

УДК 622.276.5:556

А.П. Кононенко, д-р техн. наук, проф., ДонНТУ, Донецьк,
В.В. Калиниченко, ст. преп., КИИ ДонНТУ, Красноармейск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА С РАЗВИТОЙ СНАРЯДНОЙ СТРУКТУРОЙ ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющая учитывать влияние длины газовых снарядов и жидкостных пробок на режимы работы газожидкостного подъемника, а также, на основе экспериментального подтверждения, устанавливать основные геометрические характеристики снарядного потока в вертикальной подъемной трубе.

Математическая модель, эрлифт, подъемная труба, снарядная структура, подача, расход воздуха, энергоэффективность, длина газового снаряда, длина жидкостной пробки.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Наиболее энергоэффективно работают эрлифты, как пневмогидравлические аппараты, при обеспечении снарядной структуры водовоздушного потока в их подъемных трубах [1,2]. Однако существующие математические модели рабочих процессов общепромышленных эрлифтов не учитывают влияние основных геометрических характеристик снарядного потока - длин жидкостных пробок и газовых снарядов на режимы работы газожидкостных подъемников. Поэтому математическое описание рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

Анализ исследований и публикаций. Снарядная структура вертикального восходящего водовоздушного потока характеризуется очередностью прохождения жидкостных пробок и газовых снарядов в ограничивающем его канале (наиболее часто – трубопроводе). Различают развитую и развивающуюся структуры снарядного потока [3, 4, 5 и др.].

Развитая снарядная структура водовоздушного потока характеризуется наличием достаточно больших газовых пузырей (пузырей Тейлора) [3], разделяемых жидкостными пробками. При этом рассто-

яние между газовыми снарядами достаточно велико, они имеют гладко скругленную головку и поднимаются с одинаковой скоростью.

Развивающийся снарядный режим возникает при расстоянии между газовыми пузырями меньше некоторого критического значения, когда пузырь Тейлора испытывает воздействие спутной струи впереди движущегося пузыря, что приводит к нарушению стабильности течения. Передняя часть пузыря разрушается с попеременным смещением от центра – то есть становится эксцентричной [3]. Происходит как слиянием малых сферических пузырей пузырьковой структуры с образованием пузырей Тейлора, так и слиянием нескольких пузырей Тейлора вследствие взаимного воздействия движущихся друг за другом пузырей.

И в первом, и во втором случае одними из основных геометрических характеристик снарядного потока являются длины жидкостных пробок L_s и газовых снарядов L_b . Однако в настоящее время не известны достоверные зависимости (даже эмпирические) для определения указанных длин. Предлагаемая в [6] зависимость для большинства практически используемых диаметров подъемных труб определяет длину жидкостных пробок равной $100 \cdot D$, что зачастую не соответствует действительности.

Исходя из приведенного, существующие математические модели рабочего процесса общепромышленного эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока либо не учитывают влияние длин жидкостных пробок L_s и газовых снарядов L_b на режимы его работы [7], либо математическая модель в качестве аргумента содержит длину жидкостных пробок L_s без учета длин газовых снарядов L_b [8]. Это ограничивает исследование влияния основных геометрических характеристик снарядного потока на энергоэффективность работы газожидкостных подъемников.

Постановка задачи. Разработать математическую модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющую учитывать влияние длины газовых снарядов и жидкостных пробок на режимы работы газожидкостного подъемника, а также, на основе экспериментального подтверждения, устанавливать основные геометрические характеристики снарядного потока в подъемной трубе газожидкостного подъемника.

Изложение материала и результаты. Моделирование рабочего процесса эрлифта выполнено для развитой снарядной структуры

водовоздушного потока в вертикальной подъемной трубе со следующими допущениями:

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

б) жидкостная нисходящая пристенная пленка воды в вертикальной подъемной трубе отсутствует, а площадь поперечного сечения жидкостной пробки равняется площади поперечного сечения подъемной трубы;

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

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

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

е) абсолютное давление в i -ом газовом снаряде равно абсолютному давлению на верхнем торце i -ой жидкостной пробки, т.е. изменением давления по высоте газового снаряда пренебрегаем;

ж) длины всех жидкостных пробок в подъемной трубе равны между собой.

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

$$m' \cdot \frac{dw'(z)}{dt} = F_p(z) - F'_g - F'_\tau(z) - F'_{g(n-i)}(z), \quad (1)$$

где m' – масса i -ой пробки воды;

$w'(z)$ – скорость i -ой пробки воды;

t – время;

$F_p(z)$ – сила давления, обусловленная разницей давлений на нижнем $p(z)$ торце i – ой пробки воды и на выходе из подъемной трубы p_0 ;

F'_g – вес пробки воды;

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

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

n – общее число пробок воды в подъемной трубе.

Масса каждой из i -ых пробок воды равны между собой

$$m' = \rho' \cdot \omega \cdot L_s, \quad (2)$$

где ρ' – плотность воды;

ω – площадь поперечного сечения подъемной трубы;

L_s – длина пробки воды.

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

$$F_p(z) = [p(z) - p_0] \cdot \omega = \left[p_0 + p_{см} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h} \right) - p_0 \right] \cdot \omega =$$

$$= p_{см} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h} \right) \cdot \omega, \quad (3)$$

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

$$p_{см} = \rho' \cdot g \cdot h. \quad (4)$$

Вес пробки воды

$$F'_g = m' \cdot g. \quad (5)$$

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

$$F'_\tau(z) = \tau'_w(z) \cdot \pi \cdot D \cdot \sum L_s(z), \quad (6)$$

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

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

Касательное напряжение

$$\tau'_w(z) = \lambda' \cdot \frac{\rho' \cdot [w'(z)]^2}{8}, \quad (7)$$

где λ' – коэффициент гидравлического трения.

В соответствии с принятым допущением о турбулентности движения водяных пробок, что подтверждено результатами решения математической модели рабочего процесса эрлифта, коэффициент гидравлического трения λ' определен по формуле Шифринсона

$$\lambda' = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{D} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

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

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

$$\sum L_s(z) = (H + h - z) \cdot [1 - \varphi_{ср}(z)], \quad (9)$$

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

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

$$F'_{g(n-i)}(z) = m' \cdot g \cdot \frac{n}{H+h} \cdot (H+h-z) = m' \cdot g \cdot n \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h}\right). \quad (10)$$

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

$$p''_i = p_0 + p_{cm} \cdot \left(1 - \frac{i \cdot L_s}{n \cdot L_s}\right) = p_0 + p_{cm} \cdot \left(1 - \frac{i}{n}\right), \quad (11)$$

где L_s - длина жидкостной пробки,

$$L_s = \bar{L}_s \cdot D, \quad (12)$$

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

При $i = 1$ абсолютное давление в 1-ом газовом снаряде, равное давлению на верхнем торце 1-ой жидкостной пробки $p''_1 = p'_1$

$$p''_1 = p_0 + p_{cm} \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right). \quad (13)$$

Длина первого газового снаряда

$$L_{b1} = L_s \cdot k_{L_{b1}}, \quad (14)$$

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

Объем первого газового снаряда

$$V''_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_{b1}. \quad (15)$$

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

$$V''_i = V''_1 \cdot \frac{p''_1}{p''_i}. \quad (16)$$

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

$$L_{bi} = \frac{4 \cdot V''_i}{\pi \cdot D^2}. \quad (17)$$

Расчетная длина подъемной трубы при n жидкостных пробок в ней

$$(H+h)_{расч} = L_s \cdot n + L_{b1} + \sum_{i=2}^n L_{bi}. \quad (18)$$

Вычисленное по (18) значение $(H+h)_{расч}$ должно соответствовать условию $(H+h)_{расч} \leq H+h$.

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

$$t_{sm} = \frac{L_s + L_{bm}}{w'_m}, \quad (19)$$

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

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

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

Объем жидкостной пробки

$$V_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L_s. \quad (20)$$

Подача эрлифта

$$Q_э = \frac{V_s}{t_{sm}}. \quad (21)$$

Расход воздуха

$$Q_в = \frac{V_m''}{t_{sm}}, \quad (22)$$

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

Математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока решена численным методом с использованием компьютерной программы Mathcad. В частности, такие решения найдены для газожидкостных подъемников, экспериментальные исследования которых были выполнены ранее сотрудниками Донецкого национального технического университета (Донецкого политехнического института) (табл. 1).

В результате решения математической модели рабочего процесса эрлифта, как конечные, получены значения подач $Q_э$ и расходов воздуха $Q_в$ газожидкостных подъемников при заданных значениях и соотношениях длин жидкостных пробок L_s и газовых снарядов L_b .

Значения вычисленных подач $Q_э$ эрлифта и расходов воздуха $Q_в$ в виде зависимости $Q_э = f(Q_в, \bar{L}_s)$ при неизменной высоте первого газового снаряда ($i = 1$) $L_{b1} = \text{idem}$, нанесены на экспериментально по-

лученные расходные характеристики эрлифтов $Q_g = f(Q_6)$. В качестве примера приведены указанные графические построения для эрлифта с диаметром $D = 25$ мм и длиной $H+h = 14,0$ м подъемной трубы, геометрическим погружением смесителя $h = 5,5$ м и относительным погружением смесителя $\alpha = 0,393$ [9] (рис. 1).

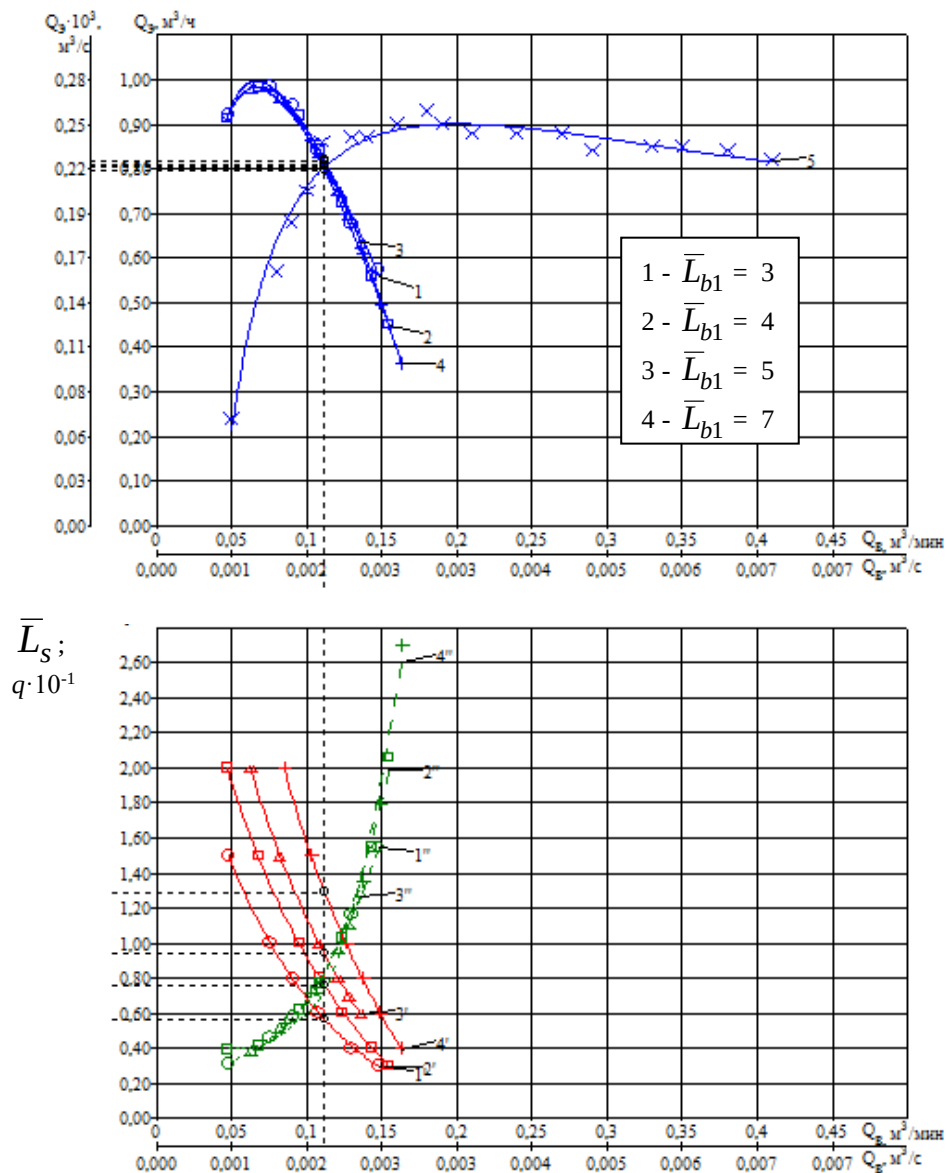


Рис. 1. Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок $\bar{L}_s$ и газовых снарядов $\bar{L}_{b1}$ для эрлифта $D = 25$ мм, $H+h = 14,0$ м, $h = 5,5$ м, $\alpha = 0,393$: 1÷4 – расчетные зависимости $Q_g = f(Q_6, \bar{L}_s)$; 5 – экспериментальная зависимость $Q_g = f(Q_6)$ [9]; 1'÷4' - $\bar{L}_s = f(Q_6)$; 1''÷4'' - $q = f(Q_6)$.

Таблица 1. Значения гидродинамических параметров эрлифтов в точке пересечения расчетных $Q_9 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученных $Q_9 = f(Q_6)$ кривых

Диаметр подъемной трубы D , мм	Длина подъемной трубы $H+h$, м	Относительная длина подъемной трубы $(H+h)/D$	Геометрическое погружение смесителя h , м	Относительное погружение смесителя α	Расход воздуха Q_6 , м ³ /мин (м ³ /с)	Подача эрлифта Q_9 , м ³ /ч (м ³ /с)	Относительная длина первого газового сляка $\bar{L}_{s1}$	Относительная длина жидкостной пробки $\bar{L}_s$	Осредненное значение $\bar{L}_s$	Удельный расход воздуха q	Источник экспериментальных данных
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
25	14,0	560,0	5,5	0,393	0,112 (1,87·10 ⁻³)	0,805 (2,24·10 ⁻⁴)	3	0,564	0,8÷0,9	8,31	[9]
							4	0,757		8,20	
							5	0,940		8,37	
							7	1,29		7,34	
50	14,0	280,0	5,5	0,393	0,730 (0,0122)	4,650 (1,29·10 ⁻³)	3	0,496	0,8÷1,0	9,37	[9]
							4	0,655		9,44	
							5	0,818		9,36	
							7	1,11		9,37	
							9	1,42		8,81	
60	16,0	266,7	8,0	0,500	1,300 (0,0217)	9,828 (0,00273)	3	0,677	1,1÷1,3	7,98	[10]
							4	0,888		8,04	
							5	1,10		8,11	
							7	1,50		7,95	
							9	1,90		7,98	
100	17,5	175,0	8,75	0,500	4,600 (0,0767)	46,20 (0,0128)	3	0,949	1,6÷1,7	5,71	[11]
							4	1,24		5,89	
							5	1,54		6,00	
							7	2,09		6,11	
							9	2,59		6,26	
150	115,0	766,7	72,0	0,625	7,150 (0,119)	116,5 (0,0324)	4	9,01	14,0÷15,0	3,56	[11]
							6	12,9		3,73	
							8	15,9		3,96	
							10	19,0		4,07	
150	63,7	424,7	59,3	0,931	3,750 (0,0625)	191,4 (0,0532)	4	23,8	34,0÷35,0	1,09	[12]
							6	32,0		1,18	
							8	38,2		1,27	
							10	43,7		1,36	
250	16,0	64,0	8,0	0,500	8,50 (0,142)	140,1 (0,0389)	12	5,72	5,7÷5,8	3,22	[13]

Длина первого газового снаряда L_{b1} выражена значением относительной длины первого газового снаряда $\bar{L}_{b1} = \frac{L_{b1}}{D} = k_{L_{b1}} \cdot \bar{L}_s$. На этом же рисунке (рис. 1) приведены графические зависимости относительной длины жидкостной пробки $\bar{L}_s = f(Q_g)$ и удельного расхода воздуха $q = f(Q_g)$ от абсолютного расхода воздуха при $\bar{L}_{b1} = \text{const}$.

Сравнение расчетных $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученных $Q_g = f(Q_g)$ зависимостей дает основание утверждать, что точка пересечения этих кривых (рис. 1) определяет относительную длину жидкостной пробки $\bar{L}_s$ в подъемной трубе данного эрлифта, а также значение удельного расхода воздуха q в этом режиме работы газожидкостного подъемника.

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

Принятый диапазон значений относительной длины первого газового снаряда $\bar{L}_{b1} = 3 \div 7$ при анализе режимов работы эрлифта $D = 25$ мм, $H+h = 14,0$ м, $h = 5,5$ м, $\alpha = 0,393$ обосновывается тем, что при значениях $\bar{L}_{b1}$ меньших, либо больших принятого диапазона или отсутствуют численные решения дифференциального уравнения (1) для

некоторых сечений подъемной трубы, или решения лишены физического смысла (по значениям относительных расходов воздуха q , газо-содержания φ , скоростей жидкостной пробки в подъемной трубе w' и др.). Такие варианты решения дифференциального уравнения (1) из числа анализируемых исключались.

Значения относительных длин жидкостных пробок $\bar{L}_s$ при расходе воздуха $Q_6 \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$), соответствующем точке пересечения расчетных $Q_9 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученной $Q_9 = f(Q_6)$ кривых, составляют (рис. 1): при $\bar{L}_{b1} = 3 - \bar{L}_s = 0,564$; при $\bar{L}_{b1} = 4 - \bar{L}_s = 0,757$; при $\bar{L}_{b1} = 5 - \bar{L}_s = 0,940$; при $\bar{L}_{b1} = 7 - \bar{L}_s = 1,292$.

Таким образом, имеются основания утверждать, что для эрлифта $D = 25 \text{ мм}$, $H+h = 14,0 \text{ м}$, $h = 5,5 \text{ м}$, $\alpha = 0,393$ относительная длина жидкостных пробок в подъемной трубе составляет $\bar{L}_s \approx 0,8 \div 0,9$ (рис. 1).

Удельный расход воздуха q при абсолютном расходе воздуха $Q_6 \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$), соответствующем точке пересечения расчетных $Q_9 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученной $Q_9 = f(Q_6)$ кривых, составляет (рис. 1): при $\bar{L}_{b1} = 3 - q = 8,31$; при $\bar{L}_{b1} = 4 - q = 8,20$; при $\bar{L}_{b1} = 5 - q = 8,37$; при $\bar{L}_{b1} = 7 - q = 7,34$. Полученный диапазон значений удельного расхода воздуха $q = 7,34 \div 8,37$ при относительном погружении смесителя $\alpha = 0,393$ соответствует множественным экспериментальным данным ученых ДонНТУ (ДПИ) [14-15], что также косвенно подтверждает достоверность результатов проведенных исследований по определению относительной длины жидкостных пробок в подъемной трубе эрлифта.

Результаты анализа гидродинамических параметров рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока рассмотренного выше и аналогично исследованных эрлифтов приведены в таблице 1.

Как следует из результатов аналитически-экспериментального исследования эрлифтов с диапазонами диаметров подъемных труб $D = 25 \div 250 \text{ мм}$, длин подъемных труб $H+h = 14 \div 115 \text{ м}$, относительных погружений смесителя $\alpha = 0,393 \div 0,931$ увеличение относительного погружения α сопровождается ростом относительных длин жидкостных пробок $\bar{L}_s$ (табл. 1). Так, при $\alpha = 0,393$ относительные длины жидкостных пробок составляют $\bar{L}_s = 0,8 \div 0,9$ (при $D = 25 \text{ мм}$) и $\bar{L}_s =$

0,8÷1,0 (при $D = 50$ мм). При $\alpha = 0,500$ относительные длины жидкостных пробок составляют $\bar{L}_s = 1,1\div 1,3$ (при $D = 60$ мм) и $\bar{L}_s = 1,6\div 1,7$ (при $D = 100$ мм), при $\alpha = 0,625$ - $\bar{L}_s = 14,0\div 15,0$ (при $D = 150$ мм), а при $\alpha = 0,931$ - $\bar{L}_s = 34,0\div 35,0$ (при $D = 150$ мм). Существенно более значительные длины жидкостных пробок при $D = 150$ мм ($\bar{L}_s = 14,0\div 15,0$ и $\bar{L}_s = 34,0\div 35,0$) в сравнении с эрлифтами с другими значениями D можно объяснить ощутимо большими абсолютными длинами подъемных труб ($H+h = 115$ м и $H+h = 63,7$ м соответственно) при значениях относительных длин подъемных труб $(H+h)/D = 175,0\div 766,7$ для анализируемых эрлифтов с $D = 25\div 150$ мм. Такие результаты не противоречат известным данным многих исследователей [3-5, 16-18]. Изложенным известным [3-5, 16-18] и полученным в данной работе закономерностям соответствует и значение относительной длины жидкостных пробок $\bar{L}_s = 5,7\div 5,8$ для эрлифта с $D = 250$ мм, $H+h = 16,0$ м, $(H+h)/D = 64,0$ м, $\alpha = 0,500$ (табл. 1), что хотя и значительно отличается от значений $\bar{L}_s$ для других эрлифтов с $\alpha = 0,500$, но может быть объяснено существенно большим абсолютным значением диаметра подъемной трубы ($D = 250$ мм в сравнении с $D = 60$ и 100 мм).

Выводы и направления дальнейших исследований. Разработана математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющая учитывать влияние длины жидкостных пробок L_s и газовых снарядов L_b в подъемной трубе на режимы работы газожидкостного подъемника. Предложен аналитико-экспериментальный метод определения значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок $\bar{L}_s$ и газовых снарядов $\bar{L}_b$ путем сравнения расчетных $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученных $Q_g = f(Q_g)$ зависимостей. Результаты проведенных исследований позволят установить рациональные значения и соотношения относительных длин жидкостных пробок $\bar{L}_s$ и газовых снарядов $\bar{L}_b$, обеспечивающих повышение энергетической эффективности работы газожидкостных подъемников.

Список источников:

1. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. - Суми: СДУ. - 2005. - №12(84). - С. 38-48.

2. Кононенко А.П., Гусак А.Г. Экспериментальное подтверждение влияния вида структуры водовоздушного потока на энергоемкость эрлифта // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки, Науковий журнал. - 2009. - № 1. - С. 34-42.
3. Мойссис, Гриффитс. Влияние входных условий на снарядный режим течения двухфазной смеси // Труды американского общества инженеров механиков, серия С. Теплопередача. - Том 84. - 1962. - №1. - С. 38-51.
4. Мойссис. Переход от снарядного к эмульсионному режиму течения двухфазной среды // Труды американского общества инженеров-механиков, серия С. Теплопередача. - Том 85. - 1963. - № 4. - С. 93 - 98.
5. Похвалов Ю.Е., Субботин В.И. Статистические параметры снарядного двухфазного течения // Теплоэнергетика. - 1988. - №2. - С. 28-33.
6. Маркович Э.Э. Образование и длина жидких пробок в газлифтных скважинах // Нефтяное хозяйство. - 1991. - №12. - С. 22-23.
7. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока // Промислова гідравліка і пневматика. - Вінниця. - 2006. - №1. - С. 34-37.
8. Кононенко А.П., Калиниченко В.В. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія :Математичне моделювання в техніці та технологіях. - Харків:НТУ «ХПІ». - 2013. - №5 (979). - С. 110-118.
9. Стифеев Ф.Ф. Разработка эрлифтов для подъема пульп повышенной плотности: Дис.... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1985. - 262 с.
10. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1976. - 197с.
11. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт: Дис. ... канд. техн. наук: - Донецк: ДПИ, 1963, том I - 209 с., том II – 140 с.
12. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. - Донецк: ДПИ, 1982. - 323с.
13. Шевченко В.Ф. Исследование и разработка узла подвода пневматической энергии в эрлифте: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.173. - Донецк: ДПИ, 1974. - 183 с.
14. Эрлифтные установки: Учебное пособие / В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, Я.К. Антонов – Донецк: ДПИ, 1982. - 64 с.
15. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко - М.: Информсвязьиздат, 1995. - 592 с.
16. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. ч. II. - М.: Наука, Гл. ред. физ.мат. лит., 1987. - 360 с.
17. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. - 440 с.
18. Гриценко А.И., Клапчук О.В., Харченко Ю.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. М.: Недра, 1994. - 238 с.

Стаття надійшла до редколегії 20.10.2013

А.П.Кононенко, В.В.Калиниченко. Математична модель робочого процесу ерліфта з розвитою снарядною структурою водоповітряного потоку.

Розроблена математична модель робочого процесу ерліфта з розвитою снарядною структурою водоповітряного потоку, що дозволяє враховувати вплив довжини газових снарядів та рідинних пробок на режими роботи газорідинного підйомника, а також, на основі експериментального підтвердження, встановлювати основні геометричні характеристики снарядного потоку в вертикальній підйомній трубі.

Математична модель, ерліфт, підйомна труба, снарядна структура, подача, витрата повітря, енергоефективність, довжина газового снаряду, довжина рідинної пробки

A.Kononenko, V.Kalinichenko. A mathematical model of working with airlift operating practices at the optimum projectile mode.

The mathematical model of operating process of the airlift is worked out with advanced projectile structure of the water-air stream, which allows to take into account the influence of the length of the gas projectiles and liquid corks on the modes of operation of gas-liquid lift, as well as on the basis of experimental evidence, to establish the basic geometric characteristics of projectile flow in a vertical riser.

Mathematical model, airlift, lift pipe, projectile structure, serve, expense of air, energy efficiency, length of the gas projectile, length of the liquid corks.

© А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко, 2013