

УДК 658.26:622.276.5

А.П. Кононенко, д-р техн. наук, доц.,
М.Ю. Карпушин, асп.,
Донецкий национальный технический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПОДВОДА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРИТОКА ЖИДКОСТИ (ГИДРОСМЕСИ) В ПРОМЕЖУТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЫ ЭРЛИФТА

Приведено экспериментальное подтверждение аналитических результатов решения математической модели рабочего процесса эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы как более энергоэффективного, в сравнении с газожидкостным подъемником традиционной схемы, в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси).

математическая модель, эрлифт, подъемная труба, энергетическая эффективность, переменный приток

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Основной недостаток эрлифта – высокая энергоемкость рабочего процесса – особенно остро ощущается при работе подъемника в условиях резкопеременных притоков жидкости (гидросмеси). При значительных изменениях (диапазоне) количеств транспортируемой газожидкостным подъемником жидкости (с включением твердых частиц) работа эрлифта на максимальных и близких к ним притоках сопровождается увеличенными гидравлическими потерями в подающей трубе и ощутимым снижением КПД.

Разработанная эрлифтная установка с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы устраняет указанный недостаток, а решение математической модели рабочего процесса данного эрлифта [1] позволяет установить количественную значимость повышения энергоэффективности его работы. Однако подтверждением результатов аналитических расчетов могут явиться только экспериментальные данные, особенно те, которые получены на промышленных установках.

Поэтому экспериментальное обоснование энергетической целесообразности использования эрлифтных установок с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы в условиях резкопеременных притоков жидкости (с включением твер-

дого материала) является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

Анализ исследований и публикаций. В эрлифтной установке с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы (рис. 1) [1] базовый приток Q_{np1} подается в эрлифт через подающую трубу 5, а дополнительный приток Q_{np2} - через дополнительный подводный трубопровод 3. Если $Q_{np2} = 0$, то подача

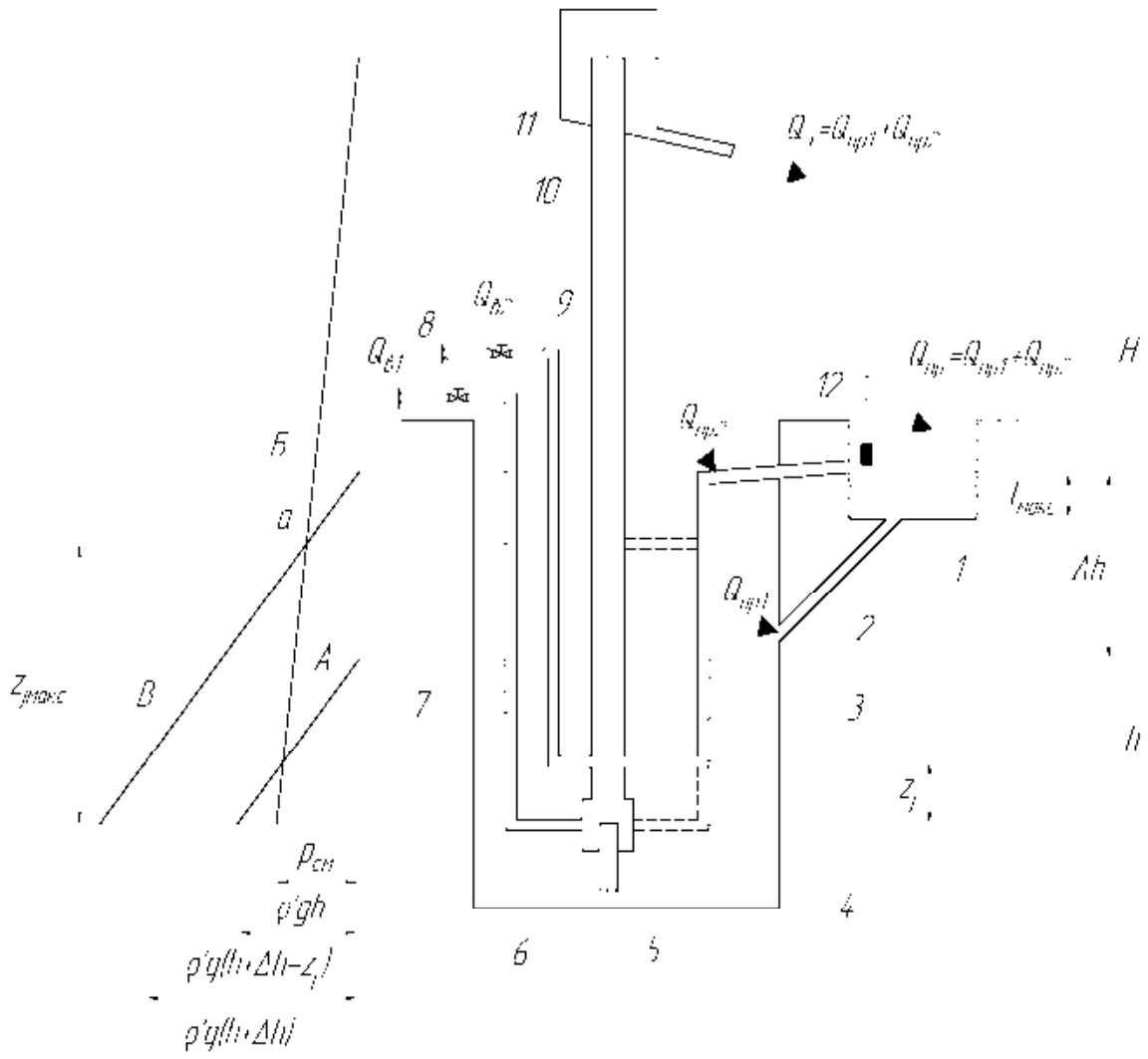


Рисунок 1 - Схема эрлифтной установки с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы: 1 - приемная емкость; 2 - основной подводный трубопровод; 3 - дополнительный подводный трубопровод; 4 - зумпф; 5 - подающая труба; 6 - смеситель; 7 - основной воздухопровод; 8 - задвижки; 9 - дополнительный воздухопровод; 10 - подъемная труба; 11 - воздухоотделитель; 12 - запорное устройство; А - эюра давления жидкости (гидросмеси) в зумпфе 4; В - эюра давления газожидкостной смеси (аэрогидросмеси) в подъемной трубе 10; В - эюра давления жидкости (гидросмеси) в дополнительном подводном трубопроводе 3

эрлифта составляет $Q_э = Q_{np1}$ и потребный расход воздуха $Q_{в1}$ подается в смеситель 6 через основной воздухопровод 7. Если приток жидкости (гидросмеси) увеличивается и подача эрлифта составляет величину $Q_э = Q_{np1} + Q_{np2}$, расход воздуха может быть увеличен до значения $Q_в = Q_{в1} + Q_{в2}$ с подводом дополнительного количества сжатого воздуха $Q_{в2}$ через дополнительный воздухопровод 9. Также увеличение расхода воздуха в эрлифт возможно за счет обеспечения подвода его большего количества через основной воздухопровод 7 при закрытой задвижке 8 на дополнительном воздухопроводе 9. Выбор варианта воздухообеспечения эрлифта определяется по критерию минимальной энергоемкости газожидкостного подъемника.

Вертикальная координата z_j промежуточного сечения подъемной трубы 10, где возможно осуществление подвода дополнительного притока Q_{np2} , не может превышать уровня точки a (точки пересечения эпюр B и B'), то есть величины $z_{j\max}$.

Разработана методика определения гидравлических потерь в подающей трубе эрлифта [2], что позволяет, в том числе, на основе решения математической модели рабочего процесса газожидкостного подъемника [1] выполнить сравнительный анализ энергоэффективности работы эрлифтных установок традиционной и предлагаемой схем.

Доказать достоверность результатов теоретических исследований целесообразно экспериментальным путем с использованием данных испытаний промышленной эрлифтной установки системы гидрозолошлакоудаления Экибастузской ГРЭС-1 [2].

Постановка задачи. Необходимо выполнить экспериментальное обоснование энергетической целесообразности и ее количественной значимости подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы газожидкостного подъемника.

Изложение материала и результаты. Основой математической модели рабочего процесса эрлифта, разработанного для использования в условиях резкопеременных притоков жидкости (гидросмеси), является уравнение стационарного восходящего движения двухкомпонентной водовоздушной смеси в вертикальной подъемной трубе с учетом дополнительных количеств жидкости (гидросмеси) и воздуха, подводимых в ее промежуточное сечение [1]

$$\begin{aligned}
 & -\frac{dp(z)}{dz} = \\
 & = \frac{4\tau_w(z)}{D} + \frac{d}{dz} \{G''(z) \cdot w'(z) \cdot \varphi(z) + G'(z) \cdot w'(z) \cdot [1 - \varphi(z)]\} + \rho_{см}(z) \cdot g,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где z – расстояние от смесителя до рассматриваемого сечения подъемной трубы; $p(z)$ – давление газожидкостной смеси; τ_w – касательное напряжение на стенке подъемной трубы; D – диаметр подъемной трубы; $G'(z)$ и $G''(z)$ – массовые скорости жидкой и газообразной фаз соответственно; $w'(z)$ – истинная скорость воды; $w''(z)$ – истинная скорость воздуха; $\varphi(z)$ – истинное газосодержание водовоздушной смеси; $\rho_{см}(z)$ – плотность газожидкостной смеси; g – ускорение свободного падения.

Подача эрлифта [расход жидкости (гидросмеси)]

$$Q_э(z) = \begin{cases} Q_{np1}, & \text{при } 0 \leq z \leq z_j; \\ Q_{np1} + Q_{np2}, & \text{при } z_j < z \leq H + h, \end{cases} \tag{2}$$

где H – высота подъема эрлифта;

h – геометрическое погружение смесителя.

Расход воздуха при нормальных (технических) условиях и подводе его дополнительного количества $Q_{э2}$ через дополнительный воздухопровод в промежуточное сечение подъемной трубы z_j

$$Q_э(z) = \begin{cases} Q_{э1}, & \text{при } 0 \leq z \leq z_j; \\ Q_{э1} + Q_{э2}, & \text{при } z_j < z \leq H + h. \end{cases} \tag{3}$$

Сравнительный аналитический анализ энергетической эффективности работы эрлифтной установки с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы выполнен на примере газожидкостного подъемника с диаметрами подъемной трубы $D = 300$ мм, подающей трубы $d = 120$ мм, длиной подъемной трубы $H+h = 30$ м, геометрическим погружением смесителя $h = 8$ м, превышением уровня жидкости в приемной емкости над уровнем жидкости в зумпфе (рис. 1) $\Delta h = 2$ м, максимально возможной координатой подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы $z_{j\max} = 3,14$ м.

Графическая зависимость безразмерной подачи эрлифта от безразмерной суммарной мощности потока воздуха $\bar{N}_{\Sigma} = \bar{N}_{\Sigma 1} + \bar{N}_{\Sigma 2}$ ($\bar{N}_{\Sigma 1}$ - безразмерная мощность основного потока воздуха $Q_{\Sigma 1}$; $\bar{N}_{\Sigma 2}$ - безразмерная мощность дополнительного расхода воздуха $Q_{\Sigma 2}$) $\bar{Q}_3 = f(\bar{N}_{\Sigma})$ (рис. 2) подтверждает энергоэффективность разработанной эрлифтной установки при работе в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси). Так, при значении безразмерной суммарной мощности потока воздуха, равном $\bar{N}_{\Sigma} = 2$ (рис. 2), подача эрлифта предлагаемой схемы на 11% превышает подачу эрлифта традиционной схемы.

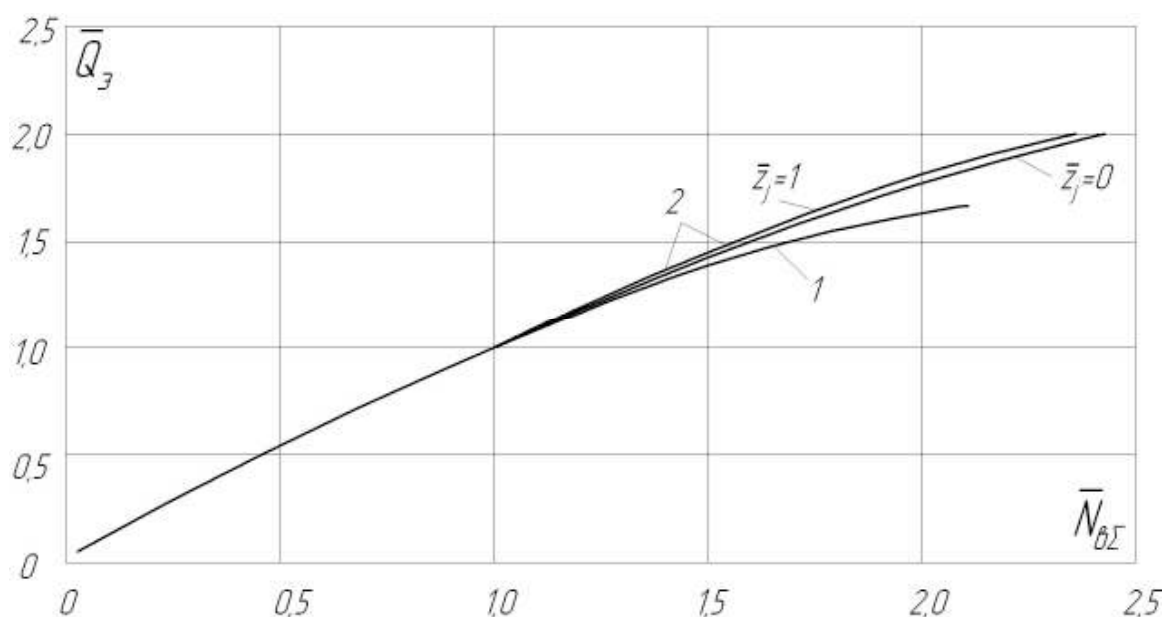


Рисунок 2 - Зависимость безразмерной подачи эрлифта от безразмерной суммарной мощности потока воздуха $\bar{Q}_3 = f(\bar{N}_{\Sigma})$ для эрлифта традиционной 1 и предлагаемой 2 схем (базисные значения $z_j = z_{j\max} = 3,14$ м; $Q_3 = 0,0222$ м³/с; $N_{\Sigma} = 15,4$ кВт;)

Для выше приведенных данных безразмерная расходная характеристика эрлифта традиционной конструкции (без подвода дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы) в виде зависимости $\bar{Q}_3 = f(\bar{Q}_6)$ имеет вид кривой 1 (рис. 3). При этом безразмерная зависимость давления в смесителе от расхода воздуха $\bar{p}_{см} = f(\bar{Q}_6)$ представляется кривой 2 и свидетельствует об уменьшении этого давления с увеличением подачи эрлифта из-за увеличивающихся гидравлических потерь в подающей трубе.

Увеличение гидравлических потерь в подающей трубе приводит к снижению энергоэффективности эрлифта и, следовательно, к снижению его подачи. Если при увеличении притока гидросмеси сверх величины, которая соответствует подаче эрлифта в оптимальном режиме $\bar{Q}_{э.опт1} = \bar{Q}_{np1}$ (рис. 3), дополнительный приток Q_{np2} подводить в промежуточное сечение подъемной трубы, то безразмерная расходная характеристика такого эрлифта будет соответствовать кривой 3. Данная характеристика получена для значения $z_j = 0$.

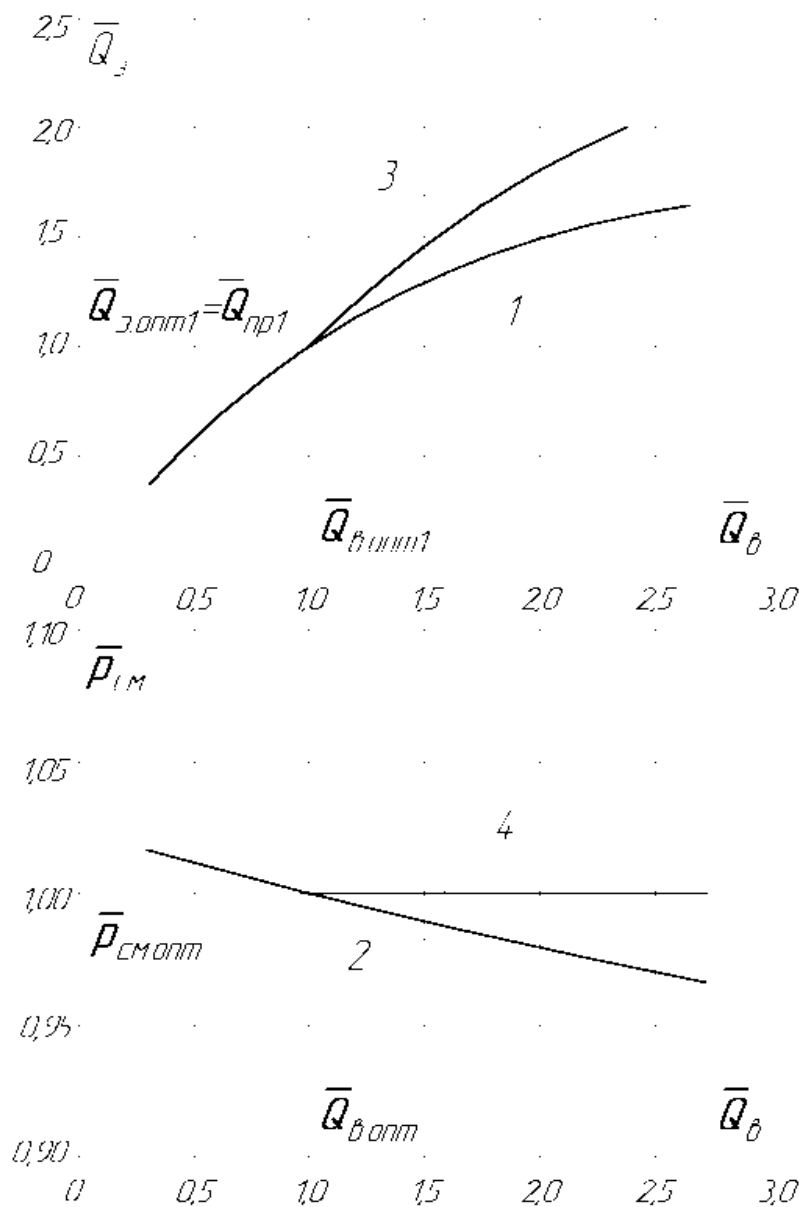


Рисунок 3 - Безразмерные характеристики эрлифтов $\bar{Q}_s = f(\bar{Q}_6)$ и $\bar{p}_{cm} = f(\bar{Q}_6)$: 1, 2 - традиционной схемы; 3, 4 - предлагаемой схемы (базисные значения $Q_s = 0,0222 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_6 = 0,273 \text{ м}^3/\text{с}$; $p_{cm} = 73,6 \text{ кПа}$)

В рассматриваемом случае увеличение подачи эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы обеспечивается за счет снижения потерь в подающей трубе и обеспечения постоянного давления в смесителе $p_{см} = p_{см.онт}$ при расходе воздуха $Q_v > Q_{v.онт1}$ (кривая 4, рис. 3).

Для экспериментального обоснования энергетической целесообразности подвода дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы газожидкостного подъемника использованы результаты исследований натурной промышленной эрлифтной установки системы гидрозолошлакоудаления (ГЗУ) энергоблока №8 мощностью 500 МВт Экибастузской ГРЭС-1 [2]. Эксперименты проведены на эрлифте 8Б с эквивалентным диаметром подъемной трубы $D_э = 0,624$ м.

Экспериментальные характеристики эрлифта получены при значениях геометрического погружения смесителя $h = 3,72; 4,68; 5,66; 6,64; 7,61; 8,59; 9,58$ м, что соответствует относительным погружениям $\alpha = 0,103; 0,129; 0,156; 0,183; 0,210; 0,237; 0,264$ (рис. 4). В качестве примера на расходной характеристике при $h = 9,58$ м ($\alpha = 0,264$) (рис. 4, кривые 7) обозначены оптимальный режим эрлифта (как точка соприкосновения касательной и расходной характеристики) $Q_{v.онт} = 220,5$ м³/мин (3,68 м³/с), $Q_{э.онт} = 702,7$ м³/ч (0,195 м³/с), $p_{см.онт} = 0,828$ кг/см² (81,2 кПа) и достигнутый в условиях эксперимента режим максимальной подачи $Q_{v.макс} = 309,1$ м³/мин (5,15 м³/с), $Q_{э.макс} = 896,0$ м³/ч (0,249 м³/с), $p_{см.макс} = 0,757$ кг/см² (74,3 кПа).

Как следует из характеристик $p_{см} = f(Q_v)$ (рис. 4), с увеличением подачи эрлифта $Q_э$ давление в смесителе $p_{см}$ снижается из-за гидравлических потерь в подающей трубе при неизменном гидростатическом давлении геометрического погружения смесителя $p_{нс} - const$, т.е. неизменном значении геометрического погружения смесителя $h - const$. Это приводит к уменьшению подачи эрлифта $Q_э$ в сравнении с потенциально большим ее значением, которое имело бы место в случае возможного сохранения давления в смесителе $p_{см}$ на уровне значения гидростатического давления геометрического погружения смесителя $p_{нс}$, то есть в случае предельно возможной минимизации гидравлических потерь в подающей трубе.

Полученное семейство экспериментальных характеристик газожидкостного подъемника позволило построить сравнительный график расходных характеристик эрлифта, одна из которых приведена при постоянном геометрическом погружении смесителя $h = 7,61$ м -

const (рис. 5, кривая 1), а вторая – при постоянном давлении в смесителе $p_{см} = 0,761 \text{ кг/см}^2$ (74,6 кПа) - *const* (рис. 5, кривая 2). Кривая 1 построена по экспериментальным точкам, а кривая 2 – по точкам, полученным из семейства расходных характеристик в диапазоне $h = 3,72 \div 9,58 \text{ м}$ (рис. 3) при $p_{см} = 0,761 \text{ кг/см}^2$ (74,6 кПа).

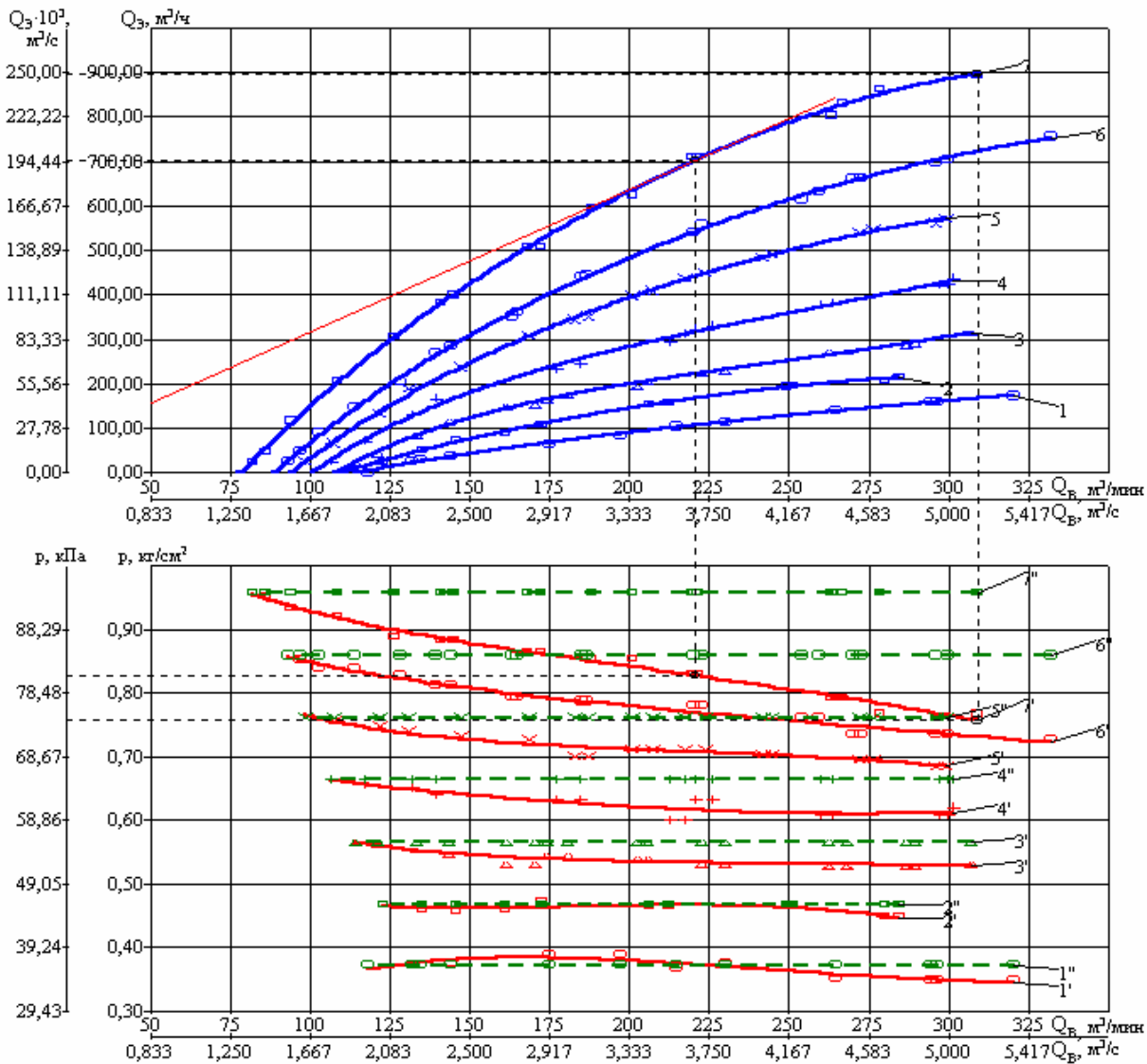


Рисунок 4 - Характеристики эрлифта $D = 624 \text{ мм}$, $d = 233 \text{ мм}$, $H+h = 36,28 \text{ м}$: 1 – $h = 3,72 \text{ м}$; 2 – $h = 4,68 \text{ м}$; 3 – $h = 5,66 \text{ м}$; 4 – $h = 6,64 \text{ м}$; 5 – $h = 7,61 \text{ м}$; 6 – $h = 8,59 \text{ м}$; 7 – $h = 9,58 \text{ м}$ [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – $Q_э = f(Q_э)$; 1', 2', 3', 4', 5', 6', 7' – $p_{см} = f(Q_э)$; 1'', 2'', 3'', 4'', 5'', 6'', 7'' – $p_{nc} = f(Q_э)$]

Как видно из сравниваемых расходных характеристик 1 и 2 (рис. 5), при практически равноценных подачах при $Q_э < 200 \text{ м}^3/\text{мин}$, подача эрлифта с $p_{см} = 0,761 \text{ кг/см}^2$ (74,6 кПа) - *const* существенно больше подачи эрлифта с $h = 7,61 \text{ м}$ - *const* в диапазоне расходов воздуха $Q_э > 200 \text{ м}^3/\text{мин}$. Так, при расходе воздуха $Q_э = 250 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($4,17 \text{ м}^3/\text{с}$) подача эрлифта, работающего с постоянным давлением в смесителе

$p_{см} = 0,761 \text{ кг/см}^2$ (74,6 кПа) - *const* превышает подачу эрлифта, работающего с постоянным геометрическим погружением смесителя $h = 7,61 \text{ м}$ – *const*, на 26%, а при $Q_в = 300 \text{ м}^3/\text{мин}$ ($5,0 \text{ м}^3/\text{с}$) – на 52%. При этом кривой 2" (рис. 5) показано потребное изменение гидростатического давления геометрического погружения смесителя $p_{nc} = f(Q_в)$ для обеспечения постоянного давления в смесителе $p_{см} = 0,761 \text{ кг/см}^2$ (74,6 кПа) - *const* в рассматриваемом диапазоне расходов воздуха $Q_в$.

Учитывая, что постоянное давление в смесителе $p_{см}$ - *const* в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) имеет место при работе эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы, приведенные экспериментальные данные (рис. 4, 5) являются подтверждением энергоэффективности разработанного газожидкостного подъемника.

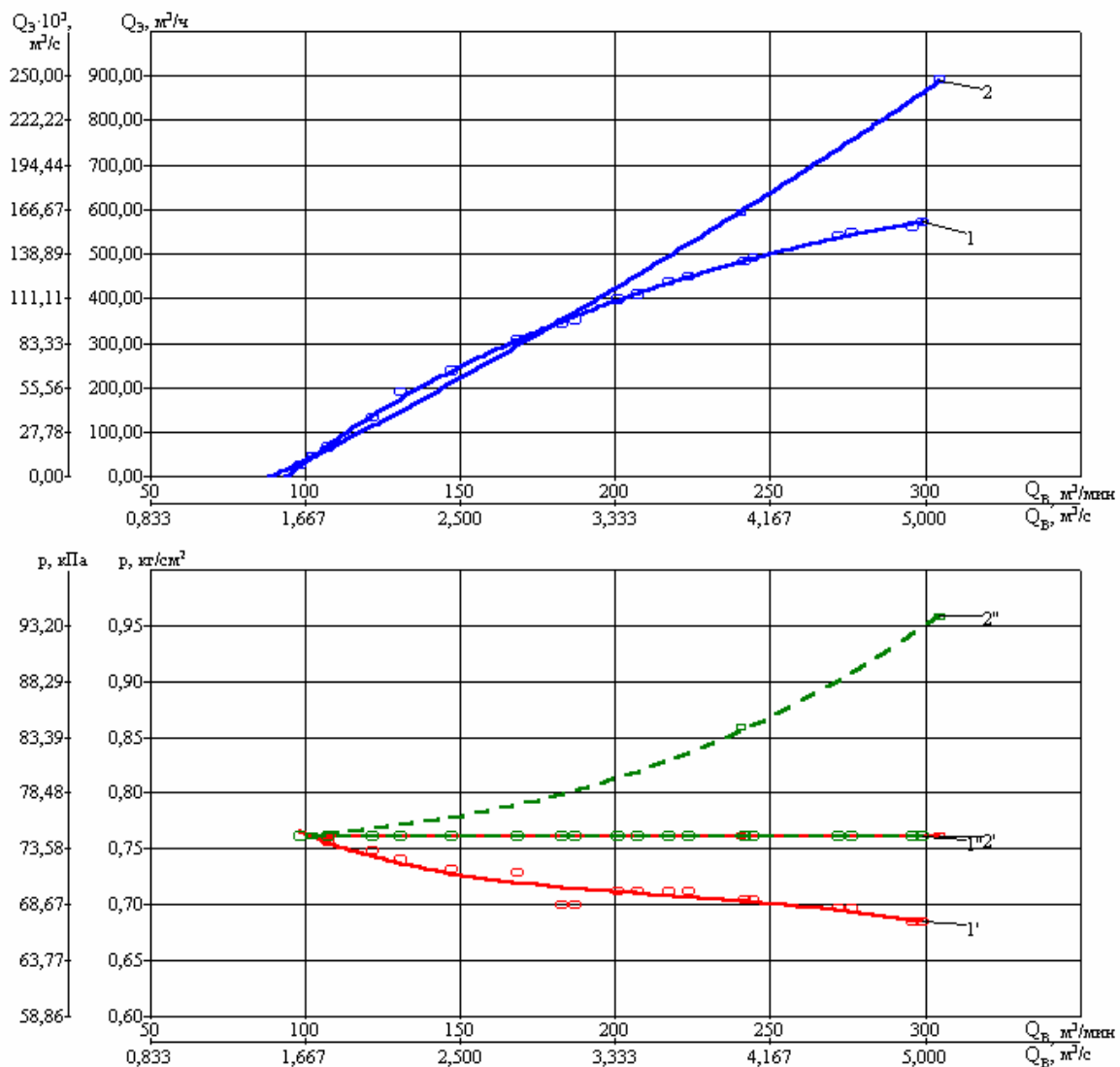


Рисунок 5 - Характеристики эрлифтов $D = 624 \text{ мм}$, $d = 233 \text{ мм}$, $H+h = 36,28 \text{ м}$: 1 – $h = 7,61 \text{ м}$; 2 – $p_{см} = 0,761 \text{ кг/см}^2$ [1, 2– $Q_з = f(Q_в)$; 1', 2' - $p_{см} = f(Q_в)$; 1'', 2'' - $p_{nc} = f(Q_в)$]

Выводы и направление дальнейших исследований. Повышение энергетической эффективности работы эрлифта с подводом дополнительного притока в промежуточное сечение подъемной трубы в условиях резкопеременных притоков жидкости (гидросмеси) преимущественно обеспечивается снижением гидравлических потерь в подающей трубе. На основе результатов промышленных испытаний эрлифтной установки системы гидрозолошлакоудаления Экибастузской ГРЭС-1 приведено экспериментальное подтверждение количественной значимости увеличения энергоэффективности разработанного эрлифта. Полученные данные являются основой экономии энергоресурсов при работе эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси).

Список литературы

1. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта в условиях переменных притоков жидкости (гидросмеси) / А.П.Кононенко, М.Ю.Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». - 2008. – Вип. 16(142). - С. 149-158.
2. Кононенко А.П. Энергетическая эффективность эрлифта / А.П. Кононенко // Вісник Донецького університету. Серія: А, «Природничі науки». – 2006. - №1, Ч. 1. - С. 205-212.

А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин. *Експериментальне обґрунтування енергетичної доцільності підведення додаткового припливу рідини (гідросуміші) у проміжний перетин підйомної труби ерлифта. Приведено експериментальне підтвердження аналітичних результатів розв'язку математичної моделі робочого процесу ерлифта з підведенням додаткового припливу в проміжний перетин підйомної труби як більш енергоефективного, у порівнянні з газорідинним підйомником традиційної схеми, в умовах змінних припливів рідини (гідросуміші).*

математична модель, ерліфт, підйомна труба, енергетична ефективність, змінний приплив

A. Kononenko, M. Karpushin. *Experimental Basis of Energy Feasibility of Underwater Additional Inflow of Liquid (Slurry) in the Intermediate Cross Section of the Riser Pipe Airlift. The paper presents an experimental confirmation of the analytical results of solving the mathematical model of the airlift workflow to supply additional flow to the intermediate section of the riser pipe as being more energy efficient compared to the traditional gas-liquid lift, with variable inflow of liquid (slurry).*

mathematical model, air-lift, an elevating pipe, power efficiency, variable inflow

Стаття надійшла до редколегії 22.10.2010

Рецензент: зав. каф. ЕМС ДонНТУ, д-р техн. наук, проф. М.Г.Бойко

© Кононенко А.П., Карпушин М.Ю., 2010