

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 $k_Q = f(\alpha, q)$ (α – 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. Барботажаж – 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 ρ' – 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; ω_v , ω_n – площади поперечных сечений соответственно восходящего и нисходящего потоков.

Решение системы уравнений (1) и (2) позволило уточнить значение коэффициента ε , 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%).

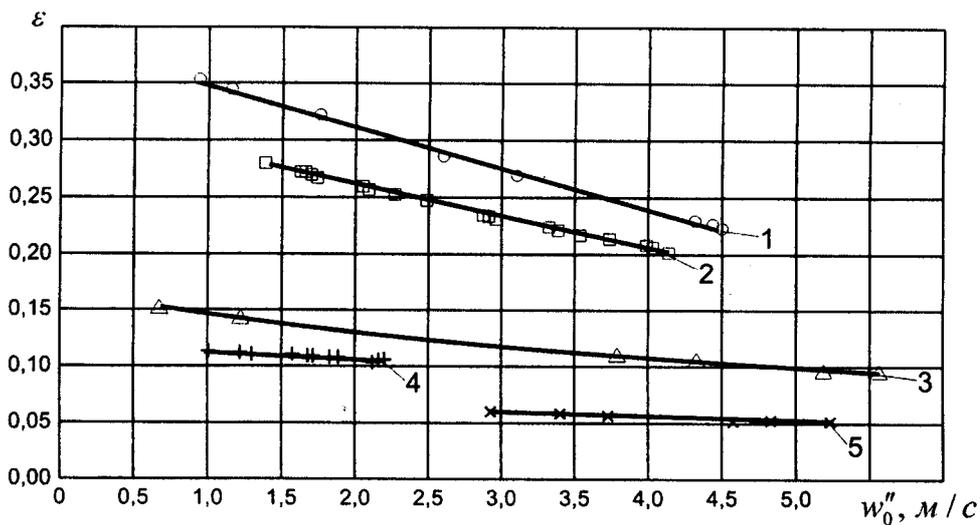


Рис. 1. Залежність коефіцієнта ε від приведеної швидкості повітря при середньому тиску в підіймальній трубі: 1 – $D = 140$ мм; 2 – $D = 150$ мм; 3 – $D = 250$ мм; 4 – $D = 353$ мм; 5 – $D = 624$ мм

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 ω – 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.

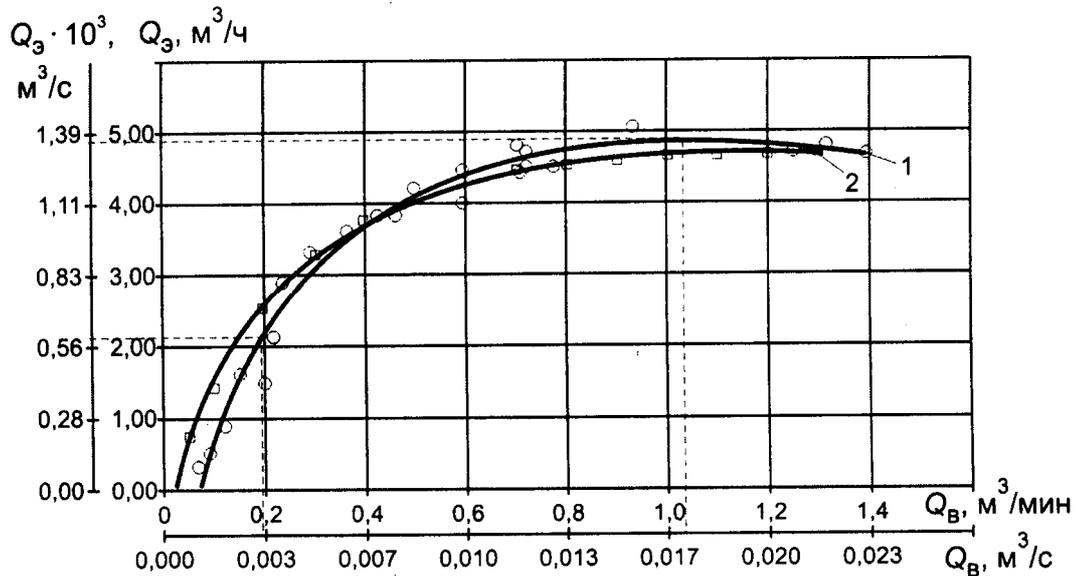


Рис. 2. Экспериментальная 1 и расчетная 2 расходные характеристики эрлифта $D = 50$ мм, $H+h = 14,0$ м, $h = 5,5$ м, $\alpha = 0,393$

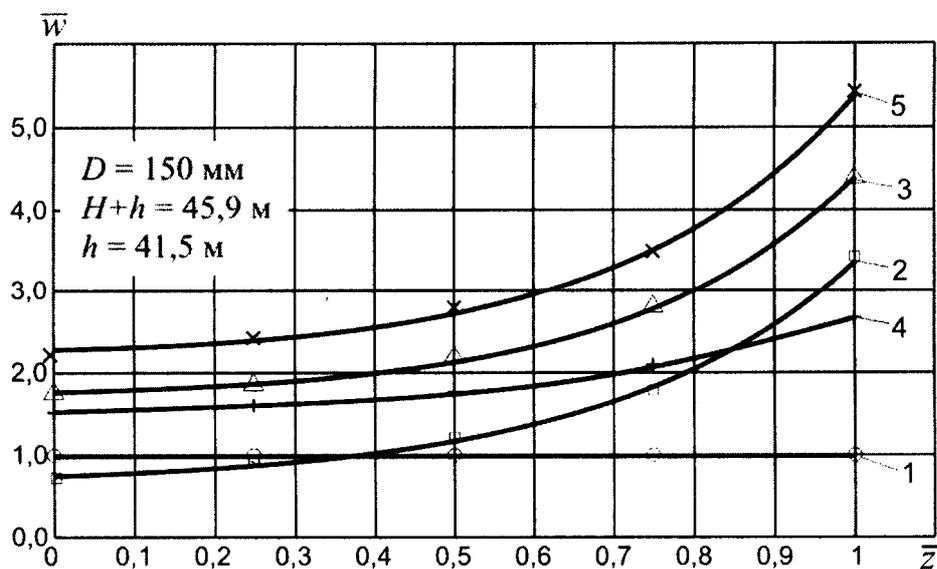


Рис. 3. Изменение относительных скоростей водовоздушной смеси и ее компонентов по высоте подъемной трубы в режиме максимальной подачи эрлифта: 1 - $\bar{w}'_0 = f(\bar{z})$, 2 - $\bar{w}''_0 = f(\bar{z})$, 3 - $\bar{w}_{см} = f(\bar{z})$, 4 - $\bar{w}' = f(\bar{z})$, 5 - $\bar{w}'' = f(\bar{z})$ (\bar{w}'_0 , \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)

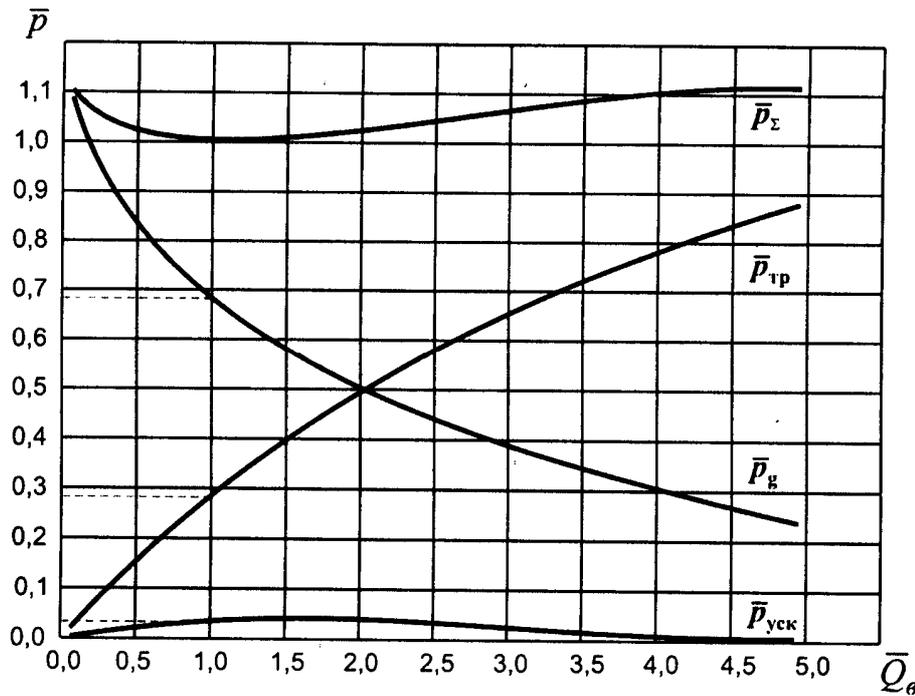


Рис. 4. Изменение относительных давлений в эрлифте $D = 150$ мм, $H+h = 45,9$ м, $d = 100$ мм, $l = 500$ мм, $h = 41,5$ м, $\alpha = 0,904$ [d и l – соответственно диаметр и длина подающей трубы; базисные значения $Q_e = 11,4$ м³/мин (0,19 м³/с), $p_\Sigma = 3,71$ кгс/см² (364,0 кПа)]

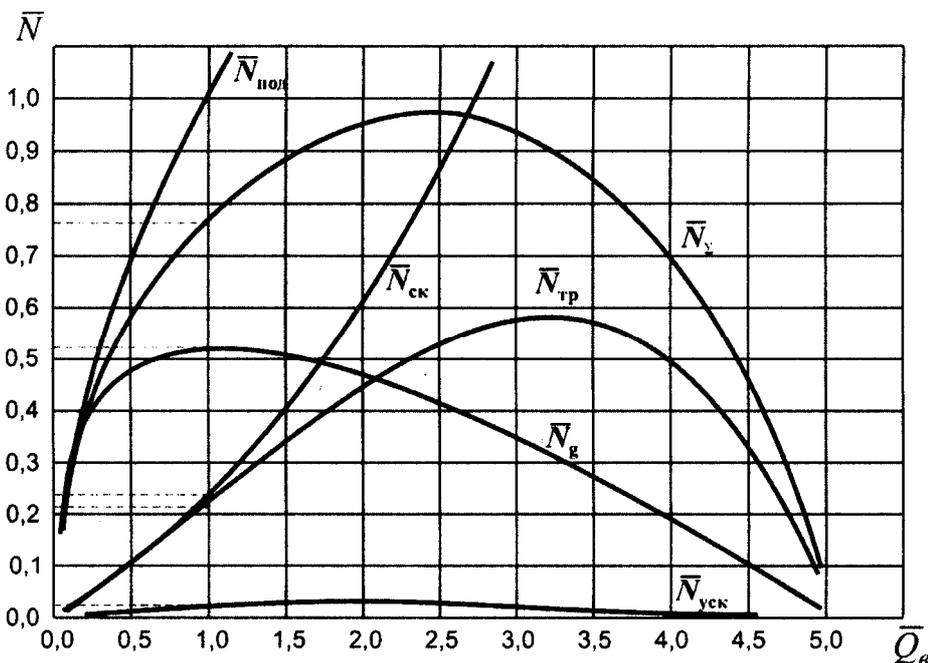


Рис. 5. Изменение относительных мощностей в эрлифте $D = 150$ мм, $H+h = 45,9$ м, $d = 100$ мм, $l = 500$ мм, $h = 41,5$ м, $\alpha = 0,904$ [базисные значения $Q_e = 11,4$ м³/мин (0,19 м³/с), $N_{подв} = 49,0$ кВт)]

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_{cpi} на соответствующее давление $p_{\Sigma i}$, p_{mpi} , p_{yski} и p_{gi} также позволяет определять значения мощностей $N_{\Sigma i}$, N_{mpi} , N_{yski} и N_{gi} при движении водовоздушного потока на участке подъемной трубы длиной z_i . Подведенная к подъемной трубе мощность равна сумме $N_{nodi} = N' + N_i''$, причем $N_{nodi} = N_{\Sigma i}$ из-за принятой модели гомогенного течения, предполагающей отсутствие потерь мощности на скольжение фаз $N_{cki} = 0$.

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 "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ "ХПІ". – 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