \cdot 10^{-3},$$

$$S_2 = 0,62 \frac{1,8 \cdot 10^5}{0,661 \cdot 10^6} = 0,17$$

$$S = \frac{0,095 \cdot 10^{-3}}{0,17^{1,75}} = 2,1 \cdot 10^{-3},$$

$$Re = \frac{1,8 \cdot 10^5 \cdot 0,62}{0,661 \left\{ 1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \left[1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \left(1 - 2,1 \cdot 10^{-3} \right)^{1,75} \right]^{1,75} \right\}} = 1,69 \cdot 10^5;$$

Коэффициент коррекции на число Рейнольдса

$$k_{Re} = \frac{C + B \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75}}{C + B},$$

$$k_{Re} = \frac{0,62 + 0,53 \cdot 10^{-3} \left(\frac{10^6}{1,69 \cdot 10^5} \right)^{0,75}}{0,62 + 0,53 \cdot 10^{-3}} = 1,002.$$

Тогда средняя квадратичная относительная погрешность коэффициента коррекции на число Рейнольда

$$\sigma_{k_{Re}} = (1 - k_{Re}) \sigma_{\mu} = (1 - 1,002) \sigma_{\mu} = 0.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения температуры

$$\sigma_T = 0,5 \frac{N_T}{273,15 + t} S_t,$$

где $N_T = 100 + 273,15 = 373,15$ К; класс точности термометра

$$S_t = \frac{1}{100} 100 = 1;$$

Диапазон измеряемых температур, $t = 23 \div 27$ °С.

Тогда в соответствии с (В.32) $\sigma_T = 0,62 \div 0,63$.

Средняя квадратичная относительная погрешность определения плотности сухого воздуха в нормальных условиях

$$\sigma_{\rho_{ном}} = 50 \frac{\Delta \rho_{ном}}{\rho_{ном}},$$

где $\Delta \rho_{ном}$ - максимальная абсолютная погрешность величины $\rho_{ном}$, равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении $\rho_{ном}$, $\Delta \rho_{ном} = 5 \cdot 10^{-5}$ кг/м³.

Тогда

$$\sigma_{\rho_{ном}} = 50 \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1,2046} = 0,01.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность определения коэффициента сжимаемости воздуха

$$\sigma_K = 50 \frac{\Delta K}{K},$$

где ΔK - максимальная абсолютная погрешность величины K , равна половине единицы разряда последней значащей цифры в табличном значении K , $\Delta K = 5 \cdot 10^{-3}$.

Тогда

$$\sigma_K = 50 \frac{5 \cdot 10^{-3}}{1,00} = 0,25.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность измерения расхода воздуха в соответствии с (В.2) равна:

$$\sigma_{Q_6} = \left\{ 0,238^2 + (0,63 \div 2,49)^2 + 0^2 + (0,003 \div 0,008)^2 + \right. \\ \left. + 0,25 \left[(0,25 \div 1,66)^2 + 0,01^2 + (0,78 \div 0,79)^2 + (0,62 + 0,63)^2 + 0,25^2 \right] \right\}^{0,5} = \\ = 0,86 \div 2,69.$$

Средняя квадратичная относительная погрешность определения геометрического напора жидкости над водосливом H

$$\sigma_H = 100 \frac{\Delta H}{H},$$

где ΔH - максимальная абсолютная погрешность величины H ; H – значение границы шкалы измерения пьезометра.

В данном случае $\Delta H = 0,5$ мм, $H = 100$ мм.

$$\sigma_H = 100 \frac{0,5}{100} = 0,5$$

Погрешность измерения давления в смесителе манометром

$$\sigma_{p_u} = 0,5 \frac{p_{np}}{p_u} S_{p_u},$$

где p_{np} – значение верхней границы шкалы измерения манометра, $p_{np} = 1,0$ кгс/см²; p_u – значение измеряемого избыточного давления, $p_u = 0,15 \div 0,2$ кгс/см²; S_{p_u} – класс точности прибора, $S_{p_u} = 1,5$.

$$\sigma_{p_u} = 3,75 \div 5.$$

Согласно [127] погрешность измерения расхода жидкости ультразвуковым расходомером «Эргомера 120-Н2» не превышает 2%.

Приложение В2- Протоколы экспериментальных исследований работы эрлифта с подъемной трубой
диаметром $D = 68$ мм и длиной $H+h = 5$ м, геометрическое погружение смесителя $h = 2$ м

Протокол №1													
15 мая 2012 г.													
Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.													
Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 52$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Геометрическое погружение смесителя $h = 2$ мм.													
Барометрическое давление $p_0 = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 40\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 23$ °С.													
№ п/п	Подача эрлифта		Расход воздуха основной			Расход воздуха дополнительный							
	Уровень жидкости перед треугольным водосливом, мм	Расход техничес кой воды, м ³ /с	Давление в смесителе (изб.), кгс/см ²	Расход в подающей трубе, м ³ /с	Дополнительный приток, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диа- фрагмой (изб.), кгс/см ²	Температ ура воз- духа перед диа- фрагмой, °С	Расход воз- духа, м ³ /с	Перепад давлений на диафрагме, мм. вод. ст.	Давление воздуха перед диа- фрагмой (изб.), кгс/см ²	Темпера тура воз- духа перед диафраг мой, °С	Расход воздуха , м ³ /с
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	41	0,00047	0,200	-	-	4	0,195	23	0,0030	-	-	-	-
	48	0,00072	0,190	-	-	5	0,205	23	0,0035	-	-	-	-
	63	0,00138	0,165	-	-	34	0,302	23	0,0090	-	-	-	-
	72	0,00197	0,160	-	-	43	0,320	23	0,0100	-	-	-	-
	76	0,00219	0,160	-	-	91	0,382	23	0,0147	-	-	-	-
	77	0,00231	0,150	-	-	112	0,416	23	0,0162	-	-	-	-
	76	0,00219	0,150	-	-	107	0,416	23	0,0158	-	-	-	-
Протокол №2													
17 мая 2012 г., $H+h=5$ м, $h=2$ м, $D = 68$ мм, $d = 52$ мм, $p_0 = 740$ мм. рт. ст, $t_a = 22$ °С, $\varphi = 40\%$.													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	38	0,00039	0,200	-	-	2	0,192	22	0,0025	-	-	-	-
2	44	0,00058	0,195	-	-	9	0,211	22	0,0045	-	-	-	-
3	67	0,00161	0,155	-	-	33	0,301	22	0,0093	-	-	-	-
4	74	0,00211	0,165	-	-	56	0,333	22	0,0112	-	-	-	-

5	75	0,00214	0,160	-	-	86	0,371	22	0,0145	-	-	-	-
6	75	0,00214	0,155	-	-	106	0,402	22	0,0157	-	-	-	-
7	73	0,00203	0,160	-	-	111	0,429	22	0,0160	-	-	-	-
Протокол №3													
17 мая 2012 г., Н+h=5 м, h=2 м, D = 68 мм, d = 52 мм, p _б = 740 мм. рт. ст, t _a = 22 °С, φ = 40%													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	49	0,00075	0,190	-	-	7	0,205	22	0,0042	-	-	-	-
2	39	0,00042	0,200	-	-	3	0,192	22	0,0027	-	-	-	-
3	69	0,00178	0,165	-	-	32	0,294	22	0,0087	-	-	-	-
4	73	0,00203	0,160	-	-	46	0,320	22	0,0103	-	-	-	-
5	74	0,00208	0,155	-	-	78	0,371	22	0,0135	-	-	-	-
6	74	0,00208	0,160	-	-	110	0,416	22	0,0162	-	-	-	-
7	75	0,00214	0,160	-	-	108	0,462	22	0,0158	-	-	-	-
Протокол №4													
18 мая 2012 г., Н+h=5 м, h=2 м, D = 68 мм, d = 52 мм, p _б = 740 мм. рт. ст, t _a = 23 °С, φ = 40%													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	36	0,00033	0,200	-	-	1,5	0,192	23	0,0020	-	-	-	-
2	68	0,00167	0,160	-	-	30	0,275	23	0,0083	-	-	-	-
3	76	0,00222	0,160	-	-	54	0,288	23	0,0113	-	-	-	-
4	83	0,00197	0,150	-	-	80	0,357	23	0,0140	-	-	-	-
5	74	0,00206	0,145	-	-	108	0,402	23	0,0158	-	-	-	-
6	75	0,00219	0,150	-	-	112	0,416	23	0,0163	-	-	-	-
7	46	0,00064	0,195	-	-	6	0,198	23	0,0038	-	-	-	-
Протокол №5													
18 мая 2012 г., Н+h=5 м, h=2 м, D = 68 мм, d = 52 мм, p _б = 740 мм. рт. ст, t _a = 23 °С, φ = 40%													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	33	0,00028	0,200	-	-	2	0,192	23	0,0025	-	-	-	-
2	69	0,00175	0,160	-	-	33	0,288	23	0,0092	-	-	-	-
3	74	0,00211	0,160	-	-	47	0,377	23	0,0105	-	-	-	-
4	73	0,00206	0,150	-	-	84	0,352	23	0,0143	-	-	-	-
5	75	0,00217	0,145	-	-	112	0,460	23	0,0163	-	-	-	-
6	76	0,00225	0,150	-	-	99	0,397	23	0,0153	-	-	-	-

7	44	0,00056	0,195	-	-	4	0,211	23	0,0033	-	-	-	-
Протокол №6													
4 июня 2012 г.													
Объект исследования – эрлифт. Рабочее тело – сжатый воздух.													
Диаметр подъемной трубы $D = 68$ мм. Диаметр подающей трубы $d = 52$ мм. Длина подъемной трубы $H+h = 5$ м. Геометрическое погружение смесителя $h = 2$ м. Координата подвода дополнительных притока воды и расхода воздуха от уровня смесителя $z_j = 0$ м.													
Барометрическое давление $p_{\sigma} = 740$ мм. рт. ст. Относительная влажность $\varphi = 60\%$. Температура атмосферного воздуха $t_a = 26$ °С.													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	53	0,00089	0,195	0,00089	0	4	0,333	23	0,0033	-	-	-	-
2	69	0,00175	0,190	0,00175	0	10	0,320	23	0,0048	-	-	-	-
3	76	0,00225	0,190	0,00169	0,00056	19	0,288	23	0,0067	-	-	-	-
4	77	0,00228	0,190	0,00161	0,00067	32	0,256	23	0,0088	-	-	-	-
5	83	0,00281	0,185	0,00172	0,00108	83	0,205	23	0,0140	-	-	-	-
6	83	0,00281	0,190	0,00156	0,00125	98	0,192	23	0,0151	-	-	-	-
7	84	0,00286	0,185	0,00167	0,00119	90	0,192	23	0,0150	-	-	-	-
Протокол №7													
6 июня 2012 г., $H+h=5$ м, $h=2$ м, $D = 68$ мм, $d = 52$ мм, $z_j = 0,5$ м, $p_{\sigma} = 740$ мм. рт. ст, $t_a = 26$ °С													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	42	0,0005	0,195	0,0005	0	3	0,448	23	0,0028	0	0,448	23	0
2	68	0,0018	0,190	0,0018	0	13	0,378	23	0,0058	0	0,378	23	0
3	72	0,0019	0,190	0,0019	0	14	0,339	23	0,0062	0	0,339	23	0
4	83	0,0028	0,185	0,0016	0,0012	13	0,224	23	0,0058	5	0,224	23	0,0077
5	78	0,0024	0,190	0,0017	0,00056	14	0,243	23	0,0065	3	0,243	23	0,0050
6	84	0,00283	0,185	0,0017	0,00117	12	0,250	23	0,0055	11	0,250	23	0,0097
7	81	0,0026	0,190	0,0017	0,00064	14	0,205	23	0,0063	10	0,205	23	0,0095
Протокол №8													
7 июня 2012 г., $H+h=5$ м, $h=2$ м, $D = 68$ мм, $d = 52$ мм, $z_j = 1$ м, $p_{\sigma} = 740$ мм. рт. ст, $t_a = 26$ °С													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

1	47	0,00067	0,195	0,00067	0	4	0,397	26	0,0033	0	0,397	26	0
2	48	0,00069	0,190	0,00069	0	4	0,397	26	0,0035	0	0,397	26	0
3	68	0,00169	0,180	0,00169	0	17	0,346	26	0,0067	0	0,346	26	0
4	73	0,00200	0,180	0,00144	0,00056	11	0,326	26	0,0053	1	0,326	26	0,00317
5	81	0,00261	0,175	0,00172	0,00092	20	0,256	26	0,0070	4	0,256	26	0,00633
6	80	0,00256	0,175	0,00156	0,00100	17	0,230	26	0,0063	12	0,230	26	0,0089
7	77	0,00231	0,180	0,00167	0,00064	20	0,224	26	0,0068	2	0,224	26	0,0045
8	79	0,00250	0,180	0,00178	0,00100	23	0,198	26	0,0075	10	0,198	26	0,0082

Протокол №9

14 июня 2012 г., $H+h=5$ м, $h=2$ м, $D = 68$ мм, $d = 52$ мм, подвод дополнительного притока воды в $z_j = 1$ м, воздуха в - $z_j = 0,5$ м, $p_6 = 742$ мм. рт.

ст, $t_a = 25$ °С

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	52	0,00089	0,195	0,00089	0	4	0,416	25	0,0033	0	0,416	25	0
2	68	0,00167	0,190	0,00167	0	12	0,320	25	0,0052	0	0,320	25	0
3	80	0,00250	0,180	0,00161	0,00089	11	0,243	25	0,0047	2	0,243	25	0,0043
4	78	0,00240	0,180	0,00172	0,00069	12	0,237	25	0,0055	3	0,237	25	0,0048
5	77	0,00236	0,180	0,00183	0,00053	11	0,211	25	0,0058	8	0,211	25	0,0082
6	81	0,00264	0,180	0,00167	0,00097	10	0,192	25	0,0053	11	0,192	25	0,0097
7	82	0,00270	0,180	0,00161	0,00108	9	0,205	25	0,0048	13	0,205	25	0,0108

Приложение В3 – Результаты расчета эрлифта ($H+h=5$ м, $h=2$ м, $l_{n.m} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м)

Таблица В3.1 - Результаты расчета эрлифта традиционной схемы

Расчет от 25.07.2012 г. 12:00:54 – вариант Б

=====
 Параметры:
 =====

Касат. напряжения и коэф-ты сопротивл. по формулам: Уоллиса Г. [118]
 Истинное газосодержание по формулам: Уоллиса Г. (учет поправки.) [118]
 Расчет газосодержания по: формулам № 1
 Вид процесса изменения состояния воздуха: изотермический
 Подающая труба: короткая труба
 =====

Исходные данные:
 =====

Плотность воды ρ' , кг/м³..... 1000
 Плотность воздуха при нормальных условиях ρ_0'' , кг/м³1,2
 Атмосферное давление p_0 , Па..... 98100
 Динамическая вязкость воды μ' , Пас..... 0,001
 Динамическая вязкость воздуха μ'' , Пас..... 1,79E-5
 Коэффициент поверхностного натяжения σ , Н/м..... 0,0723
 Показатель политропы n 1
 Показатель степени в формуле Арманда 1,53
 Расход воздуха при нормальных условиях Q_v , м³/мин..... 0 - 1 - 0,1
 Длина подъемной трубы $H+h$, м..... 5
 Диаметр подъемной трубы D , м..... 0,068
 Эквивалентная шероховатость трубы Δ_s , м..... 0,0002
 Ускорение свободного падения d , м..... 9,81
 Относительная длина жидкой пробки D/L , м..... 2
 Геометрическое погружение смесителя h , м..... 2
 Диаметр подающей трубы d , м..... 0,052
 Длина подающей трубы l , м..... 2
 Коэффициент расхода подающей трубы $\mu_{n.m}$ 0,76
 Сумма коэф-тов местных сопротивлений подающей трубы $\sum \zeta_{n.m}$ 5,4
 =====

Qv = 0,000 м³/мин: нет реш.

 Qv = 0,100 м³/мин: нет реш.

 Qv = 0,200 м³/мин: Qe = 0,000767 м³/с (2,761 м³/ч)

Значения z, м:	0,000	1,250	2,500	3,750	5,000
Давление $p_a(z)$ в сечении z, кг/см ² :	1,195	1,146	1,098	1,049	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	1,434	1,376	1,317	1,259	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	400,2	390,8	381,1	371,1	360,7
Объемное расходное воздухо содержание $\beta(z)$:	0,784	0,791	0,798	0,806	0,813
Массовое расходное воздухо содержание x :	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Пас:	0,778	0,778	0,778	0,778	0,778
Площадь сечения трубы $\omega \cdot 10^3$, м ² :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	0,979	1,012	1,047	1,086	1,129
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	0,211	0,211	0,211	0,211	0,211
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	0,768	0,801	0,836	0,875	0,918
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	0,529	0,541	0,555	0,570	0,587
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	1,279	1,313	1,350	1,390	1,434
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	34,23	34,55	34,87	35,22	35,58
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² с:	212,3	212,3	212,3	212,3	212,3
Давление, обусл. трением $p_{тр} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	1,067	2,180	3,344	4,562
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} \cdot 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,028	0,058	0,091	0,126

Давление, обусл. силой тяжести $p_{gi}10^3, \text{кг/см}^2$:	0,000	49,44	97,70	144,7	190,4
Давление (сумма) $p_{\Sigma}10^3, \text{кг/см}^2$:	0,000	50,54	99,94	148,1	195,1
Полный напор воды в смесителе $H_{см}, \text{м}$:	1,951	1,951	1,951	1,951	1,951
Относительное geometr. погруж. смес. α :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. α_0 :	0,390	0,390	0,390	0,390	0,390
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z), \text{Па}$:	1,395	1,453	1,517	1,588	1,665
$Nf(z) / 1000000$:	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
Истинное газосодержание $\varphi(z)$:	0,601	0,610	0,620	0,630	0,640
$Nf(z) / 1000000$:	55,49	55,50	55,50	55,50	55,50
$Re_{\Gamma} / 1000000$:	20,38	20,47	20,56	20,66	20,76
$w0/w''$:	1,065	1,069	1,074	1,079	1,084
$b(z)/D$:	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Суммарный перепад давления, кг/см^2 :	0,000	0,049	0,098	0,146	0,195
Средний расход водовозд. смеси $Q_{срi} \cdot 10^3, \text{м}^3/\text{с}$:	-----	1,949	1,973	1,999	2,026
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}, \text{кВт}$:	-----	0,009	0,019	0,029	0,039
Мощность комп. потерь на трение $N_{mpi}, \text{кВт}$:	-----	0,000	0,000	0,001	0,001
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{уски}, \text{кВт}$:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести $N_{gi}, \text{кВт}$:	-----	0,009	0,019	0,028	0,038
Мощность потока сжатого воздуха $N_i'', \text{кВт}$:	0,000	0,014	0,028	0,043	0,058
Мощность потока воды $N', \text{кВт}$:	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Мощность, подведенная к трубе $N_{ноdi}, \text{кВт}$:	0,015	0,028	0,043	0,057	0,073
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ски}, \text{кВт}$:	0,016	0,019	0,024	0,029	0,034
Ср. плотность по расх. воздухосодерж. $\rho_{ср\beta i}, \text{кг/м}^3$:----		213,3	209,7	206,2	202,5
Ср. плотность по ист. воздухосодерж. $\rho_{ср\phi i}, \text{кг/м}^3$:-----		395,5	390,8	385,9	380,9
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срp i}, \text{кг/м}^3$:	216,8	213,3	209,8	206,2	202,6
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q_{срi}'', \text{м}^3/\text{мин}$:0,167		0,171	0,174	0,178	0,182
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}, \text{м}$:	0,049	0,049	0,049	0,049	0,049
Соппротивление подающей трубы $A, \text{с}^2/\text{м}^5$:	88835	88835	88835	88835	88835
Коэффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,064	0,064	0,064	0,064	0,064
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}, \text{м/с}$:	0,348	0,348	0,348	0,348	0,348
Поправочный множ. к формуле Шевелова k_I :	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248

Таблица В3.2 - Результаты расчета эрлифта с подводом дополнительного притока в сечение $z_j = 0 \text{ м}$

=====
Параметры:
=====

Касат. напряжения и коэф-ты сопротивл. по формулам: Уоллиса Г. [118]
Истинное газосодержание по формулам: Уоллиса Г. (учет поправки.) [118]
Расчет газосодержания по: формулам № 1
Вид процесса изменения состояния воздуха: изотермический
Подающая труба: короткая труба
=====

Исходные данные:
=====

Плотность воды $\rho', \text{кг/м}^3$	1000
Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_0'', \text{кг/м}^3$	1,2
Атмосферное давление $p_0, \text{Па}$	98100
Динамическая вязкость воды $\mu', \text{Пас}$	0,001
Динамическая вязкость воздуха $\mu'', \text{Пас}$	1,79E-5
Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma, \text{Н/м}$	0,0723
Показатель политропы n	1
Показатель степени в формуле Арманда.....	1,53
Длина подъемной трубы $H+h, \text{м}$	5
Диаметр подъемной трубы $D, \text{м}$	0,068
Эквивалентная шероховатость трубы $\Delta, \text{м}$	0,0002

Ускорение свободного падения $g, м$	9,81
Относительная длина жидкой пробки $D/L, м$2
Верт. координата подвода доп. притока $z_j, м$	0
Приток, подводимый в зумпф $Q_{np1}, м^3/ч$	4,66
Приток, подводимый в промежуточное сечение подъемной трубы $Q_{np2}, м^3/ч$	0 - 5,86
Геометрическое погружение смесителя $h, м$	2
Диаметр подающей трубы $d, м$	0,052
Длина подающей трубы $l, м$	2
Коэффициент расхода подающей трубы $\mu_{n,m}$	0,76
Сумма коэф-тов местных сопротивлений подающей трубы $\sum \zeta_{n,m}$	5,4

Qв1 = 0,300000 м³/мин, Qв2 = 0,000000 м³/мин: Qnp1 = 0,001297 м³/с (4,668 м³/ч)

Значения $z, м$:	0,000	1,250	2,500	3,750	5,000
Давление $p_d(z)$ в сечении $z, кг/см^2$:	1,185	1,139	1,093	1,046	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z), кг/м^3$:	1,422	1,367	1,311	1,256	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z), кг/м^3$:	368,5	359,7	350,7	341,4	331,9
Объемное расходное воздухосодержание $\beta(z)$:	0,765	0,772	0,779	0,787	0,794
Массовое расходное воздухосодержание x :	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3, Па \cdot с$:	0,798	0,798	0,798	0,798	0,798
Площадь сечения трубы $\omega 10^3, м^2$:	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z), м/с$:	1,518	1,566	1,617	1,673	1,734
Приведенная скорость воды $w'_0, м/с$:	0,357	0,357	0,357	0,357	0,357
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z), м/с$:	1,161	1,209	1,260	1,316	1,377
Истинная скорость воды $w'(z), м/с$:	0,971	0,995	1,020	1,048	1,078
Истинная скорость воздуха $w''(z), м/с$:	1,837	1,885	1,938	1,996	2,058
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	47,66	47,98	48,31	48,66	49,02
Приведенная массовая скорость смеси $G, кг/м^2 \cdot с$:	358,6	358,6	358,6	358,6	358,6
Давление, обусл. трением $p_{мп1} 10^3, кг/см^2$:	0,000	2,287	4,662	7,133	9,708
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} 10^3, кг/см^2$:	0,000	0,087	0,181	0,282	0,393
Давление, обусл. силой тяжести $p_{gi} 10^3, кг/см^2$:	0,000	45,52	89,92	133,1	175,2
Давление (сумма) $p_{\Sigma} 10^3, кг/см^2$:	0,000	47,89	94,77	140,6	185,3
Полный напор воды в смесителе $H_{см}, м$:	1,854	1,854	1,854	1,854	1,854
Относительное геометр. погруж. смес. a :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. a_0 :	0,371	0,371	0,371	0,371	0,371
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z), Па$:	2,996	3,108	3,230	3,364	3,510
$Nf(z) / 1000000$:	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Истинное газосодержание $\phi(z)$:	0,632	0,641	0,650	0,659	0,669
$Nf(z) / 1000000$:	55,49	55,50	55,50	55,50	55,51
$Re_{г} / 1000000$:	21,64	21,74	21,85	21,96	22,08
$w0/w''$:	1,131	1,136	1,141	1,147	1,153
$\beta(z)/D$:	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Суммарный перепад давления, $кг/см^2$:	0,000	0,046	0,093	0,139	0,185
Средний расход водовозд. смеси $Q_{ср1} \cdot 10^3, м^3/с$:	-----	3,577	3,622	3,669	3,719
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}, кВт$:	-----	0,016	0,033	0,050	0,068
Мощность комп. потерь на трении $N_{мп1}, кВт$:	-----	0,001	0,002	0,003	0,004
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{уск1}, кВт$:	-----	0,000	0,000	0,000	0,000
Мощность преод. силы тяжести $N_{gi}, кВт$:	-----	0,016	0,032	0,048	0,064
Мощность потока сжатого воздуха $N''_i, кВт$:	0,000	0,020	0,040	0,061	0,083
Мощность потока воды $N', кВт$:	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
Мощность, подведенная к трубе $N_{под1}, кВт$:	0,022	0,041	0,062	0,083	0,105
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ск1}, кВт$:	0,023	0,025	0,029	0,033	0,038
Ср. плотность по расх. воздухосодерж. $\rho_{ср\beta i}, кг/м^3$ -----		232,6	229,0	225,4	221,7
Ср. плотность по ист. воздухосодерж. $\rho_{ср\phi i}, кг/м^3$ -----		364,1	359,7	355,1	350,5
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{ср p i}, кг/м^3$:	236,2	232,6	229,0	225,4	221,8
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q_{ср1}'' , м^3/мин$: 0,253		0,258	0,263	0,269	0,275
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}, м$:	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146
Сопротивление подающей трубы $A, с^2/м^5$:	85616	85616	85616	85616	85616
Коэффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}, м/с$:	0,615	0,615	0,615	0,615	0,615
Поправочный множ. к формуле Шувелова k_l :	1,103	1,103	1,103	1,103	1,103

Qв1 = 0,300 м³/мин, Qв2 = 0,100 м³/мин: Qnp1 = 0,001297 м³/с (4,668 м³/ч); Qnp2 = 0,000532 м³/с(1,916 м³/ч)

Значения z, м:	0,000	1,250	2,500	3,750	5,000
Давление $p_d(z)$ в сечении z, кг/см ² :	1,186	1,139	1,093	1,046	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	1,423	1,367	1,311	1,256	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	416,5	343,0	334,2	325,0	315,6
Объемное расходное воздуходождение $\beta(z)$:	0,698	0,762	0,769	0,777	0,785
Массовое расходное воздуходождение x:	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Пас:	0,848	0,807	0,807	0,807	0,807
Площадь сечения трубы $\omega 10^3$, м ² :	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	1,665	2,115	2,183	2,258	2,339
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	0,504	0,504	0,504	0,504	0,504
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	1,161	1,611	1,680	1,754	1,836
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	1,211	1,472	1,511	1,553	1,599
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	1,987	2,450	2,520	2,596	2,679
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	55,61	61,13	61,47	61,84	62,21
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² с:	505,2	505,7	505,7	505,7	505,7
Давление, обусл. трением $p_{мп} 10^3$, кг/см ² :	0,000	3,910	7,965	12,17	16,56
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} 10^3$, кг/см ² :	0,000	1,357	1,559	1,779	2,018
Давление, обусл. силой тяжести $p_{г} 10^3$, кг/см ² :	0,000	43,42	85,76	126,9	167,0
Давление (сумма) $p_{\Sigma} 10^3$, кг/см ² :	0,000	48,69	95,28	140,9	185,6
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	1,856	1,856	1,856	1,856	1,856
Относительное geometr. погруж. смес. α :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. α_0 :	0,371	0,371	0,371	0,371	0,371
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	4,024	5,311	5,511	5,730	5,971
Nf(z) / 1000000:	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
Истинное газосодержание $\phi(z)$:	0,584	0,658	0,667	0,676	0,685
Nf(z) / 1000000:	55,49	55,50	55,50	55,50	55,50
Re _г / 1000000:	21,94	22,76	22,88	23,00	23,13
w0/w'':	1,146	1,189	1,195	1,201	1,208
b(z)/D:	0,033	0,034	0,034	0,034	0,034
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,046	0,093	0,139	0,186
Средний расход водовозд. смеси $Q_{ср} \cdot 10^3$, м ³ /с:	-----	5,287	5,355	5,428	5,504
Суммарная мощность N_{Σ} , кВт:	-----	0,024	0,049	0,074	0,100
Мощность комп. потерь на трение $N_{мп}$, кВт:	-----	0,002	0,004	0,006	0,009
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{уск}$, кВт:	-----	0,001	0,001	0,001	0,001
Мощность преод. силы тяжести $N_{г}$, кВт:	-----	0,023	0,045	0,068	0,090
Мощность потока сжатого воздуха N''_i , кВт:	0,000	0,020	0,040	0,061	0,084
Мощность потока воды N' , кВт:	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
Мощность, подведенная к трубе $N_{под}$, кВт:	0,031	0,050	0,071	0,092	0,114
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ск}$, кВт:	0,032	0,026	0,022	0,018	0,014
Ср. плотность по расх. воздуходоерж. $\rho_{ср\beta}$, кг/м ³ :----		242,8	239,1	235,3	231,5
Ср. плотность по ист. воздуходоерж. $\rho_{ср\phi}$, кг/м ³ :----		347,4	343,0	338,5	334,0
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срp}$, кг/м ³ : 303,4		299,3	295,0	290,8	286,5
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q''_{ср}$, м ³ /мин:0,253		0,258	0,263	0,269	0,275
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{н.м}$, м:	0,144	0,144	0,144	0,144	0,144
Соппротивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	85648	85648	85648	85648	85648
Кoeffициент соппротивления под. трубы $\lambda_{н.м}$:	0,057	0,057	0,057	0,057	0,057
Скорость воды в подающей трубе $w'_{н.м}$, м/с:	0,611	0,611	0,611	0,611	0,611
Поправочный множ. к формуле Шевелова k_l :	1,105	1,105	1,105	1,105	1,105

Приложение В4 - Обработка экспериментальных данных

Таблица В4.1 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта ($H+h=5$ м, $h=2$ м, $l_{n.m}=2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $\rho_{см} = 0,190$ кгс/см²) с вводом дополнительного притока в смеситель

Расход сжатого воздуха $Q_в$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_э$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ /ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
0,198	3,2; 3; 3,4; 3,3,3,2	3,22	0,150	0,023	2,95÷3,45
0,288	6,3; 6,3; 6,1; 6,5; 6,2	6,28	0,148	0,022	6,03÷6,53
0,402	7,9; 8,1; 8,2; 8,2; 8	8,08	0,130	0,017	7,86÷8,29
0,528	8,1;8,2; 8,3; 8,2; 8,4	8,24	0,114	0,013	8,05÷8,43
0,840	10,1; 9,8; 10; 10,3; 10,2	10,1	0,194	0,038	9,78÷10,4
0,906	10,1; 10,2; 10,1; 10,2; 10	10,1	0,087	0,0075	9,96÷10,2
0,900	10,3; 10,5; 10,1; 10,8; 10,1	10,4	0,300	0,09	9,90÷10,9

Расчетный критерий Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{макс}^2}{S_{мин}^2},$$

$$F_{расч} = \frac{0,038}{0,0075} = 5,1.$$

Табличное значение критерия Фишера [132] по степеням свободы $f_{макс} = n_{макс} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{мин} = n_{мин} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{табл} = 6,39$.

При условии $F_{табл} > F_{расч}$, которое выполняется ($6,39 > 5,1$), сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{св}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{св}^2 = \frac{0,023 \cdot 4 + 0,022 \cdot 4 + 0,017 \cdot 4 + 0,013 \cdot 4 + 0,038 \cdot 4 + 0,0075 \cdot 4 + 0,09 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} =$$

$$= 0,03 \text{ м}^6/\text{ч}^2$$

Уравнения регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов с суммарным отклонением 0,94%

$$Q_3 = 20,02 - 1,996Q_6 + 1,694Q_6^3 + 2,779Q_6^4 - 2,648/Q_6 -$$

$$- 0,467 \ln(Q_6) - 8,52Q_6^{1/2}$$

Расчетные значения подачи эрлифта Q_3 и ее отклонения от экспериментальных данных приведены в таблице В4.2.

При этом среднее отклонение расчетных данных от экспериментальных составило

$$\Delta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,2 + 12,5 + 5,4 + 10 + 9}{5} = 9\%$$

Таблица В4.2 - Расчетные данные подачи эрлифта при подводе дополнительного притока воды в смеситель

Расход сжатого воздуха Q_v , м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_э$, м ³ /ч	Отклонение расчетных данных от экспериментальных Δ , %
0,30	5,6	8,20
0,40	7,2	12,5
0,6	9,8	5,40
0,8	11	10,0
0,9	11,1	9,00

1. Эрлифт с подводом дополнительного притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5$ м ($\bar{z}_j = 0,1$)

Расчетный критерий Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{макс}^2}{S_{мин}^2},$$

$$F_{расч} = \frac{0,078}{0,038} = 2,05.$$

Табличное значение критерия Фишера [132] по степеням свободы $f_{макс} = n_{макс} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{мин} = n_{мин} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{табл} = 6,39$.

При условии $F_{табл} > F_{расч}$, которое выполняется ($6,39 > 2,05$), сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{св}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{св}^2 = \frac{0,038 \cdot 4 + 0,058 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,078 \cdot 4 + 0,073 \cdot 4 + 0,058 \cdot 4 + 0,068 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} =$$

$$= 0,06 \text{ м}^6/\text{ч}^2$$

Таблица В4.3 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта ($H+h=5$ м, $h=2$ м, $l_{n.m}=2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $p_{см} = 0,185$ кгс/см²) с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5$ м ($\bar{z}_j = 0,1$)

Расход сжатого воздуха $Q_{в}$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э}$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ /ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
0,168	1,8; 1,5; 1,6; 1,8; 2	1,74	0,195	0,038	1,41÷2,07
0,348	6,5; 6,2; 6,8; 6,3; 6,6	6,50	0,240	0,058	6,10÷6,90
0,372	6,8; 6,9; 6,5; 7,1; 6,7	6,80	0,224	0,050	6,40÷7,20
0,810	10,1; 9,8; 10,3; 9,8; 10,4	10,1	0,278	0,078	9,60÷10,6
0,690	8,6; 8,9; 8,5; 8,3; 8,5	8,60	0,269	0,073	8,15÷9,05
0,912	10,2; 10; 10,5; 9,9; 10,3	10,2	0,240	0,058	9,80÷10,6
0,950	9,4; 9,3; 9,8; 9,1; 9,3	9,40	0,260	0,068	8,97÷9,83

Уравнения регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов с суммарным отклонением 1,60%

$$Q_9 = 10,22 - 0,2803Q_6 + 1,568Q_6^2 + 5,997Q_6^3 - 6,32Q_6^4 - 1,42 / Q_6.$$

Расчетные значения подачи эрлифта Q_9 и ее отклонения от экспериментальных данных приведены в таблице В4.4.

Таблица В4.4 - Расчетные данные подачи эрлифта с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5$ м ($\bar{z}_j = 0,1$)

Расход сжатого воздуха Q_6 , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_9 , м ³ /ч	Отклонение расчетных данных от экспериментальных Δ , %
0,3	5,2	6,1
0,4	4,8	2,0
0,6	9,6	5,5
0,8	10,4	9,5
0,9	10,3	8,4

Среднее отклонение составило

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,4 + 9,5 + 5,5 + 2 + 6,1}{5} = 6,3\%$$

2. Эрлифт с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 1$ м ($\bar{z}_j = 0,2$)

Расчетный критерий Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{макс}^2}{S_{мин}^2},$$

$$F_{расч} = \frac{0,125}{0,023} = 5,43.$$

Табличное значение критерия Фишера [132] по степеням свободы $f_{макс} = n_{макс} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{мин} = n_{мин} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{табл} = 6,39$.

При условии $F_{табл} > F_{расч}$, которое выполняется ($6,39 > 5,43$), сравниваемые дисперсии однородны.

Таблица В4.5 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта ($H+h=5$ м, $h=2$ м, $l_{н.м} = 2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $Q_{61} = 0,2$ м³/мин, $Q_{нр1} = 2,76$ м³/ч, $p_{см} = 0,180$ кгс/см²) с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 1$ м ($\bar{z}_j = 0,2$)

Расход сжатого воздуха $Q_{в}$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э}$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ /ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
0,198	2,4; 2,3; 2,7; 2,4; 2,1	2,4	0,218	0,048	2,04÷2,76
0,210	2,3; 2,5; 2,8; 2,6; 2,5	2,5	0,187	0,035	2,19÷2,81
0,402	5,9; 6,1; 6,3; 6,4; 5,8	6,1	0,255	0,065	5,67÷6,53
0,508	7; 7,2; 7,4; 7,1; 7,2	7,2	0,150	0,023	6,95÷7,45
0,800	9; 9,4; 9,8; 9,2; 9,7	9,4	0,335	0,113	8,84÷9,96
0,910	9,2; 9,8; 9; 8,9; 9,3	9,2	0,354	0,125	8,61÷9,79
0,678	8,3; 8; 8,5; 8,6; 8,1	8,3	0,250	0,065	7,9÷8,73
0,942	9; 9,5; 9,1; 8,8; 8,7	9	0,312	0,098	8,48 ÷9,52

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{св}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{св}^2 = \frac{0,048 \cdot 4 + 0,035 \cdot 4 + 0,065 \cdot 4 + 0,023 \cdot 4 + 0,113 \cdot 4 + 0,125 \cdot 4 + 0,065 \cdot 4 + 0,098 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} = 0,072 \text{ м}^6/\text{ч}^2$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов с суммарным отклонением 0,77%

$$Q_э = 5,097 + 7,297Q_в + 0,847Q_в^2 + 0,601Q_в^3 - 3,78Q_в^4 - 0,847/Q_в.$$

Среднее отклонение составило

$$\Delta_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{8,4 + 9,5 + 5,5 + 2 + 6,1}{5} = 6,3\%.$$

Таблица В4.6 - Расчетные данные подачи эрлифта с подводом дополнительных притока воды и расхода воздуха в сечение подъемной трубы $z_j = 0,5 \text{ м}$ ($\bar{z}_j = 0,1$)

Расход сжатого воздуха $Q_в$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_э$, м ³ /ч	Отклонение расчетных данных от экспериментальных Δ , %
0,3	5,2	6,1
0,4	4,8	2,0
0,6	9,6	5,5
0,8	10,4	9,5
0,9	10,3	8,4

3. Эрлифт с подводом дополнительного притока воды в сечение $z_j = 1$ м, а дополнительного расхода воздуха в сечение $z_j = 0,5$ м

Расчетный критерий Фишера

$$F_{расч} = \frac{S_{макс}^2}{S_{мин}^2},$$

$$F_{расч} = \frac{0,098}{0,023} = 4,26.$$

Таблица В4.7 - Результаты обработки экспериментальных данных подачи эрлифта ($H+h=5$ м, $h=2$ м, $l_{н.м}=2$ м, $D = 0,068$ м, $d = 0,052$ м, $\rho_{см} = 0,180$ кгс/см²) с подводом дополнительного притока воды в сечение $z_j = 1$ м, а дополнительного расхода воздуха в сечение $z_j = 0,5$ м

Расход сжатого воздуха $Q_{сж}$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э}$, м ³ /ч	Математическое ожидание \bar{x} , м ³ /ч	Средне - квадратичное отклонение S_x , м ³ /ч	Дисперсия S_x^2 , м ⁶ /ч ²	Значения на границах доверительного интервала $x_{мин} \div x_{макс}$, м ³ /ч
0,2	3; 3,2; 3,4; 3,1; 3,2	3,2	0,150	0,023	2,95÷3,45
0,312	5,7; 6; 6,2; 6,2; 6	6	0,206	0,043	5,66÷6,34
0,540	8,8; 9; 9,1; 9,2; 9	9	0,150	0,023	8,75÷9,25
0,618	8,4; 8,6; 9; 8,7; 8,9	8,7	0,240	0,058	8,30÷9,10
0,840	8,6; 8,8; 9,2; 8,8; 8,9	8,9	0,224	0,050	8,53÷9,27
0,900	9,1; 9,5; 9,9; 9,2; 9,4	9,4	0,312	0,098	8,88÷9,92
0,936	9,6; 9,7; 10; 9,5; 9,7	9,7	0,187	0,035	9,39÷10,0

Табличное значение критерия Фишера [132] по степеням свободы $f_{\max} = n_{\max} - 1 = 5 - 1 = 4$, $f_{\min} = n_{\min} - 1 = 5 - 1 = 4$ составило $F_{\text{табл}} = 6,39$.

При условии $F_{\text{табл}} > F_{\text{расч}}$, которое выполняется ($9,28 > 4,26$), сравниваемые дисперсии однородны.

Средневзвешенная дисперсия

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2 \cdot f_u}{\sum_{u=1}^k f_u}$$

$$S_{\text{св}}^2 = \frac{0,043 \cdot 4 + 0,023 \cdot 4 + 0,023 \cdot 4 + 0,058 \cdot 4 + 0,05 \cdot 4 + 0,098 \cdot 4 + 0,035 \cdot 4}{4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4 + 4} =$$

$$= 0,047 \text{ м}^6/\text{ч}^6$$

Уравнение регрессии экспериментальной расходной характеристики, полученное при помощи ПЭВМ методом наименьших квадратов с суммарным отклонением 1,32%

$$Q_9 = 11,5 + 2,50Q_6 - 1,86Q_6^2 - 6,405Q_6^3 + 5,76Q_6^4 - 1,76/Q_6.$$

Таблица В4.8 - Расчетные данные подачи эрлифта с подводом дополнительного притока воды в сечение $z_j = 1 \text{ м}$, а дополнительного расхода воздуха в сечение $z_j = 0,5 \text{ м}$

Расход сжатого воздуха Q_6 , м ³ /мин	Подача эрлифта Q_9 , м ³ /ч	Отклонение расчетных данных от экспериментальных Δ , %
0,3	5	20
0,4	6,7	7,5
0,6	8,7	3,3
0,8	9,4	2,2
0,9	9,8	7,7

Среднее отклонение составило

$$\Delta_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i}{n} = \frac{20 + 7,5 + 3,3 + 2,2 + 7,7}{5} = 8\% .$$

Приложение Г – К разделу «Рекомендации по разработке эрлифтных установок с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы. Опыт применения»

Приложение Г1 – Договор о сотрудничестве между ГБУЗ ДонНТУ и Старобешевской ТЭС ПАО «Донбассэнерго»

Приложение Г2 - Результат расчета эрлифта удаления случайных и дренажных стоков котлотурбинного цеха-2 Старобешевской ТЭС ОАО «Донбассэнерго»

Параметры:

Касат. напряжения и коэф-ты сопротивл. по формулам:	Уоллиса Г. [118]
Истинное газосодержание по формулам:	Уоллиса Г. (учет поправки...)
[118]	
Расчет газосодержания по:	формулам № 1
Вид процесса изменения состояния воздуха:	изотермический
Подающая труба:	насадок
=====	
Исходные данные:	
=====	
Плотность воды ρ' , кг/м ³	1000
Плотность воздуха при нормальных условиях ρ_0'' , кг/м ³	1,2
Атмосферное давление p_0 , Па.....	98100
Динамическая вязкость воды μ' , Пас.....	0,001
Динамическая вязкость воздуха μ'' , Пас.....	1,79E-5
Коэффициент поверхностного натяжения σ , Н/м.....	0,0723
Показатель политропы n	1
Показатель степени в формуле Арманда.....	1,53
Длина подъемной трубы $H+h$, м.....	5
Диаметр подъемной трубы D , м.....	0,25
Эквивалентная шероховатость трубы Δ , м.....	0,0002
Относительная длина жидкой пробки D/L , м.....	2
Верт. координата подвода доп. притока z_j , м.....	0
Приток, подводимый в зумпф $Q_{пр1}$, м ³ /ч.....	80
Приток, подводимый в промежуточное сечение подъемной трубы $Q_{пр2}$, м ³ /ч	0 - 20
Геометрическое погружение смесителя h , м.....	2
Диаметр подающей трубы d , м.....	0,1
Длина подающей трубы l , м.....	0,4
Коэффициент расхода подающей трубы $\mu_{н.т}$	0,76
Сумма коэф-тов местных сопротивлений подающей трубы $\sum \zeta_{н.т}$	1,5
=====	

Qв1 = 6,15 м³/мин, Qв2 = 0,000 м³/мин: Qпр1 = 0,022203 м³/с (79,929 м³/ч)

Значения z , м:	0,000	1,250	2,500	3,750	5,000
Давление $p_d(z)$ в сечении z , кг/см ² :	1,185	1,139	1,093	1,046	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	1,422	1,367	1,311	1,256	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	379,8	371,0	362,0	352,7	343,1
Объемное расходное воздуходождение $\beta(z)$:	0,796	0,802	0,809	0,815	0,822
Массовое расходное воздуходождение x :	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Пас:	0,768	0,768	0,768	0,768	0,768
Площадь сечения трубы $\omega 10^3$, м ² :	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	2,095	2,163	2,237	2,317	2,404
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	0,428	0,428	0,428	0,428	0,428
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	1,667	1,735	1,809	1,889	1,976
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	1,129	1,156	1,185	1,216	1,250
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	2,685	2,755	2,831	2,914	3,005
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	266,3	268,6	271,0	273,4	276,0
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² с:	430,3	430,3	430,3	430,3	430,3
Давление, обусл. трением $p_{пр1} 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,830	1,694	2,596	3,539
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,118	0,246	0,384	0,535
Давление, обусл. силой тяжести $p_g 10^3$, кг/см ² :	0,000	46,93	92,75	137,4	180,9
Давление (сумма) $p_{\Sigma} 10^3$, кг/см ² :	0,000	47,88	94,69	140,4	185,0
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	1,850	1,850	1,850	1,850	1,850
Относительное геометр. погруж. смес. a :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. a_0 :	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	4,102	4,269	4,450	4,649	4,867
Nf(z) / 1000000:	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020

Истинное газосодержание $\varphi(z)$:	0,621	0,630	0,639	0,648	0,658
$Nf(z) / 1000000$:	407,7	407,7	407,8	407,8	407,8
$Re_{г} / 1000000$:	151,5	152,1	152,8	153,5	154,3
$w0/w''$:	1,077	1,081	1,086	1,092	1,097
$\delta(z)/D$:	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,046	0,093	0,139	0,185
Средний расход водовозд. смеси $Q_{срi} \cdot 10^3, м^3/с$:	-----	59,46	60,18	60,94	61,74
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, кВт:	-----	0,270	0,546	0,830	1,121
Мощность комп. потерь на трение N_{mpi} , кВт:	-----	0,005	0,010	0,016	0,021
Мощность комп. потерь на ускор. $N_{ускi}$, кВт:	-----	0,001	0,001	0,002	0,003
Мощность преод. силы тяжести N_{gi} , кВт:	-----	0,274	0,548	0,822	1,096
Мощность потока сжатого воздуха N_i'' , кВт:	0,000	0,400	0,817	1,252	1,707
Мощность потока воды N' , кВт:	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Мощность, подведенная к трубе $N_{подi}$, кВт:	0,370	0,771	1,188	1,623	2,077
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ски}$, кВт:	0,371	0,501	0,641	0,793	0,956
Ср. плотность по расх. воздухосодерж. $\rho_{ср\beta i}$, кг/м ³ :-----		202,1	198,9	195,6	192,3
Ср. плотность по ист. воздухосодерж. $\rho_{ср\phi i}$, кг/м ³ :-----		375,4	371,0	366,4	361,8
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срp i}$, кг/м ³ :	205,3	202,1	198,9	195,7	192,4
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q_{срi}'', м^3/мин$:5,190		5,293	5,401	5,513	5,629
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}$, м:	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
Соппротивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	283,4	283,4	283,4	283,4	283,4
Коэффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}$, м/с:	1,304	1,304	1,304	1,304	1,304
Поправочный множ. к формуле Шевелёва k_I :	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Qв1 = 6,15 м ³ /мин, Qв2 = 0,20 м ³ /мин: Qnp1 = 0,0222 м ³ /с (79,929 м ³ /ч); Qnp2 = 0,00131 м ³ /с (4,745 м ³ /ч)					

Значения z, м:	0,000	1,250	2,500	3,750	5,000
Давление $p_a(z)$ в сечении z, кг/см ² :	1,185	1,139	1,092	1,046	1,000
Плотность воздуха $\rho''(z)$, кг/м ³ :	1,422	1,366	1,311	1,255	1,200
Плотность смеси $\rho_{см}(z)$, кг/м ³ :	385,8	370,0	360,9	351,6	342,0
Объемное расходное воздухосодержание $\beta(z)$:	0,786	0,798	0,805	0,811	0,818
Массовое расходное воздухосодержание x:	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Динамическая вязкость смеси $\mu_{см} \cdot 10^3$, Пас:	0,778	0,772	0,772	0,772	0,772
Площадь сечения трубы $\omega 10^3, м^2$:	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
Приведенная скорость смеси $w_{см}(z)$, м/с:	2,121	2,245	2,321	2,403	2,494
Приведенная скорость воды w'_0 , м/с:	0,453	0,453	0,453	0,453	0,453
Приведенная скорость воздуха $w''_0(z)$, м/с:	1,668	1,792	1,868	1,950	2,040
Истинная скорость воды $w'(z)$, м/с:	1,178	1,228	1,259	1,292	1,328
Истинная скорость воздуха $w''(z)$, м/с:	2,711	2,840	2,919	3,004	3,097
Число Рейнольдса смеси $Re_{см}(z) \cdot 10^{-3}$:	270,3	276,3	278,7	281,2	283,8
Приведенная массовая скорость смеси G , кг/м ² с:	455,7	455,8	455,8	455,8	455,8
Давление, обусл. трением $p_{мп} 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,890	1,816	2,783	3,793
Давление, обусл. ускорением $p_{уск} 10^3$, кг/см ² :	0,000	0,239	0,383	0,539	0,709
Давление, обусл. силой тяжести $p_{gi} 10^3$, кг/см ² :	0,000	46,80	92,48	137,0	180,3
Давление (сумма) $p_{\Sigma} 10^3$, кг/см ² :	0,000	47,93	94,68	140,3	184,8
Полный напор воды в смесителе $H_{см}$, м:	1,849	1,849	1,849	1,849	1,849
Относительное геометр. погруж. смес. α :	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Относительное динамич. погруж. смес. α_0 :	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
Дополнительные параметры:					
Касательные напряжения $\tau_w(z)$, Па:	4,266	4,577	4,769	4,980	5,212
$Nf(z) / 1000000$:	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Истинное газосодержание $\varphi(z)$:	0,615	0,631	0,640	0,649	0,659
$Nf(z) / 1000000$:	407,7	407,7	407,8	407,8	407,8
$Re_{г} / 1000000$:	151,7	152,9	153,6	154,3	155,1
$w0/w''$:	1,079	1,087	1,092	1,097	1,103
$\delta(z)/D$:	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Суммарный перепад давления, кг/см ² :	0,000	0,046	0,092	0,139	0,185
Средний расход водовозд. смеси $Q_{срi} \cdot 10^3, м^3/с$:	-----	63,16	63,93	64,74	65,60
Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, кВт:	-----	0,286	0,580	0,881	1,190
Мощность комп. потерь на трение N_{mpi} , кВт:	-----	0,006	0,011	0,018	0,024

Мощность комп. потерь на ускор. $N_{ускi}$, кВт:	-----	0,001	0,002	0,003	0,005
Мощность преод. силы тяжести N_{gi} , кВт:	-----	0,290	0,580	0,870	1,161
Мощность потока сжатого воздуха N_i^a , кВт:	0,000	0,400	0,817	1,252	1,706
Мощность потока воды N^w , кВт:	0,392	0,392	0,392	0,392	0,392
Мощность, подведенная к трубе $N_{подi}$, кВт:	0,392	0,792	1,209	1,643	2,098
Мощность комп. потерь на скольж. $N_{ски}$, кВт:	0,393	0,505	0,629	0,763	0,908
Ср. плотность по расх. воздухосодерж. $\rho_{ср\beta i}$, кг/м ³ :	-----	206,3	203,0	199,7	196,3
Ср. плотность по ист. воздухосодерж. $\rho_{ср\phi i}$, кг/м ³ :	----	374,4	369,9	365,4	360,7
Ср. плотность по среднему давлению $\rho_{срpi}$, кг/м ³	214,8	211,5	208,2	204,8	201,4
Объемный расход воздуха при ср. давл. $Q_{срi}^a$, м ³ /мин:	5,190	5,294	5,401	5,513	5,630
Потери напора в подающей трубе $\Delta h_{n,m}$, м:	0,151	0,151	0,151	0,151	0,151
Сопротивление подающей трубы A , с ² /м ⁵ :	283,4	283,4	283,4	283,4	283,4
Коэффициент сопротивления под. трубы $\lambda_{n,m}$:	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
Скорость воды в подающей трубе $w'_{n,m}$, м/с:	1,308	1,308	1,308	1,308	1,308
Поправочный множ. к формуле Шевелева k :	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Приложение Г3 – Материалы внедрения результатов работы