

ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СНАРЯДНОГО ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПО ВЫСОТЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ ЭРЛИФТА

*А.П. Кононенко*¹

Приведено решение математической модели рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока, позволяющее определять, в том числе, изменение гидродинамических параметров газожидкостной смеси по высоте вертикальной подъемной трубы.

ВВЕДЕНИЕ

1 Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Повышение энергетической эффективности гидравлических машин и аппаратов является одной из приоритетных задач на пути их совершенствования. Это особенно важно для низкоэкономичных гидравлических аппаратов, к которым относится и эрлифт.

Одной из особенностей эрлифта является изменение гидродинамических параметров водовоздушной смеси, а в некоторых случаях и ее структуры, не только по «длине» расходной характеристики, но и по высоте подъемной трубы при каждом заданном расходе воздуха. Изменение гидродинамических параметров по высоте восходящего водовоздушного потока обусловлено изменением его давления.

Сокращение непроизводительных энергетических расходов в эрлифте предполагает возможность количественной оценки распределения подведенной к аппарату мощности, 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 снарядной структуре, часто реализуемой в эрлифтах.

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

2 Анализ исследований и публикаций.

Экспериментальный количественный анализ полного перепада давлений и его составляющих в [1] и анализ значений мощностей при рассмотрении внешней задачи – определении полезных и затрачиваемых составляющих в [2, 3], приведены для всего эрлифта в целом (вертикальной трубы с водовоздушным потоком) без исследования изменения гидродинамических параметров в промежуточных сечениях подъемной трубы.

Используя разработанную математическую модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой газожидкостной смеси в [4] выполнен анализ распределения давлений и мощностей водовоздушного потока в зависимости от расхода воздуха (по «длине» характеристики). Однако изменение гидродинамических параметров двухфазной смеси по высоте

¹ Канд. техн. наук, доцент, Донецкий национальный технический университет.

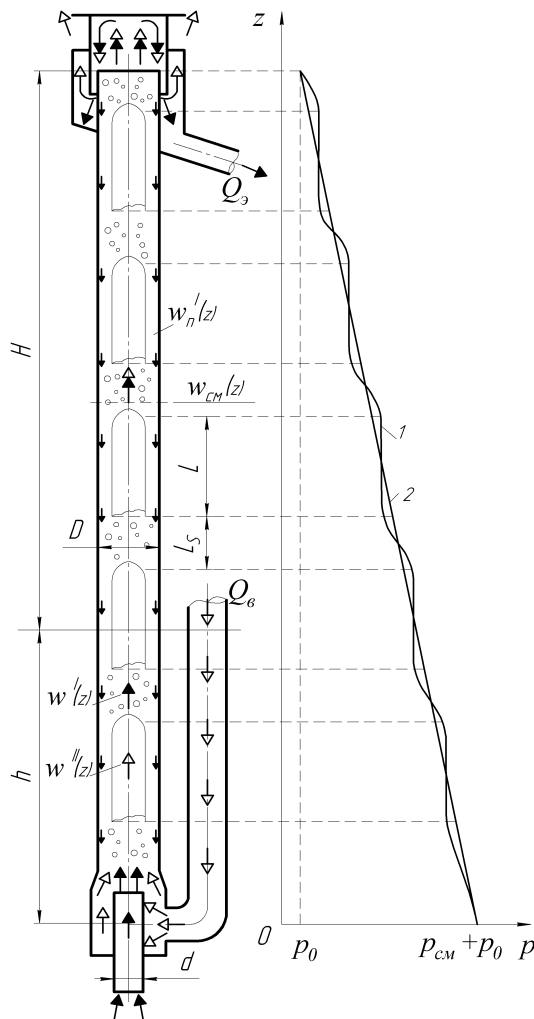


Рисунок 1 – Схема эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока: истинная 1 и усредненная 2 эпюры давления в подъемной трубе

в зоне имеет место нисходящее движение жидкостной пленки со скоростью $w'_n(z)$.

Доказана [2, 3] допустимая правомерность линейного закона изменения давления восходящего газожидкостного потока в вертикальной трубе.

Уравнение стационарного восходящего движения водовоздушной смеси для условий вертикальной подъемной трубы эрлифта согласно теории раздельного течения [5-6] возможно представить в виде

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

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

подъемной трубы в характерных режимах работы эрлифта и в этой работе не исследовалось.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На основе разработанной математической модели рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой газожидкостной смеси выполнить количественный анализ распределения гидродинамических параметров водовоздушного потока по высоте вертикальной подъемной трубы газожидкостного подъемника в режиме максимальной подачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При снарядной структуре течения в эрлифте с подъемной трубой диаметром D , длиной $H+h$ (H – высота подъема, h – геометрическое погружение смесителя) и подающей трубой диаметром d газ движется с истинной скоростью $w''(z)$ преимущественно в виде больших пузырей (снарядов) длиной L (рис. 1). Жидкостные пробки длиной L_s , движущиеся с истинной скоростью $w'(z)$, как правило, включают газовую фазу в виде мелких пузырей. Приведенная скорость водовоздушной смеси при этом $w_{cm}(z)$. В пристенной

которое, в свою очередь, для участка подъемной трубы длиной z_i ($0 \leq z_i \leq H+h$) запишем следующим образом

$$p_{\Sigma i} = p_{m_{pi}} + p_{y_{cki}} + p_{g_i}, \quad (2)$$

где p_{cm} – избыточное давление в смесителе; z_i – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы; $\tau_{cm}(z)$ – касательное напряжение; G – приведенная массовая скорость газожидкостной смеси; x – массовое расходное газосодержание; ρ' и $\rho''(z)$ – плотности соответственно воды и воздуха; $\varphi(z)$ – истинное газосодержание водовоздушной смеси; g – ускорение свободного падения; $p_{\Sigma i}$ – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i ; $p_{m_{pi}}$, $p_{y_{cki}}$, p_{g_i} – 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 определяется выражением

$$Q_{cpi} = \frac{\pi \cdot G \cdot D^2}{4z_i} \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'}. \quad (3)$$

Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, а также ее составляющие – мощности, необходимые для компенсации потерь на трение $N_{m_{pi}}$, ускорение $N_{y_{cki}}$ и гравитационную составляющую N_{g_i} при движении водовоздушного потока по участку вертикальной подъемной трубы длиной z_i , определяются как произведение среднего объемного расхода Q_{cpi} на соответствующий перепад давлений $p_{\Sigma i}$, $p_{m_{pi}}$, $p_{y_{cki}}$ и p_{g_i} . Суммарная подведенная мощность N_{nodi} и мощности, подведенные потоком воды N' и сжатого воздуха N''_i , вычисляются по общеизвестным соотношениям [2, 3]. Мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение N_{cki} для снарядной структуры потока определяется разностью $N_{nodi} - N_{\Sigma i}$.

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 со снарядной структурой водовоздушного потока подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных расходных характеристик газожидкостных подъемников [7].

Уменьшение давления по ходу движения водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта приводит к увеличению объемного расхода воздуха и соответствующих изменений объемного расходного и истинного газосодержаний и скоростей компонентов потока.

Количественный анализ изменения гидродинамических параметров по высоте водовоздушной смеси выполнен для режима максимальной подачи эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 150$ мм, длиной $H+h = 45,9$ м и подающей трубой диаметром $d = 100$ мм, длиной $l = 500$ мм при геометрическом погружении смесителя $h = 41,5$ м (относительное

геометрическое погружение смесителя $\alpha = 0,904$) [8]. Использована модель рабочего процесса подъемника при определении давления в смесителе $p_{см}$ с учетом потерь в подающей трубе $\Delta h_{п.т.}$

Структура потока в подъемной трубе (как на входе, так и на выходе) для оптимального режима и режима максимальной подачи данного эрлифта снарядная [9].

Расчетная безразмерная расходная характеристика эрлифта [4] представлена в диапазоне относительных подач от $\bar{Q}_э = 0$ на восходящей ветви характеристики до $\bar{Q}_э = 0$ на нисходящей ветви характеристики, что соответствует относительным расходам воздуха от барботажного $\bar{Q}_в = \bar{Q}_{вб}$ до предельного $\bar{Q}_в = \bar{Q}_{впр}$ (рис. 2). При этом принято допущение правомерности использования математической модели рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока во всем диапазоне изменения расходов воздуха.

При построении безразмерной расходной характеристики эрлифта в качестве базисных были приняты значения расходов воздуха и подачи эрлифта в режиме максимальной подачи $Q_{в макс} = 11,4 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($0,19 \text{ м}^3/\text{с}$), $Q_{э макс} = 199,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,0553 \text{ м}^3/\text{с}$).

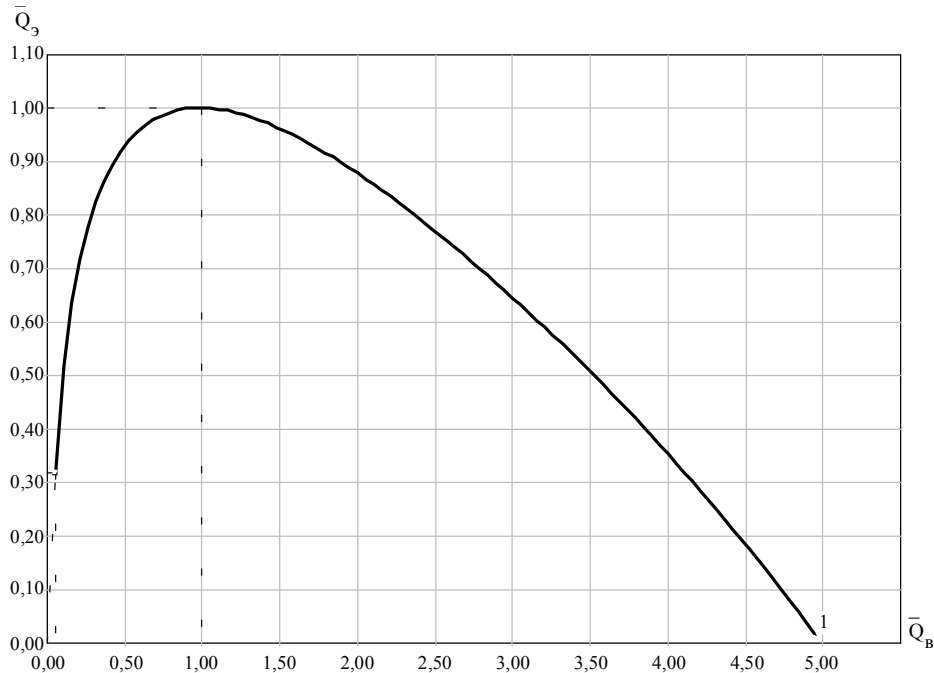


Рисунок 2 – Безразмерная расходная характеристика эрлифта
 $D = 150 \text{ мм}$, $H+h = 45,9 \text{ м}$, $d = 100 \text{ мм}$, $l = 500 \text{ мм}$, $h = 41,5 \text{ м}$, $\alpha = 0,904$
 (базисные значения $Q_в = 11,4 \text{ м}^3/\text{мин}$, $Q_э = 199,1 \text{ м}^3/\text{ч}$)

Для данного эрлифта объемное расходное газосодержание в режиме максимальной подачи увеличивается от $\beta = 0,422$ на уровне смесителя ($\bar{z} = 0$) до $\beta = 0,775$ на уровне выхода из подъемной трубы ($\bar{z} = 1$, где $\bar{z} = z/(H+h)$) (кривая 1 рис. 3). Истинное газосодержание вследствие скольжения фаз имеет меньшее, чем расходное газосодержание, значение и равно $\varphi = 0,330$ при $\bar{z} = 0$ и $\varphi = 0,630$ при $\bar{z} = 1$ (кривая 2 рис. 3).

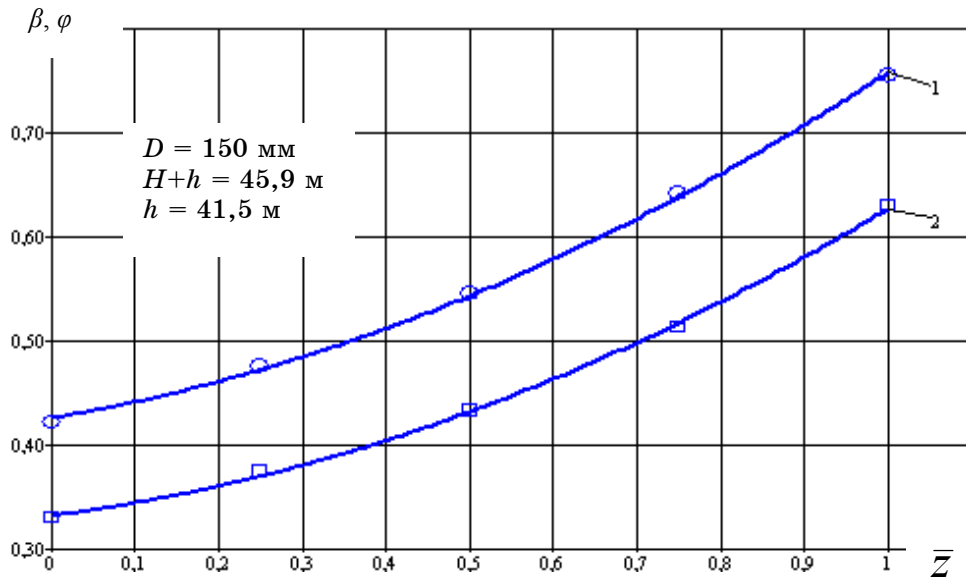


Рисунок 3 – Изменение воздуходержаний двухфазного потока по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 – $\beta = f(\bar{z})$,
 2 – $\varphi = f(\bar{z})$ (базисное значение $z = 45,9 \text{ м}$)

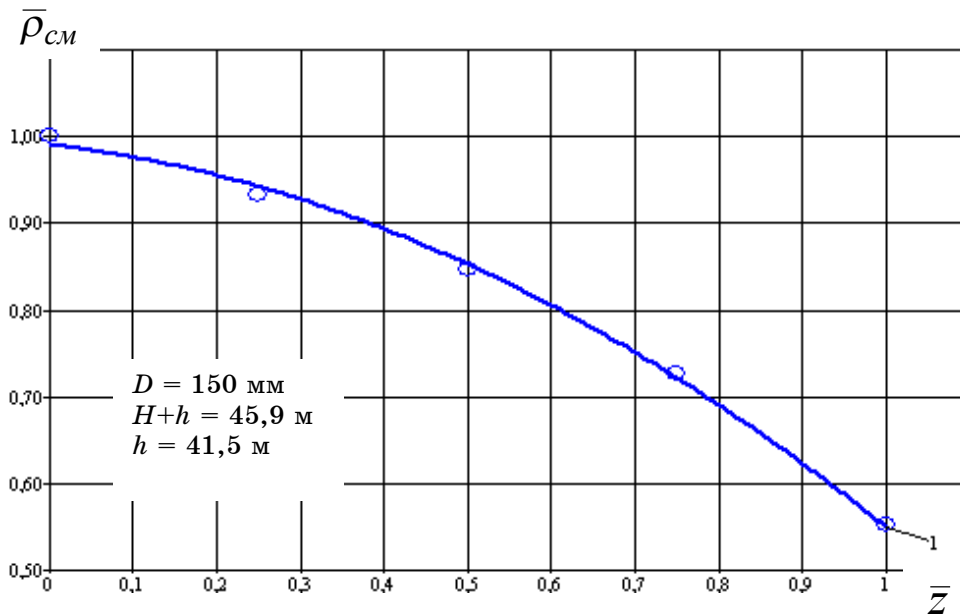


Рисунок 4 – Изменение относительной плотности водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы эрлифта $\bar{\rho}_{см} = f(\bar{z})$
 (базисные значения $z = 45,9 \text{ м}$, $\rho_{см} = 671,6 \text{ кг/м}^3$)

Плотность газожидкостной смеси из-за расширения воздуха по высоте подъемной трубы уменьшается от $\rho_{см} = 671,6 \text{ кг/м}^3$ при $z = 0$ до

$\rho_{см} = 371,1 \text{ кг/м}^3$ при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$. Безразмерная зависимость $\bar{\rho}_{см} = f(\bar{z})$ (рис. 4) построена для базисного значения плотности смеси, равного $\rho_{см} = 671,6 \text{ кг/м}^3$.

Приведенная скорость воды в подъемной трубе имеет постоянное значение по всей ее длине и составляет $w'_0 = 3,13 \text{ м/с}$. Приведенная скорость воздуха увеличивается от $w''_0 = 2,28 \text{ м/с}$ при $z = 0$ до $w''_0 = 10,8 \text{ м/с}$ при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$, а приведенная скорости смеси - от $w_{см} = 5,41 \text{ м/с}$ при $z = 0$ до $w_{см} = 13,9 \text{ м/с}$ при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$. Истинная скорость воды на всем протяжении подъемной трубы имеет меньшее значение, чем приведенная скорость смеси $w_{см}$, и составляет $w' = 4,67 \text{ м/с}$ при $z = 0$ и $w' = 8,45 \text{ м/с}$ при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$. Истинная скорость воздуха превышает значение приведенной скорости смеси $w_{см}$ и соответственно равна $w'' = 6,91 \text{ м/с}$ при $z = 0$ и $w'' = 17,1 \text{ м/с}$ при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$.

При построении безразмерных зависимостей $\bar{w}'_0 = f(\bar{z})$, $\bar{w}''_0 = f(\bar{z})$, $\bar{w}_{см} = f(\bar{z})$, $\bar{w}' = f(\bar{z})$ и $\bar{w}'' = f(\bar{z})$ (рис. 5) в качестве базисного принято значение приведенной скорости воды, равное $w'_0 = 3,13 \text{ м/с}$.

Значение истинной скорости воды на выходе из подъемной трубы во многом определяет динамические нагрузки на воздухоотделитель и является базовой величиной при расчете его долговечности. При транспортировании гидросмесей в результате абразивного износа срок службы воздухоотделителя в некоторых случаях может быть достаточно коротким. Поэтому возможность вычисления истинной скорости жидкостной фазы на выходе из подъемной трубы, которая в рассматриваемом случае более чем в 1,6 раза отличается от используемой в этих расчетах до настоящего времени приведенной скорости смеси, является практически важной.

При принятом, при построении математической модели рабочего процесса эрлифта, допущении о линейности изменения суммарного перепада давления p_{Σ} по высоте подъемной трубы, практически линейно изменяются и его составляющие, обусловленные силой тяжести p_g , трением $p_{тр}$ и ускорением $p_{уск}$. При нулевых значениях при $z = 0$ их величины при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$ составляют: суммарный перепад давления $p_{\Sigma} = 3,71 \text{ кгс/см}^2$ (364,0 кПа), обусловленный силой тяжести $p_g = 2,54 \text{ кгс/см}^2$ (249,2 кПа), обусловленный трением $p_{тр} = 1,05 \text{ кгс/см}^2$ (103,0 кПа) и обусловленный ускорением $p_{уск} = 0,12 \text{ кгс/см}^2$ (11,8 кПа).

При построении безразмерных зависимостей $\bar{p}_{\Sigma} = f(\bar{z})$, $\bar{p}_g = f(\bar{z})$, $\bar{p}_{тр} = f(\bar{z})$, $\bar{p}_{уск} = f(\bar{z})$ (рис. 6) в качестве базисного принято значение суммарного перепада давления, равное $p_{\Sigma} = 3,71 \text{ кгс/см}^2$ (364,0 кПа).

Уравнение сохранения импульса (1) при описании снарядного режима эрлифта проинтегрировано при граничных условиях $z_1 = 0$, $z_2 = H+h$, что классифицирует мощность воды на входе в подъемную трубу N' как подведенную к подъемнику.

Суммарная подведенная мощность монотонно увеличивается от $N_{подв} = 20,1 \text{ кВт}$ при $z = 0$ до $N_{подв} = 49,0 \text{ кВт}$ при $z = H+h = 45,9 \text{ м}$. Мощность, подведенная к подъемной трубе потоком воды, определяется подачей эрлифта, геометрическим погружением смесителя и сопротивлением подающей трубы и для рассматриваемого случая составляет $N' = 20,1 \text{ кВт}$. Мощность, подводимая сжатым воздухом,

увеличивается, из-за увеличения перепада давлений, от $N'' = 0$ при $z = 0$ до $N'' = 28,9$ кВт при $z = H+h = 45,9$ м.

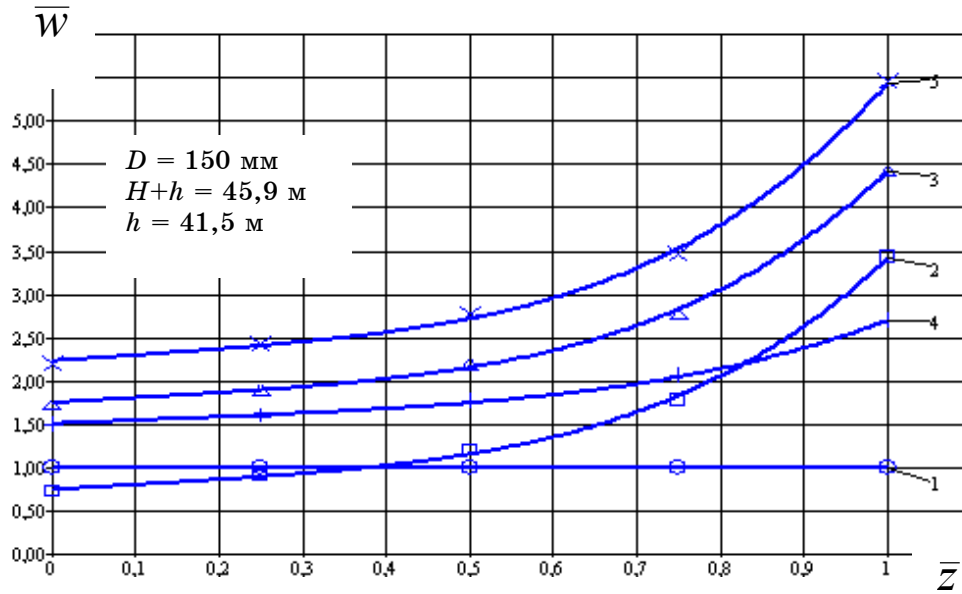


Рисунок 5 – Изменение относительных скоростей водовоздушной смеси и ее компонентов по высоте подъемной трубы эрлифта: 1- $\bar{w}'_0 = f(\bar{z})$, 2- $\bar{w}''_0 = f(\bar{z})$, 3- $\bar{w}_{см} = f(\bar{z})$, 4- $\bar{w}' = f(\bar{z})$ 5- $\bar{w}'' = f(\bar{z})$ (базисные значения $z = 45,9$ м, $w'_0 = 3,13$ м/с)

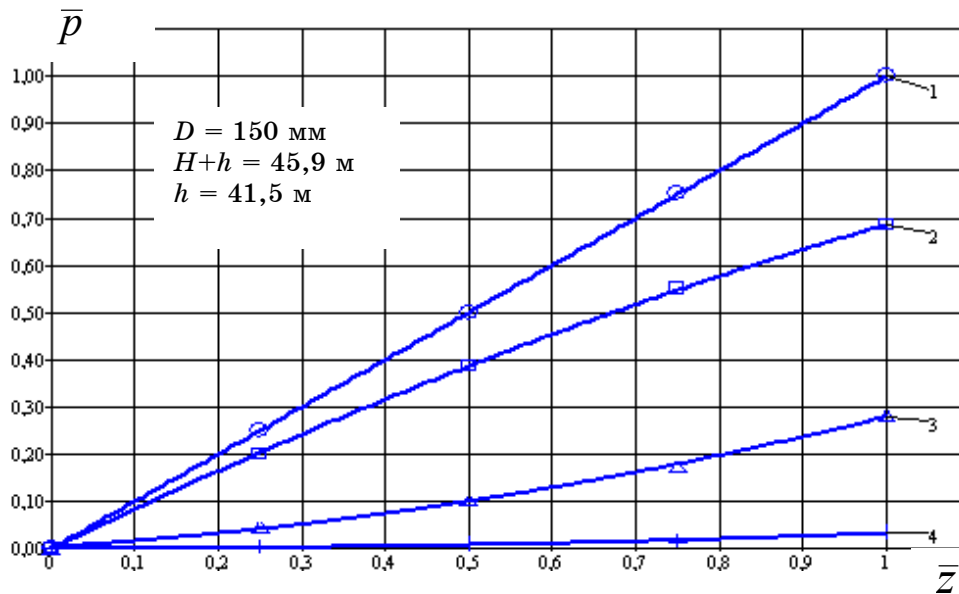


Рисунок 6 – Изменение относительных давлений по высоте подъемной трубы эрлифта: 1- $\bar{p}_\Sigma = f(z)$, 2- $\bar{p}_g = f(z)$, 3- $\bar{p}_{mp} = f(z)$, 4- $\bar{p}_{уек} = f(z)$ [базисные значения $z = 45,9$ м, $p_\Sigma = 3,71$ кгс/см² (364,0 кПа)]

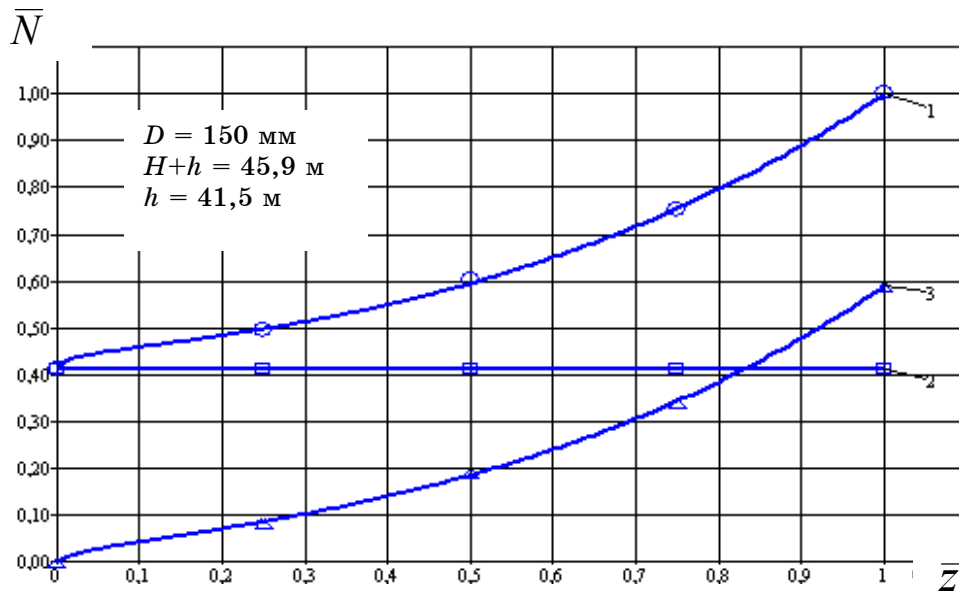


Рисунок 7 – Изменение относительных подводенных мощностей по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 - $\bar{N}_{\text{подв}} = f(\bar{z})$, 2 - $\bar{N}' = f(\bar{z})$, 3 - $\bar{N}'' = f(\bar{z})$ (базисные значения $z=45,9\text{м}$, $N_{\text{подв}} = 49,0 \text{ кВт}$)

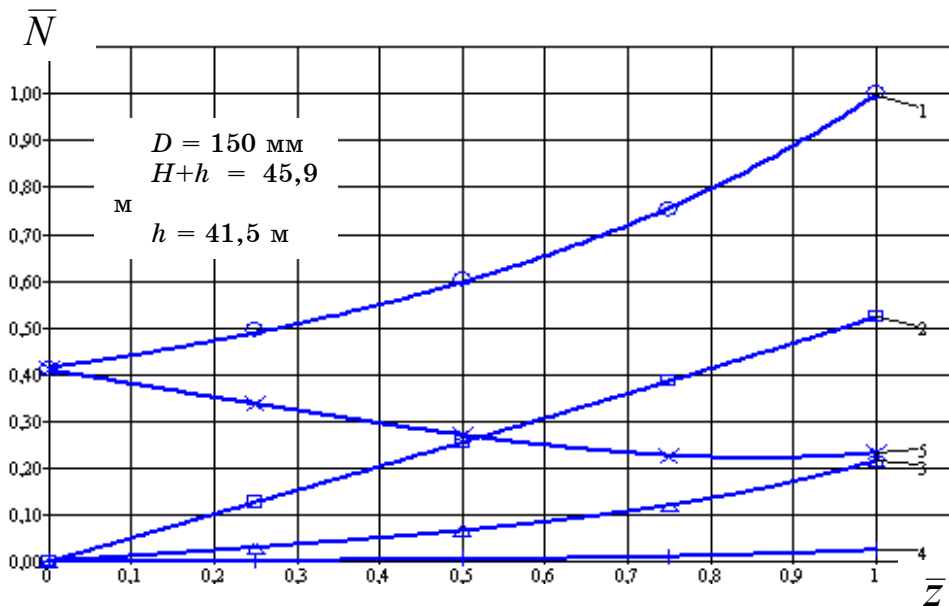


Рисунок 8 – Изменение относительных мощностей по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 - $\bar{N}_{\text{подв}} = f(\bar{z})$, 2 - $\bar{N}_g = f(\bar{z})$, 3 - $\bar{N}_{\text{тр}} = f(\bar{z})$, 4 - $\bar{N}_{\text{уск}} = f(\bar{z})$, 5 - $\bar{N}_{\text{ск}} = f(\bar{z})$ (базисные значения $z = 45,9 \text{ м}$, $N_{\text{подв}} = 49,0 \text{ кВт}$)

При построении безразмерных зависимостей $\bar{N}_{подв} = f(\bar{z})$, $\bar{N}' = f(\bar{z})$, $\bar{N}'' = f(\bar{z})$ (рис. 7) в качестве базисного принято значение суммарной подведенной мощности, равное $N_{подв} = 49,0$ кВт.

Монотонно увеличиваясь по высоте подъемной трубы, изменяются и мощности:

а) компенсирующая силу тяжести - $N_g = 0$ при $z = 0$ и $N_g = 25,7$ кВт при $z = H+h = 45,9$ м;

б) компенсирующая потери на трение - $N_{тр} = 0$ при $z = 0$ и $N_{тр} = 10,6$ кВт при $z = H+h = 45,9$ м;

в) компенсирующая потери на ускорение - $N_{уск} = 0$ при $z = 0$ и $N_{уск} = 1,23$ кВт при $z = H+h = 45,9$ м.

Мощность, компенсирующая потери на скольжение, при изложенной выше трактовке подведенных мощностей, на входе в трубу ($N_{ск} = 20,1$ кВт при $z = 0$) превышает ее значение на выходе из трубы ($N_{ск} = 11,5$ кВт при $z = H+h = 45,9$ м), что не является очевидным.

При построении безразмерных зависимостей $\bar{N}_{подв} = f(\bar{z})$, $\bar{N}_g = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{тр} = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{уск} = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{ск} = f(\bar{z})$ (рис. 8) в качестве базисного принято значение суммарной подведенной мощности, равное $N_{подв} = 49,0$ кВт.

Физически более правомерно трактовать распределение мощностей в каждом из рассматриваемых сечений подъемной трубы по ее высоте, если в качестве подведенной рассматривать мощность воздушного потока N'' , а мощность, расходуемую на преодоление сил тяжести, обозначить как

$$N_{гск} = N_g - N' . \quad (4)$$

В последнем выражении $N_{гск}$ выражает мощность, затрачиваемую на преодоление гравитационных сил при подъеме двухфазной смеси на высоту $H' = (H + h) - \frac{p_{см}}{\rho g} = 45,9 - \frac{3,71 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{9,81 \cdot 1000} = 8,8$ м. Относительная вертикальная координата начального уровня подъема смеси составляет $\bar{z} = 1 - \frac{H'}{H + h} = 1 - \frac{8,8}{45,9} = 0,808$.

Тогда мощность, компенсирующая потери на скольжение, будет равна

$$N_{ск} = N'' - N_{гск} - N_{тр} - N_{уск} . \quad (5)$$

В интервале значений $0 \leq \bar{z} \leq 0,808$ (рис. 9), при которых гравитационная составляющая $N_{гск} = 0$, мощность потока сжатого воздуха N'' расходуется на компенсацию потерь на трение $N_{тр}$ и ускорение $N_{уск}$, а составляющая ее часть $N_{ск}$, монотонно увеличиваясь, представляет потери на изотермическое дросселирование при расширении воздуха от избыточного давления $p_{см}$ до избыточного давления $p_{см}(1 - \bar{z})$, что согласуется с [10].

При $\bar{z} > 0,808$ интенсивность увеличения мощности $N_{ск}$ по длине трубы снижается, что объясняется монотонно увеличивающейся на этом участке составляющей мощности на преодоление гравитационных сил $N_{гск}$. Абсолютное значение мощности, компенсирующей потери на скольжение, при $z = H+h = 45,9$ м составляет, как и в предыдущем случае (рис. 8), величину $N_{ск} = 11,5$ кВт.

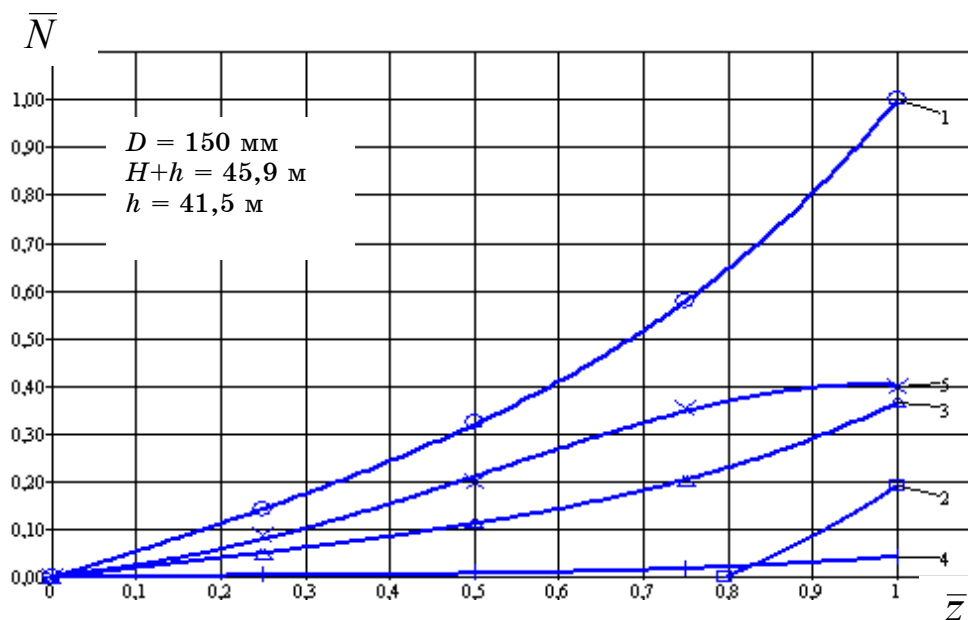


Рисунок 9 – Изменение относительных мощностей по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 - $\bar{N}'' = f(\bar{z})$, 2 - $\bar{N}_{гсж} = f(\bar{z})$, 3 - $\bar{N}_{тр} = f(\bar{z})$,

$$4 - \bar{N}_{уск} = f(\bar{z}), 5 - \bar{N}_{ск} = f(\bar{z})$$

(базисные значения $z = 45,9 \text{ м}$, $N'' = 28,9 \text{ кВт}$)

Необходимо учитывать, что при $\bar{z} < 1$ имеет место запас неиспользованной в эрлифте мощности сжатого воздуха N'' , определяемый значением избыточного давления в промежуточном сечении $0 \leq \bar{z} < 1$.

При построении безразмерных зависимостей $\bar{N}'' = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{гсж} = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{тр} = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{уск} = f(\bar{z})$, $\bar{N}_{ск} = f(\bar{z})$ (рис. 9) в качестве базисного принято значение мощности, подведенной сжатым воздухом, равное $N'' = 28,9 \text{ кВт}$.

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

ВЫВОДЫ И НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Впервые получены расчетные количественные распределения объемного расходного и истинного газосодержаний, плотности водовоздушной смеси, приведенных и истинных скоростей компонентов потока, давлений и мощностей, расходуемых на компенсацию сил тяжести, трения и ускорения, а также потерь на скольжение фаз по высоте подъемной трубы эрлифта.

Это позволит установить наиболее энергетически целесообразные режимы эксплуатации и разработать рекомендации по совершенствованию газожидкостных подъемников.

SUMMARY

The solution of the mathematical model of the working process of the airlift with the slug 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. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе // Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. - Спб. Изд-во АН СССР, 1955. - С. 21-34.
2. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пащенко, Я.К. Антонов - Донецк: ДПИ, 1982. - 64 с.
3. Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пащенко, А.П. Кононенко Энциклопедия эрлифтов. - М.: Информсвязиздат, 1995. - 592 с.
4. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта // Вісник ДонДУЕТ. Серія Технічні науки. - 2006. - №1(29). - С. 20-30.
5. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения.- М.: Мир, 1972. - 440 с.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. - М.: Наука, 1987. - Ч. II.- 360 с.
7. Бойко Н.Г., Кононенко А.П. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси // Наукові праці ДНТУ. Серія Гірничо-електромеханічна. - 2006. - Вип. 104. - С. 17-29.
8. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъема твердого материала: Дисс... канд. техн. наук. - Донецк: ДПИ, 1982. - 323 с.
9. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов //Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. - 2005. - №12 (84). - С. 38-48.
10. Логвинов Н.Г., Надеев Е.И., Стегниенко А.П., Аврахов Ф.И. Баланс энергии в эрлифте // Труды Международной научно-технической конференции "Горная энергомеханика и автоматика". - Донецк: ДонНТУ, 2003. - Т.1- С. 147-152.

Поступила в редакцию 11 декабря 2006 г