



ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С РАДИАЛЬНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ

А. П. Кононенко¹, Р. И. Божко²

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,

58, ул. Артема, г. Донецк, ДНР, 83000.

E-mail: ¹ ap.kononenko@ukr.net, ² bozhko342@mail.ru

Получена 09 февраля 2018; принята 23 марта 2018.

Аннотация. Исследованы возможные области применения нагнетательных эрлифтных установок и факторы, ограничивающие применение эрлифтов традиционной конструкции. Выполнен численный анализ работы нагнетательной эрлифтной установки на примере использования в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0. Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в нагнетательном режиме, в диапазоне относительных погружений $\alpha = (0,15 \div 0,95)$, обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости и подачи эрлифта при практически равноценной энергетической эффективности.

Ключевые слова: нагнетательный эрлифт, радиальный нагнетатель, высота подъема, коэффициент полезного действия, подача эрлифта.

ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАГНІТАЛЬНИХ ЕРЛІФТНИХ УСТАНОВОК З РАДІАЛЬНИМИ НАГНІТАЧАМИ

А. П. Кононенко¹, Р. І. Божко²

ДОНУ ВПО «Донецький національний технічний університет»,

58, вул. Артема, м. Донецьк, ДНР, 83000.

E-mail: ¹ ap.kononenko@ukr.net, ² bozhko342@mail.ru

Отримана 09 лютого 2018; прийнята 23 березня 2018.

Анотація. Досліджено можливі області застосування нагнітальних ерліфтних установок і фактори, що обмежують застосування ерліфтів традиційної конструкції. Виконано чисельний аналіз роботи нагнітальної ерліфтної установки на прикладі використання в її складі радіального нагнітача ЦНВ 200/3,0. Доведено, що в порівнянні з ерліфтною установкою традиційної технологічної схеми робота ерліфтної установки з нагнітачем ЦНВ 200/3,0 в нагнітальному режимі, в діапазоні відносних занурень $\alpha = (0,15 \div 0,95)$, забезпечує збільшення висоти підйому рідини і подачі ерліфта при практично рівноцінній енергетичній ефективності.

Ключові слова: нагнітальний ерліфт, радіальний нагнітач, висота підйому, коефіцієнт корисної дії, подача ерліфта.

AREAS OF APPLICATION OF PUMP AIRLIFT INSTALLATIONS WITH RADIAL SUPERCHARGERS

Anatoly Kononenko¹, Ruslan Bozhko²

*Donetsk National Technical University,
58, Artema Str., Donetsk, DPR, 83000.*

E-mail: ¹ ap.kononenko@ukr.net, ² bozhko342@mail.ru

Received 09 February 2018; accepted 23 March 2018.

Abstract. Areas of application of pump airlift installations and factors limiting the application of airlifts of traditional design are explored. A numerical analysis of the operation of the pump airlift installation is made using the example of using a radial supercharger CAS 200/3.0 in its composition. It is proved that, in comparison with the airlift installation of the traditional technological scheme, the operation of an airlift unit with a supercharger CAS 200/3.0 in the pump mode, in the range of relative immersions $\alpha = (0,15 \div 0,95)$, provides an increase the lifting height of the liquid and airlift performance with increasing of airlift efficiency and efficiency of airlift installation.

Keywords: pressure airlift, radial supercharger, lift height, efficiency, performance of airlift.

Введение

Благодаря известным достоинствам эрлифты находят широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе и в строительном деле (для добычи и гидроподъема песка и гравия), подъема полезных ископаемых (конкреций) со дна водоемов и т. д. [3, 9, 10, 12, 13]. Одним из перспективных направлений развития технологий в этой отрасли является использование эрлифтов для добычи сапропелей и пеллоидов [3].

Используя главные достоинства гидромеханизированного способа добычи, эрлифтно-земснарядные комплексы (ЭЗК) устраняют главный его недостаток — низкую концентрацию [3, 10, 11, 14–16]. Согласно исследованиям авторов, эта концентрация для ЭЗК увеличится в 3–5 раз, а в некоторых случаях и более.

При эксплуатации эрлифтных установок традиционной конструкции движение жидкости (гидросмеси) по отводящему трубопроводу осуществляется самотеком, что требует обеспечения уклона этого трубопровода в сторону потребителя. Обеспечить движение жидкости (гидросмеси) по отводящему трубопроводу с восходящим уклоном возможно только при абсолютном давлении в воздухоотделителе, превышающем абсолютное давление у потребителя перекачиваемой жидкости (гидросмеси).

Работа эрлифта традиционной технологической схемы с избыточным давлением в воздухоотделителе повлечет снижение его энергетической эффективности, так как это эквивалентно увеличению высоты подъема при прочих равных условиях.

Увеличить энергоэффективность работы эрлифтной установки с радиальным (центробежным) нагнетателем в качестве источника сжатого воздуха возможно при подаче во всасывающий патрубок нагнетателя воздуха с избыточным давлением, имеющим место в воздухоотделителе.

Обоснование энергетической приемлемости использования нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями является актуальной научной задачей, в значительной степени востребованной практикой. Это позволит расширить область применения эрлифтных установок увеличением высоты подъема перекачиваемой жидкости и подачи эрлифта.

Изложение основного материала

При промышленном использовании эрлифтных установок возникают ситуации, когда существуют ограничения по допустимой высоте подъема эрлифта традиционной конструкции из-за ограниченных вертикальных габаритов в месте рас-

положения установки (например, ограничения вертикальными габаритами горных выработок, загроможденностью пространства оборудованием тепловых электростанций и т. д.), что делает невозможным применение таких установок как средств водоотлива (гидроподъема). В различных отраслях промышленности возникают также случаи необходимости напорной транспортировки жидкости (гидросмеси) по горизонтальному или наклонному отводящему трубопроводу (рис. 1). Реализация описанного возможна при работе газожидкостного подъемника по принципу нагнетательной эрлифтной установки (рис. 2). Устройство и работа нагнетательной эрлифтной установки изложены в [1].

Оценку энергетической эффективности работы нагнетательной эрлифтной установки выполним на примере использования в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3 производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, РФ.

Согласно заводским характеристикам $p_{ан} = f(Q_n)$ и $\eta_n = f(Q_n)$, нагнетатель ЦНВ 200/3

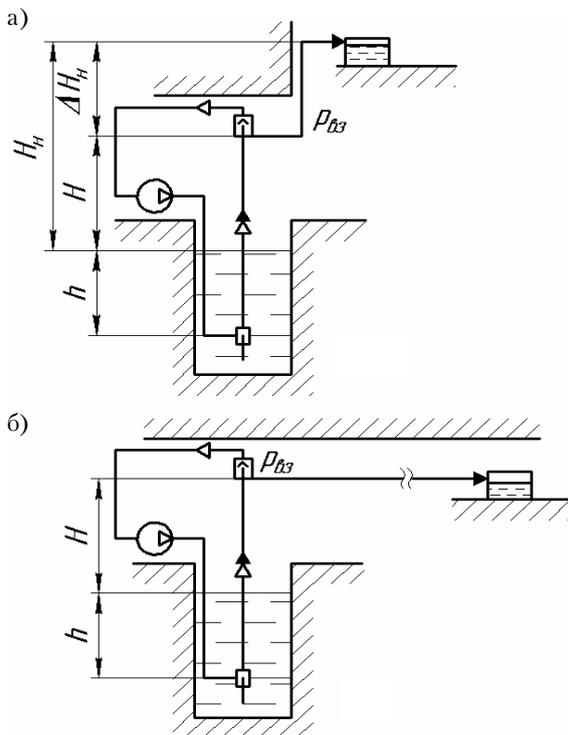


Рисунок 1. Варианты применения нагнетательной эрлифтной установки: а) для перепада жидкости; б) для горизонтальной напорной транспортировки.

развивает максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{ан.макс} = 3,05 \cdot 10^5$ Па при производительности $Q_n = 168$ м³/мин, обеспечивая в этом режиме работы значение КПД $\eta_n = 0,781$. Такие параметры работы нагнетателя имеют место при нормальных технических условиях на его входе, то есть атмосферном давлении во всасывающем патрубке $p_{авс} = p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па ($p_{авс}$ – абсолютное давление во всасывающем патрубке, p_0 – атмосферное давление) и абсолютной температуре воздуха $T = 293$ К. Максимально возможная степень сжатия нагнетателя при этом $\varepsilon_{макс} = p_{ан.макс}/p_0 = 3,05 \cdot 10^5/1,013 \cdot 10^5 = 3,01$.

При транспортировании воды максимально возможное геометрическое погружение эрлифта

$$h_{макс} = \frac{p_{ан.макс} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, $\rho = 1000$ кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81$ м/с².

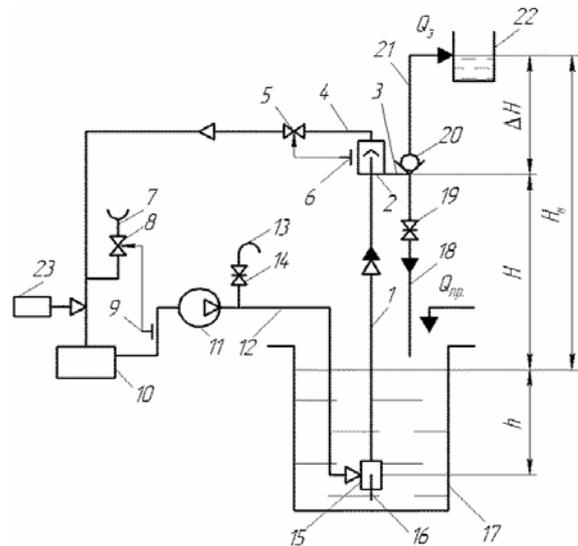


Рисунок 2. Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки: 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель; 3 – сливная труба; 4 – воздухоотводящая труба; 5, 8 – регулирующие клапаны; 6 – датчик уровня; 7 – патрубок; 9 – датчик давления; 10 – влагоотделитель; 11 – радиальный нагнетатель; 12 – напорный воздухопровод; 13 – пусковой патрубок; 14, 19 – задвижка; 15 – смеситель; 16 – подающая труба; 17 – зумпф; 18 – сбросной трубопровод; 20 – обратный клапан; 21 – отводящий трубопровод; 22 – потребитель перекачиваемой жидкости; 23 – дополнительный источник сжатого воздуха (для компенсации уноса воздуха транспортируемой жидкостью).

Тогда из (1)

$$h_{\max} = \frac{(3,05 - 1,013) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 20,8 \text{ м.}$$

Известно [2, 3–6], что для эрлифтов традиционной конструкции относительное погружение рекомендуется принимать в диапазоне от $\alpha \geq 0,15$ до $\alpha \rightarrow 1$. Анализ работы нагнетательной эрлифтной установки выполнен в диапазоне относительных погружений $0,15 \leq \alpha \leq 0,95$. Для рассмотрения методики анализа работы установки в качестве примера было принято значение относительного погружения $\alpha = 0,3$ (рис. 3а).

Схемы эрлифтных установок (традиционной, нагнетательной, эквивалентной и традиционной с высотой подъема, аналогичной нагнетательной) приведены на рисунке 3.

При заданных максимально возможном геометрическом $h_{\max} = 20,8$ м и относительном $\alpha = 0,3$ погружениях эрлифта высота подъема эрлифта

$$H = \frac{h(1 - \alpha)}{\alpha} = \frac{20,8(1 - 0,3)}{0,3} = 48,5 \text{ м.} \quad (2)$$

Общая длина подъемной трубы эрлифта (рис. 3а)

$$L = H + h_{\max}, \quad (3)$$

что для рассматриваемого случая составит $L = 48,5 + 20,8 = 69,3$ м.

Отнеся рассматриваемый эрлифт к классу коротких, в соответствии с рекомендациями [2, 3], удельный расход воздуха

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}, \quad (4)$$

откуда при $\alpha = 0,3$ объемное количество воздуха, необходимое для транспортирования едини-

цы объема жидкости (удельный расход воздуха) $q = 10,8$.

Коэффициент полезного действия эрлифта [2]

$$\eta_3 = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a \text{ см}}}{p_0}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a \text{ н макс}}}{p_0}}, \quad (5)$$

где $p_{a \text{ см}}$ – абсолютное давление в смесителе; принимаем его равным $p_{a \text{ см}} = p_{a \text{ н макс}}$.

Тогда в соответствии с (5)

$$\eta_3 = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 48,5}{10,8 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{3,05 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5}} = 0,393.$$

КПД эрлифтной установки

$$\eta_{3y} = \eta_3 \cdot \eta_n, \quad (6)$$

значение которого для рассматриваемого случая $\eta_{3y} = 0,393 \cdot 0,781 = 0,307$.

Подача эрлифта

$$Q_3 = \frac{60 Q_g}{q}, \quad (7)$$

откуда $Q_3 = 60 \cdot 168 / 10,8 = 933 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Рассмотрим работу эрлифтной установки в нагнетательном режиме с тем же нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{a \text{ вэ}} = (1,013 - 1,25) \cdot 10^5$ Па (рис. 3б). Пренебрегая гидравлическими потерями в воздухоотводящей трубе 4 (рис. 2), принято, что давление частично сжатого воздуха на входе в нагнетатель $11 p_{a \text{ вэ}}$ равно давлению в воздухоотделителе 2, то есть $p_{a \text{ вэ}} = p_{a \text{ вс}}$.

Используя известную методику [7, 8], графическим методом построены газодинамические

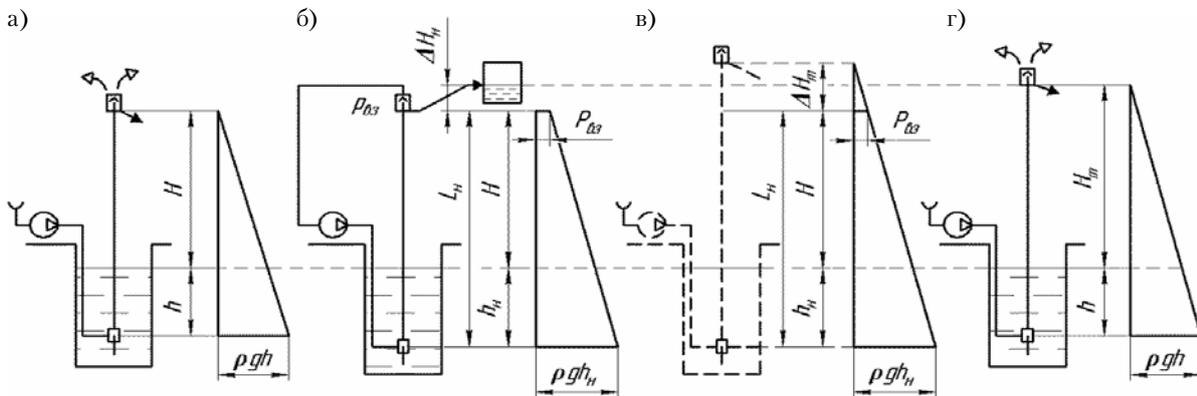


Рисунок 3. Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифта: а) традиционной технологической схемы; б) нагнетательного эрлифта; в) традиционной технологической схемы с глубиной погружения смесителя, аналогичной нагнетательному эрлифту (эквивалентная схема); г) эрлифта традиционной технологической схемы с высотой подъема, аналогичной нагнетательному.

характеристики нагнетателя при давлениях во всасывающем патрубке $p_{a\text{вс}}$ в оговоренном диапазоне (рис. 4).

Максимальное значение абсолютного давления у всасывающего патрубка нагнетателя $p_{a\text{вс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па принято исходя из допустимого значения мощности электродвигателя нагнетателя, которое в этом случае не превышает его номинальное значение.

Повысив давление в воздухоотделителе до значения $p_{a\text{вс}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па, возможно добиться следующих изменений параметров работы эрлифтной установки:

а) увеличить высоту подъема эрлифта на величину

$$\Delta H_n = \frac{p_{a\text{вс}} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (8)$$

которая для конкретных условий имеет значение

$$\Delta H_n = \frac{(1,25 - 1,013) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 2,42 \text{ м};$$

б) обеспечить работу центробежного нагнетателя ЦНВ 200/3,0 с параметрами: $p_{a\text{н.макс}} = 3,77 \cdot 10^5$ Па; $Q_n = 208 \text{ м}^3/\text{мин}$; $\eta_n = 0,781$; $\varepsilon_{\text{макс}} = 3,01$;

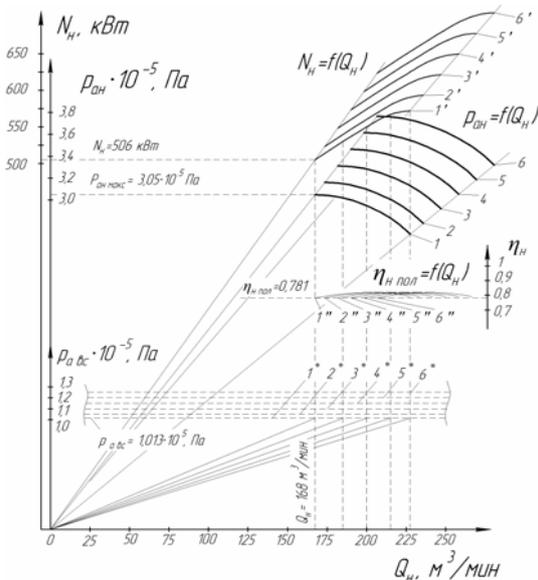


Рисунок 4. Газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при абсолютных давлениях во всасывающем патрубке $p_{a\text{вс}} = (1,013-1,25) \cdot 10^5$ Па: 1 – $1,013 \cdot 10^5$ Па; 2 – $1,05 \cdot 10^5$ Па; 3 – $1,1 \cdot 10^5$ Па; 4 – $1,15 \cdot 10^5$ Па; 5 – $1,2 \cdot 10^5$ Па; 6 – $1,25 \cdot 10^5$ Па; 1*–6* – $p_{aн} = f(Q_n)$; 1''–6'' – $N_n = f(Q_n)$, 1'''–6''' – $\eta_n = f(Q_n)$; 1*–6* – $p_{a\text{вс}} - \text{const}$.

в) обеспечить значение геометрического погружения смесителя

$$h_n = \frac{p_{aн.макс} - p_0}{\rho \cdot g} = \frac{(3,77 - 1,013) \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81} = 28,1. \quad (9)$$

Эквивалентная схема эрлифтной установки представлена на рис. 3в.

Увеличение давления в воздухоотделителе прием равноценным увеличению высоты подъема традиционного эрлифта на величину ΔH_m .

Вышесказанное выразим пропорцией

$$\frac{\Delta H_m}{L_n + \Delta H_m} = \frac{p_{a\text{вс}} - p_0}{\rho \cdot g \cdot h_n} = \frac{p_{\text{вс}}}{\rho \cdot g \cdot h_n}, \quad (10)$$

при этом избыточное давление в воздухоотделителе

$$p_{\text{вс}} = p_{a\text{вс}} - p_0, \quad (11)$$

что для данных условий имеет значение

$$p_{\text{вс}} = (1,25 - 1,013 \cdot 10^5) = 0,237 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Исходя из (10), справедливо соотношение

$$\Delta H_m \cdot \rho \cdot g \cdot h_n = (L_n + \Delta H_m) \cdot p_{\text{вс}},$$

откуда высота перепада традиционного эрлифта

$$\Delta H_m = \frac{L_n \cdot p_{\text{вс}}}{\rho \cdot g \cdot h_n - p_{\text{вс}}}, \quad (12)$$

которая для данных условий имеет значение

$$\Delta H_m = \frac{72,6 \cdot 0,237 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,81 \cdot 28,1 - 0,112 \cdot 10^5} = 7,21 \text{ м}.$$

Относительное погружение смесителя нагнетательного эрлифта в этом случае

$$\alpha_n = \frac{h_n}{L_n + \Delta H_m}, \quad (13)$$

значение которого при $h_n = 28,1$ м, $L_n = 72,6$ м и $\Delta H_m = 7,21$ м составляет $\alpha_n = 0,335$, а удельный расход воздуха в соответствии с (4) – $q_n = 8,5$.

Высота подъема нагнетательного эрлифта от уровня свободной поверхности перекачиваемой жидкости (гидросмеси) в зумпфе установки

$$H_n = H + \Delta H_n. \quad (14)$$

Для рассматриваемого случая, в соответствие с (14), $H_n = 48,50 + 2,42 = 50,92$ м.

КПД нагнетательного эрлифта, исходя из (5)

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_n}{q_n \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{aн.макс}}{p_0}}, \quad (15)$$

что составляет

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 50,92}{8,5 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{3,77 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5}} = 0,441.$$

КПД эрлифтной нагнетательной установки в соответствии с (6) – $\eta_{эн} = 0,441 \cdot 0,781 = 0,344$. Подача эрлифта, согласно (7) – $Q_{э} = 60 \cdot 208 / 8,5 = 1468 \text{ м}^3/\text{ч}$. Обеспечить высоту подъема традиционным эрлифтом $H_m = H + \Delta H_m = 48,50 + 2,42 = 50,92 \text{ м}$ с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 (рис. 3г) возможно, в соответствии с (1), (2), (4), (5), (6) и (7) со следующими параметрами работы соответственно: $h_{\text{макс}} = 20,8 \text{ м}$; $\alpha_m = 0,290$; $q_m = 11,7$; $\eta_m = 0,383$; $\eta_{э\text{т}} = 0,299$; $Q_{э\text{т}} = 864 \text{ м}^3/\text{ч}$.

По изложенной методике вычислены значения параметров, характеризующих работу нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3, в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{\text{авз}} = (1,013 \div 1,25) \cdot 10^5 \text{ Па}$ и относительных погружений смесителя $\alpha = (0,15 \div 0,95)$. Зависимости $\eta_{эн} = f(\alpha)$, $\eta_{эм} = f(\alpha)$, $\bar{H} = f(\alpha)$, $\bar{\eta}_э = f(\alpha)$ и $\bar{Q}_э = f(\alpha)$ (рис. 5–8) построены при значении абсолютного давления на входе в нагнетатель $p_{\text{авз}} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$. При вычислении безразмерных величин \bar{H} , $\bar{\eta}_э$ и $\bar{Q}_э$ в качестве базовых принимались значения соответствующих

параметров работы эрлифтной установки традиционной технологической схемы (рис. 3г) с высотой подъема, аналогичной нагнетательной ($H + \Delta H_n = H_m$).

Выводы

В ходе проведенного исследования установлено, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной конструкции работа эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в нагнетательном режиме при абсолютном давлении в воздухоотделителе (на входе в нагнетатель) $p_{\text{авз}} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$ в диапазоне относительных погружений $\alpha = (0,15 \div 0,95)$ обеспечивает увеличение высоты подъема на (4,6 ÷ 24,3) % и подачи эрлифта – на 23,6 % при практически равноценной энергетической эффективности (значения КПД нагнетательного эрлифта и эрлифтной установки в данных условиях не ниже аналогичных значений при использовании эрлифта традиционной конструкции). Установлен характер данных зависимостей.

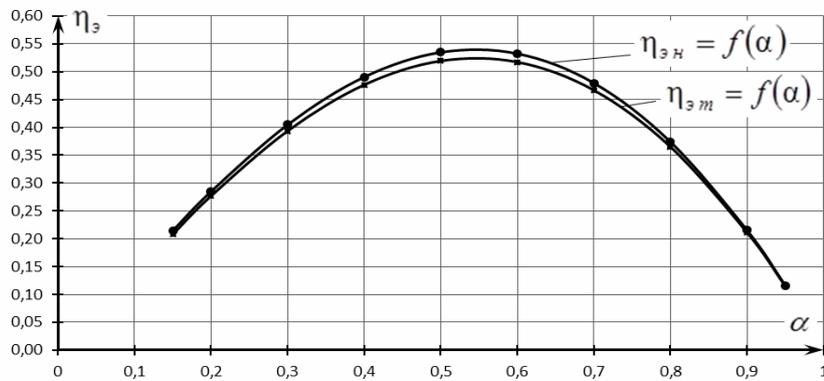


Рисунок 5. Изменение КПД нагнетательного эрлифта и эрлифта традиционной технологической схемы (с нагнетателем ЦНВ 200/3) при абсолютном давлении на входе в нагнетатель $p_{\text{авз}} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

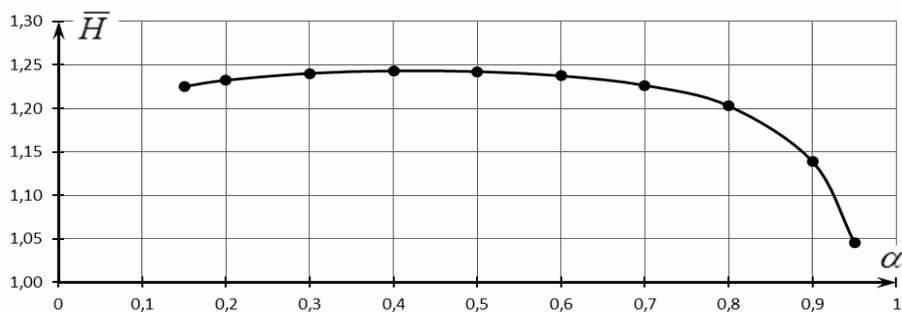


Рисунок 6. Изменение отношения высоты подъема нагнетательного и традиционного эрлифта (с нагнетателем ЦНВ 200/3) при абсолютном давлении на входе в нагнетатель $p_{\text{авз}} = 1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

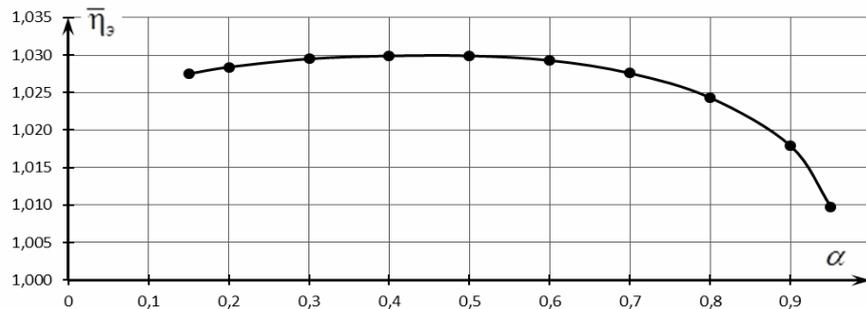


Рисунок 7. Изменение отношения КПД нагнетательного и традиционного эрлифта (с нагнетателем ЦНВ 200/3) при абсолютном давлении на входе в нагнетатель $p_{a\text{вз}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па.

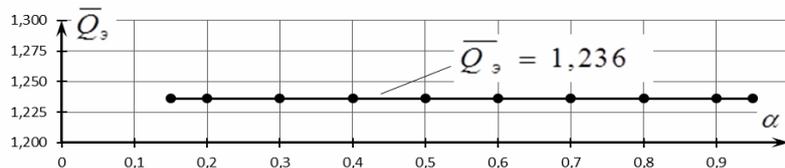


Рисунок 8. Изменение отношения подач нагнетательного и традиционного эрлифта (с нагнетателем ЦНВ 200/3) при абсолютном давлении на входе в нагнетатель $p_{a\text{вз}} = 1,25 \cdot 10^5$ Па.

Литература

1. Кононенко, А. П. Обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями [Текст] / А. П. Кононенко, Р. И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. 2017. № 1(7). С. 11–19.
2. Эрлифтные установки [Текст] : Учебное пособие / В. Г. Гейер, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пашченко, Я. К. Антонов. – Донецк : ДПИ, 1982. – 64 с.
3. Энциклопедия эрлифтов [Текст] / Ф. А. Папаяни, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пашченко, А. П. Кононенко. – М. : Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
4. Кононенко, А. П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС [Текст] / А. П. Кононенко, В. И. Мизерный, Л. Л. Глухман // Энергетика та електрифікація. 2006. № 11. С. 8–12.
5. Малеев, В. Б. Исследование и разработка сифонно-вакуумного эрлифта для очистки шахтных водоотливных емкостей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Малеев Виктор Борисович. – Донецк, 1980. – 289 с.
6. Кононенко, А. П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников [Текст] / А. П. Кононенко, Т. А. Устименко // Промислова гідраліка і пневматика. 2010. № 3 (29). С. 51–53.
7. Рис, В. Ф. Центробежные компрессорные машины [Текст] / В. Ф. Рис. – М. ; Л. : Машиностроение, 1964. – 336 с.

References

1. Kononenko, A. P.; Bozhko, R. I. Substantiation of the energy feasibility of the use of pressure airlift installations with radial superchargers. In: *Bulletin of the Donetsk National Technical University*, 2017, No. 1 (7), pp. 11–19. (in Russian)
2. Geyer, V. G.; Kozyryatsky, L. N.; Pashchenko, V. S.; Antonov, Ya. K. *Erlift installations: Textbook*. Donetsk: DPI, 1982. 64 p. (in Russian)
3. Papayani, F. A.; Kozyryatsky, L. N.; Pashchenko, V. S.; Kononenko, A. P. *Encyclopedia of airlifts*. Moscow: Informsvyazizdat, 1995. 592 p. (in Russian)
4. Kononenko, A. P.; Miserny, V. I.; Glukhman, L. L. Experience in the application of air-lift systems in the technological systems of TPP. In: *Energy and electrification*, 2006, No. 11, pp. 8–12. (in Russian)
5. Maleev, V. B. Research and development of siphon-vacuum airlift for cleaning of mine drainage tanks: the thesis submitted for the Scientific Degree on competition of Candidate of Engineering: 05.05.06. Donetsk, 1980. 289 p. (in Russian)
6. Kononenko, A. P.; Ustimenko, T. A. Optimization of parameters of gas-liquid lifts. In: *Industrial hydraulics and Pneumatics*, 2010, No. 3 (29), pp. 51–53. (in Russian)
7. Ris, V. F. *Centrifugal compressor machines*. Moscow; Leningrad: Mechanical Engineering, 1964. 336 p. (in Russian)
8. Tseitlin, Yu. A.; Murzin, V. A. *Pneumatic installations of mines*. Moscow: Nedra, 1991. 268 p. (in Russian)

8. Цейтлин, Ю. А. Пневматические установки шахт [Текст] / Ю. А. Цейтлин, В. А. Мурзин. – М. : Недра, 1991. – 268 с.
9. Холмогоров, А. П. Эрлифтно-земснарядный способ разработки песка со дна водоемов Западной Сибири [Текст] / А. П. Холмогоров, Л. Н. Козыряцкий, Я. К. Антонов // Механизация строительства. 1990. № 6. С. 20–23.
10. Эрлифтно-гидроэлеваторный комплекс по добычи гравия со дна водоемов [Текст] / Л. Н. Козыряцкий [и др.]. – Донецк, 1990. – 52 с. – Деп. в ЦНИИУголь 05.04.1990, № 9.
11. Эксплуатация эрлифтно-земснарядных комплексов в Западной Сибири [Текст] / А. П. Холмогоров, Л. Н. Козыряцкий [и др.] // Строительство трубопроводов. 1990. № 4. С. 7–13.
12. Mansour, H. Effect of air injection method on the performance of airlift pump [Текст] / H. Mansour, M. F. Khalil // Mansoura Eng. J. 1990. No. 15(2). P. 107–118.
13. Effect of air injection method on the performance of an airlift pump [Текст] / M. F. Khalil, K. A. Elshorbagy, S. Z. Kassaband, R. I. Fahmy // Int. J. Heat and Fluid Flow. 1999. No. 20. P. 598–604.
14. Dukler, E. A. Gas-Liquid Slug Flow: knots and loose ends [Текст] / E. A. Dukler, J. Fabre // Multiphase Science and Technology. 1994. Vol. 8 : Two phase flow fundamentals. P. 355–469.
15. Teitel, Y. Two-phase slug flow [Текст] / Y. Teitel, D. Barnea // Adv. Heat Transfer. 1990. Vol. 20. P. 83–132.
16. Dukler, A. E. Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems: Measurement and Modeling / A. E. Dukler, Y. Taitel // Multiphase Science and Technology. 1986. Vol. 2. P. 1–94.
9. Kholmogorov, A. P.; Kozyryatsky, L.N.; Antonov, Ya. K. Airlift-dredging method of sand development from the bottom of reservoirs of Western Siberia. In: *Mechanization of construction*, 1990, No. 6, pp. 20–23. (in Russian)
10. Kozyrytsky, L. N.; and others. Airlift-jet-pump complex for the extraction of gravel from the bottom of reservoirs. Dep. in CNII Eugol 05.04.1990, No. 9. (in Russian)
11. Kholmogorov, A. P.; Kozyryatsky, L. N. et al. Operation of airlift-dredging systems in Western Siberia. In: *Construction of pipelines*, 1990, No. 4, pp. 7–13. (in Russian)
12. Mansour, H.; Khalil, M. F. Effect of air injection method on the performance of airlift pump. In: *Mansoura Eng. J.*, 1990, No. 15(2), pp. 107–118.
13. Khalil, M. F.; Elshorbagy, K. A.; Kassaband, S. Z.; Fahmy, R. I. Effect of air injection method on the performance of an airlift pump. In: *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 1999, No. 20, pp. 598–604.
14. Dukler, E. A.; Fabre, J. Gas-Liquid Slug Flow: knots and loose ends. In: *Multiphase Science and Technology*, 1994, Vol. 8: Two phase flow fundamentals, pp. 355–469.
15. Teitel, Y.; Barnea, D. Two-phase slug flow. In: *Adv. Heat Transfer*, 1990, Vol. 20, pp. 83–132.
16. Dukler, A. E.; Taitel, Y. Flow Pattern Transitions in Gas-Liquid Systems: Measurement and Modeling. In: *Multiphase Science and Technology*, 1986, Vol. 2, pp. 1–94.

Кононенко Анатолий Петрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергомеханических систем ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: гидродинамика двухфазных потоков, газожидкостные подъемники (эрлифты) для водоотлива и гидроподъема (преимущественно в условиях систем золошлакоудаления тепловых электростанций, работающих на твердом топливе и др.), струйные аппараты.

Божко Руслан Игоревич – аспирант кафедры энергомеханических систем ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: эрлифты для водоотлива и гидроподъема, математическое моделирование процессов, проходящих в подъемной трубе эрлифта.

Кононенко Анатолий Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри енергомеханічних систем ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: гідродинаміка двофазних потоків, газорідні підійомники (ерліфти) для водовідливу і гідропідйому (переважно в умовах систем золошлаковидалення теплових електростанцій, що працюють на твердому паливі та ін.), струменеві апарати.

Божко Руслан Ігоревич – аспірант кафедри енергомеханічних систем ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: ерліфти для водовідливу та гідропідйому, математичне моделювання процесів, що проходять в підійомній трубі ерліфта.

Kononenko Anatoly – D.Sc. in Engineering, prof., the Head of Power-Mechanical Systems Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: hydrodynamics of two-phase flows, gas-liquid lifts (airlifts) for

water drainage and hydraulic lifting (mainly in conditions of ash and slag removal systems of thermal power plants operating on solid fuel, etc.), jet devices.

Bozhko Ruslan – post-graduate student, Power-mechanical systems Department; Donetsk National Technical University. Scientific interests: airlifts for dewatering and hydraulic lifting, mathematical modeling of processes in airlift pipe.