

УДК 658.26:622.276.5

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭМУЛЬСИОННОГО ВОДОВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

Бойко Н.Г., докт. техн. наук, проф.,

Кононенко А.П., канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет

Приведено решение математической модели рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока, позволяющее определять, в том числе, давления и мощности газожидкостной смеси в вертикальной подъемной трубе.

The solution of mathematical model of the working process of the airlift with the emulsion structure of the water-air flow is given. It also allows to identify pressure and power of the gas-liquid mixture in the vertical lifting tunnel

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.

Сокращение непроизводительных энергетических расходов в эрлифте предполагает возможность количественной оценки распределения подведенной к аппарату мощности. Такой анализ необходимо иметь в широком диапазоне режимов работы эрлифта для каждой из структур газожидкостной смеси, имеющих место в вертикальных подъемных трубах. Одной из часто реализуемых в эрлифтах является эмульсионная структура водовоздушной смеси.

Поэтому количественный анализ распределения давлений и мощностей эмульсионного водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта является актуальной научной и практической задачей.

Анализ исследований и публикаций. Анализ изменения полного перепада давления и его составляющих, компенсирующих силы тяжести, трения и обусловленных ускорением восходящей газожидкостной смеси в вертикальной трубе, приведен в [1] по результатам экспериментальных исследований. В процессе выполнения экспериментов поддерживался постоянный расход воды для каждой серии опытов и изменялся расход воздуха, то есть требуемый диапазон га-

зосодержаний смеси обеспечивался переменным расходом только газообразной фазы.

Отличием гидродинамических характеристик водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта от реализованных и анализируемых в [1] является то, что в эрлифт принудительно подается один компонент – сжатый воздух. Расход лифтируемой жидкости в подъемной трубе при изменении расхода воздуха устанавливается в зависимости от конструктивных и технологических особенностей эрлифта – диаметра и длины трубы, погружения смесителя и др. Поэтому представление результатов анализа распределения давлений водовоздушного потока в виде, предложенном в [1], для условий газожидкостного подъемника не является приемлемым.

Анализ мощностей потоков в эрлифте в [2, 3] выполнен при рассмотрении внешней задачи – определении полезных и затрачиваемых составляющих как правило в одном, оптимальном, режиме работы подъемника без оценки изменения этих составляющих при изменении расхода воздуха. Такой подход ограничивает возможности количественного энергетического анализа параметров эрлифта в широком диапазоне режимов его работы.

В [4] на основе теории гомогенного двухфазного течения обоснована физическая и разработана математическая модель, описывающая рабочий процесс эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе. Решение полученных зависимостей позволяет выявить закономерности изменения энергетических параметров водовоздушной смеси в газожидкостном подъемнике.

Постановка задачи. На основе разработанной в [4] математической модели рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой газожидкостной смеси выполнить количественный анализ распределения давлений и мощностей водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта в широком диапазоне изменений расходов сжатого воздуха.

Изложение материала и результаты. Уравнение одномерного стационарного восходящего движения эмульсионной водовоздушной смеси в вертикальной трубе эрлифта на основе гомогенной теории получено в [4] в виде:

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

которое для участка подъемной трубы длиной z_i (где $0 \leq z_i \leq H+h$) правомерно представить следующим образом:

$$P_{\Sigma i} = P_{тpi} + P_{уски} + P_{gi}, \quad (2)$$

где $p(z)$ – давление в сечении трубы на расстоянии z от смесителя; $\lambda_{см}(z)$ – коэффициент сопротивления водовоздушной смеси; G – приведенная массовая скорость газожидкостной смеси; D – диаметр подъемной трубы; $\beta(z)$ – объемное расходное газосодержание водовоздушной смеси; ρ' и $\rho''(z)$ – плотности соответственно воды и воздуха; ρ_0'' – плотность воздуха при нормальных условиях; p_0 – атмосферное давление; H – высота подъема эрлифта; h – геометрическое погружение смесителя; $P_{\Sigma i}$ – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной z_i ; $P_{тpi}$, $P_{уски}$, P_{gi} – перепады давления на участке подъемной трубы длиной z_i , обусловленные соответственно трением, ускорением и силой тяжести.

Средний объемный расход эмульсионной водовоздушной смеси на участке подъемной трубы длиной z_i определяется выражением [4]

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

Суммарная мощность $N_{\Sigma i}$, а также ее составляющие – мощности, необходимые для компенсации потерь на трение $N_{тpi}$, ускорение $N_{уски}$ и гравитационную составляющую N_{gi} при движении водовоздушного потока на участке вертикальной подъемной трубы длиной z_i , определяются как произведение среднего объемного расхода $Q_{срi}$ на соответствующий перепад давлений $P_{\Sigma i}$, $P_{тpi}$, $P_{уски}$ и P_{gi} . Суммарная подведенная мощность $N_{подi}$ и мощности, подведенные потоком

воды N' и сжатого воздуха N_i'' , определяются по общеизвестным соотношениям [2, 3]. Мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение $N_{ски}$ для эмульсионной структуры потока учитывается составляющей N_{mpi} ввиду принимаемого равенства скоростей жидкости и газа.

Решение полученных уравнений численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы позволяет определять следующие количественные значения и зависимости:

- значения текущих гидродинамических параметров водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы и при заданном расходе воздуха $Q_в$;

- зависимость подачи эрлифта $Q_э$ от расхода воздуха $Q_в$ (построение расходной характеристики);

- изменение давлений – суммарного $p_{\Sigma i}$, обусловленного трением p_{mpi} , ускорением $p_{уски}$ и силой тяжести p_{gi} и мощностей – суммарной $N_{\Sigma i}$, компенсирующей затраты на трение N_{mpi} , ускорение $N_{уски}$, преодоление силы тяжести N_{gi} , а также подведенной потоком воды N' , сжатого воздуха N_i'' и суммарной подведенной $N_{под i}$ в зависимости от расхода воздуха $Q_в$ и по высоте подъемной трубы.

Адекватность разработанных математических моделей рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока подтверждается удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных расходных характеристик [5 - 12].

Для количественного анализа распределения давлений и мощностей водовоздушного потока в качестве исходных приняты данные, полученные при экспериментальных исследованиях работы эрлифта с подъемной трубой диаметром $D = 353$ мм, длиной $H+h = 11,7$ м, подающей трубой диаметром $d = 205$ мм и длиной $l = 700$ мм при геометрическом погружении смесителя $h = 2,4$ м (относительное геометрическое погружение смесителя $\alpha = 0,205$) [12]. Структура потока в подъемной трубе (как на входе, так и на выходе) для оптимального режима и режима максимальной подачи данного эрлифта эмульсионная [13].

В [4] приведен анализ известных работ, содержащих рекомендации по определению коэффициента сопротивления двухфазной смеси $\lambda_{см}$, описываемой на основе гомогенной теории. Исходя из существующего состояния данного вопроса количественный анализ эмуль-

сионного потока в подъемной трубе эрлифта проведен для двух вариантов вычисления коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$:

а) при принимаемом постоянном значении коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$ в широком диапазоне изменения гидродинамических параметров водовоздушной смеси, что рекомендуется в [14];

б) при вычислении коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$ по эмпирической зависимости, имеющей вид [4]

$$\lambda_{см} = \lambda(Re_{см}, \varepsilon) \cdot \psi(\beta, Fr_{см}), \quad (4)$$

где $\lambda = f(Re_{см}, \varepsilon)$ - коэффициент сопротивления однофазного потока для критерия Рейнольдса водовоздушной смеси $Re_{см}$ и относительной шероховатости трубы ε ;

ψ - поправочный коэффициент, вычисляемый для расходного газосодержания β и критерия Фруда водовоздушной смеси $Fr_{см}$ по выражению

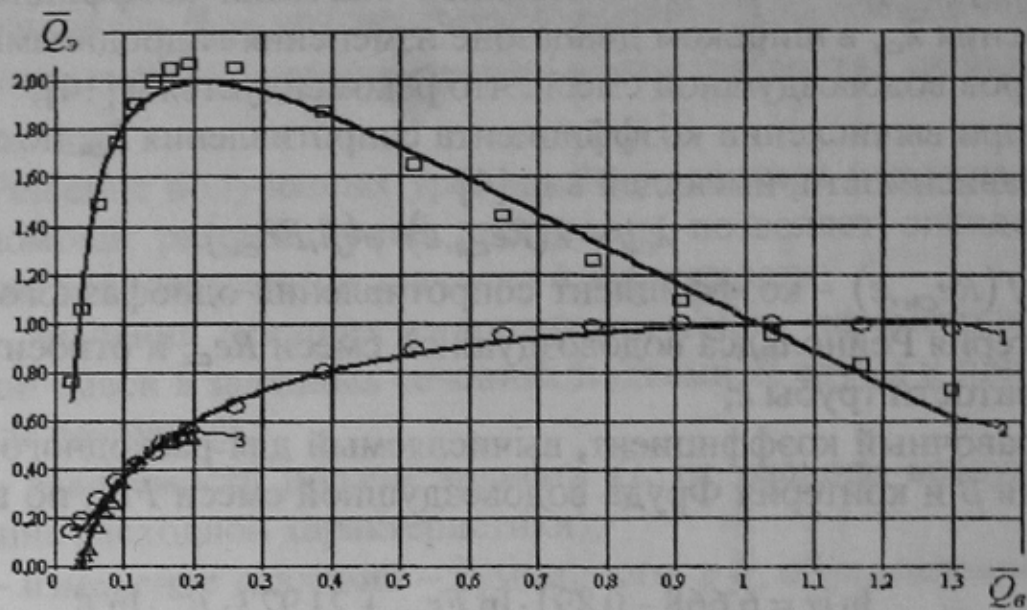
$$\ln \psi = 6,668 - 0,891 \cdot \ln Fr_{см} + 21,923 \cdot \beta^2 \cdot \ln \beta, \quad (5)$$

подтвержденному с приемлемой точностью для диапазона значимых факторов $\beta = 0,738 \div 0,995$, $Fr_{см} = 12,7 \div 171,0$.

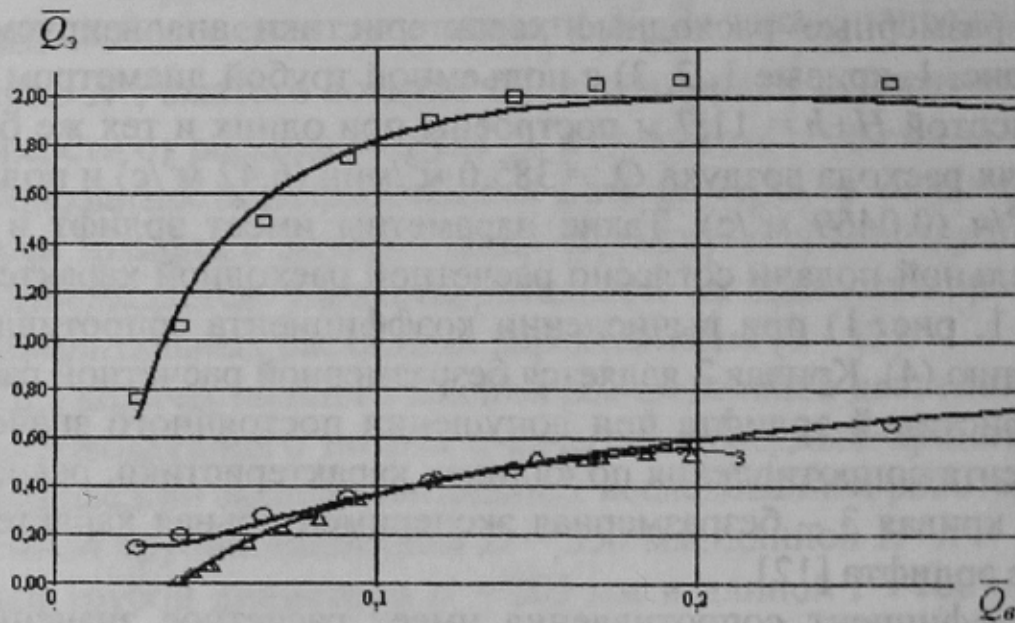
Безразмерные расходные характеристики анализируемого эрлифта (рис. 1, кривые 1, 2, 3) с подъемной трубой диаметром $D = 353$ мм и высотой $H+h = 11,7$ м построены при одних и тех же базисных значениях расхода воздуха $Q_в = 385,0$ м³/мин (6,42 м³/с) и подачи $Q_з = 168,8$ м³/ч (0,0469 м³/с). Такие параметры имеет эрлифт в режиме максимальной подачи согласно расчетной расходной характеристики (кривая 1, рис. 1) при вычислении коэффициента сопротивления по выражению (4). Кривая 2 является безразмерной расчетной расходной характеристикой эрлифта при допущении постоянного значения коэффициента сопротивления по «длине» характеристики, равного $\lambda_{см} = 0,026$, а кривая 3 – безразмерная экспериментальная характеристика этого же эрлифта [12].

Коэффициент сопротивления имеет расчетное значение $\lambda_{см} = 0,026$ в режиме максимальной подачи рассматриваемого эрлифта при среднем давлении в подъемной трубе при вычислении гидродинамических параметров водовоздушной смеси с использованием зависимости (4).

Расчет безразмерных расходных характеристик эрлифта выполнен в диапазоне относительных подач от $\bar{Q}_з \rightarrow 0$ на восходящей ветви характеристики до $\bar{Q}_з \rightarrow 0$ на нисходящей ветви



a)



б)

Рисунок 1 – Безразмерные расходные характеристики эрлифта $D = 353$ мм, $H+h = 11,7$ м, $h = 2,4$ м [а) – расходные характеристики; б) – фрагмент расходных характеристик в диапазоне $\bar{Q}_6 = 0 \div 0,3$]: 1 – расчетная при определении λ_{CM} по выражению (4); 2 – расчетная при $\lambda_{CM} = 0,026$; 3 – экспериментальная [базисные значения $Q_6 = 385,0$ м³/мин (6,42 м³/с), $Q_3 = 168,8$ м³/ч (0,0469 м³/с)]

характеристики, что соответствует относительным расходам воздуха от барботажного $\bar{Q}_v = \bar{Q}_{v.б}$ до предельного $\bar{Q}_v = \bar{Q}_{v.пр}$ (рис. 1). При этом принято допущение правомерности использования математической модели рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока во всем рассмотренном диапазоне изменения расходов воздуха.

Как следует из графиков (рис. 1), в диапазоне расходов воздуха $\bar{Q}_v = 0 \div 0,2$, что имело место при проведении эксперимента, расчетная характеристика 1 удовлетворительно согласуется с опытной характеристикой 3. В то же время значения подач \bar{Q}_v согласно расчетной характеристики 3 существенно превышают аналогичные, полученные экспериментальным путем. Следовательно, принятое значение коэффициента сопротивления $\lambda_{см} = 0,026$ для участка характеристики 3 в диапазоне относительных расходов воздуха $\bar{Q}_v = 0 \div 0,2$ существенно занижено в сравнении с действительным.

Изменение расчетных значений коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$ при среднем давлении в подъемной трубе, полученных при построении характеристики 1 (рис. 1), характеризуется гиперболической зависимостью (рис. 2).

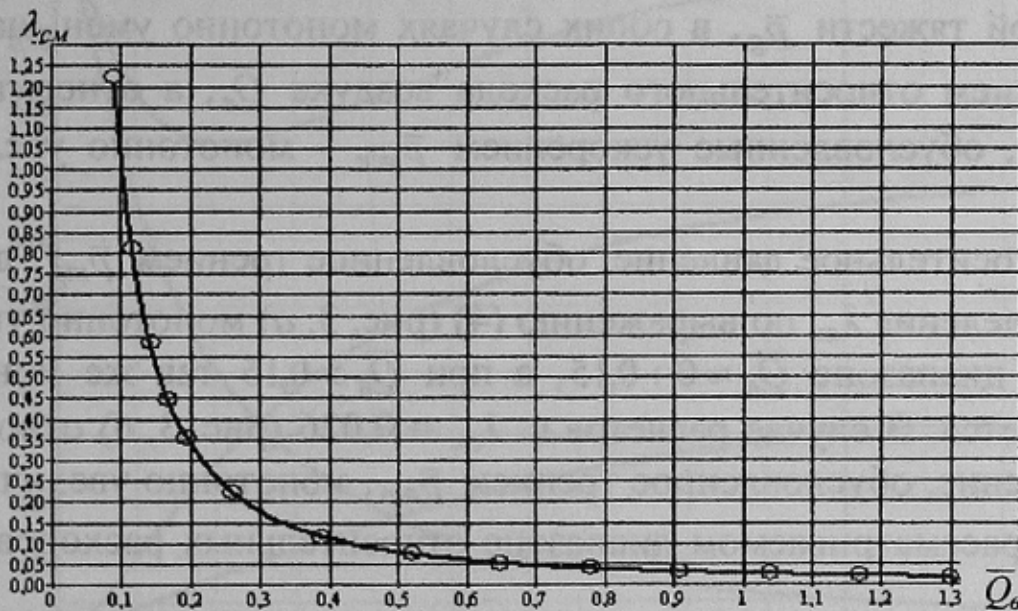


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента сопротивления при вертикальном движении водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта $D = 353$ мм, $H+h = 11,7$ м, $h = 2,4$ м от расхода воздуха $\lambda_{см} = f(\bar{Q}_v)$

Как следует из рисунков 1 и 2, использование при количественном анализе гидродинамических параметров водовоздушного потока

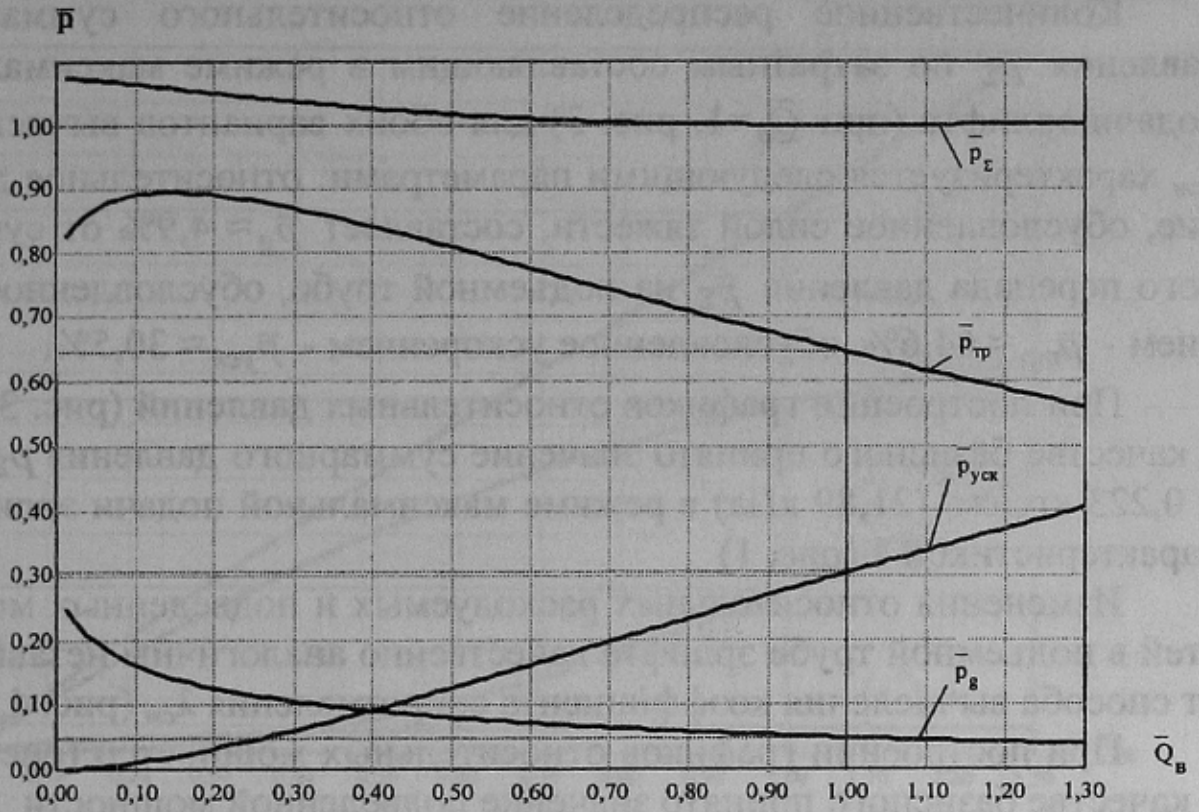
с эмульсионной структурой постоянного значения коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$ в диапазоне расходов воздуха от барботажного $\bar{Q}_в = \bar{Q}_{в.б}$ до предельного $\bar{Q}_в = \bar{Q}_{в.пр}$ может приводить к существенным погрешностям в вычислениях. Однако при определенных условиях (в зоне автомодельности) такой подход вполне приемлем и дает положительные результаты. Для рассматриваемого случая началом зоны автомодельности коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$ можно считать значения относительных расходов воздуха $\bar{Q}_в \geq 0,6 \div 0,7$, что удовлетворительно согласуется с [7].

Не зависимо от методики определения коэффициента сопротивления $\lambda_{см}$, качественно аналогично изменяются в рассматриваемом диапазоне относительных расходов воздуха $\bar{Q}_в$ суммарные относительные давления \bar{p}_Σ , а также относительные давления, обусловленные силой тяжести \bar{p}_g и потерями на ускорение водовоздушного потока $\bar{p}_{уск}$ (рис. 3, а, б).

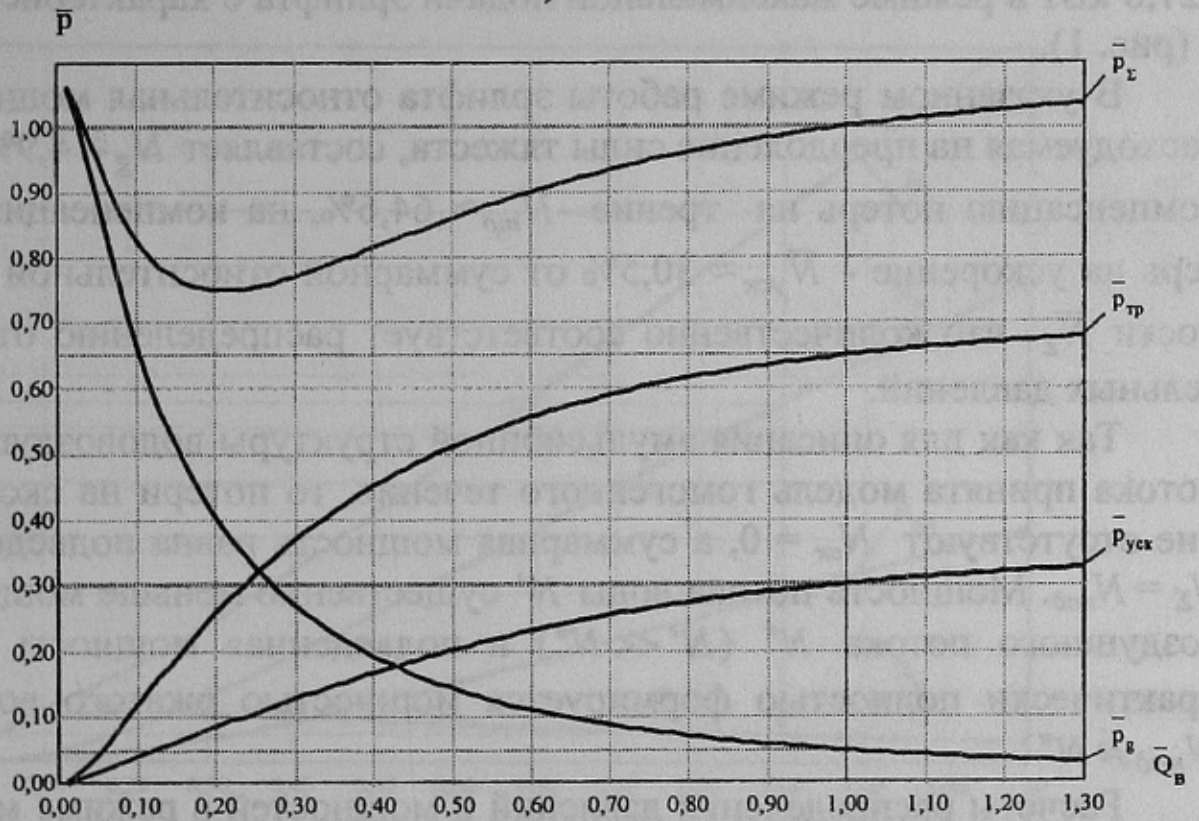
Суммарные относительные давления \bar{p}_Σ имеют минимальные значения в режимах максимальной подачи эрлифта (при $\bar{Q}_в = 1$ – рис. 3, а, и при $\bar{Q}_в \approx 0,2$ – рис. 3, б). Относительные давления, обусловленные силой тяжести \bar{p}_g , в обоих случаях монотонно уменьшаются с увеличением относительного расхода воздуха $\bar{Q}_в$, а относительные давления, обусловленные ускорением $\bar{p}_{уск}$ – монотонно увеличиваются.

Относительное давление, обусловленное трением $\bar{p}_{тр}$, для случая определения $\lambda_{см}$ по выражению (4) (рис. 3, а) монотонно увеличивается в диапазоне $\bar{Q}_в \approx 0 \div 0,15$, а при $\bar{Q}_в > 0,15$ так же монотонно уменьшается. В случае расчетов с $\lambda_{см} = 0,026$ (рис. 3, б) относительное давление, обусловленное трением $\bar{p}_{тр}$, монотонно увеличивается во всем рассматриваемом диапазоне относительных расходов воздуха.

Объяснить отличие характера изменений относительных давлений, обусловленных трением $\bar{p}_{тр}$, в зависимости от способа вычисления $\lambda_{см}$, возможно гиперболической зависимостью $\lambda_{см} = f(\bar{Q}_в)$ при вычислении коэффициента сопротивления по выражению (4) в отличие от принятого постоянного значения $\lambda_{см} = 0,026 - \text{const}$ при другом способе ведения расчетов.



а)



б)

Рисунок 3 – Изменение расчетных относительных давлений в подъемной трубе эрлифта $D = 353$ мм, $H+h = 11,7$ м, $h = 2,4$ м: а) - при определении λ_{cm} по выражению (4); б) –при $\lambda_{cm} = 0,026$ [базисные значения $Q_B = 385,0$ м³/мин (6,42 м³/с), $p_\Sigma = 0,223$ кг/см² (21,89 кПа)]

Количественное распределение относительного суммарного давления \bar{p}_Σ по затратным составляющим в режиме максимальной подачи эрлифта (при $\bar{Q}_e=1$, рис. 3) для обоих вариантов вычислений λ_{cm} характеризуется следующими параметрами: относительное давление, обусловленное силой тяжести, составляет $\bar{p}_g \approx 4,9\%$ от суммарного перепада давления \bar{p}_Σ на подъемной трубе, обусловленное трением - $\bar{p}_{тр} \approx 64,6\%$, обусловленное ускорением - $\bar{p}_{уск} \approx 30,5\%$.

При построении графиков относительных давлений (рис. 3, а, б) в качестве базисного принято значение суммарного давления $p_\Sigma = p_{cm} = 0,223 \text{ кгс/см}^2$ (21,89 кПа) в режиме максимальной подачи эрлифта с характеристикой 1 (рис. 1)

Изменения относительных расходуемых и подведенных мощностей в подъемной трубе эрлифта качественно аналогичны независимо от способа вычисления коэффициента сопротивления λ_{cm} (рис. 4, 5).

При построении графиков относительных мощностей (рис. 4, 5) в качестве базисного принято значение подведенной мощности $N_{под} = 127,8 \text{ кВт}$ в режиме максимальной подачи эрлифта с характеристикой 1 (рис. 1).

В указанном режиме работы эрлифта относительная мощность, расходуемая на преодоление силы тяжести, составляет $\bar{N}_g \approx 4,9\%$, на компенсацию потерь на трение - $\bar{N}_{тр} \approx 64,6\%$, на компенсацию потерь на ускорение - $\bar{N}_{уск} \approx 30,5\%$ от суммарной относительной мощности \bar{N}_Σ , что количественно соответствует распределению относительных давлений.

Так как для описания эмульсионной структуры водовоздушного потока принята модель гомогенного течения, то потери на скольжение отсутствуют $N_{ск} = 0$, а суммарная мощность равна подведенной $N_\Sigma = N_{под}$. Мощность потока воды N' существенно меньше мощности воздушного потока N'' ($N' \ll N''$) и подведенная мощность $N_{под}$ практически полностью формируется мощностью сжатого воздуха $N_{под} \approx N''$.

Расчеты распределения давлений и мощностей в режиме максимальной подачи газожидкостных подъемников с эмульсионной структурой водовоздушной смеси выполнены также для подъемных труб диаметрами $D = 50 \div 624 \text{ мм}$ и длинами $H+h = 2,1 \div 192,0 \text{ м}$ при

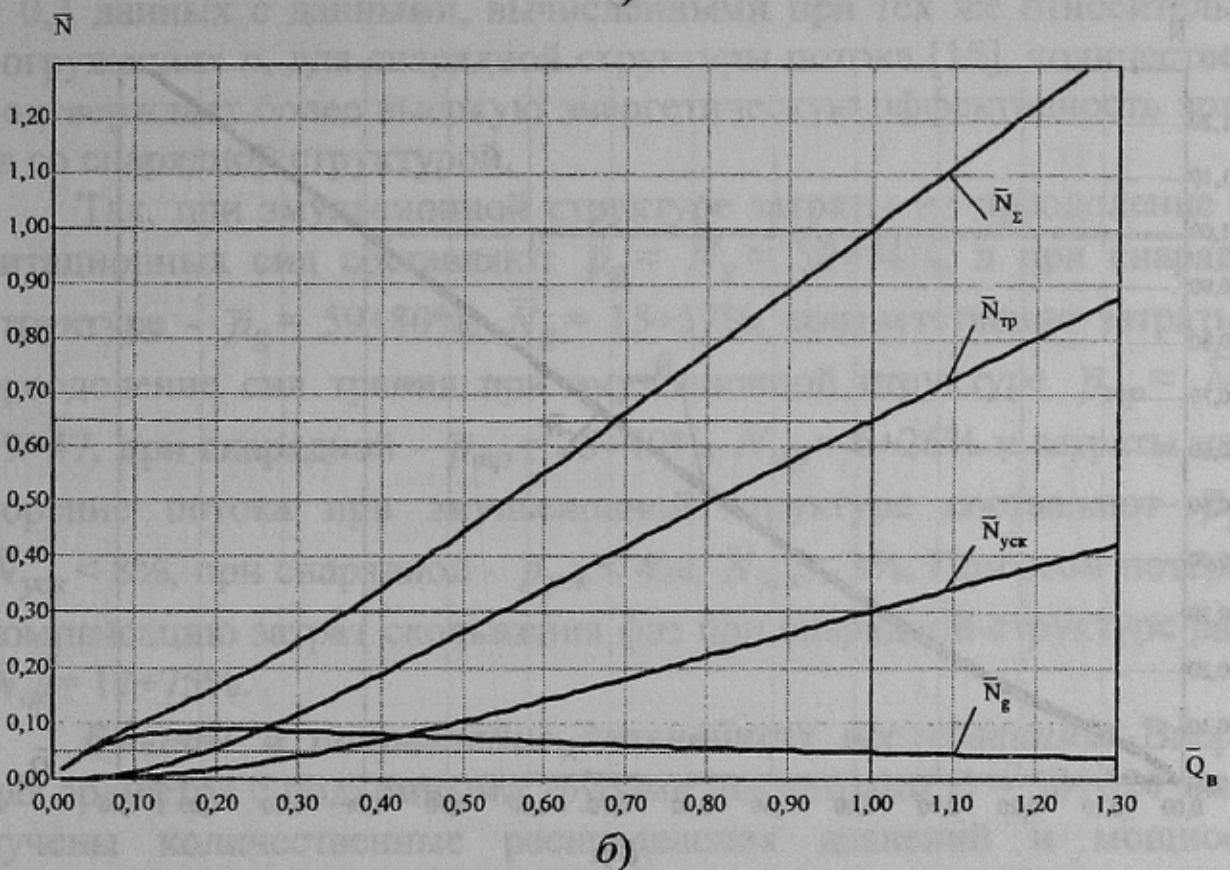
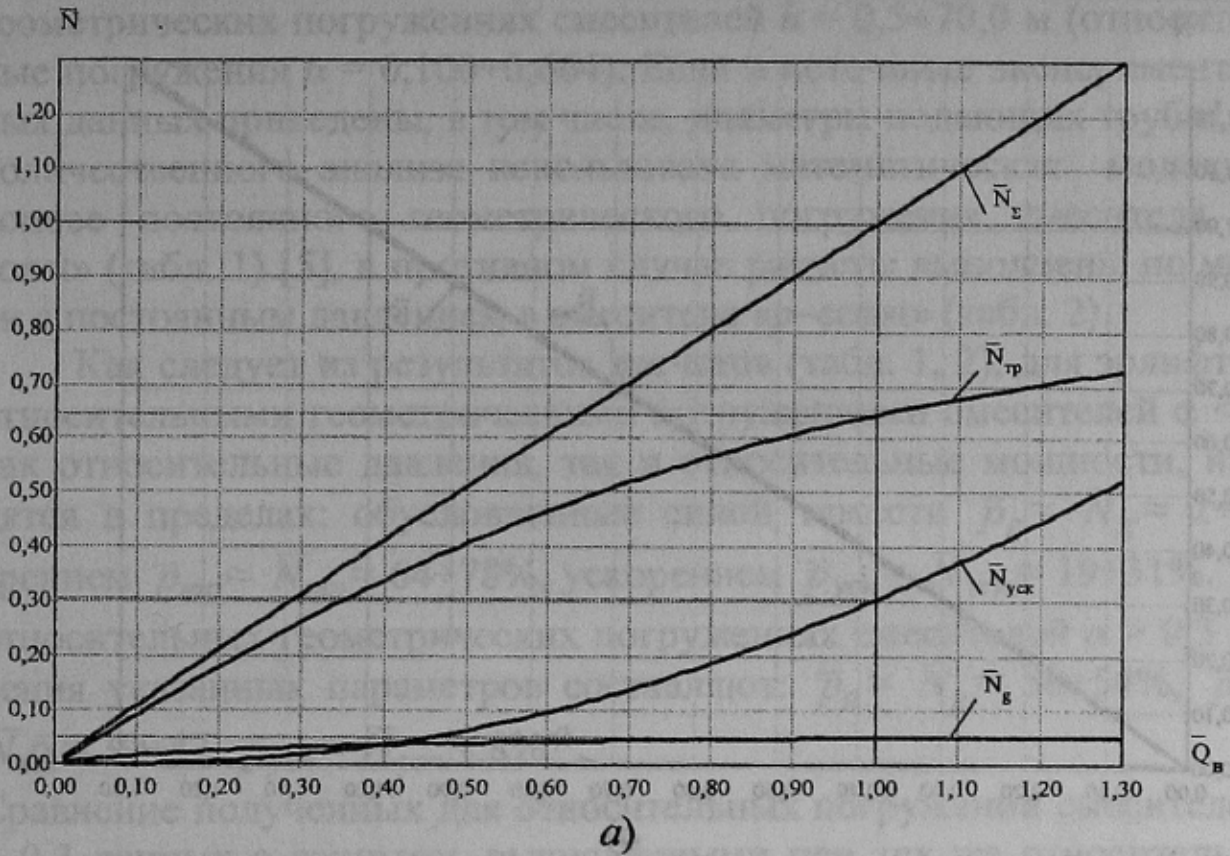


Рисунок 4 – Изменение расчетных относительных мощностей в подъемной трубе эрлифта $D = 353$ мм, $H+h = 11,7$ м, $h = 2,4$ м: а) - при определении λ_{CM} по выражению (4); б) – при $\lambda_{CM} = 0,026$ [базисные значения $Q_0 = 385,0$ м³/мин (6,42 м³/с), $N_\Sigma = 127,8$ кВт]

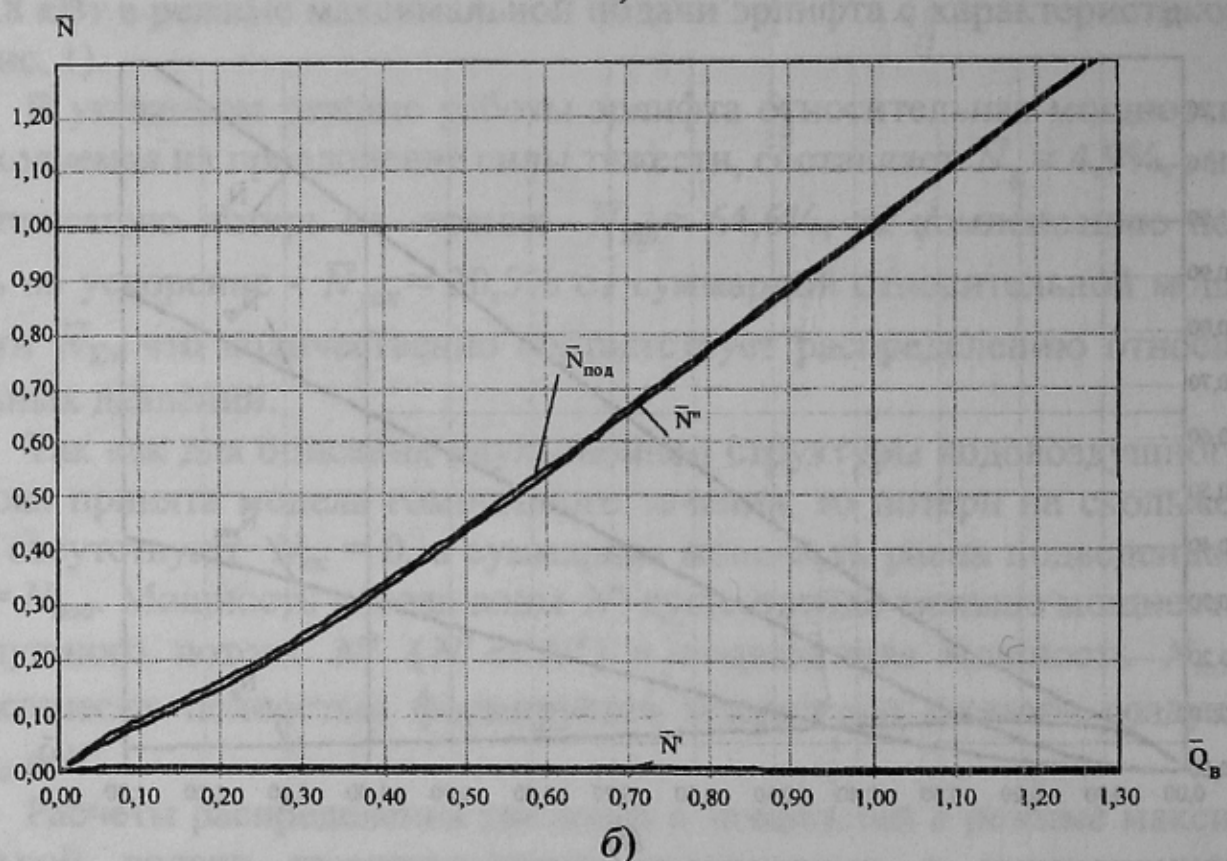
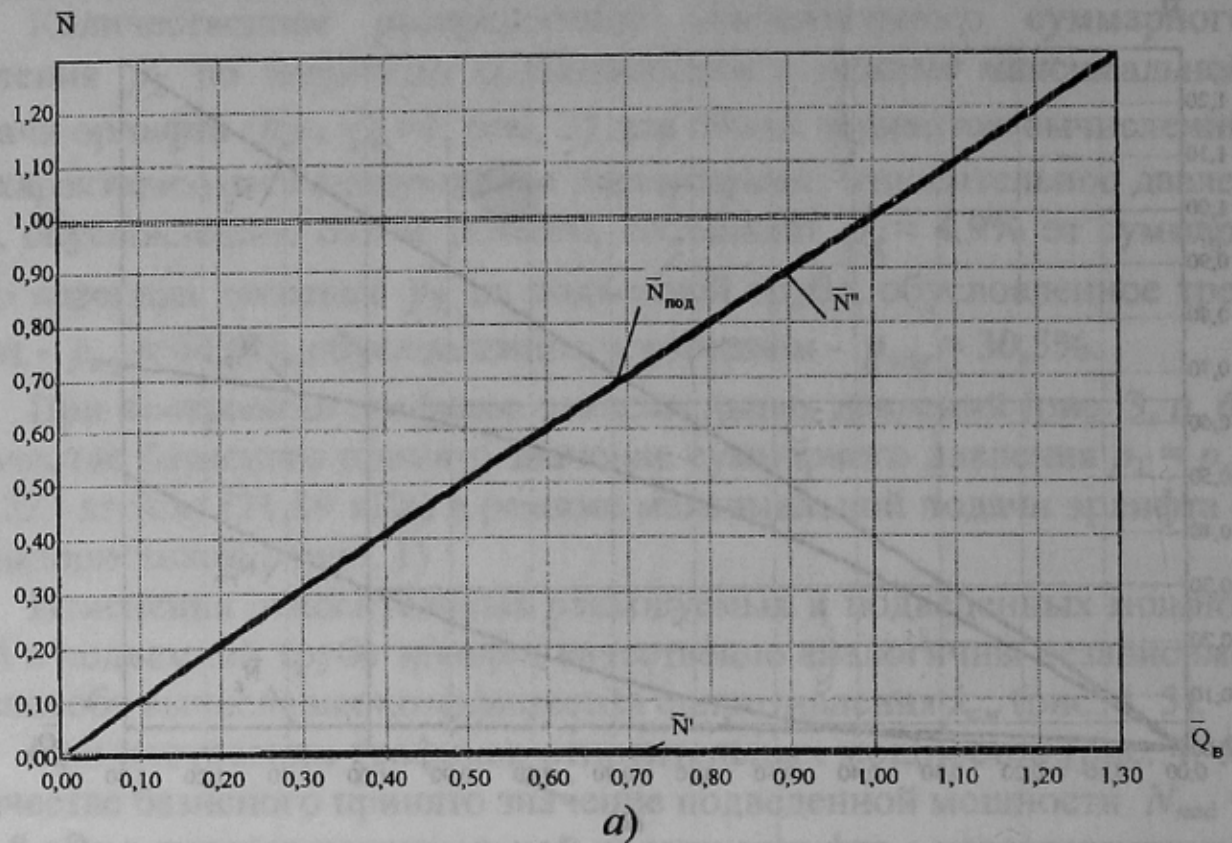


Рисунок 5 – Изменение расчетных относительных подведенных мощностей в подъемной трубе эрлифта $D = 353$ мм, $H+h = 11,7$ м, $h = 2,4$ м: а) - при определении λ_{CM} по выражению (4); б) – при $\lambda_{CM} = 0,026$ [базисные значения $Q_e = 385,0$ м³/мин (6,42 м³/с), $N_{\Sigma} = 127,8$ кВт]

геометрических погружениях смесителей $h = 0,5 \div 70,0$ м (относительные погружения $\alpha = 0,100 \div 0,664$). Если в источнике экспериментальных данных приведены, в том числе, диаметры подающих труб d , для количественного анализа использована математическая модель на основе постоянного геометрического погружения смесителя « h -const» (табл. 1) [5], в противном случае расчеты выполнены по модели с постоянным давлением в смесителе « p -const» (табл. 2).

Как следует из результатов расчетов (табл. 1, 2), для эрлифтов с относительными геометрическими погружениями смесителей $\alpha < 0,2$ как относительные давления, так и относительные мощности, находятся в пределах: обусловленные силой тяжести $\bar{p}_g \approx \bar{N}_g \approx 2 \div 6\%$, трением $\bar{p}_{тр} \approx \bar{N}_{тр} \approx 64 \div 78\%$, ускорением $\bar{p}_{уск} \approx \bar{N}_{уск} \approx 19 \div 31\%$. При относительных геометрических погружениях смесителей $\alpha > 0,3$ значения указанных параметров составляют: $\bar{p}_g \approx \bar{N}_g \approx 50 \div 54\%$, $\bar{p}_{тр} \approx \bar{N}_{тр} \approx 39 \div 47$, $\bar{p}_{уск} \approx \bar{N}_{уск} < 8\%$.

Сравнение полученных для относительных погружений смесителей $\alpha > 0,3$ данных с данными, вычисленными при тех же относительных погружениях α , для снарядной структуры потока [15], количественно подтверждает более высокую энергетическую эффективность эрлифта со снарядной структурой.

Так, при эмульсионной структуре затраты на преодоление гравитационных сил составляют $\bar{p}_g \approx \bar{N}_g \approx 50 \div 54\%$, а при снарядной структуре - $\bar{p}_g = 59 \div 80\%$, $\bar{N}_g = 15 \div 57\%$, соответственно затраты на преодоление сил трения при эмульсионной структуре $\bar{p}_{тр} \approx \bar{N}_{тр} \approx 39 \div 47$, при снарядной - $\bar{p}_{тр} = 25 \div 40\%$, $\bar{N}_{тр} = 6 \div 26\%$ и затраты на ускорение потока при эмульсионной структуре составляют $\bar{p}_{уск} \approx \bar{N}_{уск} < 8\%$, при снарядной - $\bar{p}_{уск} < 4\%$, $\bar{N}_{уск} < 3\%$. При этом потери на компенсацию затрат скольжения фаз при снарядной структуре равны $\bar{N}_{ск} = 17 \div 75\%$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Впервые для эрлифтов с подъемными трубами диаметрами $D = 50 \div 624$ мм получены количественные распределения давлений и мощностей эмульсионного водовоздушного потока в режиме максимальной подачи, составляющие при относительных геометрических погружениях смесителей $\alpha > 0,3$: обусловленные силой тяжести

Таблиця 1 - Значення гідродинамічних параметрів водовоздушної суміші в підйомній трубі в режимі максимальної подачі ерлифта при емульсійній структурі потоку (модель робочого процесу с постійним геометричним поглинанням сумішителя « h -const»)

Істочник експериментальних даних	Діаметр підйомної труби D , мм	Длина підйомної труби $H+h$, м	Діаметр подаючої труби d , мм	Длина подаючої труби l , м	Геометричне поглинання смішателя h , м	Относительное поглинання смішателя α	Расход воздуха $Q_{в. макс}$, м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э. макс}$, м ³ /ч	Перепад давления на подъемной трубе p_2 , кгс/см ²	Перепад давления, обусловленный:			Мощность, расходуемая на компенсацию:			Мощность подведенная:		
										силой тяжести p_g , кгс/см ²	трением $p_{тр}$, кгс/см ²	ускорением $p_{уск}$, кгс/см ²	силы тяжести N_g , кВт	потери на трение $N_{тр}$, кВт	потери на ускорение $N_{уск}$, кВт	потоком воды N' , кВт	воздушным потоком N'' , кВт	полная $N_{пол} = N'_2 + N''$, кВт
[6]	100	17,5	100	-	7,0	0,400	3,60	39,7	0,683	0,347	0,291	0,045	1,93	1,62	0,248	0,738	3,06	3,80
		17,5	100	-	9,1	0,520	3,40	50,7	0,881	0,461	0,358	0,062	2,47	1,92	0,334	1,22	3,51	4,73
[7]	140	4,95	100	-	0,7	0,141	74,0	13,4	0,068	0,002	0,048	0,018	0,252	5,68	2,06	0,025	7,97	8,00
[9]		5,0	50	-	0,5	0,100	78,0	7,13	0,042	0,002	0,032	0,008	0,174	4,07	0,995	0,008	5,23	5,24
[11]	150	20,2	100	-	6,62	0,328	7,20	60,0	0,623	0,314	0,284	0,025	3,38	3,07	0,272	1,02	5,70	6,72
		20,2	100	-	7,73	0,383	8,20	78,7	0,704	0,360	0,303	0,041	4,43	3,73	0,499	1,51	7,15	8,66
[12]	353	11,7	205	700	2,4	0,205	385,0	168,8	0,223	0,011	0,144	0,068	6,29	82,5	39,0	1,03	126,8	127,8
[5]	624	36,28	233	1200	4,68	0,129	1564,0	387,9	0,412	0,024	0,273	0,115	50,0	588,2	247,9	4,35	881,7	886,1

Таблица 2 - Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе в режиме максимальной подачи эрлифта при эмульсионной структуре потока (модель рабочего процесса с постоянным давлением в смесителе «p—const»)

Источник экспер-ых данных	Диаметр подъемной трубы D , мм	Длина подъемной трубы $H+h$, м	Геометрическое погружение смеси h , м	Относительное погружение смеси a	Расход воздуха $Q_{в. макс}$ м ³ /мин	Подача эрлифта $Q_{э. макс}$ м ³ /ч	Перепад давления на подъемной трубе $p_{\Sigma} = p_{см}$, кгс/см ²	Перепад давления, обусловленный:			Мощность, расходуемая на компенсацию:			Мощность подведенная:		
								силой тяжести p_g , кгс/см ²	трением $p_{мп}$, кгс/см ²	ускорением $p_{уск}$, кгс/см ²	силы тяжести N_g , кВт	потери на трение $N_{мп}$, кВт	потери на ускорение $N_{уск}$, кВт	потоком воды N' , кВт	воздушным потоком N'' , кВт	полная $N^{mod} = N_{\Sigma}$, кВт
[8]	50	14,0	5,5	0,393	0,462	5,02	0,508	0,260	0,238	0,010	0,195	0,178	0,007	0,070	0,310	0,380
[10]	143	4,44	2,95	0,664	3,20	74,4	0,266	0,136	0,121	0,009	0,905	0,807	0,061	0,539	1,23	1,77
		2,1	0,61	0,290	54,0	29,0	0,055	0,002	0,036	0,017	0,188	3,11	1,47	0,044	4,73	4,77
[6]	150	192,0	61,0	0,318	30,6	88,6	5,49	2,94	2,19	0,355	57,2	42,7	6,91	13,3	93,5	106,8
		176,0	56,0	0,318	30,0	91,1	5,04	2,67	2,02	0,353	53,3	40,4	7,05	12,5	88,2	100,7
		176,0	70,0	0,398	32,4	112,1	6,30	3,36	2,45	0,483	66,5	48,5	9,56	19,2	105,3	124,5

$\bar{p}_g \approx \bar{N}_g \approx 50 \div 54\%$, обусловленные трением $\bar{p}_{тр} \approx \bar{N}_{тр} \approx 39 \div 47$, обусловленные ускорением $\bar{p}_{уск} \approx \bar{N}_{уск} < 8\%$. Сравнительный анализ распределения давлений и мощностей водовоздушных потоков при имеющих место в подъемной трубе эрлифта снарядной, эмульсионной и кольцевой структурах течения позволит установить наиболее энергетически целесообразные режимы и разработать рекомендации по совершенствованию газожидкостных подъемников.

Список источников

1. Арманд А.А. Исследование механизма движения двухфазной смеси в вертикальной трубе. Сб.: Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления, Изд-во АН СССР, 1955. - с. 21-34.
2. Эрлифтные установки: Учебное пособие/ Гейер В.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Антонов Я.К. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
3. Папаяни Ф.А., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С., Кононенко А.П. Энциклопедия эрлифтов. М.: Информсвязиздат, 1995. – 592 с.
4. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с эмульсионной структурой водовоздушного потока. Наукові праці ДонНТУ. Серія: „Гірничо-електромеханічна”. Випуск 101. – Донецьк: ДонНТУ, 2005, с. 58-67.
5. Кононенко А.П. Энергетическая эффективность эрлифта. Научный журнал «Вестник Донецкого университета». Серия А, «Естественные науки». - Донецк: ДонНУ, №1, Часть 1, 2006, с. 205-212.
6. Костанда В.С. Исследование и разработка эрлифтных и углесосно-эрлифтных подъемов гидрошахт. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1963: т.1 – 209 с., т.2 – 140 с.
7. Козыряцкий Л.Н. Исследование и разработка уточненного расчета эрлифтных установок горной промышленности. Дисс. ... канд. техн. наук, - Донецк: ДПИ, 1976. – 197 с.
8. Стегниенко А.П. Исследование и разработка методов управления режимами работы шахтных эрлифтов. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1978. – 242 с.
9. Данилов Е.И. Исследование и разработка эрлифта для гидромеханизированной очистки водоотливных емкостей. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1979. – 298 с.
10. Триллер Е.А. Разработка схем и средств транспорта горной массы из подземных технологических емкостей. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1983. – 232 с.
11. Миргородский В.Г. Исследование и разработка выходного узла эрлифтной гидроподъемной установки. Дисс. ... канд. техн. наук, Донецк: ДПИ, 1970. – 203 с.
12. Кононенко А.П. Ограничения в подаче эрлифта. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Збірник наукових праць: «Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва», Випуск 2005-7(55). - Макіївка, 2005, с.71-81.
13. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов. Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки, №12, 2005, с. 38-48.
14. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. – 440 с.
15. Кононенко А.П. Тиски та потужності снарядного водоповітряного потоку в піднімальній трубі ерліфта. Науковий журнал «Вісник ДонДУЕТ». Серія "Технічні науки", №1(29). - Донецьк: ДонДУЕТ, 2006, с. 20-30.

Дата поступления статьи в редакцию: 01.11.06