

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК С РАДИАЛЬНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ

Проанализированы возможные практические проблемы, связанные с работой эрлифтных установок традиционной технологической схемы, и доказана целесообразность применения нагнетательных эрлифтных установок. Выполнена оценка 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 $\alpha=0,15-0,5$, обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости (гидросмеси) при увеличении КПД эрлифта и эрлифтной установки.

Ключевые слова: нагнетательный эрлифт, радиальный нагнетатель, высота переподъема, энергоэффективность.

Постановка проблемы

В эрлифтных установках традиционной технологической схемы движение жидкости (гидросмеси) после воздухоотделителя осуществляется безнапорно (с возможными участками потока, имеющими свободную поверхность), что требует обеспечения уклона отводящего трубопровода в сторону конечного потребителя этой жидкости (гидросмеси), то есть определенной высоты переподъема эрлифтом относительно данного потребителя. В некоторых случаях возникают ограничения по возможной высоте подъема эрлифта традиционной схемы из-за стесненных вертикальных габаритов в месте расположения установки (например, ограничения вертикальными габаритами горных выработок, загроможденностью пространства строительными конструкциями, технологическим оборудованием и т.д.), что исключает применение таких установок как средств гидроподъема.

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). При равенстве давления у потребителя давлению окружающей среды (как правило, атмосферному давлению) в воздухоотделителе необходимо иметь избыточное давление, обеспечивающее компенсацию гидравлических потерь в отводящем трубопроводе и, в случае необходимости, подъем жидкости (гидросмеси) на высоту, равную разности геодезических отметок центров тяжести сечений в начале и окончании отводящего трубопровода

[возможным изменением скоростного напора перекачиваемой жидкости (гидросмеси) по длине отводящего трубопровода пренебрегаем].

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.

Минимизировать потери энергетической эффективности работы эрлифтной установки с радиальным (центробежным) нагнетателем в качестве источника пневматической энергии возможно при подаче во всасывающий патрубок последнего частично сжатого воздуха с избыточным давлением, имеющим место в воздухоотделителе. При сохранении потребного давления сжатого воздуха в нагнетательном патрубке радиальной машины, преимущественно определяемого геометрическим погружением смесителя эрлифта, это уменьшит энергопотребление на производство одного и того же количества единицы пневмоэнергии из-за снижения требуемой степени сжатия воздуха в нагнетателе. Реализация описанного возможна при работе газожидкостного подъемника по принципу нагнетательной эрлифтной установки.

Такая организация работы эрлифтных установок позволит расширить область их применения. Поэтому обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

Анализ последних исследований и публикаций

Известно применение эрлифтных установок ряда технологических схем – с расположением воздухопроводов вне и внутри подъемной трубы, групповых, секционных и др., в которых предусматривается нагнетание сжатого воздуха под избыточным давлением в погруженный под уровень жидкости смеситель и безнапорное движение транспортируемой жидкости (гидросмеси) после воздухоотделителя [1-4,8,9]. В этом случае давление в воздухоотделителе равно давлению окружающей среды (атмосферному давлению), и транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю обеспечивается уклоном отводящего трубопровода в сторону последнего. Используемый в эрлифтах в качестве рабочего тела сжатый воздух производится нагнетателями (преимущественно радиальными), в которых давление атмосферного воздуха увеличивается до значения, соответствующего давлению в смесителе с учетом потерь в воздухопроводе [10-12].

В вакуумных эрлифтах смеситель, как правило, располагается на уровне перекачиваемой жидкости (гидросмеси), а вакуум в воздухоотделителе создается при помощи вакуум-насосов [4-6]. В этом случае начальный уровень отводящего безнапорного трубопровода ниже выходного сечения в воздухоотделителе на величину столба перекачиваемой жидкости (гидросмеси), уравновешивающего вакуум в воздухоотделителе.

В обоих типах рассмотренных эрлифтных установок обеспечивается только безнапорное движение перекачиваемой жидкости (гидросмеси) по отводящему трубопроводу, что ограничивает возможную геодезическую отметку ее потребителя отметкой входного сечения этого трубопровода.

Расширить энергоэффективную область применения эрлифтных установок увеличением высоты подъема транспортируемой жидкости (гидросмеси), превышающей уровень входного сечения безнапорного отводящего трубопровода, возможно обеспечением работы этого трубопровода в напорном режиме за счет избыточного давления в воздухоотделителе нагнетательного эрлифта и утилизацией энергии частично сжатого воздуха, выходящего из воздухоотделителя, подачей его на вход нагнетателя.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является обоснование энергетической целесообразности эксплуатации нагнетательных эрлифтных установок с радиальными (центробежными) воздушными

нагнетателями как наиболее широко используемыми в качестве источников пневмоэнергии водовоздушных подъемников.

Основной материал исследования

Нагнетательная эрлифтная установка с радиальным нагнетателем содержит эрлифт с подъемной трубой 1, в верхней части которой расположен герметичный воздухоотделитель 2 со сливной 3 и воздухоотводящей 4 трубами (рис. 1). Управление регулирующим клапаном 5 осуществляется по сигналу датчика уровня 6.

К воздухоотводящей трубе 4 подключен патрубок 7 с клапаном 8, положение запорно-регулирующего элемента которого задается управляющим датчиком давления 9. При открытом клапане 8 патрубок 7 обеспечивает соединение воздухоотводящей трубы 4 с атмосферой.

Воздухоотводящая труба 4 через влагоотделитель 10 присоединяется к всасывающему пат-

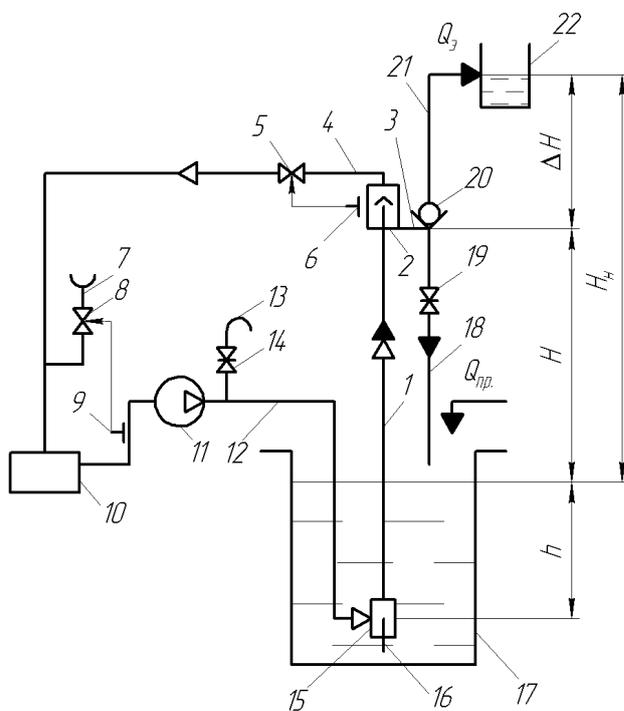


Рис. 1. Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки:

- 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 (гидросмеси)

рубку радиального нагнетателя 11. Напорный воздухопровод 12, оснащенный пусковым патрубком 13 с задвижкой 14, соединяет нагнетатель 11 со смесителем эрлифта 15 с подающей трубой 16.

Нижняя часть эрлифта расположена в зумпфе 17, куда направляется и перекачиваемая жидкость (гидросмесь) с расходом Q_{np} .

Сбросной трубопровод 18 с задвижкой 19 подключен к сливной трубе 3. Обратный клапан 20 устанавливается на начальном участке отводящего трубопровода 21, обеспечивающего транспортирование жидкости (гидросмеси) к потребителю 22. В рассматриваемом случае напор, компенсирующий требуемую высоту подъема жидкости (гидросмеси) после ее выхода из воздухоотделителя 2 и возникающие гидравлические потери, составляет величину ΔH .

Ввод в работу нагнетательной эрлифтной установки с радиальным нагнетателем осуществляется в следующей последовательности.

При открытых клапане 8 и задвижке 14 запускается нагнетатель 11 – атмосферный воздух по патрубку 7 засасывается радиальной машиной, а по патрубку 13 – сбрасывается в атмосферу. Нагнетатель 11 выводится на стабильный режим работы.

В положении запорно-регулирующей арматуры задвижка 19 и клапан 5 – открыты, закрывается задвижка 14, и сжатый воздух по воздухопроводу 12 нагнетается в смеситель 15. Поступающая из зумпфа 17 через подающую трубу 16 жидкость (гидросмесь) смешивается в смесителе 15 со сжатым воздухом, образуя газожидкостную смесь (возможно – с включениями твердых частиц), которая по подъемной трубе 1 поднимается в воздухоотделитель 2. Выделившаяся из состава газожидкостной смеси жидкость (гидросмесь) по сливной трубе 3 и сбросному трубопроводу 18 возвращается в зумпф 17, а воздух из воздухоотделителя 2 удаляется по воздухоотводящей трубе 4. При открытом клапане 8 соотношения расходов воздуха по трубопроводам 4 и 7, всасываемого нагнетателем 11, определяются условиями параллельной работы этих трубопроводов. В таком положении запорно-регулирующей арматуры достигается устойчивая работа эрлифтной установки.

Для перевода эрлифтной установки в нагнетательный режим работы жидкость (гидросмесь) подается в зумпф 17, закрывается задвижка 19 и за счет частичного закрытия регулирующего клапана 5 и увеличения при этом его сопротивления обеспечивает давление в воздухоотделителе 2, соответствующее требуемому напору ΔH . Жидкость (гидросмесь) расходом $Q_{\partial} = Q_{np}$ из воз-

духоотделителя 2 по сливной трубе 3, через обратный клапан 20 и дальше по отводящему трубопроводу 21 направляется потребителю 22.

Предотвращение затопления выходного сечения подъемной трубы 1 и возможного интенсивного влагуноса воздушным потоком, что может иметь место в нештатных режимах работы установки, обеспечивается регулированием давления в воздухоотделителе 2 клапаном 5 по сигналу датчика уровня 6. Так, при превышении уровня жидкости (гидросмеси) относительно заданного, проходное сечение клапана 5 по сигналу датчика 6 уменьшается, давление в воздухоотделителе 2 повышается. При этом, с одной стороны, увеличивается расход транспортируемой жидкости (гидросмеси) из воздухоотделителя 2 к потребителю 22, а с другой – уменьшается подача эрлифта по подъемной трубе 1. И первое, и второе препятствует затоплению выходного сечения подъемной трубы 1.

Обратный клапан 20 исключает движение жидкости (гидросмеси) от потребителя 22 в воздухоотделитель 2 после выключения эрлифтной установки и не допускает ее попадания в проточную часть нагнетателя 11.

Утилизация энергии сжатого воздуха, поступающего с избыточным давлением из воздухоотделителя 2 по воздухоотводящей трубе 4 во всасывающий патрубок нагнетателя 11, реализуется согласованием работы регулирующих клапанов 5 и 8. При этом обеспечивается подача частично сжатого воздуха на вход нагнетателя 11 за счет максимально возможного закрытия проходного сечения клапана 8 (в штатном режиме работы установки – полное закрытие), при котором эрлифтная установка устойчиво работает в нагнетательном режиме. Это уменьшает требуемую степень сжатия воздуха в нагнетателе и снижает энергозатраты на производство пневмоэнергии.

Оценку энергетической эффективности работы нагнетательной эрлифтной установки выполним на примере использования в ее составе радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (производство ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (Хабаровск)).

Согласно заводским характеристикам $p_{aн} = f(Q_{н})$ и $\eta_{н} = f(Q_{н})$, нагнетатель ЦНВ 200/3,0 развивает максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{aн макс} = 3,05 \cdot 10^5$ Па при производительности $Q_{н} = 168$ м³/мин, обеспечивая в этом режиме работы значение КПД $\eta_{н} = 0,781$. Такие параметры работы нагнетателя имеют место при нормальных технических условиях на его входе, то есть атмосферном давлении во всасывающем патрубке $p_{a вс} = p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па ($p_{a вс} -$

абсолютное давление во всасывающем патрубке, p_0 – атмосферное давление) и абсолютной температуре воздуха $T=293$ К. Максимально возможная степень сжатия нагнетателя при этом $\epsilon_{\max} = p_{a \text{ н макс}}/p_0 = 3,05 \cdot 10^5 / 1,013 \cdot 10^5 = 3,01$.

При транспортировании воды максимально возможное геометрическое погружение эрлифта составит:

$$h_{\max} = \frac{p_{a \text{ н макс}} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, $\rho=1000$ кг/м³; g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с².

Тогда из (1):

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

Известно [1,2,6], что для эрлифтов традиционной конструкции относительное погружение рекомендуется принимать в диапазоне от $\alpha \geq 0,15$ до $\alpha \rightarrow 1$. Верхний предел значения относительного погружения для общепромышленного эрлифта является сложно реализуемым, поэтому выполним анализ работы рассматриваемой эрлифтной установки в диапазоне относительных погружений $0,15 \leq \alpha \leq 0,50$, а методику анализа рассмотрим на примере значения относительного погружения $\alpha=0,3$.

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

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

Отнеся рассматриваемый эрлифт к классу коротких, в соответствии с рекомендациями [1], удельный расход воздуха составит:

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

откуда, при $\alpha=0,3$, объемное количество воздуха, необходимое для транспортирования единицы объема жидкости (удельный расход воздуха), $q=10,8$.

Коэффициент полезного действия эрлифта [1]:

$$\eta_o = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a \text{ см}}}{p_0}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a \text{ н макс}}}{p_0}}, \quad (3)$$

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 (3):

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

КПД эрлифтной установки:

$$\eta_{\text{эу}} = \eta_o \eta_n, \quad (4)$$

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

Подача эрлифта:

$$Q_o = \frac{60 Q_e}{q}, \quad (5)$$

откуда $Q_o = 60 \cdot 168 / 10,8 = 930$ м³/ч.

Рассмотрим работу эрлифтной установки в нагнетательном режиме с тем же нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{a \text{ в3}} = (1,013 - 1,125) \cdot 10^5$ Па. Пренебрегая гидравлическими потерями в воздухоотводящей трубе 4 (рис. 1), принимаем, что давление частично сжатого воздуха на входе в нагнетатель 11 $p_{\text{вс}}$ равно давлению в воздухоотделителе 2, то есть $p_{a \text{ в3}} = p_{a \text{ вс}}$.

С использованием известной методики [7] графическим методом построены газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при давлениях во всасывающем патрубке в оговоренном диапазоне (рис. 3).

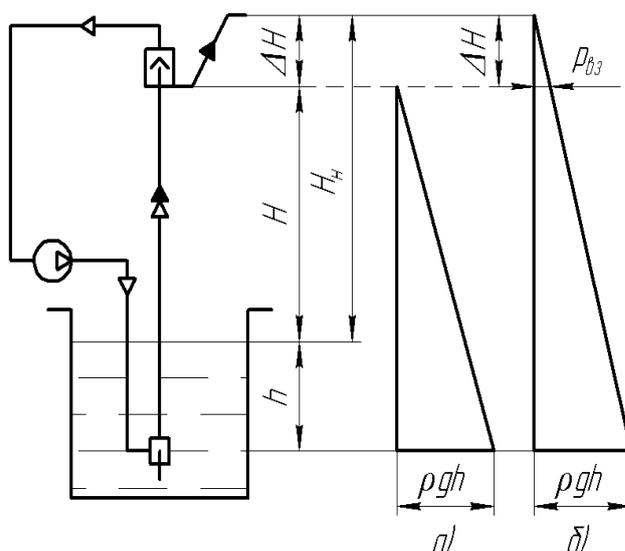


Рис. 2. Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифта традиционной технологической схемы (а) и нагнетательного эрлифта (б)

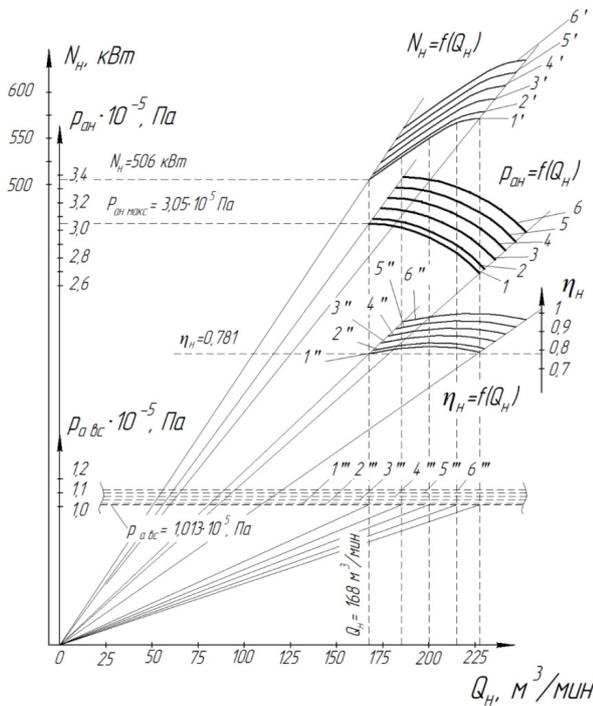


Рис. 3. Газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при абсолютных давлениях во всасывающем патрубке

$p_{a\text{вс}} = (1,013 - 1,125) \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 1 – $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 2 – $1,025 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 3 – $1,050 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 4 – $1,075 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 5 – $1,10 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 6 – $1,125 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 1-6 – $p_{a\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$; 1'-6' – $N_{\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$;
 1''-6'' – $\eta_{\text{н}} = f(Q_{\text{н}})$; 1'''-6''' – $p_{a\text{вс}} = \text{const}$

Численный анализ параметров работы нагнетательной эрлифтой установки выполним на примере давления в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке нагнетателя) $p_{a\text{вз}} = p_{a\text{вс}} = 1,125 \cdot 10^5 \text{ Па}$. В соответствии с построенными газодинамическими характеристиками нагнетателя (рис. 3) его работа при указанном давлении ($p_{a\text{вс}} = 1,125 \cdot 10^5 \text{ Па}$) характеризуется следующими параметрами: $p_{a\text{н макс}} = 3,38 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $Q_{\text{н}} = 186 \text{ м}^3/\text{мин}$; $\eta_{\text{н}} = 0,956$; $\epsilon_{\text{макс}} = 3,0$.

В соответствии с (1) и (2) максимально возможное геометрическое погружение смесителя и высота подъема эрлифта при работе по традиционной технологической схеме и относительном погружении $\alpha = 0,3$ соответственно составят: $h_{\text{макс}} = 24,1 \text{ м}$, $H = 56,3 \text{ м}$.

Избыточное давление в воздухоотделителе $p_{\text{вз}} = p_{a\text{вз}} - p_0$ позволяет обеспечить переподъем жидкости относительно входного сечения сливной трубы 3 (рис. 1) на величину ΔH (рис. 2).

Из эпюры давления в подъемной трубе нагнетательного эрлифта (рис. 2б) правомерно:

$$\frac{p_{\text{вз}}}{\rho \cdot g \cdot h} = \frac{\Delta H}{h + H + \Delta H}, \quad (6)$$

откуда:

$$\Delta H = \frac{p_{\text{вз}} \cdot (H + h)}{\rho \cdot g \cdot h - p_{\text{вз}}} = \frac{(p_{a\text{вс}} - p_0) \cdot (H + h)}{\rho \cdot g \cdot h - (p_{a\text{вс}} - p_0)} \quad (7)$$

Тогда в соответствии с (7) высота переподъема нагнетательного эрлифта при $p_{a\text{вс}} = 1,125 \cdot 10^5 \text{ Па}$:

$$\Delta H = \frac{(1,125 - 1,013) \cdot 10^5 \cdot (56,3 + 24,1)}{1000 \cdot 9,81 \cdot 24,1 - (1,125 - 1,013) \cdot 10^5} = 3,99 \text{ м.}$$

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

$$H_{\text{н}} = H + \Delta H, \quad (8)$$

что для рассматриваемого случая составит: $H_{\text{н}} = 56,3 + 3,99 = 60,3 \text{ м}$.

Относительное погружение нагнетательного эрлифта:

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{h}{H_{\text{н}} + h}. \quad (9)$$

Данная величина для нагнетательного эрлифта с $h = 24,1 \text{ м}$ и $H_{\text{н}} = 60,3 \text{ м}$ равняется $\alpha_{\text{н}} = 0,286$, а удельный расход воздуха в соответствии с (2) - $q = 12,1$.

Выражение для КПД нагнетательного эрлифта, исходя из (3), преобразуется к виду:

$$\eta_{\text{эп}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{н}}}{q \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a\text{н макс}}}{p_{a\text{вз}}}} \quad (10)$$

Тогда КПД нагнетательного эрлифта в рассматриваемых условиях в соответствии с (10) составит:

$$\eta_{\text{эп}} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 60,3}{12,1 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{3,38 \cdot 10^5}{1,125 \cdot 10^5}} = 0,440,$$

а КПД эрлифтной нагнетательной установки в соответствии с (4) - $\eta_{\text{эу}} = 0,440 \cdot 0,956 = 0,421$. Подача эрлифта согласно (5) равна: $Q_{\text{э}} = 60 \cdot 186 / 12,1 = 925 \text{ м}^3/\text{ч}$.

По изложенной методике вычислены значения параметров, характеризующих работу нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений

в воздухоотделителе $p_{a\text{вз}}=(1,013-1,125)\cdot 10^5$ Па (рис. 4). При графическом построении (рис. 4) зависимостей $\varepsilon_{\text{макс}} = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\bar{Q}_H = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\bar{h}_{\text{макс}} = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\bar{H} = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\Delta\bar{H} = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\bar{H}_H = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\alpha_H = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $q = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\eta_3 = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\eta_{3y} = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$, $\bar{Q}_3 = f(\bar{p}_{a\text{вз}})$ при вычислении безразмерных величин $\bar{p}_{a\text{вз}}$, \bar{Q}_H , $\bar{h}_{\text{макс}}$, \bar{H} , \bar{H}_H , \bar{Q}_3 в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров при работе эрлифтной установки традиционной тех-

нологической схемы, а при вычислении $\Delta\bar{H}$ – значение ΔH при $p_{a\text{вз}}=1,125\cdot 10^5$ Па.

Как следует из результатов вычислений (рис. 4) параметров работы нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 (при относительном погружении смесителя установки традиционной схемы $\alpha=0,3$), в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{a\text{вз}}=(1,013-1,125)\cdot 10^5$ Па высота подъема H_H может быть увеличена на 24,3 %, КПД эрлифта η_3 – на 12,0 %, КПД эрлифтной установки η_{3y} – на 37,1 %.

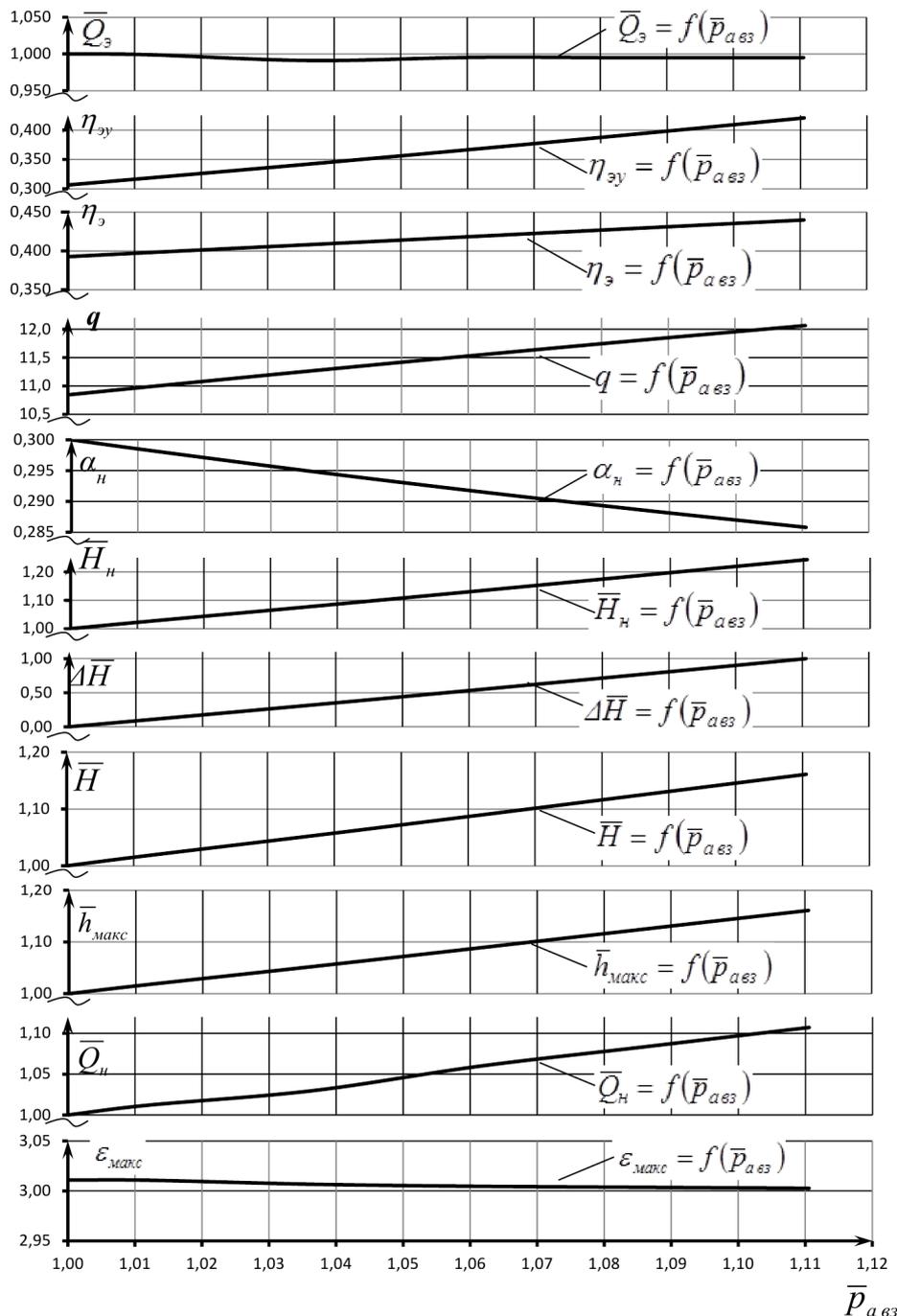


Рис. 4. Изменение безразмерных параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 при относительном погружении $\alpha=0,30$

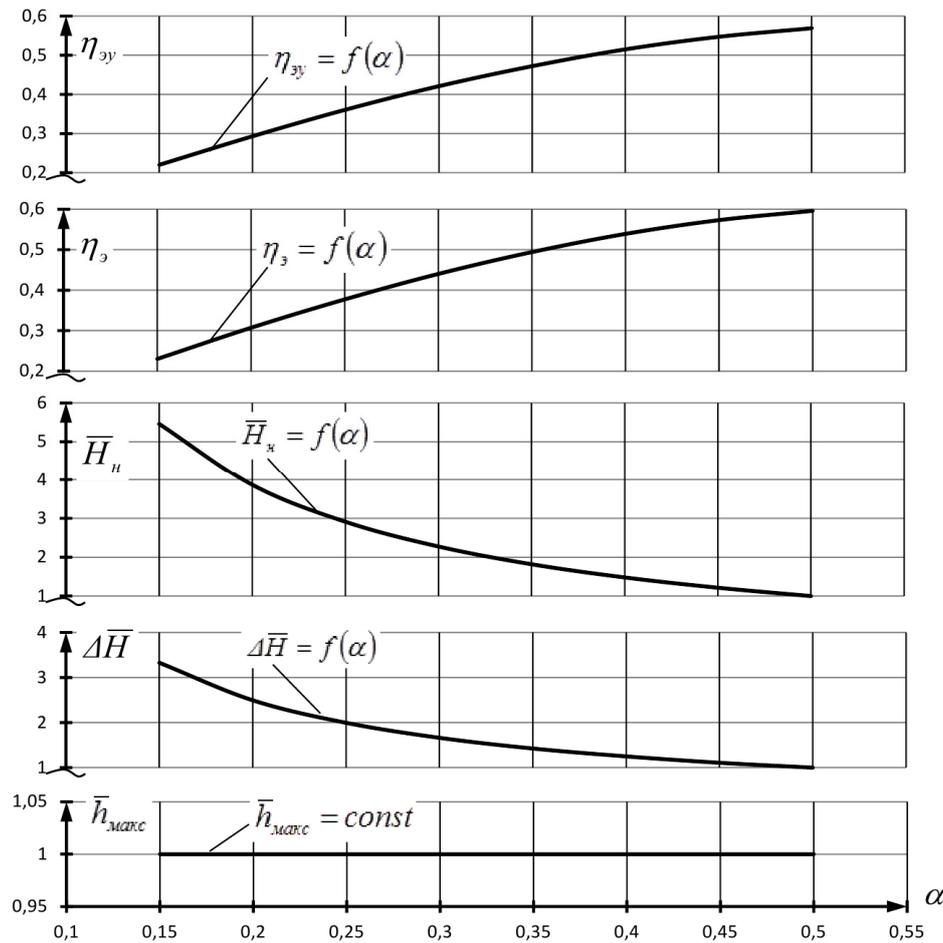


Рис. 5. Изменение безразмерных параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне относительных погружений $\alpha=0,15-0,50$

Увеличение высоты подъема нагнетательного эрлифта H_n (при $\alpha=0,3 - idem$) при росте давления в воздухоотделителе $p_{a\text{ в3}}=p_{a\text{ вс}}$ обеспечивается как увеличением максимально возможных давления нагнетателя $p_{a\text{ н макс}}$ и геометрического погружения смесителя $h_{\text{ макс}}$ в соответствии с (1), а следовательно, и высоты подъема H , так и высотой переподъема ΔH (8).

Увеличение в рассматриваемых условиях КПД эрлифта (10) η_3 и КПД эрлифтной установки $\eta_{\text{ эу}}$ объясняется большей степенью интенсивности увеличения высоты подъема H_n в сравнении с интенсивностью увеличения удельного расхода воздуха q (из-за уменьшения относительного погружения нагнетательного эрлифта α_n), а также повышением КПД нагнетателя η_n при увеличении давления воздуха во всасывающем патрубке $p_{a\text{ в3}}=p_{a\text{ вс}}$.

В рассмотренном диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе $p_{a\text{ в3}}=p_{a\text{ вс}}=(1,013-1,125)\cdot 10^5$ Па максимально возможная степень сжатия нагнетателя $\varepsilon_{\text{ макс}}$ и подача эрлифта Q , практически неизменные (рис. 4).

Анализ работы нагнетательной эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в режиме

его работы $p_{a\text{ вс}}=1,125\cdot 10^5$ Па, $p_{a\text{ н макс}}=3,38\cdot 10^5$ Па, $Q_n=186$ м³/мин при каждом из относительных погружений смесителя установки традиционной технологической схемы из диапазона $\alpha=0,15-0,5$ (рис. 5) позволил установить характер зависимостей $h_{\text{ макс}}=f(\alpha)$, $\Delta H=f(\alpha)$, $H_n=f(\alpha)$, $\eta_3=f(\alpha)$, $\eta_{\text{ эу}}=f(\alpha)$. При вычислении безразмерных величин $h_{\text{ макс}}$, ΔH , H_n в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров работы нагнетательной эрлифтной установки с относительным погружением $\alpha=h_{\text{ макс}}/(H+h_{\text{ макс}})=0,5$.

Неизменное значение максимального геометрического погружения эрлифта $h_{\text{ макс}}$ при каждом из относительных погружений смесителя $\alpha=0,15-0,5$ (рис. 5) объясняется тем, что для всех рассматриваемых вариантов работы установки принят режим работы нагнетателя с давлением $p_{a\text{ н макс}}=3,38\cdot 10^5$ Па.

Уменьшение высоты переподъема ΔH и высоты подъема H_n нагнетательного эрлифта с увеличением относительного погружения α эрлифтной установки традиционной технологической схемы (рис. 5) вызвано уменьшением высоты подъема H при неизменном геометрическом по-

гружении h_{\max} . При этом увеличение высоты подъема H_n нагнетательного эрлифта в сравнении с эрлифтом традиционной технологической схемы составляет 22,9-27,4 % в диапазоне относительных погружений $\alpha=0,15-0,5$.

Увеличение КПД нагнетательного эрлифта η , от 0,230 до 0,596 и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{\text{эу}}$ от 0,220 до 0,569 с увеличением относительного погружения α от 0,15 до 0,50 (рис. 5) обосновывается при этом большей интенсивностью уменьшения удельного расхода воздуха q в сравнении с интенсивностью уменьшения высоты подъема H_n . Увеличение КПД нагнетательного эрлифта в сравнении с КПД эрлифта традиционной технологической схемы составляет 10,6-15,1 %, а КПД нагнетательной эрлифтной установки – 35,8-40,8 % в диапазоне относительных погружений $\alpha=0,15-0,5$.

Выводы

Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа эрлифтной установки с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в нагнетательном режиме обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости (гидросмеси) на 22,9-27,4 % при увеличении КПД эрлифта на 10,6-15,1 %, а КПД эрлифтной установки – на 35,8-40,8 % в диапазоне относительных погружений $\alpha=0,15-0,5$.

Необходимо выполнить анализ работы эрлифтных установок в нагнетательном режиме при использовании в их составе других типоразмеров радиальных нагнетателей производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (г. Хабаровск, РФ), что обеспечит расширение области их применения.

Список литературы

1. Эрлифтные установки: учебное пособие // В.Г. Гейер, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, Я.К. Антонов. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.
2. Энциклопедия эрлифтов // Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
3. Кононенко, А.П. Опыт применения эрлифтных установок в технологических системах ТЭС / А.П. Кононенко, В.И. Мизерный, Л.Л. Глухман // Энергетика та електрифікація. –

2006. – №11. – С. 8-12.

4. Малеев, В.Б. Водоотлив и дегазация угольных шахт / В.Б. Малеев, В.А. Малашкина. – М.: Недра, 1995. – 208 с.
5. Малеев, В.Б. Исследование и разработка сифонно-вакуумного эрлифта для очистки шахтных водоотливных емкостей: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Малеев Виктор Борисович. – Донецк: ДПИ, 1980. – 289 с.
6. Кононенко, А.П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников / А.П. Кононенко, Т.А. Устименко // Промислова гідраліка і пневматика. – 2010. – №3(29). – С. 51-53.
7. Рис, В.Ф. Центробежные компрессорные машины. – М.-Л: Машиностроение, 1964. – 336 с.
8. Mansour, H. Effect of air injection method on the performance of airlift pump / H. Mansour, M.F. Khalil // Mansoura Eng. J. – 1990. – No.15(2). – P. 107-118.
9. Khalil, M.F. Effect of air injection method on the performance of an airlift pump / M.F. Khalil, K.A. Elshorbagy, S.Z. Kassaband, R.I. Fahmy // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 1999. – No.20. – P. 598-604.
10. Кононенко, А.П. Зоны энергетически целесообразного использования эрлифта с подводом дополнительного притока жидкости (гидросмеси) в промежуточное сечение подъемной трубы / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин, К.Ю. Кононенко // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – 2013. – Вип.1(25). – С. 88-95. (сер.: гірничо-електромеханічна).
11. Кононенко, А.П. Подача эрлифтов с блочным воздухообеспечением центробежными нагнетателями / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – 2012. – Вип.23(196). – С.110-123. (сер.: гірничо-електромеханічна).
12. Кононенко, А.П. Подача эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Наук. пр. Донецького національного технічного університету. – 2012. – Вип.2(24). – С. 118-132. (сер.: гірничо-електромеханічна).

A.P. Kononenko /Dr. Sci. (Eng.)/, R.I. Bozhko
Donetsk National Technical University (Donetsk)

SUBSTANTIATION OF THE ENERGY FEASIBILITY OF THE USE OF PRESSURE AIRLIFT INSTALLATIONS WITH RADIAL SUPERCHARGERS

Background. In airlift units of the traditional technological scheme, the movement of the liquid (slurry) is carried out after the air-purge drum pressure-free, that requires the discharge pipe bias in the direction of the ultimate consumer of the liquid (slurry) that is a certain height of the rise by airlift to the consumer. In some cases, there are restrictions on the possible lifting height of the airlift of the traditional schemes due to the limited vertical dimensions at the location of the installation (for example, limiting by the vertical dimensions of the mine workings, cluttering of the space, etc.) that precludes the use of such facilities as a hydro lift. The movement of the liquid (slurry) in the discharge pipe with the upward bias is only possible at an absolute pressure in the air-purge drum exceeding the absolute pressure at the consumer of the pumped liquid (slurry).

Materials and/or methods. To minimize the loss of energy efficiency of an airlift installation with a radial (centrifugal) supercharger as a source of pneumatic energy is possible when feeding into the suction pipe of the last partially compressed air with an overpressure, occurring in the air-purge drum. This arrangement of airlift installations will expand the scope of their application.

Results. The evaluation of the energy efficiency of the pressure airlift installation is made on the example of the use in its composition of a radial supercharger ЦНВ 200/3.0 as one of the most widely used as a source of pneumatic energy air assisted lifts. Using known methods, graphically built are the gas-dynamic characteristics of the ЦНВ 200/3.0 supercharger when the pressure in the suction pipe is within a specified range. The numerical analysis of working parameters of the airlift installation is made on the maximum, within the specified range, pressure values in the air-purge drum (in the suction pipe of the supercharger). The excess pressure in the air-purge drum allows the rise of the liquid relative to the inlet section of the drain pipe on the magnitude of ΔH .

Conclusion. It is proved that in comparison with the airlift installation of traditional technological schemes the work of an airlift installation with the ЦНВ 200/3.0 supercharger in the discharge mode provides an increase in rising height of the liquid (slurry) of 22.9 to 27.4 percent by increasing the efficiency of the airlift by 10.6-15.1 %, and the efficiency of the airlift installation – by 35.8-40.8 % in the range of relative dives $\alpha=0.15-0.5$.

Keywords: pressure airlift, radial supercharger, rising height, energy efficiency.

Сведения об авторах

А.П. Кононенко

SPIN-код: 3828-6755
Телефон: +380 (95) 251-25-52
Эл. почта: ap.kononenko@ukr.net

Р.И. Божко

SPIN-код: 2510-2591
Телефон: +380 (50) 897-20-92
Эл. почта: bozhko342@mail.ru

Статья поступила 11.04.2017 г.

© А.П. Кононенко, Р.И. Божко, 2017

Рецензент д.т.н., проф. В.П. Кондрахин



Новинки Изд-ва «Донецкая политехника»

Заметки по некоторым разделам линейной алгебры и аналитической геометрии: монография / Л.П. Мироненко. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2016. – 306 с.: ил., табл. ISBN 978-966-8248-79-5

Представлены альтернативные пути решения многих классических задач линейной алгебры и аналитической геометрии. Основное внимание уделяется вопросам, которые, по мнению автора, недостаточно освещены в учебной литературе.

Особое внимание уделено теории кривых третьего порядка. Рассматривается проблема Великой теоремы Ферма. Материал монографии носит оригинальный характер и отсутствует в отечественной литературе.