

УДК 532.542

С.И. КРИЛЬ, доктор технических наук
И.В. СКОРОХОД, кандидат физико-математических наук
В.В. ФАДЕИЧЕВ, главный инженер-гидротехник
Л.С. ОРЛОВА, ведущий инженер
Институт гидромеханики НАН Украины

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭРЛИФТА НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ТЕЧЕНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Наведено гідравлічні рівняння для усталеного ізотермічного потоку водоповітряної суміші у вертикальній трубі. Обговорюються шляхи замикання системи гідравлічних рівнянь і побудови на їх основі витратної характеристики ерліфта. Одержано розрахункові залежності для визначення істинних швидкостей руху рідинної і газової фаз суміші.

Ключові слова: ерліфт, гідравлічні рівняння газорідинного потоку, витратна характеристика ерліфта.

Приведены гидравлические уравнения для установившегося изотермического потока водовоздушной смеси в вертикальной трубе. Обсуждаются пути замыкания системы гидравлических уравнений и построения на их основе расходной характеристики эрлифта. Получены расчетные зависимости для определения истинных скоростей движения жидкой и газовой фаз смеси.

Ключевые слова: эрлифт, гидравлические уравнения газожидкостного потока, расходная характеристика эрлифта.

The hydraulic equations for the isothermal steady flow of water-air mixture in the vertical pipe are given. The methods of closing of the system of hydraulic equations and building on their basis the flow characteristic of airlift are discussed. The calculating dependences for determining the true velocities of the liquid and gaseous phases of the mixture are obtained.

Key words: airlift, hydraulic equations of gas-liquid flow, flow characteristic of airlift.

Одной из важных характеристик рабочего процесса эрлифта является производительность эрлифта, т.е. объемный расход жидкости, поднимаемой из глубины на поверхность земли.

Для заданных условий лифтирования расходная характеристика эрлифта представляет собой кривую зависимости объемного расхода жидкости от объемного расхода подаваемого воздуха. Для определения этой характеристики используют обычно гидродинамические дифференциальные уравнения сохранения массы и импульса для одномерного установившегося течения газожидкостной смеси как двухфазной среды [1]. В настоящей статье предлагается использовать более простые уравнения – гидравлические уравнения неразрывности и энергобаланса (уравнение Бернулли). В данном случае преимущество гидравлических уравнений над гидродинамическими состоит в том, что уравнение энергобаланса для потока смеси позволяет учесть мощность силы межфазного взаимодействия, связанную со скольжением фаз. Учет этой мощности имеет принципиальное значение, так как с ней связана диссипация энергии в относительном движении фаз [2].

Для установившегося изотермического потока реальной (вязкой) газожидкостной смеси в вертикальной трубе уравнение Бернулли напишем, учитывая [3], в виде

$$(1 - \beta_m)k_w \frac{u_w^2}{2g} + \beta_m k_\Gamma \frac{u_\Gamma^2}{2g} + (1 - \beta_m) \frac{P}{\rho_w g} + \beta_m \frac{P_0}{\rho_0 g} \ln \frac{P}{P_0} + z + h_{\text{тр}} + h_{\text{отн}} = \text{const} \quad (\text{вдоль потока}); \quad (1)$$

$$h_{\text{тр}} = \frac{4}{D} \int_0^H \frac{\tau_0}{\rho F g} dz; \quad (2)$$

$$h_{\text{отн}} = \frac{F}{g(Q_{m,\Gamma} + Q_{m,w})} \int_0^H R(u_\Gamma - u_w) dz. \quad (3)$$

К уравнению (1) присоединяются уравнение сохранения массы фаз

$$Q_{m,w} = \rho_w Q_w = \text{const}, \quad (4)$$

$$Q_{m,\Gamma} = \rho_\Gamma Q_\Gamma = \text{const}, \quad (5)$$

(вдоль потока)

и уравнения состояния фаз

$$\rho_w = \text{const}, \quad (6)$$

$$PV_\Gamma = \text{const}. \quad (7)$$

При записи уравнений (1-7) использованы следующие обозначения: u_w, k_w – истинная средняя по сечению трубы скорость и коэффициент Кориолиса для жидкой фазы смеси; u_Γ, k_Γ – то же для газовой фазы; β_m – расходная массовая концентрация газовой фазы; g – ускорение свободного падения; ρ_w, ρ_Γ – плотность жидкой и газовой фаз; P – давление; P_0, ρ_0 – атмосферное давление и плотность свободного воздуха для стандартных физических условий; z – координата, направленная вверх и отсчитываемая от смешивающего устройства эрлифта; τ_0 – интенсивность силы трения на стенках трубы; Q_w, Q_Γ – объемный расход жидкой и газовой фаз; $Q_{m,w}, Q_{m,\Gamma}$ – массовый расход жидкой и газовой фаз; F, D, H – площадь сечения, диаметр и длина подъемной трубы эрлифта; $V_\Gamma = \frac{1}{\rho_\Gamma}$ – удельный

объем газовой фазы; R – удельная, отнесенная к единице объема смеси, сила межфазового взаимодействия, обусловленная разностью скоростей фаз; $h_{тр}$ – потеря напора на трение; $h_{отт}$ – потеря напора, связанная со скольжением фаз.

Для построения расходной характеристики эрлифта на основе уравнения (1) необходимо предварительно определить истинные скорости фаз u_g и u_w , расходную массовую концентрацию β_m , давление P и потери напора $h_{тр}$ и $h_{отт}$, выразив их через расходы Q_w и Q_g . Подставляя выражения названных параметров в уравнение (1), и полагая, что $k_w = k_g = 1$, будем иметь уравнение, связывающее между собой расходы Q_w , Q_g и геометрические характеристики эрлифта.

Истинные скорости фаз по определению равняются

$$u_g = \frac{Q_g}{\varphi F}, \quad (8)$$

$$u_w = \frac{Q_w}{(1-\varphi)F}, \quad (9)$$

где φ – истинное газосодержание водовоздушного потока.

Из-за попутного расширения газовой фазы, связанного с непрерывным падением давления по длине трубы, величины Q_g и φ , а следовательно, u_g и u_w , являются функциями от x , тогда как величина Q_w неизменна вдоль потока.

Для определения расхода Q_g используем уравнение (5), переписав его в виде

$$\rho_g Q_g = \rho_0 Q_0, \quad (10)$$

где Q_0 – объемный расход свободного воздуха при нормальных физических условиях.

Из (10) получаем

$$Q_g = Q_0 \frac{\rho_0}{\rho_g}. \quad (11)$$

Отношение плотностей $\frac{\rho_0}{\rho_g}$ определим из уравнения состояния (7), преобразовав его к виду

$$\frac{P}{\rho_g} = \frac{P_0}{\rho_0}.$$

Отсюда

$$\frac{\rho_0}{\rho_g} = \frac{1}{\bar{P}}, \quad (12)$$

где $\bar{P} = \frac{P}{P_0}$ – безразмерное абсолютное давление в трубе как функция от безразмерной координаты $\bar{z} = \frac{z}{H}$.

С учетом (12) уравнение (11) принимает вид

$$Q_g = \frac{Q_0}{\bar{P}}. \quad (13)$$

В процессе работы неглубоководных промышленных эрлифтов давление в подъемной вертикальной трубе изменяется вдоль течения по закону, близкому к линейному [5], поэтому представим \bar{P} в виде функции

$$\bar{P} = \bar{P}_{см} - (\bar{P}_{см} - \bar{P}_{вхк})\bar{z}, \quad (14)$$

где $\bar{P}_{\text{см}} = \frac{P_{\text{см}}}{P_0}$, $\bar{P}_{\text{вык}} = \frac{P_{\text{вык}}}{P_0}$ – безразмерное абсолютное давление в смесителе и у выхода из трубы.

Подставив в (8) вместо Q_r его выражение (13), получим, учитывая, что $F = \frac{\pi}{4} D^2$,

$$u_r = \frac{4}{\pi \varphi D^2 F} Q_0 \quad (15)$$

Попутно перепишем (9) в виде

$$u_w = \frac{4}{\pi (1-\varphi) D^2} Q_w \quad (16)$$

Что касается истинного газосодержания φ , то его определим по формуле [6]

$$\varphi = \frac{(1-\varepsilon)\beta}{1-\varepsilon\beta}, \quad (17)$$

$$\beta = \frac{Q_0}{Q_0 + F Q_w}; \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{0,167}{1-0,833\beta_s}, \quad (19)$$

где β – расходная объемная концентрация газовой фазы; β_s – значение концентрации β , соответствующее среднему по длине трубы абсолютному давлению \bar{P}_s , равному

$$\bar{P}_s = \frac{1}{2} (\bar{P}_{\text{см}} + \bar{P}_{\text{вык}}). \quad (20)$$

Преобразуем формулы (15) и (16) к безразмерному виду, приняв в качестве масштаба объемного расхода величину $D^2 \sqrt{gH}$. В результате деления уравнений (15) и (16) на $D^2 \sqrt{gH}$ получаем, учитывая (17) и (18),

$$\bar{u}_r = \frac{4}{\pi} \frac{(1-\varepsilon)Q_0 + FQ_w}{(1-\varepsilon)F}, \quad (21)$$

$$\bar{u}_w = \frac{4}{\pi} \frac{(1-\varepsilon)Q_0 + FQ_w}{F}. \quad (22)$$

Здесь приняты обозначения:

$$\bar{u}_r = \frac{u_r}{\sqrt{gH}}; \quad (23)$$

$$\bar{u}_w = \frac{u_w}{\sqrt{gH}} \quad (24)$$

– безразмерные скорости фаз;

$$\bar{Q}_0 = \frac{Q_0}{D^2 \sqrt{gH}}; \quad (25)$$

$$\bar{Q}_w = \frac{Q_w}{D^2 \sqrt{gH}} \quad (26)$$

– безразмерные объемные расходы фаз.

Средняя по сечению трубы безразмерная скорость смеси \bar{u} равняется:

$$\bar{u} = \frac{4}{\pi} (\bar{Q}_0 + \bar{Q}_w) \frac{1}{F}. \quad (27)$$

Расходная массовая концентрация β_m выражается через \bar{Q}_0 и \bar{Q}_w следующим образом

$$\beta_m = \frac{\rho_0 \bar{Q}_0}{\rho_0 \bar{Q}_0 + \rho_w \bar{Q}_w} \quad (28)$$

и ее величина, согласно (4) и (5), постоянна вдоль течения.

Далее, потери напора на трение $h_{\text{тр}}$ определены в [4]. Что касается потерь напора на скольжение фаз $h_{\text{отн}}$, то для их определения необходимо

предварительно определить силу межфазного взаимодействия R , содержащуюся в (3). Кроме того, предстоит еще найти выражения для давлений $\bar{P}_{\text{см}}$ и $\bar{P}_{\text{выск}}$, содержащихся в формуле (14). Определение параметров R , $\bar{P}_{\text{см}}$ и $\bar{P}_{\text{выск}}$ является предметом дальнейших исследований.

В заключение данной работы определим в качестве примера характер изменения скоростей \bar{u}_r и \bar{u}_w по длине трубы для конкретных условий лифтирования. Для этого используем заимствованную из [7] экспериментальную расходную характеристику эрлифта $D = 0,15\text{м}$, $H = 51,4\text{м}$, $d = 0,1\text{м}$, $l = 21\text{м}$, $h = 47\text{м}$, где d , l – диаметр и длина подающей трубы; h – глубина погружения эрлифта. Графическое изображение этой характеристики показано на рис.1.

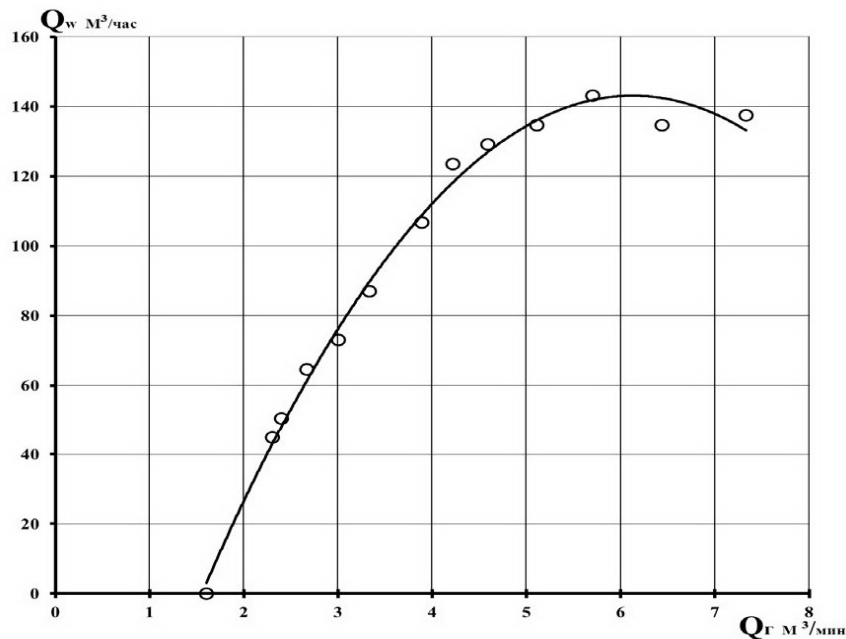


Рис.1. Экспериментальная расходная характеристика эрлифта [7]

Определим функции $\bar{u}_r(\bar{z})$ и $\bar{u}_w(\bar{z})$, например, для расхода воздуха $Q_{\Gamma} = 4 \text{ м}^3/\text{мин} = 0,0667 \text{ м}^3/\text{с}$. Согласно рис.1., этому расходу соответствует расход жидкости $Q_{\text{ж}} = 112 \text{ м}^3/\text{час} = 0,031 \text{ м}^3/\text{с}$. Поскольку в данном опыте масштаб расхода $D^2\sqrt{gH} = 0,505 \text{ м}^3/\text{с}$, указанным выше расходам соответствуют безразмерные расходы $\bar{Q}_0 = 0,132$ и $\bar{Q}_w = 0,0614$. Кроме того, в данных опытах давления $\bar{P}_{\text{см}}$ и $\bar{P}_{\text{выск}}$ равняются: $\bar{P}_{\text{см}} = 4,78$, $\bar{P}_{\text{выск}} = 1,367$. При этом $\bar{P}_g = 3,073$, а соответствующее ему расчетное значение $\bar{\alpha} = 0,254$.

Значения безразмерных параметров \bar{P} , \bar{u}_r и \bar{u}_w , полученные по соответствующим формулам (14), (21) и (22), а также размерных скоростей u_r , u_w и $\Delta u = u_r - u_w$, представлены в таблице 1.

Таблиця 1

\bar{z}	P	$\bar{u}_Г$	\bar{u}_W	$u_Г$ (м/с)	u_W (м/с)	Δu (м/с)
0	4,78	0,140	0,104	3,14	2,35	0,79
0,2	4,10	0,146	0,109	3,28	2,45	0,83
0,4	3,41	0,154	0,115	3,46	2,58	0,88
0,6	2,73	0,166	0,124	3,73	2,78	0,95
0,8	2,05	0,186	0,139	4,18	3,12	1,06
1,0	1,37	0,228	0,170	5,12	3,82	1,3

Графики зависимости величин $u_Г$, u_W и Δu от \bar{z} изображены на рис. 2.

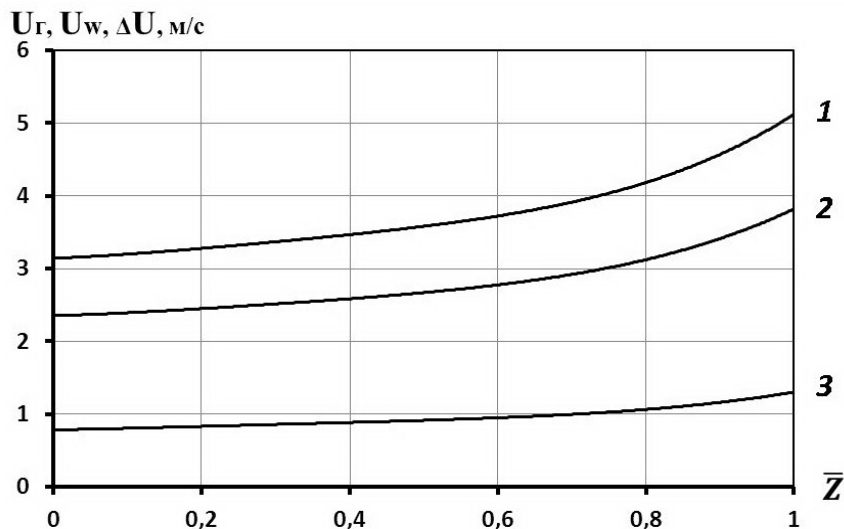


Рис.2. Зависимость скоростей $u_Г$, u_W , Δu от \bar{z} : 1 – $u_Г$; 2 – u_W ; 3 – Δu

Видно, что для заданных условий лифтирования истинные скорости фаз и разность этих скоростей непрерывно возрастают по длине трубы.

Список литературы

1. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. – 304 с.
2. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова думка, 1990. – 160 с.
3. Криль С.И. Гідравлічні рівняння для усталеного ізотермічного руху газорідних сумішей в трубах // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки – Вип.22. – 2013. – С.132-139.
4. Криль С.И., Кононенко А.П. О потерях напора на трение при движении водовоздушной смеси в подъемной вертикальной трубе эрлифта // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки – Вип.24 – 2014. – С.141-149.
5. Эрлифтные установки: учебное пособие / Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Антонов Я.К. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
6. Криль С.И., Кононенко А.П. Определение истинного газосодержания водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки – Вип.23. – 2014. – С.154-161.

7. Кононенко А.П. Теория и рабочий процесс эрлифта // Дисс. докт. техн. наук – Донецк, 2007. – 565 с.

Надійшло до редакції 15.04.2015