

УДК 658.26:622.276.5

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭМУЛЬСИОННОГО ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПО ВЫСОТЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ ЭРЛИФТА

А.П.Кононенко, Т.А.Устименко,
Донецкий национальный технический университет

Введение. Сокращение непроизводительных энергетических расходов в эрлифте предполагает возможность количественной оценки распределения подведенной к аппарату мощности и изменения других гидродинамических параметров водовоздушного потока, в том числе, и по высоте подъемной трубы. Такой анализ необходимо иметь в характерных режимах работы эрлифта, одним из которых является режим максимальной подачи.

Учитывая многообразие структур газожидкостной смеси, имеющих место в вертикальных подъемных трубах, целесообразно исследование изменения гидродинамических параметров водовоздушной смеси при эмульсионной структуре, часто реализуемой в эрлифтах.

Поэтому количественный анализ распределения гидродинамических параметров эмульсионного водовоздушного потока по высоте подъемной трубы эрлифта в режиме его максимальной подачи является актуальной научной и практической задачей.

Разработанная математическая модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой газожидкостной смеси [1] позволила выполнить анализ распределения давлений и мощностей водовоздушного потока в зависимости от расхода воздуха (по «длине» характеристики) [2]. Однако изменение гидродинамических параметров двухфазной смеси по высоте подъемной трубы в характерных режимах работы эрлифта в этой работе не изучалось.

Исследование изменений гидродинамических параметров водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы эрлифта в [3] выполнено для снарядной структуры двухфазного потока, имеющего принципиальные отличия от газожидкостного потока с эмульсионной структурой [4]. Поэтому необходим сравнительный анализ изменений гидродинамических параметров водовоздушных потоков в изучаемых режимах и сечениях подъемных труб для указанных структур двухфазной смеси, что подтверждает потребность в таких исследованиях для эмульсионных потоков.

Цель работы – на основе разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой газожидкостной смеси выполнить количественный анализ распределения гидродинамических параметров водовоздушного потока по высоте вертикальной подъемной трубы газожидкостного подъемника в режиме максимальной подачи.

Изложение материала и результаты. При эмульсионной структуре течения в эрлифте с подъемной трубой диаметром D , длиной $H+h$ (H – высота подъема, h – геометрическое погружение смесителя) и подающей трубой диаметром d и длиной l водовоздушная смесь движется с приведенной скоростью $w_{cm}(z)$ (рис. 1). Пристенная жидкостная пленка толщиной $\delta(z)$ перемещается с результирующей скоростью $w'_n(z)$.

Доказана [5, 6] допустимая правомерность линейного закона изменения давления восходящего газожидкостного потока в вертикальной подъемной трубе эрлифта.

Одномерное стационарное восходящее течение водовоздушной смеси в вертикальной цилиндрической трубе на основе гомогенной теории, приемлемой для эмульсионной структуры газожидкостных потоков, описывается уравнениями неразрывности и движения [7, 8]:

$$Q_{mcm} = \rho_{cm\beta}(z) \cdot w_{cm}(z) \cdot \omega = const, \quad (1)$$

$$Q_{mcm} \cdot \frac{dw_{cm}(z)}{dz} = -\omega \cdot \frac{dp(z)}{dz} - \chi \cdot \tau_{cm}(z) - \omega \cdot \rho_{cm\beta}(z) \cdot g, \quad (2)$$

где Q_{mcm} – массовый расход водовоздушной смеси;

$\rho_{cm\beta}(z)$ – плотность водовоздушной смеси, вычисленная через объемное расходное газосодержание;

ω – площадь поперечного сечения трубы;

$p(z)$ – давление в сечении трубы на расстоянии z от начального;

χ – периметр трубы;

$\tau_{cm}(z)$ – касательное напряжение;

g – ускорение свободного падения.

Преобразование уравнений (1) и (2) для условий водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта с изотермическим процессом изменения состояния газовой фазы и линейным законом изменения давления по высоте позволяет получить соотношение, описывающее зависимость полного градиента давления от плотностей фаз и газосодержания [1]:

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \left\{ \lambda_{cm}(z) \cdot \frac{G^2}{2D} \cdot \frac{1}{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'} - G^2 \cdot \frac{[\rho''(z) - \rho'] \cdot \frac{d\beta(z)}{dz}}{\{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'\}^2} + \right. \\ \left. + g \cdot [\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'] \right\} \cdot \left\langle 1 - G^2 \cdot \frac{\beta(z) \cdot \frac{\rho_0''}{\rho_0}}{\{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'\}^2} \right\rangle^{-1}, \quad (3)$$

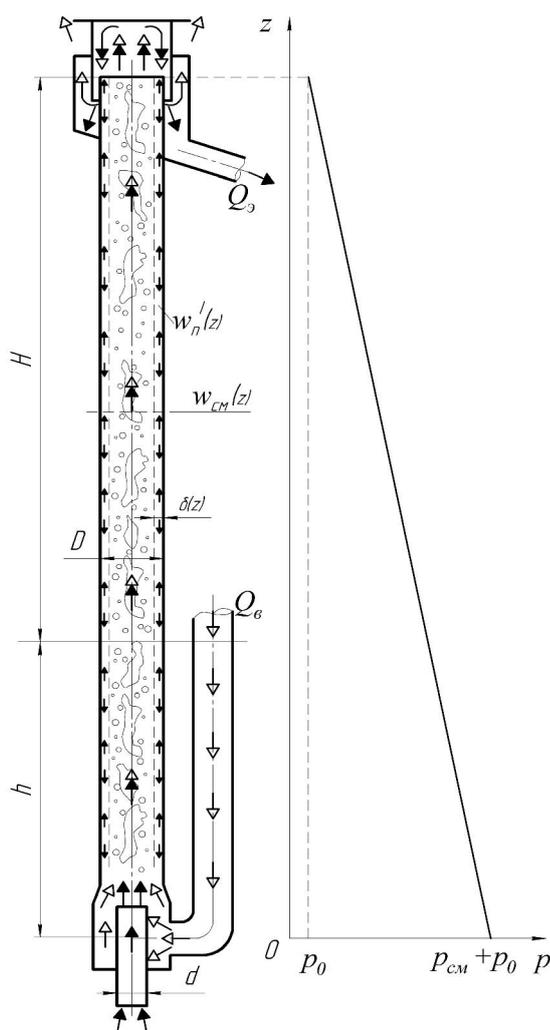


Рис. 1. Схема эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока и эпюра давления в подъемной трубе

перепад давлений $p_{\Sigma i}$, p_{mpi} , $p_{уски}$ и p_{gi} . Суммарная подводенная мощность $N_{подi}$ и мощности, подводенные потоком воды N' и сжатого воздуха N'' , вычисляются по общеизвестным соотношениям [5, 6]. Так как модель гомогенного течения предполагает отсутствие потерь мощности на скольжение фаз, выполняется равенство

где $\lambda_{cm}(z)$ – коэффициент сопротивления;
 G – приведенная массовая скорость газожидкостной смеси;
 $\beta(z)$ – объемное расходное газосодержание;
 ρ' – плотность воды;
 $\rho''(z)$ – плотность воздуха.

Интегрируя уравнение (3) для участка подъемной трубы эрлифта длиной z_i (где $0 \leq z_i \leq H + h$), возможно записать баланс давлений водовоздушного потока:

$$p_{\Sigma i} = p_{mpi} + p_{уски} + p_{gi}, \quad (4)$$

где $p_{\Sigma i}$ – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i ;

p_{mpi} , $p_{уски}$, p_{gi} – перепады давления на участке подъемной трубы длиной z_i , обусловленные, соответственно, трением, ускорением и силой тяжести.

Средний объемный расход водовоздушной смеси на участке трубы длиной z_i определяется выражением [1]

$$Q_{cpi} = \frac{G \cdot \omega}{z_i} \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'}. \quad (5)$$

Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, а также ее составляющие – мощности, необходимые для компенсации потерь на трение N_{mpi} , ускорение $N_{уски}$ и гравитационную составляющую N_{gi} при движении водовоздушного потока по участку вертикальной подъемной трубы длиной z_i , определяются как произведение среднего объемного расхода Q_{cpi} на соответствующий

$$N_{nodi} = N_{\Sigma i} \quad (6)$$

Решение полученных уравнений численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы позволяет определять, в том числе, значения текущих гидродинамических параметров водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы и при заданном расходе воздуха Q_6 .

Адекватность разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных расходных характеристик газожидкостных подъемников [9].

Уменьшение давления по ходу движения водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта приводит к увеличению объемного расхода воздуха и соответствующих изменений объемного расходного газосодержания и приведенной скорости смеси.

Анализ изменения гидродинамических параметров по высоте эмульсионного водовоздушного потока выполнен для режима максимальной подачи эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 353$ мм, длиной $H+h = 11,7$ м, подающей трубой диаметром $d = 205$ мм, длиной $l = 700$ мм при геометрическом погружении смесителя $h = 2,4$ м (относительное геометрическое погружение смесителя $\alpha = 0,205$, рис. 2) [10]. Использована модель рабочего процесса подъемника при определении давления в смесителе $p_{см}$ с учетом потерь в подающей трубе $\Delta h_{n,m}$ [11].

В рассматриваемых условиях структура водовоздушной смеси является эмульсионной по всей высоте подъемной трубы [4].

Наиболее значимыми гидродинамическими параметрами двухфазного эмульсионного потока являются плотность смеси $\rho_{см\beta}$, объемное расходное газосодержание β , приведенная скорость смеси $w_{см}$, значения давлений, обусловленных силой тяжести p_g , трением $p_{тр}$ и ускорением водовоздушного потока $p_{уск}$, суммарный перепад давления p_{Σ} и мощности, подведенные потоками воды N' , воздуха N'' и общая подведенная N_{nodi} , а также необходимые для преодоления сил тяжести N_g , сил трения $N_{тр}$ и компенсации потерь на ускорение $N_{уск}$.

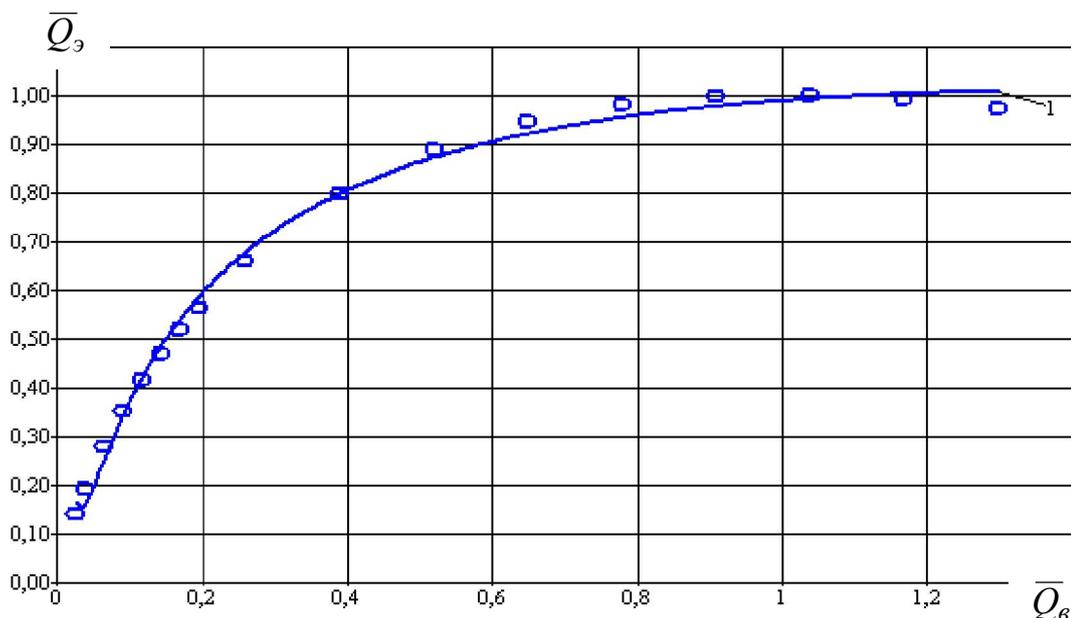


Рис. 2. Безразмерная расчетная расходная характеристика эрлифта

$D = 353$ мм, $H+h = 11,7$ м, $h = 2,4$ м, $d = 205$ мм, $l = 700$ мм $\alpha = 0,205$ (базисные значения $Q_6 = 6,42$ м³/с, $Q_3 = 0,0469$ м³/с)

Изменения значений перечисленных параметров водовоздушной смеси по высоте z_i подъемной трубы эрлифта в режиме максимальной подачи при расходе воздуха $Q_6 = 6,42$ м³/с и подаче $Q_3 = 0,0469$ м³/с приведены в таблице.

Высокое объемное расходное газосодержание водовоздушного потока как на входе $\beta = 0,991$, так и на выходе из подъемной трубы $\beta = 0,993$ и линейный закон изменений давления по ее высоте формируют значения плотности водовоздушной смеси в диапазоне от $\rho_{см\beta} = 10,3$ кг/м³ при $z = 0$ до $\rho_{см\beta} = 8,45$ кг/м³ при $z = H+h = 11,7$ м.

Приведенная скорость смеси из-за расширения воздуха увеличивается от $w_{см} = 54,1$ м/с на уровне смесителя до 66,0 м/с на верхнем торце подъемной трубы.

Как суммарный перепад давления, так и его составляющие увеличиваются с увеличением длины рассматриваемого участка подъемной трубы z_i от нулевого значения на входе до значений на выходе: $p_{\Sigma} = 21,89$ кПа – суммарный перепад, $p_g = 1,08$ кПа – обусловленный силой тяжести, $p_{тр} = 14,13$ кПа – обусловленный силой трения и $p_{уск} = 6,68$ кПа – обусловленный ускорением.

Мощность, подводенная потоком воды, составляет $N' = 1,03$ кВт, а мощность потока сжатого воздуха увеличивается от $N'' = 0$ при $z = 0$ до $N'' = 126,8$ кВт при $z = H+h = 11,7$ м. Суммарная подводенная мощность складывается из двух последних слагаемых $N_{под} = N' + N''$.

Таблица. Значения параметров восходящего водовоздушного потока по высоте подъемной трубы диаметром $D = 353$ мм, длиной $H+h = 11,7$ м в режиме максимальной подачи эрлифта при расходе воздуха $Q_g = 6,42$ м³/с и подаче $Q_3 = 0,0469$ м³/с

| Параметр | Обозначение | Ед. измерения | Значение параметра | | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | 0,000 | 2,925 | 5,850 | 8,775 | 11,70 |
| Длина участка подъемной трубы | z_i | м | 0,000 | 2,925 | 5,850 | 8,775 | 11,70 |
| Плотность смеси | $\rho_{см}$ | кг/м ³ | 10,3 | 9,85 | 9,38 | 8,91 | 8,45 |
| Объемное расходное воздухоудержание | β | - | 0,991 | 0,992 | 0,992 | 0,992 | 0,993 |
| Приведенная скорость смеси | $w_{см}$ | м/с | 54,1 | 56,6 | 59,5 | 62,6 | 66,0 |
| Перепад давления, обусловленный: | | | | | | | |
| – силой тяжести | p_g | кПа | 0,00 | 0,29 | 0,59 | 0,78 | 1,08 |
| – трением | $p_{тр}$ | | 0,00 | 3,43 | 6,97 | 10,60 | 14,13 |
| – ускорением | $p_{уск}$ | | 0,00 | 1,48 | 3,04 | 4,71 | 6,68 |
| Суммарный перепад давления | p_{Σ} | кПа | 0,00 | 5,20 | 10,60 | 16,09 | 21,89 |
| Мощность потока: | | | | | | | |
| – воды | N' | кВт | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 | 1,03 |
| – сжатого воздуха | N'' | | 0,000 | 29,4 | 60,2 | 92,6 | 126,8 |
| Мощность подводенная | $N_{под}$ | кВт | 1,03 | 30,4 | 61,2 | 93,6 | 127,8 |
| Мощность для преодоления: | | | | | | | |
| – силы тяжести | N_g | кВт | 0,000 | 1,57 | 3,14 | 4,71 | 6,29 |
| – потерь на трение | $N_{тр}$ | | 0,000 | 18,8 | 38,8 | 60,0 | 82,6 |
| – потерь на ускорение | $N_{уск}$ | | 0,000 | 7,74 | 16,6 | 27,0 | 39,0 |

Мощность, необходимая для преодоления сил тяжести, увеличивается по высоте подъемной трубы от $N_g = 0$ при $z = 0$ до $N_g = 6,29$ кВт при $z = H+h = 11,7$ м, компенсирующая потери на трение – от $N_{тр} = 0$ при $z = 0$ до $N_{тр} = 82,6$ кВт при $z = H+h = 11,7$ м и компенсирующая потери на ускорение – от $N_{уск} = 0$ при $z = 0$ до $N_{уск} = 39,0$ кВт при $z = H+h = 11,7$ м.

Графическое представление этих зависимостей качественно аналогично зависимостям, приведенным для эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси [3].

Выводы. В работе получены расчетные количественные распределения объемного расходного газосодержания, плотности водовоздушной смеси, приведенной скорости потока, давлений и мощностей, компенсирующих силы тяжести, трения и ускорения, по высоте подъемной трубы эрлифта. Это позволит установить наиболее энергетически целесообразные режимы эксплуатации и разработать рекомендации по совершенствованию газожидкостных подъемников.

РЕЗЮМЕ

Приведено рішення математичної моделі робочого процесу ерліфта з емульсійною структурою водоповітряного потоку, що дозволяє визначати, зокрема, зміну гідродинамічних параметрів газорідної суміші по висоті вертикальної піднімальної труби.

SUMMARY

The solution of the mathematical model of the working process of the airlift with the emulsion structure of the water-air flow is given. It allows to identify the change of the hydrodynamic parameters of the gas-liquid mixture according to the height of the vertical lifting tunnel.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока / А.П.Кононенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2005. – Вип. 101. – С. 58-67.
2. Бойко Н.Г. Энергетические параметры эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта / Н.Г.Бойко, А.П.Кононенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ. – 2006. – Вип. 12 (113) – С. 17-32.
3. Кононенко А.П. Изменение гидродинамических параметров снарядного водовоздушного потока по высоте подъемной трубы эрлифта / А.П.Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія – Технічні науки. – Суми: СДУ. – 2006. – №12(96). – С. 12-22.
4. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов / А.П. Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія – Технічні науки. – Суми: СДУ. – 2005. – №12(84). – С.38-48.
5. Эрлифтные установки: Учебное пособие / Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С. и др. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
6. Папаяни Ф.А. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А.Папаяни, Л.Н.Козыряцкий, В.С.Пашенко и др. – М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
7. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис – М.: Мир, 1972. – 440 с.
8. Прогодьяконов И.О. Гидродинамика и массообмен в системах газ-жидкость / И.О.Прогодьяконов, И.Е.Люблинская – Л.: Наука, 1990. – 349 с.
9. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси / А.П.Кононенко // Науковий журнал «Вісник Донецького університету». Серія А, «Природничі науки». – Донецьк: ДонНУ. – 2006. – №2. – С. 143-150.
10. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта / А.П. Кононенко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць: «Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва». – Макіївка: ДНАБА. – 2005. – Вип. 2005-7(55). – С.71-81.
11. Кононенко А.П. Энергетическая эффективность эрлифта / А.П. Кононенко // Науковий журнал «Вісник Донецького університету». Серія А, «Природничі науки». – Донецьк: ДонНУ. – 2006. – №1, Частина 1. – С. 205-212.

Поступила в редакцію 06.05.2010 г.