

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 газорідної 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 φ_s и расходного β_s газосодержаний, соответствующих среднему давлению в трубе:

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

$$\varphi_s = \frac{F_{гс}}{F}; \quad (2)$$

$$\beta_s = \frac{Q_{r,s}}{Q_{r,s} + Q_w}, \quad (3)$$

здесь $F_{r,s}$ – площадь живого сечения, занятая газовой фазой смеси; F – общая площадь живого сечения; $Q_{r,s}$, 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.

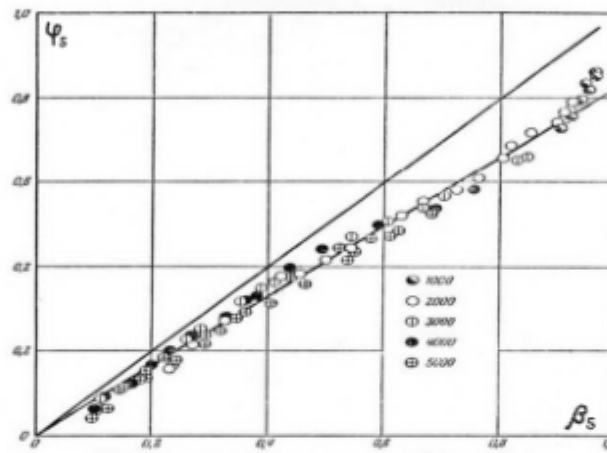


Рис. 1. Зависимость φ_s от β_s для вертикальной подъемной трубы эрлифта.

В [2] на основании выражения

$$\beta = \frac{Q_r}{Q_r + Q_w}, \quad (4)$$

относящегося к произвольному живому сечению потока, получена более общая функциональная связь между φ и β , а именно:

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

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

где u_r , u_w – истинная средняя по сечению скорость газовой и жидкостной фаз.

Зависимость коэффициента α_0 от определяющих его параметров предложена в [3]. Установлено, что α_0 зависит от поверхностного натяжения жидкости на межфазной границе σ , динамической вязкости жидкости μ_w и газового фактора Γ

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

приведенного к среднему давлению в трубе. В результате получена следующая эмпирическая зависимость для α_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 σ выражается в ерг/см², а динамическая вязкость μ_w – в сантипуазах. Формула (8) правомочна для широкогодиапазонаизменения β 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 α_0 , полученных по формуле (8), с опытными данными показывает, что среднее квадратичное отклонение составляет $\pm 36,7\%$. При этом максимальная погрешность расчетных значений φ не превышает 13%. Выражение (8), а следовательно, и формула (5) относятся к пузырьковой, пробковой и эмульсионной структурам газожидкостной смеси.

В работе [4] уравнение для φ 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 φ :

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

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; ρ_Γ , ρ_w – плотность газовой и жидкостной фаз. В результате подстановки

выражения (15) в (14) и последующего решения полученного уравнения относительно φ получается

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

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

где u – средняя приведенная скорость движения смеси.

Недостатком методики расчета φ 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

$$Q_r = \varphi u_r F, \quad (19)$$

$$Q_w = (1 - \varphi) u_w F, \quad (20)$$

перепишем уравнение (4) в виде

$$\beta = \frac{\varphi}{\varphi + (1 - \varphi) \frac{u_w}{u_r}} \quad (21)$$

или, учитывая тождество

$$\frac{u_w}{u_r} \equiv 1 - \frac{u_r - u_w}{u_r},$$

можем написать, вместо (21),

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

где

$$\alpha = \frac{u_r - u_w}{u_r}. \quad (23)$$

Решение уравнения (22) относительно φ дает

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

Будем полагать, что для заданных условий лифтирования величина α 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 φ и β на φ_s и β_s , соответственно, после чего решим, учитывая (1), полученное уравнение относительно α . В результате будем иметь

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

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 α использовано эмпирическое соотношение (1).

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

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{Q_w}{Q_r}}, \quad (26)$$

затем сделаем определенные преобразования соотношения $\frac{Q_w}{Q_r}$.

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

$$\rho_r Q_r = \rho_0 Q_0, \quad (27)$$

где ρ_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

$$Q_r = Q_0 \frac{\rho_0}{\rho_r}. \quad (28)$$

Принимая во внимание уравнение состояния газовой фазы

$$\frac{P}{\rho_r} = \frac{P_{атм}}{\rho_0}, \quad (29)$$

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

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

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

Учитывая (30), можем написать

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

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 $P_{атм}$ местной потерей давления на выходе из трубы, представим $\bar{P}(\bar{z})$ в виде следующей линейной функции

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

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

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

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

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

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 α 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 φ для произвольной высоты \bar{z} .

В качестве примера в табл. 1 представлены расчетные значения φ , полученные по формулам (5) и (24) для различных значений \bar{z} и ε . При этом значения параметра ε 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 φ , полученные по формулам (5) и (24).

| | $\varepsilon = 0,$ $\alpha_0 = 0,5287,$ $\alpha = 0,2536$ | | $\varepsilon = 0,05,$ $\alpha_0 = 0,5413,$ $\alpha = 0,2568$ | | $\varepsilon = 0,10,$ $\alpha_0 = 0,5544,$ $\alpha = 0,2600$ | |
|-----------|---|----------------|--|----------------|--|----------------|
| \bar{z} | φ (5) | φ (24) | φ (5) | φ (24) | φ (5) | φ (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 φ , полученные по формуле (5), занижены по сравнению с соответствующими расчетными значениями, полученными по формуле (24). Среднее по высоте \bar{z} относительное отклонение этих значений φ составляет 8,7% для каждого из значений ε .

В данном примере расчета величина $\beta_s = 0,41$ при $\varepsilon = 0$. Для данного значения β_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 φ_s составляет 9,3%.

В частности, результаты расчетов величины φ , 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.

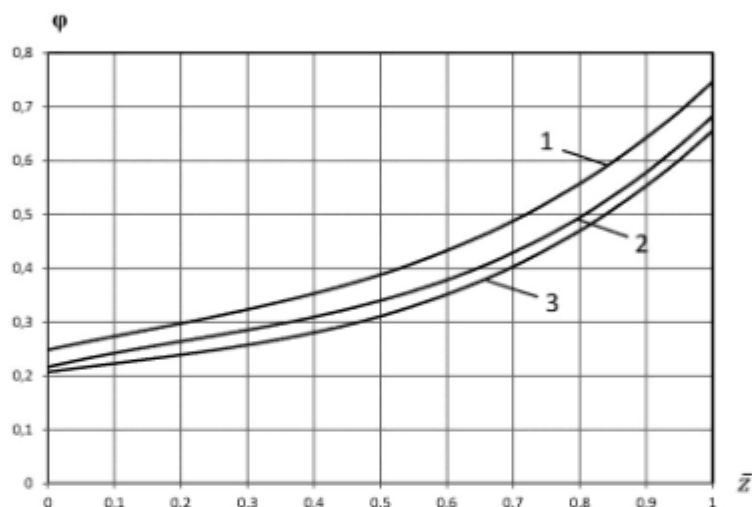


Рис.2. Зависимость φ от \bar{z} : кривым 1, 2, 3 соответствуют формулы (16), (24) и (5).

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. Андриасов 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. Андриасов 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., Пашенко В.С., Антонов Я.К.. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
6. Кононенко А.П. Теория и рабочий процесс эрлифта// Дисс. докт. техн. наук. – Донецк, 2007.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2014