

УДК 622.276.5:556

А.П. Кононенко, д-р техн. наук

ГВУЗ “Донецкий национальный технический университет”, Донецк, Украина

В.В. Калининченко

Красноармейский индустриальный институт

ГВУЗ “Донецкий национальный технический университет”, Красноармейск, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОЙ ПОДАЧИ СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭРЛИФТА

## EXPERIMENTAL GROUND OF INFLUENCE OF DISCRETE SERVE OF THE COMPRESSED AIR ON POWER-HUNGRYNESS OPERATING PROCESS OF THE AIRLIFT

*Приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований работы эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель, обосновывающих повышение эффективности лифтирования жидкостей газожидкостными подъемниками с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси в подъемной трубе в сравнении с развивающейся. Развивающаяся снарядная структура в сравнении с развитой характеризуется уменьшением длин жидкостных пробок и увеличением длин газовых снарядов с повышением их относительной скорости, что при работе эрлифта приводит к снижению подачи, уменьшению истинного газосодержания, увеличению потерь на скольжение фаз и, в общем итоге, снижению энергоэффективности работы гидроаппарата. Для эрлифта с подъемной трубой диаметром 57 мм и длиной 2,57 м, геометрическим погружением смесителя 0,93 м дискретная подача воздуха регулирующим клапаном с режимом работы  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,54/2,5$  обеспечивает увеличение подачи в 1,21–1,22 раза в сравнении с традиционной работой газожидкостного подъемника.*

*Ключевые слова: эрлифт, подъемная труба, снарядная структура водовоздушного потока, дискретная подача сжатого воздуха, энергоэффективность, газовый снаряд, жидкостная пробка.*

### Проблема и ее связь с научными и практическими задачами

Одними из наиболее энергоэффективных являются режимы работы эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушной смеси в подъемной трубе. Для большинства промышленно эксплуатируемых газожидкостных подъемников, в которых обеспечивается работа со снарядной структурой водовоздушной смеси, последняя классифицируется как развивающаяся. Для такой структуры газожидкостного потока характерно восходящее движение хотя и все еще визуально различимых газовых снарядов и жидкостных пробок, но уже теряющих строгую геометрическую форму с возможностью взаимного слияния и деления.

Развивающаяся снарядная структура в сравнении с развитой характеризуется уменьшением длин жидкостных пробок и увеличением длин газовых снарядов с повышением их относительной скорости, что при работе эрлифта приводит к снижению подачи, уменьшению истинного газосодержания, увеличению потерь на скольжение фаз и, в общем итоге, снижению энергоэффективности работы гидроаппарата.

Поэтому экспериментальное обоснование возможности приближения развивающейся снарядной структуры к развитой дискретной подачей сжатого воздуха в

смеситель подъемника и подтверждение аналитических выводов о повышении при этом энергетической эффективности работы эрлифта является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

### Анализ исследований и публикаций

Результаты анализа гидродинамических особенностей и параметров восходящих вертикальных снарядных газожидкостных потоков обоснованно позволяют разделить последние на развитые и развивающиеся [1–5]. Одним из отличительных признаков развитой снарядной двухфазной смеси в сравнении с развивающейся является большая длина жидкостных пробок, что применительно к эрлифту обеспечивает повышение их подачи и энергетической эффективности работы в целом [6–8]. Теоретическим подтверждением этого являются результаты решения математических моделей рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока [9–11].

Возможным способом приближения развивающейся снарядной структуры к развитой может быть дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта [12–14], что однозначно требует экспериментального подтверждения и аналитического обоснования.

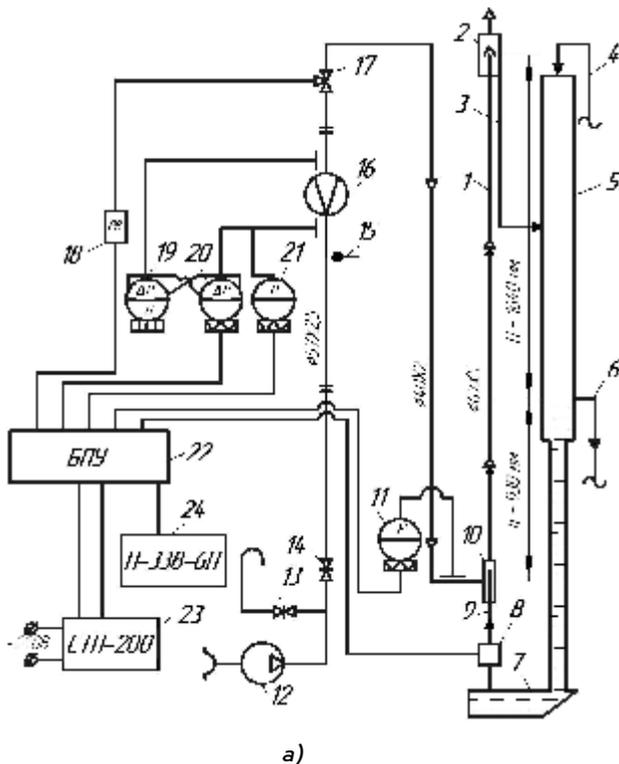


Рисунок 1 Схема а) и фото б) экспериментальной эрлифтной установки: 1 — подъемная труба; 2 — воздухоотделитель; 3, 4, 6 — трубопроводы соответственно отводящий, подпитки и переливной; 5 — вертикальная емкость; 7 — буферная емкость; 8 — расходомер; 9 — подающая труба; 10 — смеситель; 11, 21 — датчики давления; 12 — воздушный нагнетатель; 13, 14 — вентили; 15 — ртутный термометр; 16 — измерительная диафрагма; 17 — запорно-регулирующий клапан с электромагнитным приводом; 18 — реле времени; 19 — водяной дифференциальный манометр; 20 — датчик перепада давлений; 22 — блок питания и управления; 23 — стабилизатор напряжения; 24 — самописец

### Постановка задачи

Экспериментально доказать возможность приближения характеристик развивающейся снарядной структуры восходящего вертикального газожидкостного потока к характеристикам развитой структуры дискретной подачи сжатого воздуха в смеситель подъемника и подтвердить аналитические выводы о повышении энергетической эффективности работы эрлифта с развитой снарядной структурой двухфазной смеси в подъемной трубе в сравнении с развивающейся.

### Изложение материала и результаты

Для экспериментального подтверждения возможности приближения развивающейся снарядной структуры газожидкостного потока к развитой дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель подъемника и оценки энергоэффективности такого способа работы эрлифта в сравнении с энергоэффективностью традиционного способа работы с непрерывной подачей воздуха в лаборатории кафедры энергомеханики и автоматики Красноармейского индустриального института ДонНТУ была построена экспериментальная эрлифтная установка с подъемной трубой диаметром  $D = 57$  мм и длиной  $H+h = 2,57$  м ( $H$  — высота подъема), геометрическим погружением смесителя  $h = 0,93$  м и относительным погружением сме-

сителя  $\alpha = 0,362$  (рисунок 1). Подъемная и подающая трубы были изготовлены из прозрачного органического стекла, что позволяло визуально контролировать структуру водовоздушного потока в подъемной трубе и особенности течения жидкости в подающей трубе

На воздухопроводе диаметром  $40 \times 2$  мм был смонтирован измерительный узел для измерения расхода сжатого воздуха, состоящий из металлической трубы диаметром  $57 \times 2,5$  мм длиной 2,0 м и измерительной диафрагмы с угловым способом отбора перепада давления. После измерительного узла на воздухопроводе был установлен запорно-регулирующий клапан с электромагнитным приводом. Нормальное положение регулирующего клапана закрытое. Открытие его осуществлялось с помощью электромагнита, который управлялся реле времени. Подача эрлифта измерялась расходомером электротурбогенератором.

Сигналы с датчиков (перепада) давления и расходомера из блока БПУ (блок питания и управления) поступали на самописец Н-338-6П, на лентах которого регистрировались их показания. Питание системы измерения выполнялось через стабилизатор напряжения СТН-200.

Методика проведения экспериментальных исследований как традиционной работы эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м,  $\alpha = 0,362$ , так и работы этого эр-

лифта при дискретной подаче сжатого воздуха соответствовала общеизвестным требованиям [15].

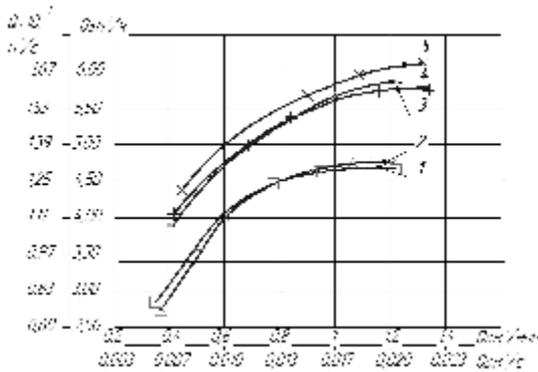


Рисунок 2 — Экспериментальные расходные характеристики  $Q_z = f(Q_v)$  эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м,  $\alpha = 0,362$  при: 1 — традиционной работе эрлифта; 2-5 — дискретной подаче сжатого воздуха с периодичностью  $t_{откр}/t_{закр}$ : 2 — 1/1; 3 — 1/1,5; 4 — 1/2; 5 — 1/2,5

На рисунке 2 показано, что в процессе эксперимента получены расходные характеристики эрлифта в виде зависимости подачи от расхода воздуха  $Q_z = f(Q_v)$ , зависимости изменения давления в смесителе  $p_{см} = f(Q_v)$  и гидростатического давления геометрического погружения смесителя  $p_{п.с} = f(Q_v)$  при непрерывной (традиционно работающий эрлифт) и дискретной подаче сжатого воздуха.

Дискретная подача сжатого воздуха в смеситель эрлифта обеспечивалась при помощи запорно-регулирующего клапана с электромагнитным приводом и реле времени (рисунок 1). Характеристики эрлифта, при прочих равных условиях, получены при четырех соотношениях периодов времени, характеризующих положение запорно-регулирующего элемента клапана:  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1$ ,  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5$ ,  $t_{откр}/t_{закр} = 1/2$ ,  $t_{откр}/t_{закр} = 1/2,5$  ( $t_{откр}$  — период времени, в течение которого запорно-регулирующий элемент клапана открыт,  $t_{закр}$  — период времени, в течение которого запорно-регулирующий элемент клапана закрыт,  $c$ ). Для других соотношений периодов времени  $t_{откр}/t_{закр}$ , задаваемых во время экспериментальных исследований работы эрлифта, положительных результатов получено не было — либо режимы работы эрлифта не отличались от традиционных режимов, либо работа эрлифта становилась неустойчивой, вплоть до срыва подачи и прекращения его работы.

Визуальное наблюдение за водовоздушным потоком в прозрачной подъемной трубе эрлифта дает основание утверждать, что на всех экспериментально исследованных режимах при традиционной работе подъемника структура водовоздушной смеси относится к снарядной развивающейся. При дискретной подаче сжатого воздуха газожидкостный поток становится более упорядоченным с внешними признаками развитой снарядной структуры. При этом, согласно визуальных наблюдений с замерами, дискретная подача сжатого воздуха с периодами времени  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5-1/2,5$  обеспечивает увеличение дли-

ны жидкостных пробок в подъемной трубе на 30–40% в сравнении с традиционной работой эрлифта, при которой эта длина составляет  $(0,7-1,0)D$  в нижней части подъемной трубы и  $(0,5-0,8)D$  — в верхней части.

Полученные экспериментальные данные работы эрлифта с дискретной подачей сжатого воздуха в соответствии с положениями теории подобия и моделирования правомерно относить к газожидкостным подъемникам с относительными погружениями смесителей  $\alpha \geq 0,362$ , относительными длинами подъемных труб  $(H+h)/D \leq 45$ , значениями чисел Струхала  $Sh = 0,123-0,992$  при соответствии числа Рейнольдса  $Re$  водовоздушной смеси автомодельной зоне.

Значения длин жидкостных пробок снарядной структуры определены также аналитико-экспериментальным методом на основе решения математической модели рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока в подъемной трубе [11] и вышеприведенных результатов экспериментальных исследований работы газожидкостного подъемника с  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м,  $\alpha = 0,362$ . По аналогии с методикой, изложенной в [11] на примере эрлифтов с  $D = 25-250$  мм, для традиционно работающего эрлифта с  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м,  $\alpha = 0,362$  при расходе воздуха  $Q_v = 0,950$  м³/мин ( $1,58 \cdot 10^{-2}$  м³/с) и подаче эрлифта  $Q_z = 4,659$  м³/ч ( $1,29 \cdot 10^{-3}$  м³/с) осредненное значение относительной длины жидкостных пробок составляет  $\bar{L}_s = 0,65-0,75$  ( $\bar{L}_s = L_s/D$ , где  $L_s$  — длина жидкостной пробки). При дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5-1/2,5$  при расходе воздуха  $Q_v = 0,840$  м³/мин ( $1,40 \cdot 10^{-2}$  м³/с) и подаче эрлифта  $Q_z = 5,433$  м³/ч ( $1,51 \cdot 10^{-3}$  м³/с) осредненное значение относительной длины жидкостных пробок составляет  $\bar{L}_s = 0,85-0,95$ .

При этом исходили из того, что экспериментальные расходные характеристики эрлифта  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$  м,  $h = 0,93$  м,  $\alpha = 0,362$  при его традиционном способе работы (кривая 1, рисунок 2) и при дискретной подаче сжатого воздуха с периодами  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1$  (кривая 2, рисунок 2) практически неотличимы («наложение характеристик»). В связи с количественной незначительностью расхождений расходных характеристик 1 и 2 (рисунок 2) статистическое исследование этих расхождений не выполнялось, а для дальнейшего анализа параметров рабочего процесса экспериментально исследуемого эрлифта в качестве расходной характеристики традиционно работающего газожидкостного подъемника использована экспериментальная зависимость 2 (рисунок 2).

Экспериментально полученные расходные характеристики эрлифта при дискретной подаче сжатого воздуха в диапазоне периодов  $t_{откр}/t_{закр} = 1/1,5-1/2,5$  (кривые 3–5, рисунок 2) также характеризуются, для проводимого вида исследования, незначительным отличием величин подач  $Q_z$  при одних и тех же расходах воздуха  $Q_v$ . Поэтому для рассматриваемого случая анализ по определению осредненного значения относительной длины жидкостных пробок  $\bar{L}_s$  в эрлифте  $D = 57$  мм,  $H+h = 2,57$

$m, h = 0,93 \text{ м}, \alpha = 0,362$  при дискретній подачі сжатого воздуха в діапазоні періодів  $t_{\text{откр}}/t_{\text{закр}} = 1/1,5-1/2,5$  виконані існуючі із осередненого значення подачі  $Q_3 \approx 5,433 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $1,51 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ) для всіх трьох характеристик (криві 3–5, рисунок 2).

Аналитическе дослідження впливу довжини жидкостных пробок на енергоефективність роботи ерлифта виконано на основі рішення рівняння стаціонарного восходящего движения двухкомпонентной водовоздушной смеси в вертикальній підйомній трубі ерлифта [10, 16]

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

де  $p_{cm}$  — избыточное давление в смесителе;  $z$  — вертикальная координата,  $\tau_w(z)$  — касательное напряжение на внутренней стенке подъемной трубы,  $G$  — приведенная массовая скорость водовоздушной смеси,  $x$  — массовое расходное газосодержание,  $w'(z), w''(z)$  — действительные скорости соответственно воды и воздуха в подъемной трубе,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho(z)$  истинное газосодержание;  $\rho', \rho''(z)$  — плотности соответственно воды и воздуха.

Истинное газосодержание  $\varphi(z)$  для решаемой задачи определяется по выражению [16]

$$\varphi(z) = \frac{Q_g(z)}{C_1 \cdot [Q_g(z) + Q_3] + C_2 \cdot \omega \cdot w''_{\infty}(z)}, \quad (2)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  коэффициенты:  $C_1 = 1,2, C_2 = 1 + 8e^{-1,06L_s/D}$  при  $Re_{cm} > 8000; L_s/D$  — относительная длина жидкостной пробки;  $\omega$  — площадь поперечного сечения подъемной трубы;  $w''_{\infty}(z)$  — скорость подъема одиночного пузыря в неподвижной жидкости.

Выражение для касательного напряжения на внутренней стенке подъемной трубы [16] в качестве одного из аргументов содержит истинное газосодержание  $\varphi(z)$ , определяемое с учетом значения относительной длины жидкостных пробок  $L_s/D$  снаряженной структуры водовоздушного потока

$$\tau_w(z) = [1 - \varphi(z)] \cdot \lambda(z) \cdot \frac{\rho' \cdot [w_{cm}(z)]^2}{8}, \quad (3)$$

где  $\lambda(z)$  — коэффициент гидравлического трения [10],  $w_{cm}$  — скорость газожидкостной смеси.

Таким образом, вычисленные по (2) истинное газосодержание  $\varphi(z)$  и по (3) касательное напряжение  $\tau_w(z)$  зависят, в том числе, и от относительной длины жидкостной пробки  $\bar{L}_s = L_s / D$ . Это позволяет установить влияние параметра  $\bar{L}_s$  на эффективность работы эрлифта и определить рациональный диапазон значений  $\bar{L}_s$  для исследуемого класса газожидкостных подъемников.

Численным решением уравнения движения водовоздушной смеси (1) в подъемной трубе эрлифта  $D = 57 \text{ мм}, H+h = 2,57 \text{ м}, h = 0,93 \text{ м}, \alpha = 0,362$  определены значения подач  $Q_3$  для каждого из расходов воздуха  $Q_b = 0,840 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и  $Q_b = 0,950 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) при осередненных значениях относительных длин жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,70$  и  $\bar{L}_s = 0,90$  и прочих равных условиях. Таким образом, анализ выполнен при характерных режимах как традиционной работы эрлифта, так и работы при дискретной подаче сжатого воздуха.

Результаты этих вычислений позволили установить, что при расходе сжатого воздуха  $Q_b = 0,840 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ) и относительной длине жидкостных пробок  $\bar{L}_s = 0,70$  подача эрлифта составляет  $Q_3 = 3,54 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $0,983 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ), а при  $\bar{L}_s = 0,90 - Q_3 = 4,18 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ), то есть степень увеличения подачи составила  $k_Q = 1,18$ . При расходе воздуха  $Q_b = 0,950 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{мин}$ ) увеличение относительной длины жидкостных пробок от  $\bar{L}_s = 0,70$  до  $\bar{L}_s = 0,90$  обеспечивает увеличение подачи в  $k_Q = 1,13$  раза (таблица 1).

Согласно экспериментальных исследований эрлифта с  $D = 57 \text{ мм}, H+h = 2,57 \text{ м}, h = 0,93 \text{ м}, \alpha = 0,362$  степень увеличения подачи при увеличении относительной длины жидкостных пробок от  $\bar{L}_s = 0,70$  до  $\bar{L}_s = 0,90$  находится в пределах  $k_Q = 1,21-1,22$  (рисунок 2, таблица 1).

**Таблица 1 — Значения гидродинамических параметров водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта  $D = 57 \text{ мм}, H+h = 2,57 \text{ м}, h = 0,93 \text{ м}, \alpha = 0,362$**

Метод определения параметров:	Подача $Q_3$ , м <sup>3</sup> /ч (м <sup>3</sup> /с), при расходе воздуха $Q_b$ :				Степень увеличения подачи, $k_Q$
	0,840 м <sup>3</sup> /мин ( $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ )		0,950 м <sup>3</sup> /мин ( $1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ )		
	$\bar{L}_s = 0,70$	$\bar{L}_s = 0,90$	$\bar{L}_s = 0,70$	$\bar{L}_s = 0,90$	
аналитический	3,54 ( $0,983 \cdot 10^{-3}$ )	4,18 ( $1,16 \cdot 10^{-3}$ )	4,29 ( $1,19 \cdot 10^{-3}$ )	4,86 ( $1,35 \cdot 10^{-3}$ )	1,13÷1,18
экспериментальный	4,52 ( $1,26 \cdot 10^{-3}$ )	5,46 ( $1,52 \cdot 10^{-3}$ )	4,62 ( $1,28 \cdot 10^{-3}$ )	5,64 ( $1,57 \cdot 10^{-3}$ )	1,21÷1,22
Погрешность определения степени увеличения подачи, %					3,28÷7,38

Расхождение в аналитическом и экспериментальном методах определения степени увеличения подачи эрлифта составляет 3,28–7,38%, что является приемлемым результатом.

Таким образом, аналитически установлено и экспериментально подтверждено, что увеличение длин жидкостных пробок снарядной структуры водовоздушного потока в подъемной трубе эрлифта обеспечивает повышение энергетической эффективности работы газожидкостного подъемника.

### Выводы

Экспериментально доказана возможность приближения характеристик развивающегося снарядного водовоздушного потока к характеристикам развитого потока дискретной подачей сжатого воздуха в смеситель эрлифта. Увеличение длин жидкостных пробок развитой снарядной структуры газожидкостной смеси в сравнении с развивающейся структурой обеспечивает повышение энергетической эффективности работы эрлифта. Для расширения области применения приведенных результатов работы эрлифтов с дискретной подачей сжатого воздуха требуются дополнительные экспериментальные исследования рабочих процессов газожидкостных подъемников с другими геометрическими характеристиками.

### Литература

1. Гриффитс, М. Влияние входных условий на снарядный режим течения двухфазной смеси / М. Гриффитс // Труды американского общества инж.-мех., серия С. Теплопередача. — 1962. — Том 84 — №1. — С. 38—51.
2. Гриффитс, М. Переход от снарядного к эмульсионному режиму течения двухфазной среды / М. Гриффитс // Труды американского общества инж.-мех., серия С. Теплопередача. — 1963. — Том 85. — № 4. — С. 93—98.
3. Временные и структурные характеристики газожидкостного потока при снарядном течении / В.И. Субботин, Ю.Е. Похвалов, Л.Е. Михайлов, И.В. Кронин, В.А. Леонов; Теплоэнергетика. —1976. — №1. — С. 67—70.
4. Субботин, В.И. Структура снарядного пароводяного потока / В.И. Субботин, Ю.Е. Похвалов, В.А. Леонов. Теплоэнергетика. — 1977. — №7. — С. 65—67.
5. Похвалов, Ю.Е. Статистические параметры снарядного двухфазного течения / Ю.Е. Похвалов, В.И. Субботин. — Теплоэнергетика. 1988. №2. С. 28—33.
6. Кириченко, Е.А. Исследование параметров снарядной структуры течения в подъемной трубе глубоководного эрлифта / Е.А. Кириченко, В.В. Евтеев, А.В. Романюков // Науковий вісник НГУ. — 2007. — № 9. — С. 66—72.
7. Кириченко, Е.А. Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмо-гидротранспортных системах [Текст]: моногр. / Е.А. Кириченко, О.Г. Гоман, В.Е. Кириченко, А.В. Романюков. — Днепропетровск: Национальный горный университет, 2012. — 268 с.
8. Кириченко, Е.А. Теория и алгоритм расчета снарядного течения в эрлифте / Е.А. Кириченко, В.Е. Кириченко, В.В. Евтеев. — Днепропетровск: Национальный горный университет, 2013. — 263 с.

9. Кононенко, А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Промислова гідраліка і пневматика. — Вінниця. — 2006. — №1. — С. 34—37.

10. Кононенко, А.П. Модель рабочего процесса эрлифта с учетом структуры газожидкостных образований снарядного водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях. —Харків: НТУ “ХПІ”. — 2013. — №5 (979). — С. 110—118.

11. Кононенко, А.П. Математическая модель рабочего процесса эрлифта с развитой снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко, В.В. Калиниченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. — 2013. — Вип. 2(26). — С. 151—163.

12. Триллер, Е.А., Надеев, Е.И., Ганза, А.И., Немцев, Э.Н., Калиниченко, В.В. Декларационный патент на полезную модель №41406 “Газлифт”. Бюл. №5, 25.05.2009 г.

13. Триллер, Е.А., Надеев, Е.И., Ганза, А.И., Немцев, Э.Н., Калиниченко В.В. Декларационный патент на полезную модель №46892 “Пристрій керування ерліфтом”. Бюлетень №1, 11.01.2010.

14. Логвинов, Н.Г. Синхронизатор автоколебаний эрлифтных установок / Н.Г. Логвинов, Е.И. Надев, В.В. Калиниченко // Матер. науч.-практ. конф. “Наука—жизнь—производство”. — Красноармейск, 2001. — 124 с.

15. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко. — М.: Информсвязьиздат, 1995. — 592 с.

16. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис. — М.: Мир, 1972. — 440 с.

### References

1. Griffiths, M. Vliyanie vhodnyh uslovii na snaryadnyi rezhim techeniya dvuhfaznoi smesi / M. Griffiths // Trudy amerikanskogo obschestva inzh.-meh., seriya S. Teploperedacha. — 1962. — Tom 84. — №1. — S. 38—51.
2. Griffiths, M. Perehod ot snaryadnogo k emul'sionnomu rezhimu techeniya dvuhfaznoi sredy / M. Griffiths // Trudy amerikanskogo obschestva inzh.-meh., seriya S. Teploperedacha. — 1963. — Tom 85. — № 4. — S. 93—98.
3. Vremennye i strukturnye harakteristiki gazozhidkostnogo potoka pri snaryadnom techenii / V.I. Subbotin, Yu.E. Pohvalov, L.E. Mihailov, I.V. Kronin, V.A. Leonov. — Teploenergetika. — 1976. — №1. — S. 67—70.
4. Subbotin, V.I. Struktura snaryadnogo parovodyanogo potoka / V.I. Subbotin, Yu.E. Pohvalov, V.A. Leonov. — Teploenergetika. — 1977. — №7. — S. 65—67.
5. Pohvalov, Yu.E. Statisticheskie parametry snaryadnogo dvuhfaznogo techeniya / Yu.E. Pohvalov, V.I. Subbotin. — Teploenergetika. — 1988. — №2. — S. 28—33.
6. Kirichenko, E.A. Issledovanie parametrov snaryadnoi struktury techeniya v pod'emnoi tube glubokovodnogo erlifta / E.A. Kirichenko, V.V. Evteev, A.V. Romanyukov // Naukoviy visnik NGU. — 2007. — № 9. — S. 66—72.
7. Kirichenko, E.A. Modelirovanie dinamicheskikh processov v glubokovodnykh pnevmogidrottransportnykh siste-

mah [Tekst]: monogr. / E.A. Kirichenko, O.G. Goman, V.E. Kirichenko, A.V. Romanyukov. — Dnepropetrovsk: Natsional'nyi gornyi universitet. — 2012. — 268 s.

8. Kirichenko, E.A. Teoriya i algoritm rascheta snaryadnogo techeniya v erlifte / E.A. Kirichenko, V.E. Kirichenko, V.V. Evteev. — Dnepropetrovsk: Natsional'nyi gornyi universitet, 2013. — 263 s.

9. Kononenko, A.P. Model' rabocheho protsessa erlifta so snaryadnoi strukturoi vodovozdushnogo potoka / A.P. Kononenko // Promislova gidravlika i pnevmatika. — Vinnitsya. — 2006. — №1. S. 34-37.

10. Kononenko A.P. Model' rabocheho protsessa erlifta s uchetom struktury gazozhidkostnykh obrazovanii snaryadnogo vodovozdushnogo potoka / A.P. Kononenko, V.V. Kalinichenko // Visnik Natsional'nogo tehnicnogo universitetu "HPI". Zbirnik naukovih prats'. Seriya: Matematichne modelyuvannya v tehnitsi ta tehnologiyah. — Harkiv: NTU "HPI". — 2013. — №5 (979). — S. 110—118.

11. Kononenko A.P. Matematicheskaya model' rabocheho protsessa erlifta s razvitoi snaryadnoi strukturoi vodovozdushnogo potoka / A.P. Kononenko, V.V. Kalini-

chenko // Naukovi pratsi DonNTU. Seriya girnicho- elektromechanichna. — 2013. — Vip. 2(26). — S. 151—163.

12. Triller, E.A., Nadeev, E.I., Ganza, A.I., Nemtsev, E.N., Kalinichenko, V.V. Deklaratsiini patent na korisnu model' №41406 "Gazlift". Byuleten' №5, 25.05.2009.

13. Triller, E.A., Nadeev, E.I., Ganza, A.I., Nemtsev, E.N., Kalinichenko, V.V. Deklaratsiyni patent na korisnu model' №46892 "Pristrii keruvannya erliftom". Byuleten' №1, 11.01.2010.

14. Logvinov, N.G. Sinhronizator avtokolebani erliftnyh ustanovok / N.G. Logvinov, E.I. Nadev, V.V. Kalinichenko // Materialy nauch.-prakt. konf. "Nauka-zhizn'-proizvodstvo". — Krasnoarmeisk, 2001. — 124 s.

15. Entsiklopediya erliftov / F.A. Papayani, L.N. Kozyryatskii, V.S. Paschenko, A.P. Kononenko. — M.: Informsvyaz'izdat, 1995. — 592 s.

16. Uollis, G. Odnomernye dvuhfaznye techeniya / G. Uollis. — M.: Mir, 1972. — 440 s.

*Надійшла 12.12.2013 року*

**УДК 622.276.5:556**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ  
ВПЛИВУ ДИСКРЕТНОСТІ ПОДАЧІ СТИСНЕНОГО  
ПОВІТРЯ НА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ РОБОЧОГО  
ПРОЦЕСУ ЕРЛИФТА**

**А.П. Кононенко, В.В. Калініченко**

Наведено результати експериментальних і аналітичних досліджень роботи ерліфта з дискретною подачею стисненого повітря в змішувач, що обґрунтовують підвищення ефективності ліфтування рідин газорідними підйомниками з розвиненою снарядною структурою водоповітряної суміші в підйомній трубі в порівнянні з тою, що розвивається. Снарядна структура, що розвивається, в порівнянні з розвинутою характеризується зменшенням довжин рідинних пробок і збільшенням довжин газових снарядів з підвищенням їх відносної швидкості, що при роботі ерліфта призводить до зниження подачі, зменшення істинного газовмісту, збільшення втрат на ковзання фаз і, в загальному підсумку, зниження енергоефективності роботи гідроапарата. Для ерліфта з підйомною трубою діаметром 57 мм і довжиною 2,57 м, геометричним зануренням змішувача 0,93 м дискретна подача повітря регулюючим клапаном з режимом роботи  $t_{\text{откр}} / t_{\text{закр}} = 1/1, 5-1/2, 5$  ( $t_{\text{откр}}$  — період часу, протягом якого запірно-регулюючий елемент клапана відкритий,  $c$ ;  $t_{\text{закр}}$  — період часу, протягом якого запірно-регулюючий елемент клапана закритий,  $c$ ), забезпечує збільшення подачі в 1,21–1,22 рази в порівнянні з традиційною роботою газорідного підйомника.

*Ключові слова:* ерліфт, підйомна труба, снарядна структура водоповітряного потоку, дискретна подача стисненого повітря, енергоефективність, газовий снаряд, рідинна пробка.

**UDC 622.276.5:556**

**EXPERIMENTAL GROUND OF INFLUENCE  
OF DISCRETE SERVE OF THE COMPRESSED AIR  
ON POWER-HUNGRYNESS OPERATING PROCESS  
OF THE AIRLIFT**

**A.P. Kononenko, V.V. Kalinichenko**

Results over of experimental and analytical researches of work of airlift are brought with the discrete serve of the compressed air in a mixer, grounding the increase of efficiency of lifting liquids gas-liquid lifts with the developed projectile structure of the water-air stream in a lifting pipe by comparison to developing. A developing projectile structure by comparison to developed is characterized reduction of lengths of liquid corks and increase of lengths of gas projectiles with the increase of their relative speed, that during work of airlift results in the decline of serve, reduction of true gas content, to the increase of losses on skidding of phases and, for a grand total, decline of energy efficiency of work of hydraulic apparatus. For airlift with a lifting pipe by a diameter a 57 mm and long a 2,57 m, geometrical immersion of mixer a 0,93 m discrete serve of air by a regulative valve with the mode of operations of  $t_{\text{откр}} / t_{\text{закр}} = 1/1, 5-1/2, 5$  ( $t_{\text{откр}}$  is a period of time during that the plug-forming-regulative element of valve is open, second;  $t_{\text{закр}}$  is a period of time during that the plug-forming-regulative element of valve is closed, second), provides the increase of serve in 1,21–1,22 time by comparison to traditional work of gas-liquid lift.

*Key words:* airlift, lifting pipe, projectile structure of the water-air stream, discrete serve of the compressed air, energy efficiency, gas projectile, liquid cork.