

УДК 622.276.5:622.411

## РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭРЛИФТА СО СНАРЯДНОЙ СТРУКТУРОЙ ВОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Бойко Н.Г., докт. техн. наук, проф.,

Кононенко А.П., канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет

*Показана возможность построения адекватных расходных характеристик эрлифта в широком диапазоне изменений расходов сжатого воздуха при снарядной структуре водовоздушной смеси в подъемной трубе на основе численного решения разработанной математической модели рабочего процесса газожидкостного подъемника.*

*The possibility to construct the airlift adequate metering characteristics in the wide range of compressed air consumption changing under the slug structure of the water-air mixture in lifting tunnel is shown. It is based on the computational solution of the mathematical model of the operational process of the gas-liquid lift.*

**1. Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Успешное проектирование, наладка и эксплуатация гидравлических машин и аппаратов требует наличия их достоверных технических характеристик. Для серийно производимых гидравлических машин (насосов, компрессоров, вентиляторов) характеристики получают, как правило, экспериментальным путем на стендах заводоизготовителей. В отношении эрлифтов такой метод не является рациональным ввиду их индивидуального проектирования под конкретные условия применения. Получение достоверных характеристик эрлифтов аналитическим путем связано с известными сложностями, в том числе обусловленными реализацией в подъемных трубах различных структур водовоздушных потоков.

Поэтому уточнение методики расчета характеристик газожидкостных подъемников со снарядной структурой двухфазной смеси, как одной из часто реализуемой в эрлифте, является актуальной задачей, имеющей научное и практическое приложение.

**2. Анализ исследований и публикаций.** Сложность и малоизученность процессов движения двухфазных смесей в вертикальных трубах послужило основанием разработки метода построения расходных характеристик эрлифта на основе теории подобия с исполь-

зованием экспериментальных данных [1, 2]. Разработанный метод расчета расходных характеристик газожидкостного подъемника на основе универсальных безразмерных характеристик обеспечивает приемлемую точность количественных соотношений между расходом воздуха и подачей воды при заданных геометрических и технологических параметрах эрлифта, однако, будучи эмпирическим, исключает возможность его использования для анализа физических процессов лифтирования жидкости сжатым газом.

Математическое обоснование правомерности описания безразмерной характеристики эрлифта уравнениями дуги окружности или квадратичной параболы [3, 4] не лишает данный метод эмпиризма с его известными недостатками.

Эти же недостатки присущи и работам [5, 6], в основе которых заложена идея эмпирических безразмерных расходных характеристик газожидкостного подъемника.

Известные работы, направленные на исследование влияния ряда конструктивных и гидродинамических параметров на подачу газожидкостного подъемника, в том числе с использованием ЭВМ [7, 8], также не решают задачу возможности построения расходных характеристик эрлифта на основе теоретической модели с приемлемыми допущениями.

В [9] на основе гомогенной модели двухфазной смеси для обезличенной структуры водовоздушного потока получены аналитические зависимости, которые в большей степени качественно объясняют характер изменения подачи эрлифта при изменениях погружения смесителя и (или) расхода воздуха. Выполнить адекватный количественный анализ гидродинамических параметров водовоздушного потока и его компонентов в подъемной трубе эрлифта разработанные аналитические зависимости не позволяют.

Теоретическая модель газожидкостного подъемника со снарядной структурой смеси в [10] разработана исходя из допущения неизменной плотности воздуха по высоте подъемной трубы, что приемлемо для ряда конкретных условий применения, но для промышленных эрлифтов со значительными геометрическими погружениями смесителя может приводить к ощутимым погрешностям.

Автором разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси в подъемной трубе, позволяющая вычислять, в том числе, значения подачи эрлиф-

та в широком диапазоне расходов сжатого воздуха для заданных геометрических и технологических параметров подъемника (данная научная работа будет опубликована во всеукраинском научно-техническом журнале „Промислова гідраліка і пневматика” в первой половине 2006 г.).

**3. Постановка задачи.** На основе разработанной математической модели рабочего процесса газожидкостного подъемника доказать возможность построения адекватных расходных характеристик эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси в широком диапазоне изменений расходов сжатого воздуха.

**4. Изложение материала и результаты.** Уравнение стационарного восходящего движения газожидкостной смеси в вертикальной трубе для отдельного течения, в том числе со снарядной структурой, записывают в виде [11-13]:

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

которое после преобразований для условий водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта с изотермическим процессом состояния газовой фазы и линейным законом изменения давления по высоте принимает вид

$$p_{cm} \frac{z_i}{H+h} = \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_{cm}(z) dz + G \cdot [x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z)]_0^{z_i} + g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz, \quad (2)$$

или

$$P_{\Sigma i} = P_{mpi} + P_{ускi} + P_{gi}, \quad (3)$$

где  $p(z)$  – давление в сечении подъемной трубы на расстоянии  $z$  от смесителя;  $\tau_{cm}(z)$  – касательное напряжение;  $D$  – диаметр подъемной трубы;  $G'(z)$  и  $G''(z)$  – массовые скорости соответственно жидкости и газа;  $w'(z)$  и  $w''(z)$  – истинные скорости соответственно воды и воздуха;  $\varphi(z)$  – истинное газосодержание водовоздушной смеси;  $\rho_{cm}(z)$  – плотность водовоздушной смеси;  $g$  – ускорение свободного падения;  $p_{cm}$  – избыточное давление в смесителе;  $H$  – высота подъема эрлифта;  $h$  – геометрическое погружение смесителя;  $z_i$  – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы;  $G$  – приведенная массовая скорость газожидкостной смеси;  $x$  – массовое расходное га-

зосодержание;  $\rho'$  и  $\rho''(z)$  - плотности соответственно воды и воздуха;  $p_{\Sigma i}$  - суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ ;  $P_{тпi}$ ,  $P_{ускi}$ ,  $P_{gi}$  - перепады давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленные соответственно трением, ускорением и силой тяжести.

Решение уравнений (2) и (3) численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы позволяет определять, в том числе, зависимость подачи эрлифта  $Q_e$  от расхода воздуха  $Q_s$  (построение расходной характеристики).

Касательные напряжения  $\tau_{cm}$  и истинные газосодержания  $\varphi$  вычисляются по эмпирическим выражениям, рекомендованным для вертикальных восходящих газожидкостных потоков со снарядной структурой [13-17].

В соответствии с методикой [18] выявлены экспериментальные характеристики эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 25 \div 353$  мм, длинами  $H+h = 11,45 \div 90,5$  м и относительными погружениями смесителей  $\alpha = 0,310 \div 0,931$ , в которых оптимальный, либо оптимальный и режим максимальной подачи реализуются со снарядной структурой водовоздушного потока [19-24].

Для количественных значений гидродинамических параметров экспериментальных эрлифтов со снарядной структурой двухфазной смеси выполнены расчеты на ПЭВМ с построением расходных характеристик и произведено их сравнение с экспериментальными данными (табл. 1).

Разработанная математическая модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси позволяет выполнять расчеты как с учетом потерь давления в подающей трубе эрлифта (« $h$ -режим»), так и при постоянном заданном давлении в смесителе во всем рассматриваемом диапазоне изменения расходов воздуха (« $p$ -режим»). Расчеты в « $h$ -режиме» выполняются при известных геометрических параметрах подающих труб (диаметре  $d$  и длине  $l$ ) анализируемых эрлифтов, а расчеты в « $p$ -режиме» - при отсутствии таких данных либо при пренебрежимо несущественных потерях давления в подающей трубе. Потери давления в подающей трубе эрлифта при расчетах в « $h$ -режиме» определяются либо по методике, применяемой для насадков [25], либо по методике, разработанной для коротких труб [26].

Расчеты с использованием модели с «*h*-режимом» выполнены для экспериментальных данных эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 60, 100, 250$  и  $353$  мм и длинами соответственно  $H+h = 16,0, 16,9, 11,45$  и  $11,7$  м, причем для эрлифтов с  $D = 60, 250$  и  $353$  мм потери давления в подающей трубе определялись как потери в насадке, а для эрлифтов с  $D = 100$  мм – как потери в короткой трубе (табл. 1).

Расчеты с использованием модели с «*p*-режимом» выполнены для экспериментальных данных эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 25, 50, 80$  и  $150$  мм и длинами  $H+h = 11,7 \div 90,5$  м (табл. 1). Количественные значения давлений в смесителе, кроме указанных в примечаниях, приняты в соответствии с экспериментальными данными.

Как следует из таблицы 1, отклонения расчетных подач эрлифтов в оптимальных режимах и режимах максимальных подач от экспериментальных данных, при прочих равных условиях, в большинстве случаев не превышают 20%, что следует признать удовлетворительным результатом.

В подавляющем большинстве случаев для определения касательных напряжений и истинных газосодержаний использовались методики [13, 14].

В качестве примера приведено сравнительное графическое изображение экспериментальных и расчетных расходных характеристик некоторых эрлифтов (рис. 1-7), полные количественные данные которых изложены в таблице 1.

Графические зависимости (рис. 1-7) подтверждают удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных расходных характеристик эрлифтов со снарядной структурой водовоздушной смеси.

**5. Выводы и направление дальнейших исследований.** Подтверждена возможность построения адекватных расчетных расходных характеристик эрлифтов со снарядной структурой водовоздушной смеси с подъемными трубами диаметрами  $D = 25 \div 353$  мм, длинами  $H+h = 11,45 \div 90,5$  м при относительных погружениях смесителя  $\alpha = 0,310 \div 0,931$ . Достоверность расчетных расходных характеристик позволит выполнить объективный анализ гидродинамических параметров водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы и в широких диапазонах изменения расхода сжатого воздуха с целью энергетического усовершенствования эрлифтов.

Таблиця 1 - Сравнение расчетных и экспериментальных значений подач эрлифтов со снарядной структурой потока в вертикальных подъемных трубах

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		13		14	15		16	17
											Диаметр подъемной трубы $D$ , мм	Диаметр подающей трубы $d$ , мм	Диаметр подающей трубы $d$ , мм	Длина подающей трубы $l$ , мм		Геометрическое погружение смеси $h$ , м	Относительное погружение смеси $\alpha$		
25	14,0	-	-	5,5	0,393	$p$ -режим	-	0,518	0,078	opt	0,67	0,64	4,7	[19]	[14]	[14]	[19]	[19]	[19]
								0,497	0,204	max	0,77	0,90	-14,4						
50	16,0	-	-	10,56	0,660	$h$ -режим	h	0,508	0,200	opt	2,51	2,10	19,5	[20]	[14]	[14]	[20]	[20]	[20]
								0,480	1,03	max	4,65	4,87	-4,5						
60	16,0	50	-	8,0	0,500	$h$ -режим	h	0,700	0,40	opt	13,2	11,6	13,8	[20]	[14]	[14]	[20]	[20]	[20]
				1,56	1,66			max	13,1	13,1	0								
80	15,0	-	-	6,5	0,433	$p$ -режим	-	0,450 <sup>3</sup>	0,570	opt	4,83	4,84	-0,2	[19]	[14]	[14]	[19]	[19]	[19]
				1,31	1,31				max	8,73	7,36	18,8							
100	16,9	70	1500	9,1	0,538	$h$ -режим	кт	-	0,83	opt	21,7	18,5	17,3	[21]	[14]	[14]	[21]	[21]	[21]
				7,5	0,444				3,00	max	35,2	34,4	2,3						
									5,36	max	29,3	28,1	4,3						

<sup>1</sup> Метод определения потерь напора в подающей трубе: н – насадок; кт – короткая труба.<sup>2</sup> Режим работы эрлифта: opt – оптимальный режим работы; max – работа эрлифта в режиме максимальной подачи.<sup>3</sup> Значение давления в смесителе расчетное.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
100	16,9	70	1500	5,9	0,349	и-режим	кт	-	1,51	opt	14,7	13,0	13,1	[14]	[14]	[21]	
				4,3	0,254					max	21,7	21,0	3,3				
	11,7	105	460	5,4	0,462	и-режим		0,486	3,44	opt	36,4	29,6	23,0	[13]	[13]	Данные автора	
				4,8	0,410					opt	29,2	27,8	5,0				
150	45,9	100	500	41,5	0,904	р-режим	-	4,02	3,81	opt	187,7	175,1	7,2	[13]	[13]	[22]	
				3,97	5,54					max	208,8	213,3	-2,1				
	51,4	100	21000	47,0	0,914	и-режим		3,73	3,98	opt	114,1	111,9	2,0	[13]	[13]	[22]	
				3,11	6,25					max	144,2	143,7	0,3				
250	63,7	100	500	59,3	0,931	и-режим	-	5,72	3,56	opt	189,1	182,6	3,6	[14]	[14]	[23]	
				4,75	4,05					max	217,9	226,9	-4,0				
	90,0	150	700	55,0	0,611	и-режим	и	4,03	6,47	opt	130,1	123,6	5,3	[13]	[13]	[24]	
				6,80 <sup>3</sup>	4,71					max	161,6	156,3	3,4				
353	90,5	150	700	68,0	0,751	и-режим	и	5,50 <sup>3</sup>	4,71	opt	80,6	91,4	-11,8	[13]	[13]	Данные автора	
				8,0	0,700					opt	116,0	133,1	-12,8				
	11,7	205	700	5,4	0,462	и-режим	и	-	2,10	20,0	opt	71,7	70,6	1,6	[13]	[13]	Данные автора
				4,8	0,410						max	199,2	197,8	0,7			
11,7	205	700	5,4	0,462	и-режим	и	-	15,5	17,7	opt	164,8	166,9	-1,3	[13]	[13]	Данные автора	
			4,8	0,410						opt	127,3	143,9	-11,5				

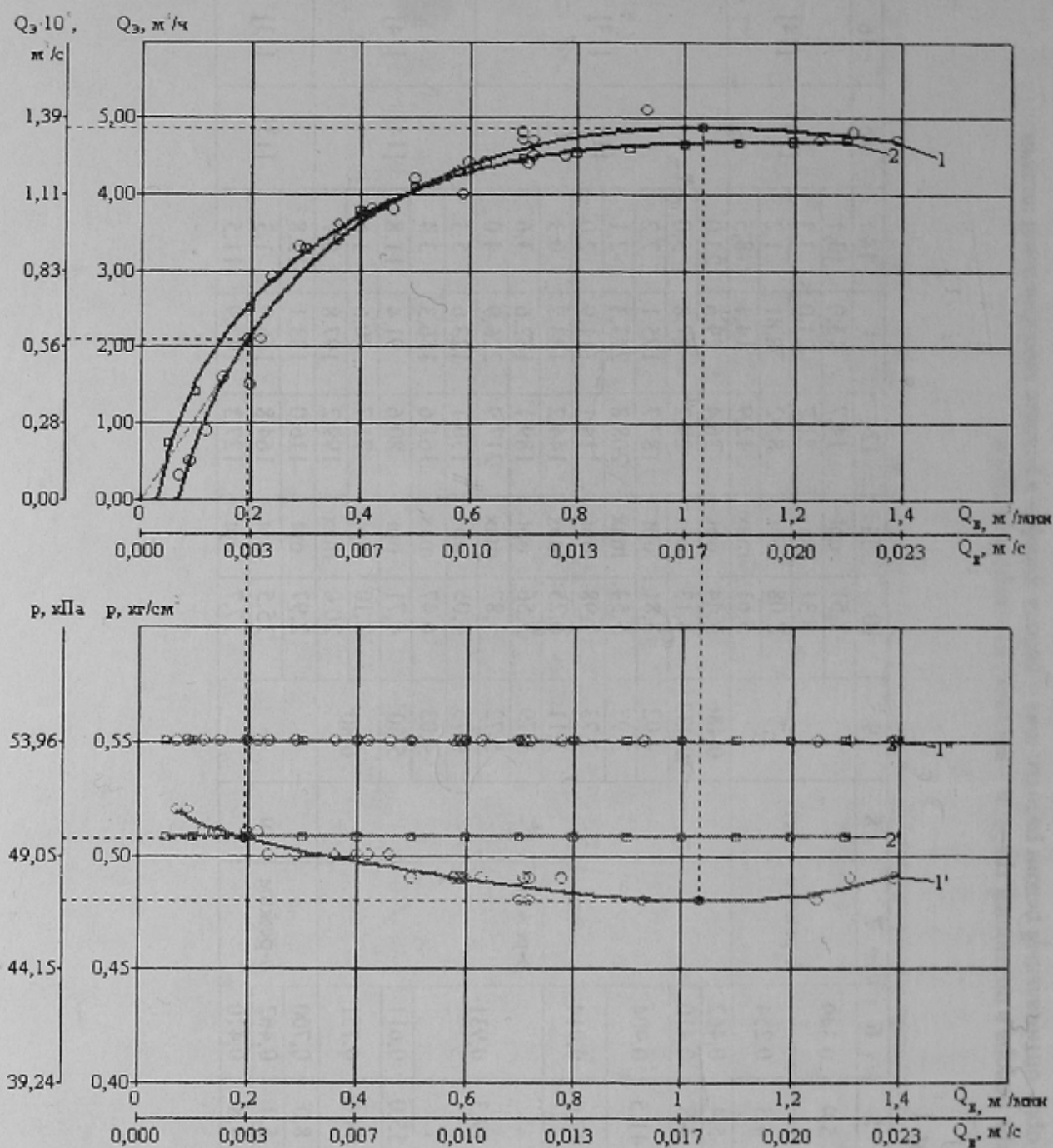


Рисунок 1 – Экспериментальная 1 [19] и расчетная 2 расходные характеристики эрлифта  $D = 50$  мм,  $H+h = 14,0$  м,  $h = 5,5$  м (1' и 2' - давление в смесителе, 1'' и 2'' - гидростатическое давление геометрического погружения смесителя)



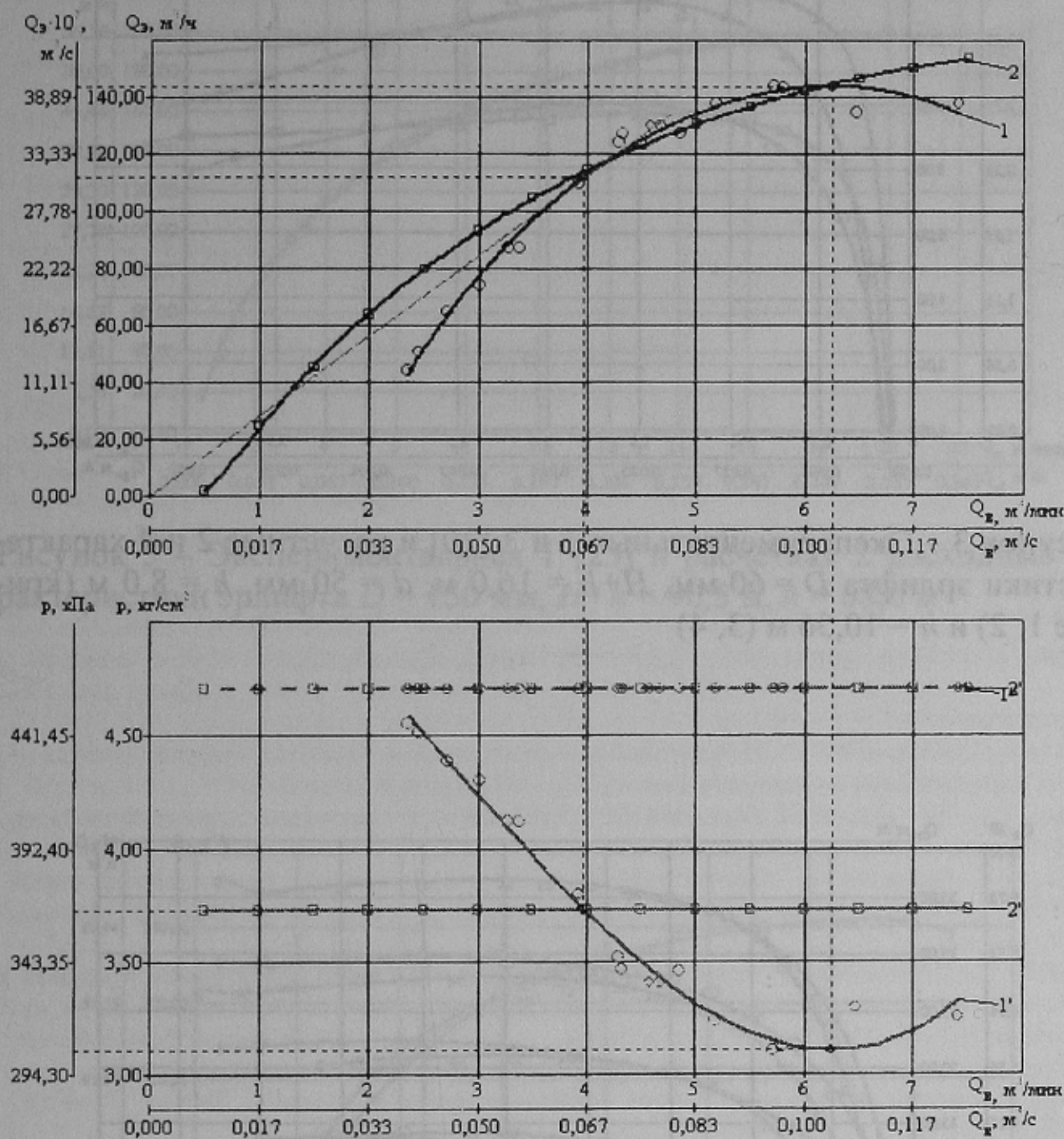


Рисунок 2 – Экспериментальная 1 [22] и расчетная 2 расходные характеристики эрлифта  $D = 150$  мм,  $H+h = 51,4$  м,  $d = 100$  мм,  $l = 21,0$  м,  $h = 47,0$  м (1' и 2' - давление в смесителе, 1'' и 2'' - гидростатическое давление геометрического погружения смесителя)

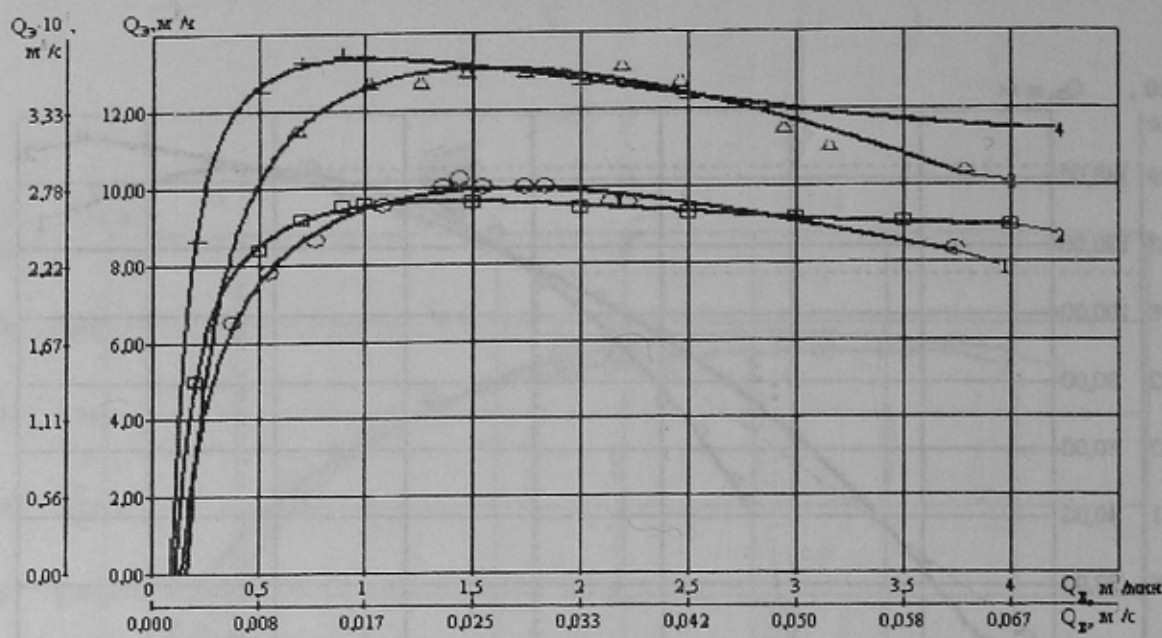


Рисунок 3 – Экспериментальные 1 и 3 [20] и расчетные 2 и 4 характеристики эрлифта  $D = 60$  мм,  $H+h = 16,0$  м,  $d = 50$  мм,  $h = 8,0$  м (кривые 1, 2) и  $h = 10,56$  м (3, 4)

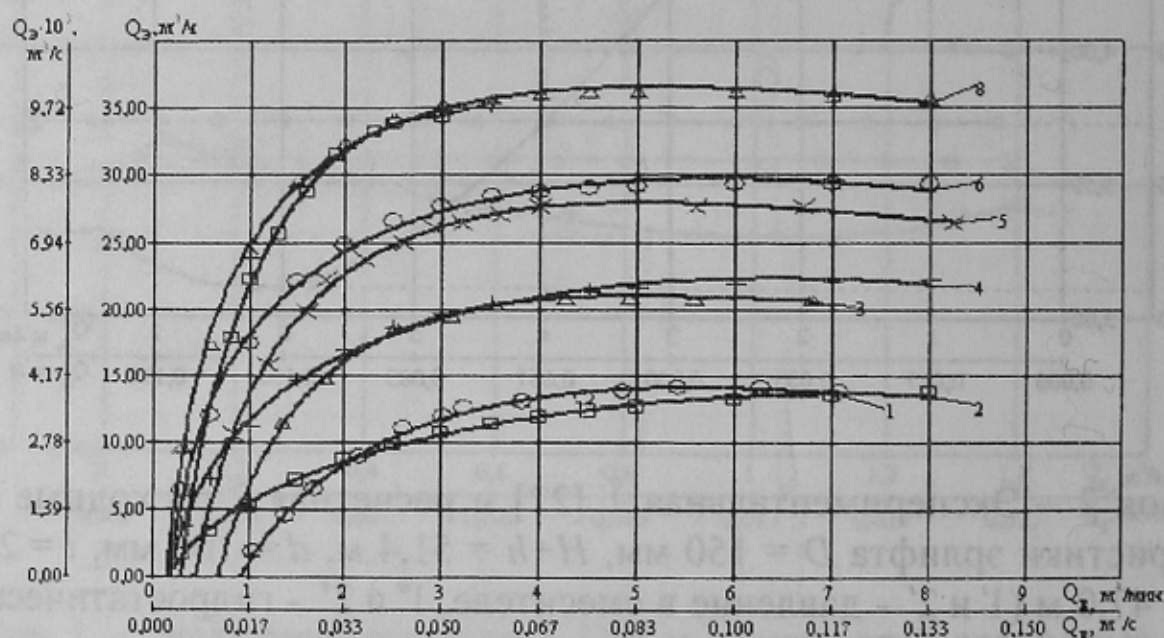


Рисунок 4 – Экспериментальные 1, 3, 5, 7 [21] и расчетные 2, 4, 6, 8 характеристики эрлифта  $D = 100$  мм,  $H+h = 16,9$  м,  $d = 70$  мм,  $l = 1500$  м,  $h = 4,3$  м (кривые 1, 2),  $h = 5,9$  м (3, 4),  $h = 7,5$  м (5, 6),  $h = 9,1$  м (7, 8)

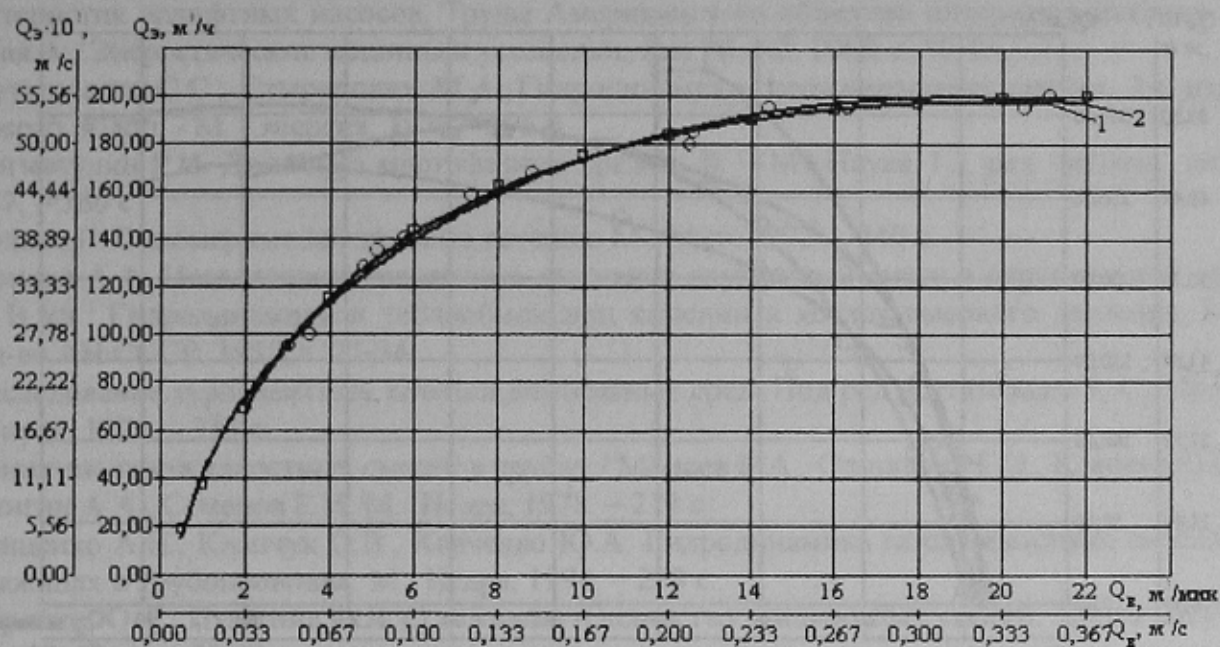


Рисунок 5 – Экспериментальная 1 [23] и расчетная 2 расходные характеристики эрлифта  $D = 150$  мм,  $H+h = 90,5$  м,  $h = 68,0$  м

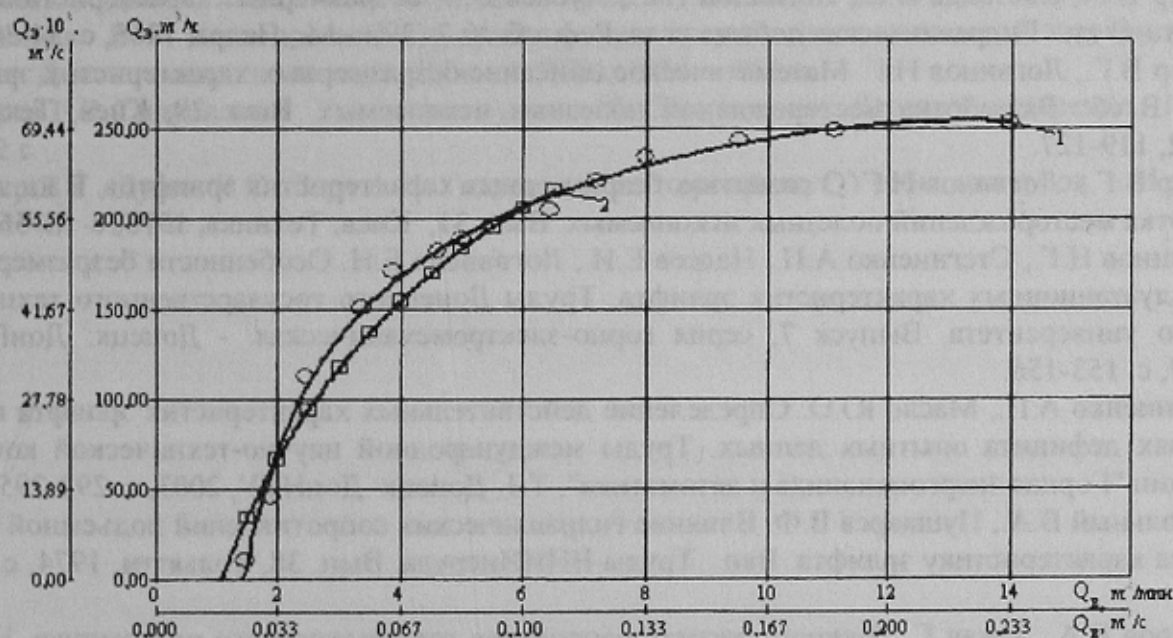


Рисунок 6 – Экспериментальная 1 [24] и расчетная 2 характеристики эрлифта  $D = 250$  мм,  $H+h = 11,45$  м,  $d = 150$  мм,  $h = 8$  м

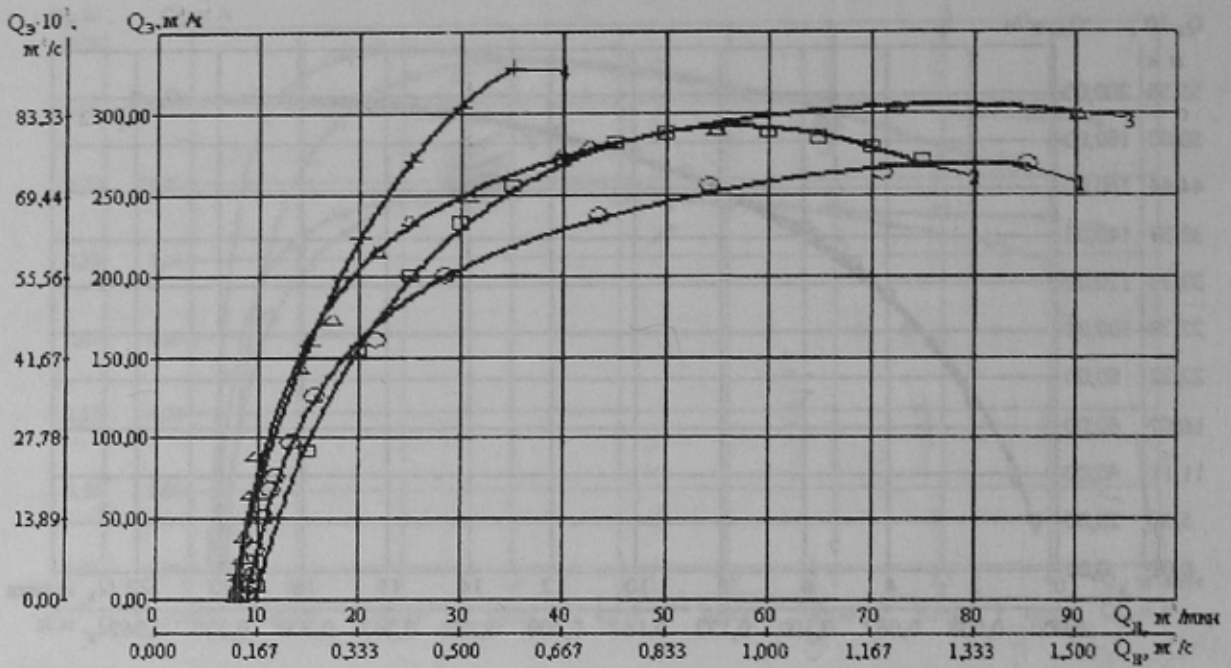


Рисунок 7 – Экспериментальные 1 и 3 [Данные автора] и расчетные 2 и 4 характеристики эрлифта  $D = 353$  мм,  $H+h = 11,7$  м,  $d = 205$  мм,  $l = 700$  м,  $h = 4,8$  м (кривые 1, 2),  $h = 5,4$  м (3, 4)

#### Список источников.

1. Гейер В.Г., Костанда В.С. Универсальные характеристики подъемной трубы эрлифта. В кн.: Гидравлическая добыча угля. Вып. 4(26), – М., Недра, 1965, с. 30-34.
2. Гейер В.Г., Костанда В.С., Логвинов Н.Г., Хубаев В.В. Безразмерные характеристики эрлифта. В кн.: Гидравлическая добыча угля. Реф. сб. № 7 (29). - М., Недра, 1965, с. 34-38.
3. Гейер В.Г., Логвинов Н.Г. Математическое описание безразмерных характеристик эрлифтов. В сб.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 29, Киев, Техніка, 1972, 119-127.
4. Гейер В.Г., Логвинов Н.Г. О свойствах безразмерных характеристик эрлифтов. В кн.: Разработка месторождений полезных ископаемых. Вып. 31, Киев, Техніка, 1973, с. 51-56.
5. Логвинов Н.Г., Стегниенко А.П., Надеев Е.И., Логвинова Е.Н. Особенности безразмерных эксплуатационных характеристик эрлифта. Труды Донецкого государственного технического университета. Выпуск 7, серия горно-электромеханическая. - Донецк: ДонГТУ, 1999, с. 153-156.
6. Стегниенко А.П., Масло Ю.О. Определение действительных характеристик эрлифта в условиях дефицита опытных данных. Труды международной научно-технической конференции "Горная энергомеханика и автоматика", Т. 1, Донецк: ДонНТУ, 2003, с. 293-295.
7. Раздольный В.А., Пушкарев В.Ф. Влияние гидравлических сопротивлений подъемной трубы на характеристику эрлифта. Вкн.: Труды ВНИИнеруда. Вып. 38, Тольятти, 1974, с. 66-71.
8. Сахаров В.А., Такач Г. Точность расчета параметров газожидкостного подъемника. Нефтяное хозяйство, N4, 1984, с.55-58.
9. Козыряцкий Л.Н., Кононенко А.П., Мизерный В.И. Уравнение безразмерной характеристики длинных эрлифтов. Наукові праці Донецького державного технічного університету. Випуск 27, серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонДТУ, 2001, с. 210-214.

10. Стеннинг А., Мартин С. Теоретическое и экспериментальное исследование рабочих характеристик эрлифтных насосов. Труды Американского общества инженеров-механиков, серия А, Энергетические машины и установки, том 90, N2, 1968, с. 10-15.
11. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергия, 1976, - 296 с.
12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. II. - М.: Наука, Гл. ред. физ.мат. лит., 1987. - 360 с.
13. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. - 440 с.
14. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе. В кн.: Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. М.: Изд-во АН СССР, 1955, с. 21-34.
15. Исследование турбулентных течений двухфазных сред/ Под ред. Кутателадзе С.С., Новосибирск, 1973. - 315 с.
16. Движение газожидкостных смесей в трубах / Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Клапчук О.В., Точигин А.А., Семенов Е.И. М.: Недра, 1978. - 271 с.
17. Гриценко А.И., Клапчук О.В., Харченко Ю.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. М.: Недра, 1994. - 238 с.
18. Сорокин Ю.Л., Пушкина О.Л. О режимах течения газожидкостных смесей, Труды ЦКТИ, вып. 47, 1964, с. 72-82.
19. Стифеев Ф.Ф. Разработка эрлифтов для подъема пульпы повышенной плотности. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1985. - 262 с.
20. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности. Дисс. ... канд. техн. наук, - Донецк: ДПИ, 1976. - 197 с.
21. Стегниенко А.П. Исследование и разработка методов управления режимами работы шахтных эрлифтов. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1978. - 242 с.
22. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала. Дисс. ... канд. техн. наук, - Донецк: ДПИ, 1982. - 323 с.
23. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1963: т.1 - 209 с., т.2 - 140 с.
24. Шевченко В.Ф. Исследование и разработка узла подвода пневматической энергии в эрлифте. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1974. - 183 с.
25. Чугаев Р.Р. Гидравлика: Учебн. для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. - 672 с.
26. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод: Учебн. для вузов. - М.: Недра, 1991. - 331 с.