

УДК 622.276.5:556

А.П. Кононенко (д-р техн. наук, проф.),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»,
В.В. Калиниченко (ст. преп.)
Красноармейский индустриальный институт
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

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.

Ключевые слова: 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 характе-

ризуется наличием достаточно больших газовых пузырей (пузырей Тейлора) [3], разделяемых жидкостными пробками. При этом расстояние между газовыми снарядами достаточно велико, они имеют гладко скругленную головку и поднимаются с одинаковой скоростью.

Развивающийся снарядный режим возникает при расстоянии между газовыми пузырями меньше некоторого критического значения, 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 находящейся 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.

Массы 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

$$\begin{aligned} F_p(z) &= [p(z) - p_0] \cdot \omega = \left[p_0 + p_{см} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h} \right) - p_0 \right] \cdot \omega = \\ &= p_{см} \cdot \left(1 - \frac{z}{H+h} \right) \cdot \omega, \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

где $\varphi_{cp}(z)$ – 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

$$V_1'' = \frac{p \cdot D^2}{4} \cdot L_{b1}. \quad (15)$$

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 $2 \leq i \leq n$

$$L_{bi} = \frac{4 \cdot V_i''}{p \cdot D^2}. \quad (17)$$

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

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

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 .

Табл. 1. Значения гидродинамических параметров эрлифтов в точке пересечения расчетных $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученных $Q_3 = f(Q_6)$ кривых

Диаметр подъемной трубы D , мм	Длина подъемной трубы $H+h$, м	Относительная длина подъемной трубы $(H+h)/D$	Геометрическое погружение смесителя h , м	Относительное погружение смесителя α	Расход воздуха Q_6 , м ³ /мин (м ³ /с)	Подача эрлифта Q_3 , м ³ /ч (м ³ /с)	Относительная длина первого газового снаряда L_{b1}	Относительная длина жидкостной пробки \bar{L}_s	Осредненное значение \bar{L}_s	Удельный расход воздуха q	Источник экспериментальных данных
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	[12]
							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]

Значения вычисленных подач Q_3 эрлифта и расходов воздуха Q_6 в виде зависимости $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ при неизменной высоте первого газового снаряда ($i = 1$) $L_{b1} = \text{idem}$, нанесены на экспериментально полученные расходные характеристики эрлифтов $Q_3 = f(Q_6)$. 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).

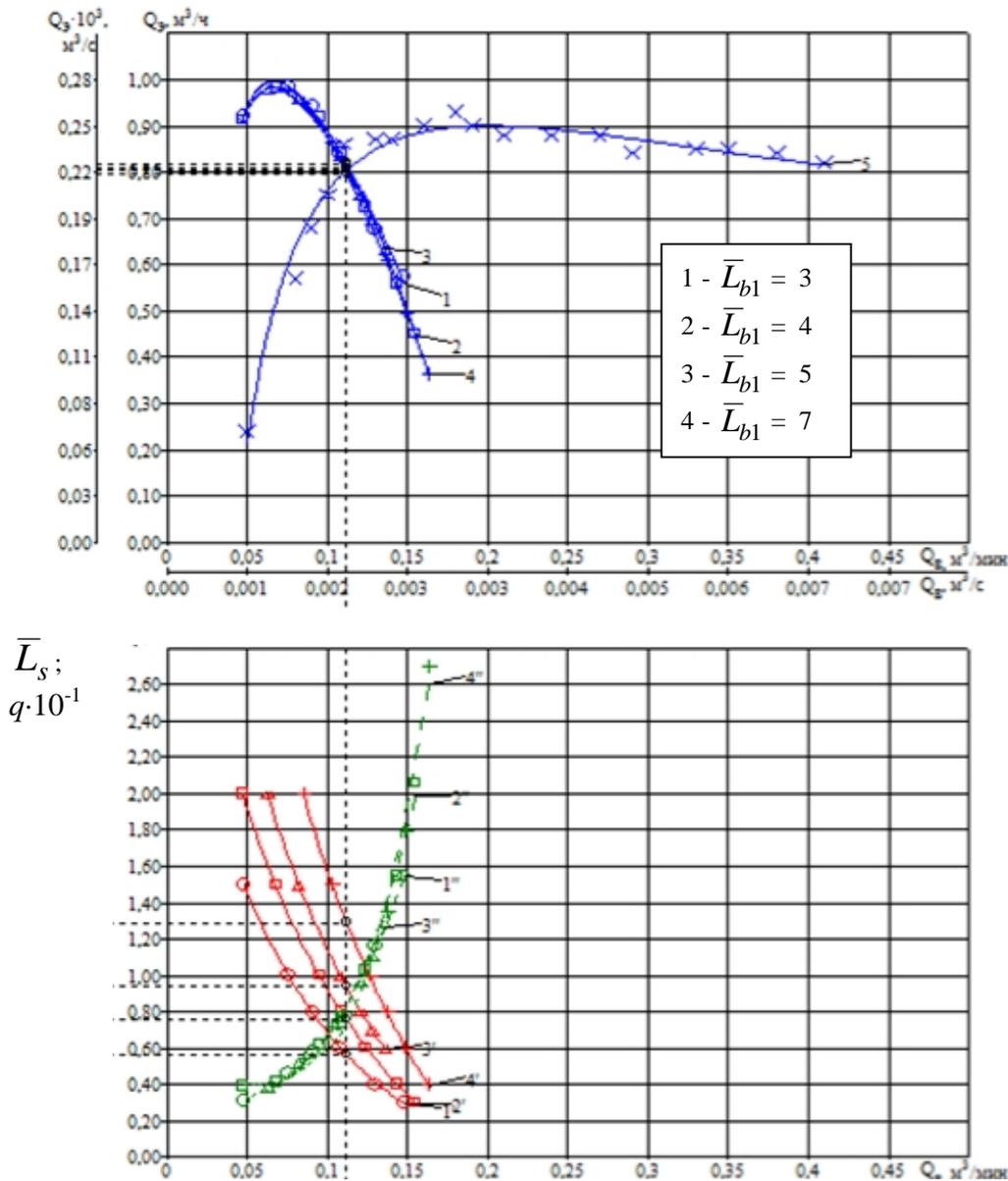


Рис. 1. Аналитически-экспериментальное определение значений и соотношений относительных длин жидкостных пробок \bar{L}_s и газовых снарядов \bar{L}_{b1} для эрлифта $D = 25$ мм, $H+h = 14,0$ м, $h = 5,5$ м, $\alpha = 0,393$: 1÷4 – расчетные зависимости $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$; 5 – экспериментальная зависимость $Q_3 = f(Q_6)$ [9]; 1'÷4' - $\bar{L}_s = f(Q_6)$; 1"÷4" - $q = f(Q_6)$.

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 $\bar{L}_s = f(Q_e)$ и удельного расхода воздуха $q = f(Q_e)$ от абсолютного расхода воздуха при $\bar{L}_{b1} = const$.

Сравнение расчетных $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученных $Q_3 = f(Q_e)$ 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 $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученной $Q_3 = f(Q_e)$ кривых значения расхода воздуха составляет $Q_e \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$) и подачи эрлифта $Q_3 \approx 0,805 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($2,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$) практически при всех анализируемых значениях относительной длины первого газового снаряда $\bar{L}_{b1} = 3 \div 7$ [кривые $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$ при значениях $\bar{L}_{b1} = 3, 4, 5$ и 7 визуально «наложились» друг на друга]. Допущение о равенстве расхода воздуха Q_e и подачи эрлифта Q_3 в точке пересечения расчетных $Q_3 = f(Q_e, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученной $Q_3 = f(Q_e)$ кривых при всех анализируемых значениях $\bar{L}_{b1} = 3, 4, 5$ 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 , газосодержания 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 $Q_g \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$), соответствующем точке пересечения расчетных $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученной $Q_g = f(Q_g)$ 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 $Q_g \approx 0,112 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($1,87 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$), соответствующем точке пересечения расчетных $Q_g = f(Q_g, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученной $Q_g = f(Q_g)$ 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 $Q_3 = f(Q_6, \bar{L}_s)$ и экспериментально полученных $Q_3 = f(Q_6)$ зависимостей. Результаты проведенных исследований позволяют 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 литературы

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

2. Кононенко А.П. Экспериментальное подтверждение влияния вида структуры водовоздушного потока на энергоемкость эрлифта / А.П.Кононенко, А.Г. Гусак // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2009. – № 1. – С. 34-42.
3. Мойссис, Гриффитс. Влияние входных условий на снарядный режим течения двухфазной смеси / Г. Мойссис // Труды американского общества инженеров механиков, серия С. Теплопередача. – Том 84. – 1962. – №1. – С. 38-51.
4. Мойссис Г. Переход от снарядного к эмульсионному режиму течения двухфазной среды / Г. Мойссис // Труды американского общества инженеров-механиков, серия С. Теплопередача. – Том 85. – 1963. – № 4. – С. 93 - 98.
5. Похвалов Ю.Е. Статистические параметры снарядного двухфазного течения / Ю.Е. Похвалов, В.И. Субботин // Теплоэнергетика. – 1988. – №2. – С. 28-33.
6. Маркович Э.Э. Образование и длина жидких пробок в газлифтных скважинах / Э.Э. Маркович // Нефтяное хозяйство. – 1991. – №12. – С. 22-23.
7. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – №1. – С. 34-37.
8. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2013. – №5 (979). – С. 110-118.
9. Стифеев Ф.Ф. Разработка эрлифтов для подъема пульпы повышенной плотности: Дис.... канд. техн. наук: 05.05.06 / Стифеев Федор Федорович. – 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 / Козыряцкий Леонид Никитович. – Донецк: ДПИ, 1976. – 197с.
11. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт: Дис. ... канд. техн. наук / Костанда Виктор Семенович. – 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 / Адамов Борис Исаевич. – Донецк: ДПИ, 1982. – 323с.
13. Шевченко В.Ф. Исследование и разработка узла подвода пневматической энергии в эрлифте: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.173 / Шевченко Владимир Филиппович. – 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 / Р.И. Нигматулин. – ч. II. – М.: Наука, Гл. ред. физ.мат. лит., 1987. – 360 с.
17. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
18. Гриценко А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А.И. Гриценко, О.В. Клапчук, Ю.А. Харченко. – М.: Недра, 1994. - 238 с.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2013

*А.П. Кононенко, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
В.В. Калиниченко, Красноармійський індустріальний інститут ДВНЗ «До-
нецький національний технічний університет»*

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 газорідного підйомника, а також, на основі експериментального підтвердження, встановлювати основні геометричні характеристики снарядного потоку в вертикальній підйомній трубі.

Ключові слова: математична модель, ерліфт, підйомна труба, снарядна структура, подача, витрата повітря, енергоефективність, довжина газового снаряду, довжина рідинної пробки.

A.Kononenko, Donetsk National Technical University; V. Kalinichenko, Krasnoarmiysk Industrial Institute of Donetsk National Technical University

A Mathematical Model of Working with Airlift Operating Practices at the Optimum Projectile Mode

A mathematical model of airlift operating process is developed with advanced projectile structure of water-air stream, which allows taking into account the influence of the length of gas projectiles and liquid corks on operation modes of gas-liquid lift, and, on the basis of experimental evidence, establishing basic geometric characteristics of projectile flow in a vertical riser.

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