

УДК 622.276.5

**А. П. Кононенко**, докт. техн. наук, доцент  
Донецкий национальный технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА

*Доказана возможность адекватного математического моделирования барботажного и эксплуатационных рабочих процессов газожидкостных подъемников.*

**эрлифт, подъемная труба, газожидкостная смесь, математическая модель, газосодержание, подача, расход воздуха**

***Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.*** Повышение энергетической эффективности работы гидравлических машин и аппаратов в подавляющем большинстве случаев является приоритетной научной задачей.

Основой научного совершенствования машин и аппаратов являются адекватные математические модели их рабочих процессов, разработанные на основе глубокого понимания происходящих в рассматриваемых устройствах физических явлений.

Эрлифты относятся к гидравлическим аппаратам с достаточно сложными, далеко не до конца изученными, протекающими преимущественно в подъемной трубе гидродинамическими процессами движения газожидкостных смесей (зачастую с включениями твердых частиц) и, следовательно, с далеко не совершенными существующими аналитическими моделями.

Поэтому адекватное математическое описание рабочего процесса эрлифта является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

***Анализ исследований и публикаций.*** Используя многие годы математические модели рабочего процесса общепромышленного эрлифта основывались на двух эмпирических зависимостях -  $q = f(\alpha)$  и  $k_Q = f(\alpha, q)$  ( $\alpha$  – относительное погружение смесителя,  $q$  – удельный расход воздуха,  $k_Q$  – коэффициент подачи эрлифта) [1, 2], что затрудняло возможность анализа физических процессов лифтирования жидкости сжатым газом и определения направлений совершенствования газожидкостных подъемников в части повышения их энергетической эффективности.

Доказано [3] существование в подъемной трубе эрлифта двух видов движения водовоздушной смеси – свободного движения цир-

куляционных потоков (за счет разности их плотностей) в барботажном режиме работы и напорного движения газожидкостной смеси при эксплуатационных режимах работы подъемника.

В подъемной трубе в эксплуатационных режимах работы эрлифта могут иметь место разные структуры газожидкостного потока – пузырьково-снарядная, эмульсионная, кольцевая, диспергированная [4]. Современное развитие гидродинамики и теории многофазных течений позволяет создавать аналитические модели газожидкостных потоков применительно только для данного вида их структуры, что, в свою очередь, вынуждает разрабатывать отдельные математические модели эксплуатационного рабочего процесса эрлифта для каждой, из имеющей место в подъемной трубе, структуры газожидкостной смеси.

Обоснованная, исходя из представлений о напорной характеристике вертикального трубопровода, физическая модель работы эрлифта [3] подтверждает правомерность использования при математическом моделировании рабочего процесса газожидкостного подъемника в качестве базовых уравнений неразрывности движения и количества движения жидкости [5].

**Постановка задачи.** Доказать возможность и правомерность адекватного математического описания гидродинамических процессов в эрлифте уравнениями свободного движения жидкости (барботажный режим работы) и напорного движения жидкости (эксплуатационные режимы работы).

**Изложение материала и результаты.** Барботаж – начальный режим работы эрлифта, характеризующийся формированием столба газожидкостной смеси высотой до  $H+h$  ( $H$  – высота подъема эрлифта,  $h$  – геометрическое погружение смесителя) в подъемной трубе при отсутствии излива жидкости через верхний ее торец.

Согласно принятой физической модели барботажного режима работы эрлифта [6] при восходящем движении газовых образований в подъемной трубе имеют место восходящий (центральный) и нисходящий (пристенный) циркуляционные потоки, обусловленные разницей их плотностей. Более 90% длины подъемной трубы при  $H+h \geq 10$  м занимает зона стабилизации с плавноизменяющимся (близким к постоянному) значением газосодержания.

Математическая модель барботажного режима работы эрлифта представляет собой систему уравнений (1) и (2), полученных из уравнений неразрывности движения (исходя из равенства нулю суммар-

ного расхода жидкости в любом сечении подъемной трубы) и количества движения [6]:

$$\rho' \cdot w' = G' = 0; \quad (1)$$

$$g \cdot \int_0^{H+h} [\rho_{cp.n}(z) - \rho_{cp.v}(z)] dz = \left\{ \rho_{cp.v}(z) \cdot [w_{cp.v}(z)]^2 \right\}_0^{H+h} -$$

$$- \left\{ \rho_{cp.n}(z) \cdot [w_{cp.n}(z)]^2 \right\}_0^{H+h} + \frac{1}{\omega_v} \cdot \int_0^{H+h} F_{\delta v}(z) dz +$$

$$+ \frac{1}{\omega_n} \cdot \int_0^{H+h} [F_{\delta v}(z) + F_{\delta w}(z)] dz, \quad (2)$$

где  $\rho'$  – плотность воды;  $w'$  – истинная скорость воды;  $G'$  – массовая скорость воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{cp.v}(z)$ ,  $\rho_{cp.n}(z)$  – средние по сечениям плотности соответственно восходящего и нисходящего циркуляционных потоков;  $z$  – вертикальная координата (расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы);  $w_{cp.v}(z)$ ,  $w_{cp.n}(z)$  – средние по сечениям скорости соответственно восходящего и нисходящего потоков;  $F_{\delta v}$ ,  $F_{\delta w}$  – удельные (на единицу длины трубы) силы трения соответственно между восходящим и нисходящим потоками и между нисходящим потоком и стенкой трубы;  $\omega_v$ ,  $\omega_n$  – площади поперечных сечений соответственно восходящего и нисходящего потоков.

Решение системы уравнений (1) и (2) позволило уточнить значение коэффициента  $\varepsilon$ , входящего в известную зависимость газосодержания по сечению барботажного потока от его значения в центре канала, применительно к подъемной трубе эрлифта [7]. Используя экспериментальные данные для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 140, 150, 250, 353$  и  $624$  мм, получены эмпирические зависимости  $e = f(w_0'', D)$  в диапазоне приведенных скоростей воздуха  $w_0'' = 0,68 \div 5,56$  м/с при среднем давлении в подъемной трубе (рис. 1). Подтверждением адекватности разработанной модели служит удовлетворительная точность полученных зависимостей  $\varepsilon = f(w_0'')$  при  $D = idem$  (среднеквадратические погрешности уравнений регрессии не превышают 0,3%).

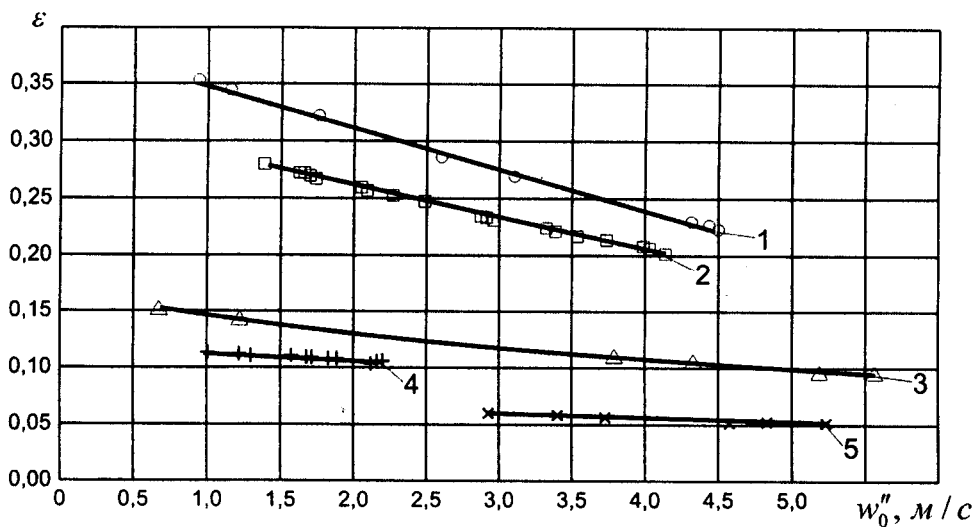


Рис. 1. Залежність коефіцієнта  $\varepsilon$  від приведеної швидкості повітря при середньому тиску в підіймальній трубі: 1 –  $D = 140$  мм; 2 –  $D = 150$  мм; 3 –  $D = 250$  мм; 4 –  $D = 353$  мм; 5 –  $D = 624$  мм

Разработанная для ПЭВМ программа численного решения системы уравнений (1), (2) с использованием зависимости  $e = f(w_0'', D)$  позволяет определять, с приемлемой точностью, расход воздуха эрлифтом в барботажном режиме, а также значения газосодержаний, плотностей и скоростей водовоздушной смеси и ее компонентов в подъемной трубе с графической иллюстрацией полученных результатов.

Аналитические исследования барботажных процессов в эрлифтах с подъемными трубами диаметрами  $D = 140 \div 624$  мм и длинами  $H+h = 5 \div 30$  м при геометрических погружениях смесителей  $h = 0,5 \div 13$  м позволили установить, что среднее воздухосодержание барботажной смеси для условий выхода из подъемной трубы находится в пределах  $\varphi_{cp} = 0,605 \div 0,912$ , для условий среднего давления в подъемной трубе –  $\varphi_{cp} = 0,530 \div 0,872$ , что удовлетворительно согласуется с данными [8] по среднему критическому газосодержанию  $\varphi_{кр} = 0,75$ , соответствующему началу лифтирования жидкости.

Адекватность разработанной математической модели барботажного режима работы газожидкостного подъемника дает основание утверждать о правомерности принятой физической модели и наличии в подъемной трубе циркуляционных потоков, из которых нисходящий, при увеличении расхода воздуха и выхода эрлифта на эксплуатационный режим с пузырьково-снарядной структурой, превращается в нисходящую пристенную жидкостную пленку.

Для снарядной структуры характерный размер включений (че-

редующихся газовых пузырей или жидкостных пробок) соизмерим с масштабом потока (диаметром трубы).

Уравнение стационарного восходящего движения снарядной водовоздушной смеси в вертикальной подъемной трубе эрлифта, исходя из уравнений неразрывности движения и количества движения для двухкомпонентной модели газожидкостного потока, возможно представить в виде [9]

$$p_{см} \cdot \frac{z_i}{H+h} = \frac{4}{D} \cdot \int_0^{z_i} \tau_w(z) dz + G \cdot [x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z)] \Big|_0^{z_i} +$$

$$+ g \cdot \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz,$$
(3)

или

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

где  $p_{см}$  – избыточное давление в смесителе;  $\tau_w(z)$  – касательное напряжение на стенке подъемной трубы;  $x$  – массовое расходное газосодержание водовоздушной смеси;  $w''(z)$  – истинная скорость воздуха;  $\varphi(z)$  – истинное газосодержание водовоздушной смеси;  $\rho''(z)$  – плотность воздуха;  $p_{\Sigma i}$  – 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 подъемной трубы длиной  $z_i$

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

где  $\omega$  – площадь сечения подъемной трубы.

Произведение  $Q_{срi}$  на соответствующее давление  $p_{\Sigma i}$ ,  $p_{mpi}$ ,  $p_{уски}$  и  $p_{gi}$  позволяет определить значения мощностей – суммарной  $N_{\Sigma i}$ , компенсирующих потери на трение  $N_{mpi}$  и ускорение  $N_{уски}$ , а также необходимой для преодоления силы тяжести  $N_{gi}$  при движении водовоздушного потока на участке подъемной трубы длиной  $z_i$

$(N_{\Sigma i} = N_{mpi} + N_{ycki} + N_{gi})$ . Подведенная к подъемной трубе мощность  $N_{nodi}$  при принятой математической модели рабочего процесса эрлифта формируется суммой мощностей воздушного потока  $N_i''$  и потока воды  $N'$ , а мощность, компенсирующая потери на скольжение, определяется зависимостью  $N_{cki} = N_{nodi} - N_{\Sigma i}$ .

Решение математической модели рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой двухфазной смеси выполнено численным методом на ПЭВМ с помощью разработанной программы [10]. Адекватность модели подтверждена удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментально полученных подач эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 25 \div 353$  мм, длинами  $H+h = 11,45 \div 90,5$  м и относительными погружениями смесителей  $\alpha = 0,310 \div 0,931$  [ $\alpha = h/(H+h)$ ], у которых в оптимальном, либо оптимальном и режиме максимальной подачи (34 режима работы, пример – рис. 2) имеет место снарядная структура водовоздушного потока (отклонения в большинстве случаев не превышают 20%).

Разработанная математическая модель и программа для ее решения на ПЭВМ позволяет определять следующие количественные значения и зависимости (с графическим построением):

а) значения текущих гидродинамических параметров снарядной водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы и при заданном расходе воздуха  $Q_e$  (пример - рис. 3);

б) зависимость подачи эрлифта  $Q_o$  от расхода воздуха  $Q_e$  (построение расходной характеристики);

в) изменение давлений  $p_{\Sigma i}$ ,  $p_{mpi}$ ,  $p_{ycki}$  и  $p_{gi}$  (пример - рис. 4) и мощностей  $N_{\Sigma i}$ ,  $N_{mpi}$ ,  $N_{ycki}$ ,  $N_{gi}$ ,  $N_{cki}$ ,  $N'$ ,  $N_i''$  и  $N_{nodi}$  (пример - рис. 5) в зависимости от расхода воздуха  $Q_e$  и по высоте подъемной трубы.

Увеличение газосодержания снарядного потока приводит к росту касательных напряжений на поверхности раздела фаз (поверхности пленки) и образованию значительных неустойчивых волн, которые увлекаются вверх потоком воздуха. Разрушение крупномасштабных газовых пузырей и жидкостных пробок приводит к интенсивному перемешиванию компонентов двухфазного потока и формированию эмульсионной структуры с неподдающейся количественной оценке геометрической характеристикой.

Эмульсионное течение характеризуется большой частотой и малой амплитудой пульсаций и по своим свойствам приближается к гомогенной структуре.

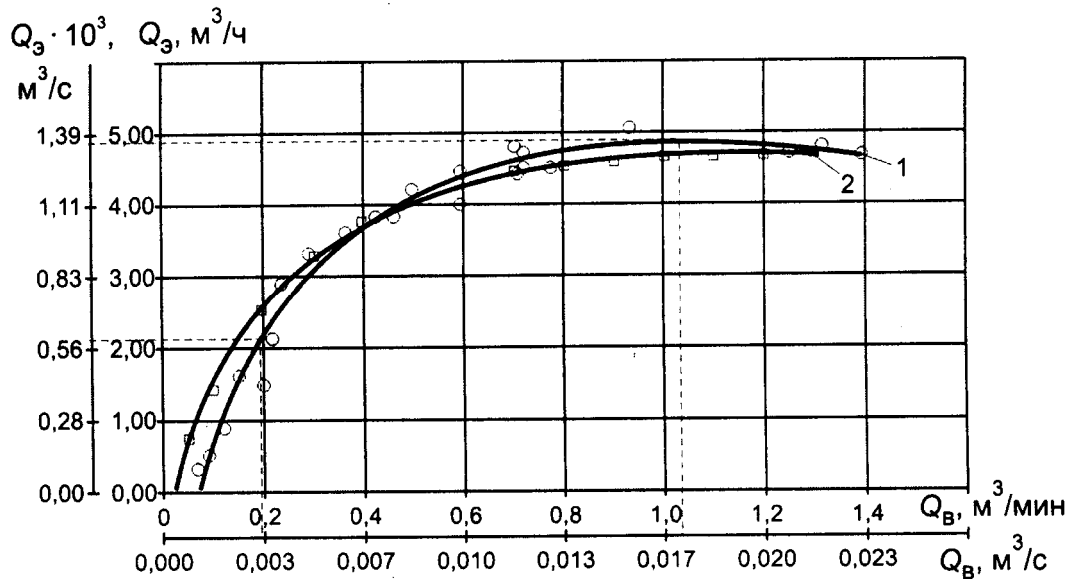


Рис. 2. Экспериментальная 1 и расчетная 2 расходные характеристики эрлифта  $D = 50$  мм,  $H+h = 14,0$  м,  $h = 5,5$  м,  $\alpha = 0,393$

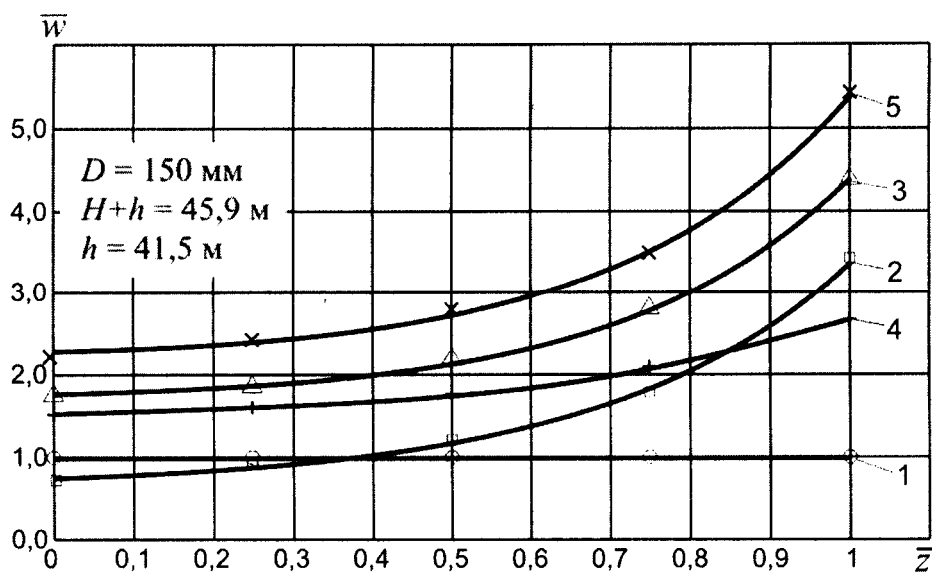


Рис. 3. Изменение относительных скоростей водовоздушной смеси и ее компонентов по высоте подъемной трубы в режиме максимальной подачи эрлифта: 1 -  $\bar{w}'_0 = f(\bar{z})$ , 2 -  $\bar{w}''_0 = f(\bar{z})$ , 3 -  $\bar{w}_{см} = f(\bar{z})$ , 4 -  $\bar{w}' = f(\bar{z})$ , 5 -  $\bar{w}'' = f(\bar{z})$  ( $\bar{w}'_0, \bar{w}''_0, \bar{w}_{см}$  - относительные приведенные скорости соответственно воды, воздуха и водовоздушной смеси;  $\bar{w}', \bar{w}''$  - относительные истинные скорости соответственно воды и воздуха; базисные значения  $z = 45,9$  м,  $w'_0 = 3,13$  м/с)

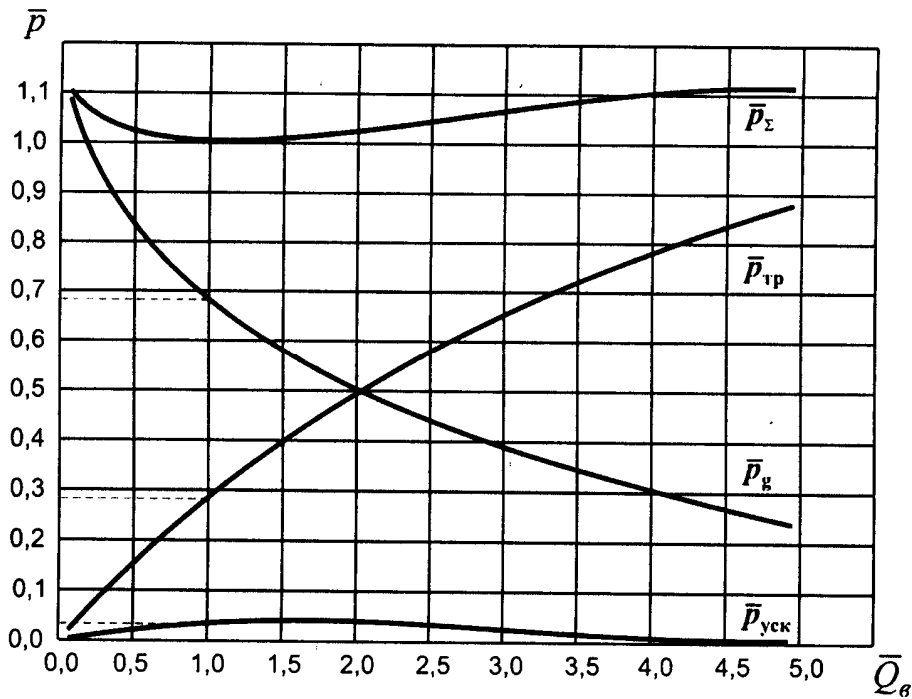


Рис. 4. Изменение относительных давлений в эрлифте  $D = 150$  мм,  $H+h = 45,9$  м,  $d = 100$  мм,  $l = 500$  мм,  $h = 41,5$  м,  $\alpha = 0,904$  [ $d$  и  $l$  – соответственно диаметр и длина подающей трубы; базисные значения  $Q_e = 11,4$  м<sup>3</sup>/мин (0,19 м<sup>3</sup>/с),  $p_\Sigma = 3,71$  кгс/см<sup>2</sup> (364,0 кПа)]

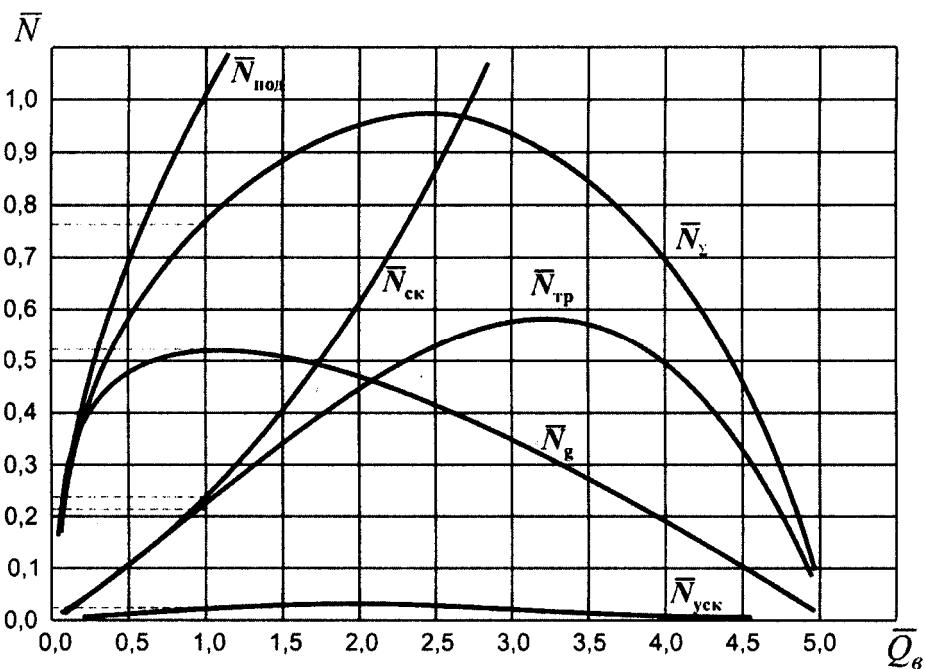


Рис. 5. Изменение относительных мощностей в эрлифте  $D = 150$  мм,  $H+h = 45,9$  м,  $d = 100$  мм,  $l = 500$  мм,  $h = 41,5$  м,  $\alpha = 0,904$  [базисные значения  $Q_e = 11,4$  м<sup>3</sup>/мин (0,19 м<sup>3</sup>/с),  $N_{подв} = 49,0$  кВт)]

Для одномерного стационарного восходящего течения эмульсионной водовоздушной смеси в вертикальной подъемной трубе эрлифта упрощенные уравнения неразрывности движения и количества



движения на основе гомогенной (однокомпонентной) теории позволяют получить соотношение, описывающее зависимость полного градиента давления от плотностей фаз и газосодержания [11]:

$$\begin{aligned}
 -\frac{dp(z)}{dz} = & \left\{ \lambda_{cm}(z) \cdot \frac{G^2}{2D} \cdot \frac{1}{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'} - \right. \\
 & \left. - G^2 \cdot \frac{[\rho''(z) - \rho'] \cdot \frac{d\beta(z)}{dz}}{\{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'\}^2} + g \cdot [\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'] \right\} \times \quad (6) \\
 & \times \left\langle 1 - G^2 \cdot \frac{\beta(z) \cdot \frac{\rho_0''}{\rho_0}}{\{\beta(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta(z)] \cdot \rho'\}^2} \right\rangle^{-1},
 \end{aligned}$$

где  $p(z)$  – давление;  $\lambda_{cm}(z)$  – коэффициент сопротивления;  $\beta(z)$  – объемное расходное газосодержание водовоздушного потока.

Интегрирование уравнения (6) для участка подъемной трубы эрлифта длиной  $z_i$  (где  $0 \leq z_i \leq H+h$ ) приводит к выражению, подобному (4).

Средний объемный расход эмульсионной водовоздушной смеси на участке трубы длиной  $z_i$  определяется зависимостью (5), в которой вместо истинного газосодержания  $\varphi(z)$  используется выражение для объемного расходного газосодержания  $v(z)$ .

По аналогии с математической моделью рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси, для модели с эмульсионной структурой произведение  $Q_{срi}$  на соответствующее давление  $p_{\Sigma i}$ ,  $p_{mpi}$ ,  $p_{ускi}$  и  $p_{gi}$  также позволяет определять значения мощностей  $N_{\Sigma i}$ ,  $N_{mpi}$ ,  $N_{ускi}$  и  $N_{gi}$  при движении водовоздушного потока на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ . Подведенная к подъемной трубе мощность равна сумме  $N_{ноди} = N' + N_i''$ , причем  $N_{ноди} = N_{\Sigma i}$  из-за принятой модели гомогенного течения, предполагающей отсутствие потерь мощности на скольжение фаз  $N_{ски} = 0$ .

Сравнения расчетных и экспериментально определенных подач с использованием математической модели рабочего процесса газо-

жидкостного подъемника с эмульсионной структурой водовоздушного потока выполнены численным методом по разработанной программе на ПЭВМ для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 50 \div 624$  мм, длинами  $H+h = 2,1 \div 192,0$  м и относительными погружениями смесителей  $\alpha = 0,100 \div 0,664$  [12].

Отклонения расчетных подач эрлифтов в оптимальных режимах и режимах максимальных подач (24 режима работы) от экспериментально полученных данных при эмульсионной структуре водовоздушной смеси не превышают 25%, что является удовлетворительным результатом для рассматриваемых условий и подтверждает адекватность разработанной модели.

Разработанная математическая модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси и программа для ее решения на ПЭВМ позволяют определять те же гидродинамические параметры и зависимости, что и в случае модели для снарядной структуры, однако с учетом гомогенности (однокомпонентности) газожидкостного потока.

Физическая модель кольцевой структуры водовоздушного потока в вертикальной подъемной трубе эрлифта принята таковой, при которой пленка жидкости толщиной  $\delta(z)$  движется по внутренней стенке, а газ с капельными и близкими к ним включениями жидкости образует гомогенное ядро потока. Между газожидкостным ядром потока и пленкой, состоящей только из жидкости, имеет место массообмен за счет уноса и осаждения капель.

Уравнения неразрывности движения и количества движения раздельного водовоздушного потока с кольцевой структурой в вертикальной подъемной трубе эрлифта представлены системой зависимостей [13]:

$$W_g = \rho''(z) \cdot \beta_c(z) \cdot w''(z) \cdot \omega_c(z) = \text{const}; \quad (7)$$

$$W_{\text{эс}}(z) \Big|_0^{z_i} = W_{\text{э}} \cdot \varepsilon(z) \Big|_0^{z_i} = \int_0^{z_i} J_{fc}(z) \cdot dz - \int_0^{z_i} J_{cf}(z) \cdot dz; \quad (8)$$

$$W_{\text{эф}}(z) \Big|_0^{z_i} = W_{\text{э}} \cdot [1 - \varepsilon(z)] \Big|_0^{z_i} = \int_0^{z_i} J_{cf}(z) \cdot dz - \int_0^{z_i} J_{fc}(z) \cdot dz; \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
p_{cm} \cdot \frac{z_i}{H+h} &= 2\pi \int_0^{z_i} \frac{[R - \delta(z)] \cdot \tau_v(z)}{\omega_c(z)} dz + \\
&+ \int_0^{z_i} \frac{\{ [J_{cf}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] \cdot w_c(z) - [J_{fc}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] \cdot w'_v(z) \}}{\omega_c(z)} dz + \\
&+ \{ \rho''(z) \cdot \beta_c(z) + \rho' \cdot [1 - \beta_c(z)] \} \cdot \left[ \frac{Q_\delta(z) + Q_\varepsilon \cdot \varepsilon(z)}{\omega_c(z)} \right]^2 \Big|_0^{z_i} + \\
&+ g \cdot \int_0^{z_i} \{ \rho''(z) \cdot \beta_c(z) + \rho' \cdot [1 - \beta_c(z)] \} \cdot dz;
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
p_{cm} \cdot \frac{z_i}{H+h} &= -2\pi \int_0^{z_i} \frac{[R - \delta(z)] \cdot \tau_v(z)}{\omega_f(z)} dz - \\
&- \int_0^{z_i} \frac{\{ [J_{cf}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] \cdot w_c(z) - [J_{fc}(z) - J_{fc}^{(s)}(z)] \cdot w'_v(z) \}}{\omega_f(z)} dz + \\
&+ \pi \cdot R \cdot \rho' \cdot \int_0^{z_i} \frac{C_w(z) \cdot [w'_f(z)]^2}{\omega_f(z)} dz + \{ \rho' \cdot [w'_f(z)]^2 + \rho' \cdot g \cdot z \} \Big|_0^{z_i},
\end{aligned} \tag{11}$$

где  $W_\delta, W_{\delta c}(z), W_{\delta f}(z)$  - массовые расходы соответственно воздуха, воды в ядре газожидкостного потока и воды в пристенной пленке;  $\beta_c(z)$  - расходное объемной воздуходержание ядра газожидкостного потока;  $\omega_c(z), \omega_f(z)$  - площадь сечения соответственно гомогенного ядра и пристенной пленки;  $\varepsilon(z)$  - массовая часть жидкости, уносимая газом в ядре кольцевого потока;  $J_{fc}(z), J_{cf}(z)$  - интенсивность соответственно уноса капель с поверхности жидкостной пленки и осаждения капель на пленку;  $J_{fc}^{(s)}(z)$  - интенсивность ударного брызгоуноса;  $R$  - радиус подъемной трубы;  $\tau_v(z)$  - касательное напряжение на поверхности раздела фаз;  $w_c(z), w'_f(z), w'_v(z)$  - скорость соответственно гомогенного ядра газожидкостного потока, воды в при-

стенной пленке и скорость воды в пленке на межфазной границе;  $C_w(z)$  - коэффициент трения между пленкой и стенкой трубы.

Уравнения (10) и (11) возможно преобразовать к виду

$$p_{cm} \cdot \frac{z_i}{H+h} = \frac{\pi \cdot R \cdot \rho'}{\omega} \cdot \int_0^{z_i} C_w(z) \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot dz + \quad (12)$$

$$+ \frac{\{\beta_c(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta_c(z)] \cdot \rho'\} \cdot [w_c(z)]^2 \cdot \omega_c(z)}{\omega} \Big|_0^{z_i} + \frac{\rho' \cdot [w'_f(z)]^2 \cdot \omega_f(z)}{\omega} \Big|_0^{z_i} +$$

$$+ \frac{g}{\omega} \cdot \left[ \int_0^{z_i} \{\beta_c(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \beta_c(z)] \cdot \rho'\} \cdot \omega_c(z) \cdot dz + \rho' \int_0^{z_i} \omega_f(z) \cdot dz \right],$$

который, в свою очередь, соответствует выражению (4) и позволяет определять значения давлений  $p_{\Sigma i}$ ,  $p_{mpi}$ ,  $p_{уски}$  и  $p_{gi}$ .

Средний объемный расход водовоздушной смеси на участке трубы длиной  $z_i$

$$Q_{cpi} = \frac{W_g + W_a}{z_i} \int_0^{z_i} \frac{dz}{\varphi^*(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi^*(z)] \cdot \rho'}, \quad (13)$$

где  $\varphi^*(z)$  - расчетное газосодержание водовоздушного потока.

Значения мощностей  $N_{\Sigma i}$ ,  $N_{mpi}$ ,  $N_{уски}$ ,  $N_{gi}$ ,  $N_{ски}$ ,  $N'$ ,  $N''_i$  и  $N_{подi}$  определяются по методике, аналогичной используемой в математической модели рабочего процесса эрлифта со снаряженной структурой водовоздушной смеси.

Решения системы уравнений (7) - (11) с учетом массообмена между гомогенным ядром и пристенной пленкой кольцевой структуры двухфазного потока для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 20 \div 400$  мм и длинами  $H+h = 5 \div 50$  м при относительных погружениях смесителей  $\alpha = 0,05 \div 0,20$  найти не удалось. Объяснить это возможно ограниченным диапазоном использования существующих эмпирических зависимостей для определения интенсивности капельного массообмена между ядром газожидкостного потока и пристенной пленкой.

Для возможности количественной оценки рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси расчеты выпол-

нены при допущении отсутствия массообмена между ядром потока и пристенной пленкой и условия постоянства толщины пленки по всей высоте подъемной трубы.

Отклонения расчетных подач эрлифтов с подъемными трубами диаметрами  $D = 100 \div 250$  мм, длинами  $H+h = 11,7 \div 31,2$  м и относительными погружениями смесителей  $\alpha = 0,070 \div 0,205$  в оптимальных режимах и режимах максимальных подач (8 режимов работы) от экспериментально полученных данных при кольцевой структуре не превышают 30%, что подтверждает адекватность разработанной модели даже при пренебрежении массообменом между ядром потока и пристенной пленкой [14].

Вычисление гидродинамических параметров по высоте кольцевого водовоздушного потока при заданных расходах воздуха и построение расходной характеристики эрлифта при помощи разработанной математической модели и программы для ее решения на ПЭВМ выполняется также при допущении отсутствия массообмена между ядром потока и пристенной пленкой жидкости.

Таким образом, разработанные математические модели рабочего процесса эрлифта позволяют адекватно описывать гидродинамические явления в подъемной трубе газожидкостного подъемника, что, в свою очередь, обеспечивает возможность аналитического поиска путей повышения энергетической эффективности рассматриваемого гидравлического аппарата.

**5. Выводы и направление дальнейших исследований.** Доказана возможность адекватного математического описания барботажного и эксплуатационных (со снарядной, эмульсионной и кольцевой структурами водовоздушного потока) режимов работы эрлифтов на основе уравнений неразрывности движения и количества движения газожидкостной смеси.

Полученные математические модели рабочего процесса эрлифта обеспечивают возможность аналитическим путем выявить резервы повышения энергетической эффективности газожидкостных подъемников.

Список источников.

1. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Антонов Я.К. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
2. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Кононенко А.П. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
3. Кононенко А.П. О принципе действия эрлифта // Наукові праці ДНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. Випуск 13 (123). - Донецьк: ДонНТУ. – 2007. - С. 91-100.

4. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – Суми: СДУ. - 2005. - №12 - С. 38-48.
5. Кононенко А.П. Уравнения сохранения массы и импульса вертикального восходящего водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта // Промислова гідравліка і пневматика. – Вінниця. - 2006. - №3 (13). - С. 44-48.
6. Кононенко А.П. Математическая модель барботажного режима эрлифта // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 83. - Донецьк: ДонНТУ. - 2004. - С. 156-169.
7. Кононенко А.П. Количественный анализ гидродинамических параметров барботажного режима эрлифта // Сборник научных трудов "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". – Краматорск: ДГМА. – 2006. - №1(3). - С. 217-223.
8. Айзенбуд М.Б., Дильман В.В. Вопросы гидравлики химических реакторов для систем газ-жидкость. Химическая промышленность, №3, 1961. – С. 51-56.
9. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока // Промислова гідравліка і пневматика. - 2006. - №1 (11). - С. 34-37.
10. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 104. - Донецьк: ДонНТУ. – 2006. - С. 17-29.
11. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". Випуск 101. - Донецьк: ДонНТУ. – 2005. - С. 58-67.
12. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушной смеси. // Научный журнал "Вестник Донецкого университета". Серия А. Естественные науки. Часть 1. – Донецк: ДонНУ. – 2006. - №2. - С. 143 - 150.
13. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с кольцевой структурой водовоздушного потока // Вісник Національного технічного університету "ХП". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ "ХП". – 2006. - №27. - С. 113-121.
14. Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта с кольцевой структурой водовоздушной смеси // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: ХПИ. – 2006. - №5/1 (23). - С. 58-61.

Стаття надійшла до редколегії 15.09.2009

Рецензент: докт. техн. наук, проф. Н. Г. Бойко

**А.П.Кононенко. Моделювання робочого процесу ерліфта. Доказана можливість адекватного математичного моделювання барботажного та експлуатаційних робочих процесів газорідних підйомників.**

**ерліфт, піднімальна труба, газорідна суміш, математична модель, газовміст, подача, витрата повітря.**

**A.Kononenko. Airlift Operation Modelling. The possibility of adequate mathematical modeling of the barbotage and operation processes of gas-liquid lifts is proved.**

**airlift, lifting pipe, gas-liquid mixture, mathematical model, gas content, air supply and consumption.**

© А. П. Кононенко, 2009