

*А.П. КОНОНЕНКО*, д-р. техн. наук, ДНТУ, г. Донецк

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОГО ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА**

Встановлені закономірності зміни гідродинамічних параметрів кільцевого водоповітряного потоку у вертикальній підймальній трубі газорідного підйомника..

The regularities of change of hydrodynamic parameters of the annular air-water flow in the vertical lifting pipe of the gas-liquid lift are stated.

### **1. Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Изменение давления газожидкостного потока по высоте подъемной трубы эрлифта приводит к соответствующему изменению гидродинамических параметров водовоздушной смеси, а, зачастую, и ее структуры.

Повышение энергетической эффективности газожидкостных подъемников предполагает возможность количественной оценки распределения подведенной к аппарату мощности, в том числе, и по высоте подъемной трубы. Такой анализ необходимо выполнять для характерных режимов работы эрлифта, одним из которых является режим максимальной подачи.

Наряду со снарядной и эмульсионной, в эрлифте возможна реализация кольцевой структуры водовоздушной смеси, особенно при работе на малых относительных погружениях смесителя ( $\alpha < 0,2$ ), что имеет место, в частности, при чистках зумпфов скиповых стволов угольных шахт и др.

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

### **2. Анализ исследований и публикаций.**

Анализ изменения гидродинамических параметров, преимущественно давлений и мощностей, в [1, 2, 3] выполнен в зависимости от расхода сжатого воздуха газожидкостным подъемником. Закономерности распределения газосодержаний, плотностей, скоростей газожидкостной смеси и ее компонентов, а также давлений и мощностей водовоздушных потоков по высоте подъемной трубы эрлифта в указанных работах не рассматривались.

Аналогичная задача решена в [4] применительно к снарядной структуре газожидкостной смеси в подъемной трубе эрлифта. Однако, учитывая принципиальные отличия как в физических основах снарядной и кольцевой структур водовоздушных потоков [5], так и принципах математического

моделирования рабочих процессов эрлифтов с данными структурами [6, 7], следует ожидать отличий в закономерностях изменения гидродинамических параметров газожидкостных потоков с кольцевой структурой от известных установленных закономерностей применительно к снарядному потоку двухфазной смеси в эрлифте.

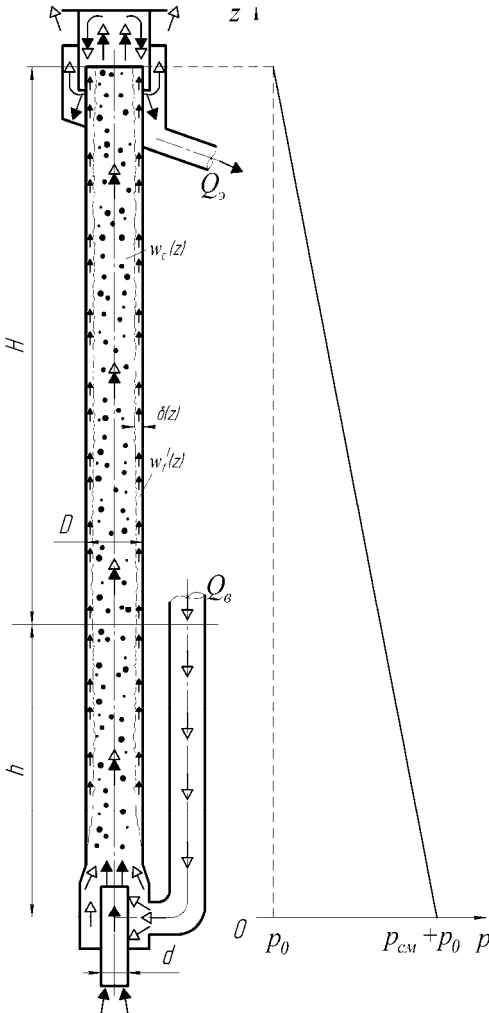


Рис. 1 – Схема эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока и эпюра давления в подъемной трубе

### 3. Постановка задачи.

Для режима максимальной подачи, как одного из характерных режимов работы эрлифта, установить закономерности изменения гидродинамических параметров кольцевого водовоздушного потока по высоте вертикальной подъемной трубы газожидкостного подъемника.

### 4. Изложение материала и результаты.

При разработке математической модели рабочего процесса эрлифта [7] под кольцевой структурой вертикального водовоздушного потока понимали такую, при которой пленка жидкости толщиной  $\delta(z)$  движется по внутренней стенке подъемной трубы эрлифта диаметром  $D$ , длиной  $H+h$  ( $H$  – высота подъема,  $h$  – геометрическое погружение смесителя) со скоростью  $w'_f(z)$ . Газ с капельными и близкими к ним включениями жидкости образуют гомогенное ядро потока, перемещающееся со скоростью  $w_c(z)$  (см. рис. 1). Между газожидкостным ядром потока и пленкой жидкости имеет место массообмен за счет уноса и осаждения капель.

Подвод транспортируемой жидкости в подъемную трубу обеспечивается подающей трубой диаметром  $d$  и длиной  $l$ .

Обоснование правомерности исходных базовых положений и допущений, принятых при разработке математической модели рабочего процесса эрлифта, изложено в [7].

Уравнение движения кольцевого восходящего водовоздушного потока в вертикальной подъемной трубе эрлифта возможно преобразовать к выражению [7]

$$p_{см} \frac{z_i}{H+h} = \frac{2\pi \cdot R}{\omega} \int_0^{z_i} \tau_w(z) \cdot dz + \frac{1}{\omega} \left\{ \rho_c(z) \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z) + \rho' \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot \omega_f(z) \right\} \Big|_0^{z_i} + \frac{g}{\omega} \left[ \int_0^{z_i} \rho_c(z) \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz \right],$$

которое, в свою очередь, для участка подъемной трубы длиной  $z_i$  ( $0 \leq z_i \leq H+h$ ) зачастую представляют в виде баланса давлений

$$p_{\Sigma i} = p_{mpi} + p_{yski} + p_{gi},$$

где  $p_{см}$  – избыточное давление в смесителе;  $z_i$  – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы;  $R$  – радиус подъемной трубы;  $\omega$ ,  $\omega_c(z)$ ,  $\omega_f(z)$  – площадь соответственно поперечного сечения подъемной трубы, гомогенного ядра газожидкостного потока и пристенной жидкостной пленки;  $\tau_w(z)$  – касательное напряжение на стенке трубы;  $\rho'$ ,  $\rho_c(z)$  – плотность соответственно воды и гомогенного ядра газожидкостного потока;  $g$  – ускорение свободного падения;  $p_{\Sigma i}$  – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ ;  $p_{mpi}$ ,  $p_{yski}$ ,  $p_{gi}$  – перепады давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленные соответственно трением, ускорением и силой тяжести, которые определяются по выражениям

$$p_{mpi} = \frac{2\pi \cdot R}{\omega} \int_0^{z_i} \tau_w(z) \cdot dz,$$

$$p_{yski} = \frac{1}{\omega} \left\{ \rho_c(z) \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z) + \rho' \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot \omega_f(z) \right\} \Big|_0^{z_i},$$

$$p_{gi} = \frac{g}{\omega} \left[ \int_0^{z_i} \rho_c(z) \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz \right].$$

Средний объемный расход водовоздушной смеси на участке трубы длиной  $z_i$  [7]

$$Q_{cpi} = \frac{W_6 + W_9}{z_i} \int_0^{z_i} \frac{dz}{\varphi^*(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi^*(z)] \cdot \rho'}$$

где  $W_6, W_9$  - массовый расход соответственно воздуха и воды (массовая подача эрлифта);  $\varphi^*(z)$  - расчетное газосодержание водовоздушного потока в подъемной трубе;  $\rho''(z)$  - плотность воздуха.

Суммарная мощность  $N_{\Sigma i}$ , а также ее составляющие - мощности, необходимые для компенсации потерь на трение  $N_{mpi}$ , ускорение  $N_{ускi}$  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 перепад давлений  $p_{\Sigma i}, p_{mpi}, p_{ускi}$  и  $p_{gi}$ . Суммарная подведенная мощность  $N_{nodi}$  и мощности, подведенные потоком воды  $N'$  и сжатого воздуха  $N''_i$ , определяются по общеизвестным соотношениям [8, 9]. Мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение  $N_{ски}$  для кольцевой структуры потока определяется разностью  $N_{nodi} - N_{\Sigma i}$ .

Адекватность разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных расходных характеристик газожидкостных подъемников [10].

Решение полученных уравнений численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы [10] позволяет определять, в том числе, значения текущих гидродинамических параметров водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы (по высоте подъемной трубы) и при заданном расходе воздуха  $Q_6$ .

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 кольцевого водовоздушного потока выполнен для режима максимальной подачи эрлифта с подъемной трубой диаметром  $D = 150$  мм, длиной  $H+h = 11,7$  м, подающей трубой диаметром  $d = 30$  мм, длиной  $l = 460$  мм при геометрическом погружении смесителя  $h = 2,4$  м (относительное геометрическое погружение смесителя  $\alpha = 0,205$ ) [11]. В рассматриваемых условиях структура водовоздушной смеси является кольцевой по всей высоте подъемной трубы, что подтверждается картой кризисных состояний водовоздушного потока [5].

При построении безразмерной расчетной расходной характеристики газожидкостного подъемника с вышеуказанными параметрами в качестве базисных были приняты значения расходов воздуха и подачи эрлифта в режиме максимальной подачи  $Q_{в.макс} = 0,32 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_{э.макс} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. рис. 2) [10].

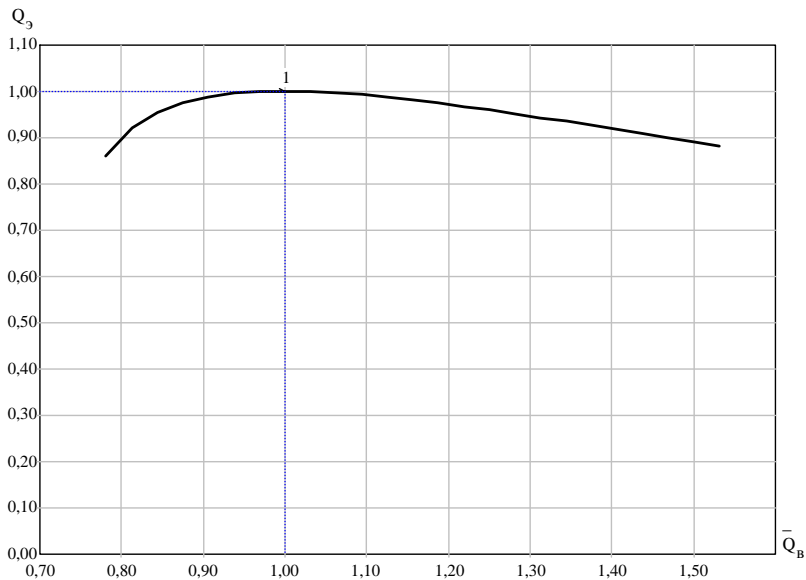


Рис. 2. Безразмерная расчетная расходная характеристика эрлифта  $D = 150 \text{ мм}$ ,  $H+h = 11,7 \text{ м}$ ,  $d = 30 \text{ мм}$ ,  $l = 460 \text{ мм}$ ,  $h = 2,4 \text{ м}$ ,  $\alpha = 0,205$  (базисные значения  $Q_в = 0,32 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $Q_э = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ )

Наиболее значимыми гидродинамическими параметрами двухфазного кольцевого потока являются массовая доля жидкости  $\varepsilon$ , уносимая газом, толщина пристенной пленки жидкости  $\delta$ , объемное расходное  $\beta$  и истинное  $\varphi$  газосодержания, плотность ядра газожидкостного потока  $\rho_c$ , скорость гомогенного ядра  $w_c$  и воды в пристенной пленке  $w'_f$ , значения давлений, обусловленных силой тяжести  $p_g$ , трением  $p_{тр}$  и ускорением водовоздушного потока  $p_{уск}$ , суммарный перепад давления  $p_\Sigma$  и мощности, подведенные потоками воды  $N'$ , воздуха  $N''$  и общая подведенная  $N_{под}$ , а также необходимые для преодоления сил тяжести  $N_g$ , сил трения  $N_{тр}$  и компенсации потерь на ускорение  $N_{уск}$  и скольжение  $N_{ск}$ .

Так как гидродинамические расчеты кольцевой структуры водовоздушной смеси выполнены при допущении отсутствия массообмена

между ядром потока и пристенной пленкой [10], то значения массовой доли жидкости, уносимой газом, и толщины пленки воды постоянны по всей высоте подъемной трубы и составляют соответственно  $\varepsilon = 0,483$  и  $\delta = 4,7$  мм.

Изменения значений остальных перечисленных параметров водовоздушной смеси по высоте  $z_i$  подъемной трубы эрлифта в режиме максимальной подачи при расходе воздуха  $Q_a = 0,32$  м<sup>3</sup>/с и подаче  $Q_3 = 0,002$  м<sup>3</sup>/с приведены в табл.

Как и следовало ожидать для кольцевой структуры, значения объемного расходного и истинного газосодержаний в подъемной трубе эрлифта достаточно высокие и находятся в пределах соответственно  $\beta = 0,993 \div 0,994$  и  $\varphi = 0,948 \div 0,956$ .

Такое же высокое объемное расходное газосодержание ядра водовоздушного потока, составляющее как на входе, так и на выходе из подъемной трубы величину  $\beta_c = 0,997$ , и линейный закон изменений давления по ее высоте формируют значения плотности водовоздушной смеси (ядра) в диапазоне от  $\rho_c = 4,85$  кг/м<sup>3</sup> при  $z = 0$  до  $\rho_c = 4,21$  кг/м<sup>3</sup> при  $z = H+h = 11,7$  м.

Скорость гомогенного ядра из-за расширения воздуха увеличивается от  $w_c = 18,0$  м/с на уровне смесителя до  $w_c = 20,7$  м/с на верхнем торце подъемной трубы. Скорость воды в пристенной пленке, при допущении отсутствия капельного массообмена, составляет  $w'_f = 0,482$  м/с по всей высоте 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:  $p_\Sigma = 14,9$  кПа – суммарный перепад,  $p_g = 14,4$  кПа – обусловленный силой тяжести,  $p_{mp} = 0,312$  кПа – обусловленный силой трения и  $p_{уск} = 0,208$  кПа – обусловленный ускорением.

Мощность, подведенная потоком воды, составляет  $N' = 0,03$  кВт, а мощность потока сжатого воздуха увеличивается от  $N'' = 0$  при  $z = 0$  до  $N'' = 4,44$  кВт при  $z = H+h = 11,7$  м. Суммарная подведенная мощность складывается из двух последних слагаемых  $N_{под} = N' + N''$ .

Мощность, необходимая для преодоления сил тяжести, увеличивается по высоте подъемной трубы от  $N_g = 0$  при  $z = 0$  до  $N_g = 0,274$  кВт при  $z = H+h = 11,7$  м, компенсирующая потери на трение – от  $N_{mp} = 0$  при  $z = 0$  до  $N_{mp} = 0,006$  кВт при  $z = H+h = 11,7$  м и компенсирующая потери на ускорение – от  $N_{уск} = 0$  при  $z = 0$  до  $N_{уск} = 0,004$  кВт при  $z = H+h = 11,7$  м.

Таблица

Значения параметров восходящего водовоздушного потока по высоте подъемной трубы диаметром  $D = 150$  мм, длиной  $H+h = 11,7$  м в режиме максимальной подачи эрлифта при расходе воздуха  $Q_a = 0,32$  м<sup>3</sup>/с и подаче  $Q_s = 0,002$  м<sup>3</sup>/с

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Значение параметра				
Длина участка подъемной трубы	$z_i$	м	0,000	2,925	5,850	8,775	11,70
Объемное расходное воздухосодержание	$\beta$	-	0,993	0,993	0,993	0,994	0,994
Истинное воздухосодержание	$\varphi$	-	0,948	0,950	0,952	0,954	0,956
Плотность ядра газожидкостного потока	$\rho_c$	кг/м <sup>3</sup>	4,85	4,69	4,53	4,37	4,21
Скорость гомогенного ядра	$w_c$	м/с	18,0	18,6	19,2	19,9	20,7
Скорость воды в пристенной пленке	$w'_f$	м/с	0,482	0,482	0,482	0,482	0,482
Перепад давления, обусловленный: - силой тяжести - трением - ускорением	$p_g$	кПа	0	3,6	7,2	10,8	14,4
	$p_{тр}$		0	0,078	0,156	0,234	0,312
	$p_{уск}$		0	0,047	0,096	0,15	0,208
Суммарный перепад давления	$p_\Sigma$	кПа	0	3,73	7,46	11,2	14,9
Мощность потока: - воды - сжатого воздуха	$N'$	кВт	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	$N''$		0,0	1,05	2,14	3,27	4,44
Мощность подведенная	$N_{под}$	кВт	0,03	1,08	2,17	3,30	4,47
Мощность для преодоления: - силы тяжести - потерь на трение - потерь на ускорение - потерь на скольжение	$N_g$	кВт	0,0	0,068	0,137	0,205	0,274
	$N_{тр}$		0,0	0,001	0,003	0,004	0,006
	$N_{уск}$		0,0	0,001	0,002	0,003	0,004
	$N_{ск}$		0,03	1,01	2,03	3,09	4,19

Основная часть потерь составляет мощность скольжения фаз, которая монотонно увеличивается по высоте трубы и при  $z = H+h = 11,7$  м равняется  $N_{ск} = 4,19$  кВт.

Следует отметить, что использовавшаяся методика определения мощности для преодоления потерь на скольжение построена на определенных допущениях, что подробно изложено в [4] на примере снарядной структуры.

Таким образом, разработанная математическая модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой газожидкостной смеси позволяет определять изменения гидродинамических параметров водовоздушного потока по высоте подъемной трубы.

**5. Выводы и направление дальнейших исследований.** Впервые аналитическим методом установлены закономерности изменения объемного расходного и истинного газосодержаний, плотности водовоздушной смеси, скоростей компонентов потока, давлений и мощностей, затрачиваемых на компенсацию сил тяжести, трения и инерции, а также потерь на скольжение фаз по высоте подъемной трубы эрлифта.

Полученные результаты позволят уточнить энергетически целесообразные режимы эксплуатации эрлифтов и разработать рекомендации по совершенствованию газожидкостных подъемников.

**Список литературы:** 1. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водовопитряного потоку в піднімальній трубі ерліфта. Науковий журнал "Вісник ДонДУЕТ". Серія "Технічні науки". №1(29). - Донецьк: ДонДУЕТ, 2006, с. 20-30. 2. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Енергетическіе параметри емульсионного водовоздушного потоку в підъемній трубі ерліфта // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія гірничо-електромеханічна. - Донецьк: ДонНТУ. - 2006. - Вип. 12 (113) - С. 17-32. 3. Кононенко А.П. Давлення і мощності кільцевого водовоздушного потоку в підъемній трубі ерліфта // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - Луганськ: СУНУ. - 2007. - №3(109), Частина 1. - С.141-147. 4. Кононенко А.П. Изменение гидродинамических параметров снарядного водовоздушного потока по высоте подъемной трубы эрлифта // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. - Суми: СДУ. - 2006. - №12(96). - С. 12-22. 5. Кононенко А.П. Структури двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. - Суми: СДУ. - 2005. - №12(84). - С. 38-48. 6. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока // Промислова гідраліка і пневматика. - Вінниця. - 2006. - №1 (11). - С. 34-37. 7. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - №27. - С. 113-121. 8. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н. и др. - Донецк: ДПИ, 1982. - 64 с. 9. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н. и др. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. - 592 с. 10. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - Харків. - 2006. - №5/1 (23). - С. 58-61. 11. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта // 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.

*Поступила в редакцію 20.03.2010 г.*