

С.И. КРИЛЬ, доктор технических наук  
Институт гидромеханики НАН Украины  
А.П. КОНОНЕНКО, доктор технических наук  
Донецкий национальный технический университет

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТИННОГО ГАЗСОДЕРЖАНИЯ ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

*На підставі виразу для витратної об'ємної концентрації отримано спрощене рівняння для визначення істинного газомісту у висхідному потоці водоповітряної суміші в вертикальній підіймальній трубі ерліфта та підтверджено його достовірність.*

**Ключові слова:** висхідний потік газорідинної суміші; істинний газоміст; вертикальна підіймальна труба ерліфта.

*На основании выражения для расходной объемной концентрации получено упрощенное уравнение для определения истинного газосодержания в восходящем потоке водовоздушной смеси в вертикальной подъемной трубе эрлифта и подтверждена его достоверность.*

**Ключевые слова:** восходящий поток газожидкостной смеси; истинное газосодержание; вертикальная подъемная труба эрлифта.

*Obtained based on the expression for the flow volume concentration simplified equation to determine the true gas content in the upstream gas-liquid mixture in a vertical riser airlift also its reliability is confirmed.*

**Keywords:** upflow gas-liquid mixture; the true gas content; the vertical lift tube airlift.

При разработке методики расчета параметров рабочего процесса эрлифта необходимо знать, в частности, истинное газосодержание в произвольном живом сечении газожидкостного потока. В работе [1] установлено следующее соотношение истинного  $\varphi_s$  и расходного  $\beta_s$  газосодержаний, соответствующих среднему давлению в трубе:

$$\varphi_s = 0,833\beta_s ; \quad (1)$$

$$\varphi_s = \frac{F_{г,с}}{F}; \quad (2)$$

© С.И. Криль, А.П. Кононенко, 2014

$$= \frac{Q_{г,с}}{Q_{г,с} + Q_w}; \quad (3)$$

здесь  $F_{г,с}$  – площадь живого сечения, занятая газовой фазой смеси;  $F$  – общая площадь живого сечения;  $Q_{г,с}$ ,  $Q_w$  – объемный расход газовой и жидкой фаз через сечение.

Соотношение (1) установлено эмпирически и относится к водовоздушному потоку. Опытные данные, из которых вытекает соотношение (1), показаны на рис. 1, который заимствован из [1]. На этом рисунке цифрами отмечены массовые расходы поднимаемой жидкости (в кг/час), к которым относятся соответствующие точки.

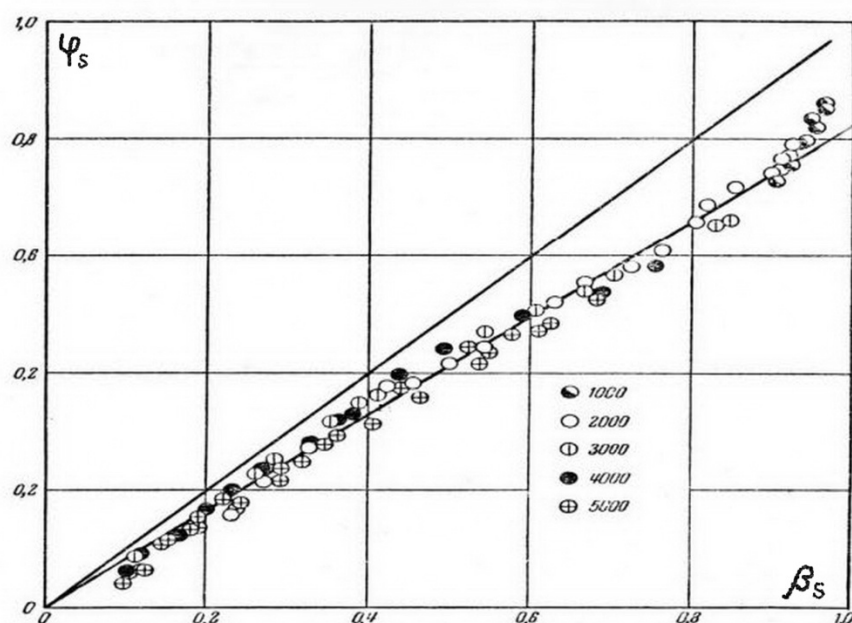


Рис. 1. Зависимость  $\varphi_s$  от  $\beta_s$  для вертикальной подъемной трубы эрлифта.

В [2] на основании выражения

$$\beta = \frac{q_g}{q_g + q_w}; \quad (4)$$

относящегося к произвольному живому сечению потока, получена более общая функциональная связь между  $\varphi$  и  $\beta$ , а именно:

$$\varphi = \frac{\beta}{1+(1-\beta)\alpha_0}, \quad (5)$$

$$\alpha_0 = \frac{u_\Gamma - u_w}{u_w}, \quad (6)$$

где  $u_\Gamma$ ,  $u_w$  – истинная средняя по сечению скорость газовой и жидкостной фаз.

Зависимость коэффициента  $\alpha_0$  от определяющих его параметров предложена в [3]. Установлено, что  $\alpha_0$  зависит от поверхностного натяжения жидкости на межфазной границе  $\sigma$ , динамической вязкости жидкости  $\mu_w$  и газового фактора  $\Gamma$

$$\Gamma = \frac{\beta}{1-\beta}, \quad (7)$$

приведенного к среднему давлению в трубе. В результате получена следующая эмпирическая зависимость для  $\alpha_0$ :

$$\alpha_0 = A(\mu_w)\Gamma^{1,5} - A(\sigma)\Gamma + B(\mu_w)\Gamma^{0,5} - B(\sigma), \quad (8)$$

здесь

$$A(\mu_w) = 0,00468 - 0,000389\mu_w; \quad (9)$$

$$A(\sigma) = 0,0475 - 0,001125\sigma; \quad (10)$$

$$B(\mu_w) = 0,67784 + 0,003623\mu_w; \quad (11)$$

$$B(\sigma) = 0,00538\sigma - 0,3284, \quad (12)$$

где поверхностное натяжение жидкости  $\sigma$  выражается в ерг/см<sup>2</sup>, а динамическая вязкость  $\mu_w$  – в сантипуазах. Формула (8) правомочна для широкогодиапазонаизменения определяющих параметров:  $0,01 < \beta \leq (0,05 \div 0,96)$ ;  $1 \leq \mu_w \leq 30$  сантипуаз;  $0 < \sigma \leq 72 \frac{\text{ерг}}{\text{см}^2}$ .

Сопоставление расчетных значений параметра  $\alpha_0$ , полученных по формуле (8), с опытными данными показывает, что среднее квадратичное отклонение составляет  $\pm 36,7\%$ . При этом максимальная погрешность

расчетных значений  $\varphi$  не превышает 13%. Выражение (8), а следовательно, и формула (5) относятся к пузырьковой, пробковой и эмульсионной структурам газожидкостной смеси.

В работе [4] уравнение для  $\varphi$  получено с учетом выражения для разности истинных средних скоростей фаз  $u_{\Gamma} - u_w$ :

$$u_{\Gamma} - u_w = \frac{\tilde{u}_{\Gamma}}{\varphi} - \frac{\tilde{u}_w}{(1-\varphi)}, \quad (13)$$

где  $\tilde{u}_{\Gamma} = \frac{Q_{\Gamma}}{F}$ ,  $\tilde{u}_w = \frac{Q_w}{F}$  – приведенные скорости фаз. Выражение (13) преобразуется к квадратному уравнению относительно  $\varphi$ :

$$(u_{\Gamma} - u_w)\varphi^2 - [\tilde{u}_{\Gamma} + \tilde{u}_w + (u_{\Gamma} - u_w)\varphi] + \tilde{u}_{\Gamma} = 0. \quad (14)$$

В качестве масштаба относительной скорости  $u_{\Gamma} - u_w$  принимается скорость свободного всплытия одиночного пузырька в безграничной неподвижной жидкости. Так что

$$u_{\Gamma} - u_w \approx \sqrt[4]{\frac{4g\sigma}{C_x^2 \rho_w} \left| 1 - \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_w} \right|}, \quad (15)$$

где  $C_x$  – коэффициент гидродинамического сопротивления для пузырька;  $\rho_{\Gamma}$ ,  $\rho_w$  – плотность газовой и жидкостной фаз. В результате подстановки выражения (15) в (14) и последующего решения полученного уравнения относительно  $\varphi$  получается

$$\varphi \approx \frac{1+K}{2} - \sqrt{\frac{(1+K)^2}{4} - \beta K}; \quad (16)$$

$$K = \frac{u\sqrt{\rho_w}}{\sqrt[4]{4g\sigma(\rho_w - \rho_{\Gamma})}}, \quad (17)$$

где  $u$  – средняя приведенная скорость движения смеси.

Недостатком методики расчета  $\varphi$  по формуле (5) совместно с (8) является то, что в частном случае – случае водовоздушных потоков и среднего давления в трубе – из формулы (5) не вытекает, учитывая (8), эмпирическое соотношение (1). Следовательно, для водовоздушных потоков вышеуказанная методика расчета истинного газосодержания является приближенной. Что касается расчетной зависимости (16), то она относится к пузырьковой структуре газожидкостных смесей и тоже носит приближенный

характер, поскольку не учитывает влияние концентрации пузырьков на относительную скорость движения фаз.

Ниже разработана методика определения истинного газосодержания исключительно для водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта. Кстати, такого рода двухфазные потоки в эрлифтах встречаются наиболее часто.

Учитывая, что поток газожидкостной смеси в эрлифте турбулентный, под термином средняя «истинная концентрация» газовой фазы будем подразумевать среднее по всему сечению трубы значение вероятностной концентрации этой фазы, т.е.

$$\varphi = \frac{1}{F} \int \bar{\varphi} dF, \quad (18)$$

где  $\bar{\varphi}$  – вероятность принадлежности произвольной заданной точки данного сечения к области, занятой газовой фазой. Такое определение средней истинной концентрации является наиболее общим и правомочным для различных структур газожидкостной смеси.

Поскольку

$$Q_{\Gamma} = \varphi u_{\Gamma} F, \quad (19)$$

$$Q_{\text{ж}} = (1 - \varphi) u_{\text{ж}} F, \quad (20)$$

перепишем уравнение (4) в виде

$$\beta = \frac{\varphi}{\varphi + (1 - \varphi) \frac{u_{\text{ж}}}{u_{\Gamma}}} \quad (21)$$

или, учитывая тождество

$$\frac{u_{\text{ж}}}{u_{\Gamma}} \equiv 1 - \frac{u_{\Gamma} - u_{\text{ж}}}{u_{\Gamma}},$$

можем написать, вместо (21),

$$\beta = \frac{\varphi}{\varphi - (1 - \varphi) \alpha}, \quad (22)$$

где

$$\alpha = \frac{u_{\Gamma} - u_{\text{ж}}}{u_{\Gamma}}. \quad (23)$$

Решение уравнения (22) относительно  $\varphi$  дает

$$\varphi = \frac{(1-\varepsilon)\beta}{1-\varepsilon\beta}. \quad (24)$$

Будем полагать, что для заданных условий лифтирования величина  $\varepsilon$  слабо изменяется по высоте трубы. В данном случае ее можно заменить соответствующей величиной, приведенной к среднему давлению в трубе и найденную с учетом эмпирического соотношения (1).

Заменим в (24) величины  $\varphi$  и  $\beta$  на  $\varphi_S$  и  $\beta_S$ , соответственно, после чего решим, учитывая (1), полученное уравнение относительно  $\varepsilon$ . В результате будем иметь

$$\varepsilon = \frac{0,167}{1-0,833\beta_S}. \quad (25)$$

В случае среднего давления в трубе формула (24) преобразуется с учетом (25) к соотношению (1), тогда как с учетом (8) формула (5) к соотношению (1) не преобразовывается. В этом и заключается принципиальное отличие формулы (24) от (5). Достоверность формулы (24) определяется тем, что она получена на основании выражения (4), а для определения коэффициента  $\varepsilon$  использовано эмпирическое соотношение (1).

Для сравнения расчетных значений  $\varphi$ , получаемых по формулам (24) и (5), и относящихся к произвольно заданному сечению трубы, представим расходную концентрацию  $\beta$  в виде функции от вертикальной координаты  $z$ , начало которой расположено на уровне смесителя эрлифта. Для этого выражение (4) напишем в виде

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{Q_W}{Q_G}} \quad (26)$$

затем сделаем определенные преобразования соотношения  $\frac{Q_W}{Q_G}$ .

На основании уравнения сохранения массового расхода газовой фазы вдоль потока можем написать

$$\rho_G Q_G = \rho_0 Q_0, \quad (27)$$

где  $\rho_0$  – плотность газовой фазы (свободного воздуха) для стандартных физических условий;  $Q_0$  – расход воздуха на выходе из подъемной трубы в окружающую атмосферу.

Из (27) получаем

$$Q_{\Gamma} = Q_0 \frac{\rho_0}{\rho_{\Gamma}} \quad (28)$$

Принимая во внимание уравнение состояния газовой фазы

$$\frac{P}{\rho_{\Gamma}} = \frac{P_{\text{атм}}}{\rho_0}, \quad (29)$$

соответствующее изотермическому движению смеси, перепишем уравнение (28) в виде

$$Q_{\Gamma} = \frac{Q_0}{\bar{P}}. \quad (30)$$

Здесь  $\bar{P} = \frac{P}{P_{\text{атм}}}$  – безразмерное абсолютное давление в подъемной трубе как функция от безразмерной координаты  $\bar{z} = \frac{z}{H}$ , где  $H$  – высота подачи эрлифта;  $P_{\text{атм}}$  – атмосферное давление для стандартных физических условий.

Учитывая (30), можем написать

$$\frac{Q_w}{Q_{\Gamma}} = \frac{Q_w}{Q_0} \bar{P}(\bar{z})$$

и тогда выражение (26) примет вид

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{Q_w}{Q_0} \bar{P}(\bar{z})}. \quad (31)$$

Как известно, в процессе работы неглубоководных промышленных эрлифтов давление в потоке газожидкостной смеси изменяется по высоте трубы по закону, близкому к линейному [5,6]. Учитывая сказанное и пренебрегая в сравнении с  $P_{\text{атм}}$  местной потерей давления на выходе из трубы, представим  $\bar{P}(\bar{z})$  в виде следующей линейной функции

$$\bar{P}(\bar{z}) = -a\bar{z} + b; \quad (32)$$

$$a = \frac{\rho_w g h}{P_{\text{атм}}} (1 - \varepsilon); \quad (33)$$

$$b = 1 + a, \quad (34)$$

здесь  $h$  – геометрическая глубина погружения смесителя эрлифта; параметр  $\varepsilon = \frac{h_{\text{пот}}}{h}$ , где  $h_{\text{пот}}$  – полная потеря пьезометрического напора в подающей трубе эрлифта:

$$h_{\text{пот}} = h_l + h_{m,1} + h_{m,2}, \quad (35)$$

где  $h_l, h_{m,1}, h_{m,2}$  – потеря пьезометрического напора на преодоление силы трения по длине подающей трубы, местных сопротивлений на входе в эту трубу и выходе из нее в зону смесителя, соответственно. Коэффициент  $a$  в (32) физически выражает безразмерное избыточное давление, а коэффициент  $b$  – безразмерное абсолютное давление в смесителе.

Среднее по высоте трубы абсолютное давление  $\bar{P}_s$  равняется:

$$\bar{P}_s = \frac{1}{2}(1 + b). \quad (36)$$

Таким образом, для произвольного заданного соотношения  $\frac{Q_w}{Q_0}$ , заимствованного из конкретной экспериментально установленной расходной характеристики эрлифта, формула (24) совместно с (25), (31), (32) и (36) позволяет определить значение  $\varphi$  для произвольной высоты  $\bar{z}$ .

В качестве примера в табл. 1 представлены расчетные значения  $\varphi$ , полученные по формулам (5) и (24) для различных значений  $\bar{z}$  и  $\varepsilon$ . При этом значения параметра  $\varepsilon$  принимались равными 0, 0,05 и 0,1. Расчеты выполнены для следующих данных:  $Q_0 = 0,1333 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_w = 0,0444 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $D = 0,15 \text{ м}$ ,  $H = 90,5 \text{ м}$ ,  $h = 68 \text{ м}$ , заимствованных из [6]. При этом принималось, что  $\mu_w = 0,01$  сантипуаз и  $\sigma = 72,75 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2}$ .

Таблица 1

Расчетные значения  $\varphi$ , полученные по формулам (5) и (24).

$\bar{z}$	$\varepsilon = 0,$ $\alpha_0 = 0,5287,$ $\alpha = 0,2536$		$\varepsilon = 0,05,$ $\alpha_0 = 0,5413,$ $\alpha = 0,2568$		$\varepsilon = 0,10,$ $\alpha_0 = 0,5544,$ $\alpha = 0,2600$	
	$\varphi$ (5)	$\varphi$ (24)	$\varphi$ (5)	$\varphi$ (24)	$\varphi$ (5)	$\varphi$ (24)
0,0	0,204	0,226	0,211	0,234	0,217	0,242
0,2	0,237	0,262	0,244	0,270	0,251	0,278
0,4	0,275	0,302	0,289	0,318	0,297	0,327



0,6	0,349	0,380	0,356	0,388	0,363	0,396
0,8	0,456	0,489	0,462	0,496	0,467	0,502
1,0	0,662	0,691	0,659	0,689	0,658	0,688

Согласно приведенным табличным данным, расчетные значения  $\varphi$ , полученные по формуле (5), занижены по сравнению с соответствующими расчетными значениями, полученными по формуле (24). Среднее по высоте  $\bar{z}$  относительное отклонение этих значений  $\varphi$  составляет 8,7% для каждого из значений  $\varepsilon$ .

В данном примере расчета величина  $\beta_s = 0,41$  при  $\varepsilon = 0$ . Для данного значения  $\beta_s$  получаем, на основании формул (24) и (5), соответственно,

$$\varphi_s = 0,833 \beta_s,$$

$$\varphi_s = 0,762 \beta_s,$$

и в данном случае относительное отклонение значений  $\varphi_s$  составляет 9,3%.

В частности, результаты расчетов величины  $\varphi$ , полученные по формулам (5) и (24) при  $\varepsilon = 0$ , представлены для наглядности в виде соответствующих кривых 3 и 2 на рис. 2. На этом рисунке показана также кривая 1, соответствующая формуле (16). Видно, что кривые 1 и 3 заметно отклоняются от кривой 2.

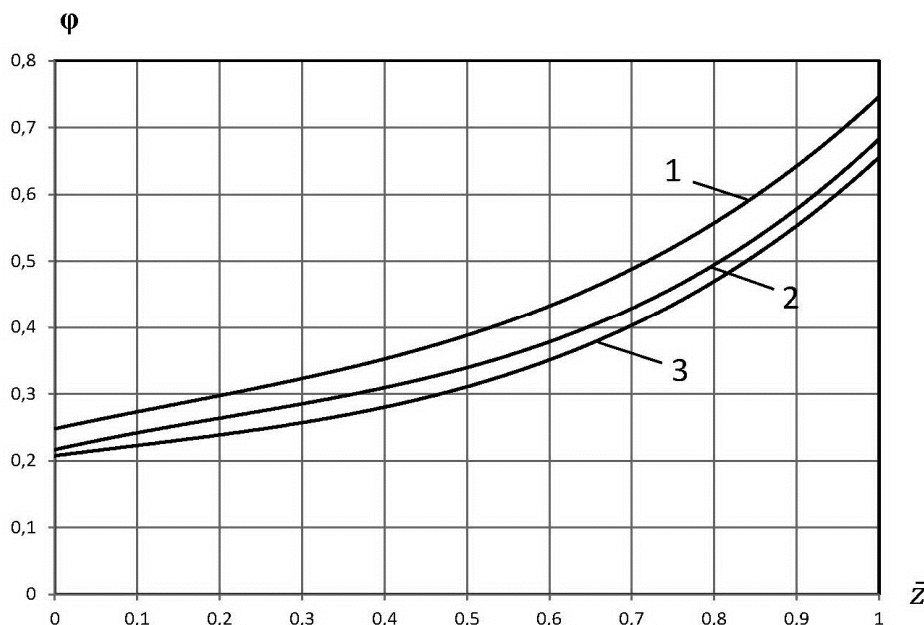


Рис.2. Зависимость  $\varphi$  от  $\bar{z}$ : кривым 1, 2, 3 соответствуют формулы (16), (24) и (5).

Таким образом, формула (24) вполне приемлема для расчетов истинного газосодержания при движении водовоздушных смесей в эрлифтах.

#### Список литературы

1. *Арманд А.А., Невструев Е.И.* Исследование механизма движения двухфазной смеси в трубе // Изв. ВТИ, и№2(178). – 1950.– С.1-8.
2. *Андрюсов Р.С., Сахаров В.А.* Влияние поверхностного натяжения на кинематические характеристики движения газожидкостных смесей в трубах // Труды МИНХ в ГП им.акад. И.М.Губкина, вып.№55. – М.: Недра, 1965.
3. *Андрюсов Р.С., Ямпольский В.И.* О связи между истинным и расходным газосодержанием при движении смесей по вертикальным трубам // Изв. Вузов. Нефть и газ, №9. – 1968. – С.38-42.
4. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 249 с.
5. *Эрлифтные установки: учебное пособие / Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пащенко В.С., Антонов Я.К..* – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
6. *Конonenко А.П.* Теория и рабочий процесс эрлифта// Дисс. докт. техн. наук. – Донецк, 2007.

Надійшло до редакції 13.05.2014