

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИАЛЬНЫХ НАГНЕТАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ ЭРЛИФТНЫХ УСТАНОВОК

Уточнены особенности рабочего процесса и энергоэффективность работы нагнетательных эрлифтных установок при использовании в качестве источников пневмоэнергии ряда серийно производимых радиальных нагнетателей. Приведено аналитическое обоснование возможного увеличения рабочих параметров (геометрических погружений смесителей, высот подъема и подачи) нагнетательных эрлифтных установок в сравнении с эрлифтными установками традиционной конструкции.

Ключевые слова: радиальный нагнетатель, эрлифт, высота подъема, подача, энергоэффективность.

Постановка проблемы

В эрлифтах традиционной технологической схемы предусматривается безнапорное (самотечное) транспортирование жидкости (гидросмеси) от данного средства подъема к потребителю. В случае если геодезическая отметка потребителя перекачиваемой жидкости (гидросмеси) превышает максимально возможную отметку центра тяжести сечения выходного отверстия воздухоотделителя традиционного эрлифта, применение последнего становится невозможным.

Нагнетательные эрлифтные установки, обеспечивающие напорное транспортирование жидкостей (гидросмесей) от воздухоотделителя по назначению, расширяют рациональную область применения газожидкостных подъемников.

Для реализации такого способа работы эрлифта необходимо обеспечивать требуемое избыточное давление в воздухоотделителе, что, однако, при традиционной схеме установки приводит к ощутимому снижению энергоэффективности его рабочего процесса. Сохранить (а зачастую и повысить) энергетическую эффективность работы нагнетательной эрлифтной установки в сравнении с традиционной возможно утилизацией энергии частично сжатого воздуха, подавая его из воздухоотделителя во всасывающий патрубок радиального нагнетателя (именно такой тип нагнетателей наиболее часто используется в качестве источников пневмоэнергии для эрлифтов).

Однако, в зависимости от индивидуальных газодинамических (расходных, энергетических) характеристик радиальных нагнетателей, утилизация энергии частично сжатого воздуха, подаваемого во всасывающий патрубок нагнетателя, для радиальных машин различного типоразмера в итоге приводит к различной степени увеличе-

ния энергоэффективности работы всей нагнетательной эрлифтной установки в сравнении с эквивалентной установкой традиционной схемы.

Поэтому установление технико-экономической целесообразности применения серийно производимых радиальных нагнетателей в качестве источников пневмоэнергии для нагнетательных эрлифтов является актуальной научной задачей, имеющей существенное практическое приложение.

Анализ последних исследований и публикаций

Обоснование энергетической целесообразности и областей применения нагнетательных эрлифтных установок выполнено в [1,2]. Однако в указанных работах анализ эффективности работы нагнетательной эрлифтной установки выполнен, как пример, только при использовании в качестве источника пневмоэнергии нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (серийное производство ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, РФ). В то же время для пневмоснабжения общепромышленных эрлифтов приемлемо использование достаточно широкого ряда радиальных нагнетателей [3], целесообразность применения которых в составе нагнетательных установок требует доказательства.

В [1] анализ энергоэффективности рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки выполнен с рядом допущений (например, о плотности аэрогидросмеси в подъемной трубе эрлифта, методике построения семейства газодинамических характеристик радиального нагнетателя при различных давлениях всасываемого воздуха и др.), что также требует уточнения.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является уточнение особенностей рабочего процесса и энергоэффективности работы нагнетательных эрлифтных установок при использовании в качестве источников пневмоэнергии ряда серийно производимых радиальных нагнетателей.

Основной материал исследования

В составе общепромышленных нагнетательных эрлифтных установок, исходя из технических параметров и газодинамических характеристик, возможно использование следующих серийно производимых воздушных нагнетателей, которые условно могут быть разделены на три классификационные группы – с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_n=(1,29...1,62) \cdot 10^5$ Па (1,32...1,65 кгс/см²) и производительностью $Q_n=0,667...4,33$ м³/с (40...260 м³/мин) (ЦНВ 60/1,4; ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,4; ЦНВ 100/1,6; ЦНВ 160/1,4; ЦНВ 160/1,6; ЦНВ 200/1,4; ЦНВ 200/1,6), с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_n=(1,54...2,43) \cdot 10^5$ Па (1,57...2,48 кгс/см²) и производительностью $Q_n=1,92...14,8$ м³/с (115...890 м³/мин) (ЦНВ 280/2,1; 360-21-1; 360-22-1; ЦНВ 750/2) и с абсолютным давлением сжатого воздуха $p_n=(2,68...3,43) \cdot 10^5$ Па (2,73...3,50 кгс/см²) и производительностью $Q_n=1,25...3,77$ м³/с (75...226 м³/мин) (ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 130/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3,0) [3]. Все перечисленные нагнетатели производятся ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования».

Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки предполагает подвод частично сжатого воздуха от воздухоотделителя эрлифта во всасывающий патрубок нагнетателя (рис. 1).

Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифтов традиционной, нагнетательной и эквивалентных схем установок позволяют обосновать правомерность принятой методики сравнения энергетической эффективности работы рассматриваемых газожидкостных подъемников (рис. 2).

Изменение газодинамических характеристик радиального нагнетателя при изменении давления всасываемого воздуха приведено на примере нагнетателя ЦНВ 200/3,0 (рис. 3).

Подробные описания схемы и работы нагнетательной эрлифтной установки (рис. 1), особенностей эпюр давления в подъемных трубах эрлифтов (рис. 2) и построения газодинамических характеристик радиальных нагнетателей при изменении давления всасываемого воздуха (на примере нагнетателя ЦНВ 200/3,0) приведены в [1,2].

В названии рис. 2 α_0 , $\alpha_{эп}$ и $\alpha_{эп}$ – относительные погружения смесителя эрлифта соответствующей технологической схемы.

Используя методику аналитического анализа параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки, изложенную в [2] на примере применения в качестве источника пневмоэнергии радиального нагнетателя ЦНВ 200/3,0, выполнены аналогичные расчеты для нагнетательных установок с нагнетателями ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,6; 360-22-1; ЦНВ 80/3,2, представляющими все три выше приведенные классификационные группы нагнетательных машин.

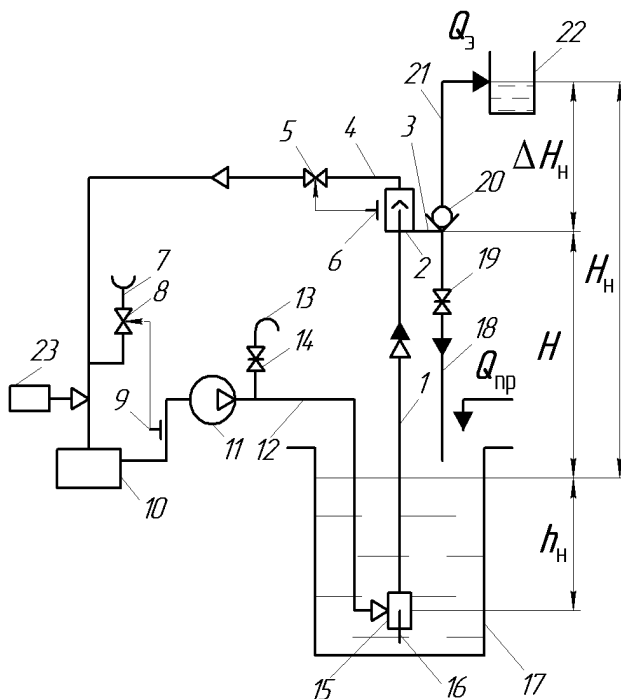


Рис. 1. Принципиальная схема нагнетательной эрлифтной установки:
 1 – подъемная труба; 2 – воздухоотделитель;
 3 – сливная труба; 4 – воздухоотводящая труба;
 5, 8 – регулирующие клапаны;
 6 – датчик уровня; 7 – патрубок;
 9 – датчик давления; 10 – влагоотделитель;
 11 – радиальный нагнетатель;
 12 – 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;
 23 – дополнительный источник сжатого воздуха,
 h_n – глубина погружения смесителя;
 H – высота подъема; ΔH_n – высота переподъема;
 H_n – высота подъема нагнетательного эрлифта

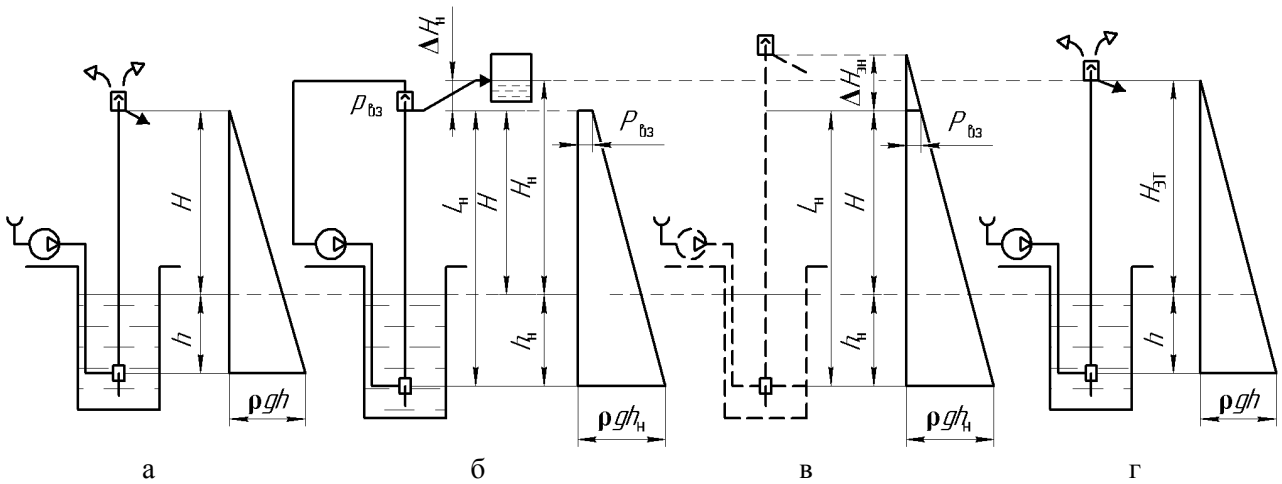


Рис. 2. Эпюры давлений в подъемных трубах эрлифта:
 а – традиционной технологической схемы, α_0 ; б – нагнетательного эрлифта;
 в – эквивалентного нагнетательного эрлифта, $\alpha_{эн}$; г – эквивалентного традиционного эрлифта, $\alpha_{эт}$

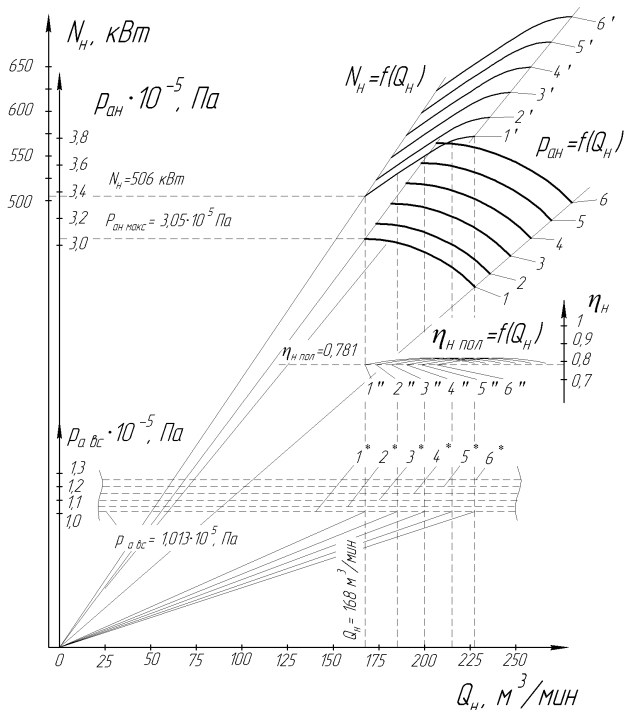


Рис. 3. Газодинамические характеристики нагнетателя ЦНВ 200/3,0 при абсолютных давлениях во всасывающем патрубке

- $p_{a\text{ вс}} = (1,013 \dots 1,250) \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 1 – $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 2 – $1,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 3 – $1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 4 – $1,15 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 5 – $1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$;
 6 – $1,25 \cdot 10^5 \text{ Па}$; 1'...6' – $p_{aн} = f(Q_n)$;
 1''...6'' – $N_n = f(Q_n)$, 1'''...6''' – $\eta_n = f(Q_n)$;
 1*...6* – линии постоянного абсолютного давления $p_{a\text{ вс}}$

В данной работе алгоритм определения значимых параметров рабочего процесса нагнетательной эрлифтной установки также приведен на примере использования в качестве источника пневмоэнергии нагнетателя ЦНВ 200/3,0.

Значения параметров нагнетателя ЦНВ

200/3,0 в диапазоне давлений во всасывающем патрубке $p_{a\text{ вс}} = (1,013 \dots 1,250) \cdot 10^5 \text{ Па}$ (табл. 1) определены по газодинамическим характеристикам (рис. 3), а именно: $p_{aн\text{ макс}}$ – максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха; $\epsilon_{\text{макс}} = p_{aн\text{ макс}} / p_0$ – максимально возможная степень сжатия нагнетателя ($p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – атмосферное давление); Q_n, η_n – соответственно производительность и КПД нагнетателя.

Значения параметров эрлифтной установки (традиционной конструкции и нагнетательной) определены с использованием ниже приведенных зависимостей [4...9], обоснование правомерности применения которых приведены в [2].

Возможное геометрическое погружение нагнетательного эрлифта:

$$h_n = \frac{p_{aн\text{ макс}} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (1)$$

где ρ – плотность транспортируемой жидкости (гидросмеси) (как пример, расчеты выполнены для случая транспортирования воды, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$); g – ускорение свободного падения.

При использовании в составе эрлифтной установки нагнетателя ЦНВ 200/3,0 и значений $p_{aн\text{ макс}} = 3,050 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ($p_{a\text{ вс}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$) геометрические погружения смесителей эрлифтов традиционной технологической схемы и нагнетательного равны между собой $h = h_n = 20,8 \text{ м}$ (рис. 2, табл. 1).

Высота подъема эрлифта (рис. 2а):

$$H = \frac{h(1 - \alpha_0)}{\alpha_0}. \quad (2)$$

Высота переподъема эрлифта:

– нагнетательного (рис. 2б):

$$\Delta H_n = \frac{p_{a\text{вз}} - p_0}{\rho \cdot g}, \quad (3)$$

где $p_{a\text{вз}}$ – абсолютное давление в воздухоотделителе;

– эквивалентного нагнетательного (рис. 2в) [2]:

$$\Delta H_{\text{эн}} = \frac{L_n \cdot p_{\text{вз}}}{\rho \cdot g \cdot h_n - p_{\text{вз}}}, \quad (4)$$

где $L_n = h_n + H$ – длина подъемной трубы нагнетательного эрлифта (рис. 2); $p_{\text{вз}}$ – избыточное давление в воздухоотделителе, $p_{\text{вз}} = p_{a\text{вз}} - p_0$.

Высота подъема нагнетательного эрлифта (рис. 2б):

$$H_n = H + \Delta H_n. \quad (5)$$

Относительное погружение смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта (рис. 2в):

$$\alpha_{\text{эн}} = \frac{h_n}{L_n + \Delta H_n}, \quad (6)$$

где h_n – геометрическое погружение смесителя нагнетательного эрлифта ($h_n > h$).

КПД нагнетательного эрлифта (рис. 2б):

$$\eta_{\text{эн}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_n}{q_n \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a\text{н макс}}}{p_{a\text{вз}}}}. \quad (7)$$

Высота подъема эквивалентного традиционного эрлифта (рис. 2г):

$$H_{\text{эм}} = H_n = H + \Delta H_n. \quad (8)$$

Относительное погружение эквивалентного традиционного эрлифта (рис. 2г):

$$\alpha_{\text{эм}} = \frac{h}{H_{\text{эм}} + h}, \quad (9)$$

где $h = 20,8$ м для всех значений $H_{\text{эм}}$.

КПД эквивалентного традиционного эрлифта (рис. 2г):

$$\eta_{\text{эм}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H_{\text{эм}}}{q_{\text{эм}} \cdot p_0 \cdot \ln \frac{p_{a\text{н макс}}}{p_0}}. \quad (10)$$

В (10) значение давления $p_{a\text{н макс}}$ неизменно и равно $3,05 \cdot 10^5$ Па.

Удельный расход воздуха:

$$q = 0,767 \cdot \alpha^{-2,2}, \quad (11)$$

подача эрлифта:

$$Q_3 = \frac{Q_6}{q} \quad (12)$$

и КПД эрлифтной установки:

$$\eta_{\text{эу}} = \eta_{\text{э}} \cdot \eta_n \quad (13)$$

определяются по приведенным зависимостям [4,9] как для нагнетательного эрлифта, так и для эрлифта традиционной конструкции при соответствующих значениях α , q , Q_3 , $\eta_{\text{э}}$.

Вычисления были проведены по зависимостям (1)...(13) в диапазоне значений относительных погружений смесителя $\alpha_0 = 0,15 \dots 0,90$ ($\Delta\alpha_0 = 0,05$). Как пример – результаты вычислений при начальном относительном погружении $\alpha_0 = 0,3$ приведены в табл. 1.

Рекомендуемое относительное погружение эрлифтов традиционной конструкции составляет $0,15 \leq \alpha < 1$ [4...6].

Повышение давления в воздухоотделителе (во всасывающей патрубке нагнетателя ЦНВ 200/3,0) от атмосферного ($p_{a\text{вз}} = p_{a\text{вс}} = 1,013 \cdot 10^5$ Па) до избыточного ($p_{a\text{вз}} = p_{a\text{вс}} = 1,250 \cdot 10^5$ Па) обеспечивает увеличение относительного погружения смесителя эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{\text{эн}} = 0,300$ до $\alpha_{\text{эн}} = 0,335$ при уменьшении относительного погружения смесителя эквивалентного традиционного эрлифта от $\alpha_{\text{эм}} = 0,300$ до $\alpha_{\text{эм}} = 0,290$ при относительном погружении смесителя эрлифта традиционной технологической схемы $\alpha_0 = 0,3$ табл. 1, рис. 4, 5).

Объясняется это преимущественным влиянием на величину $\alpha_{\text{эн}}$ (6) интенсивности увеличения возможного геометрического погружения h_n (1), (табл. 1) нагнетательного эрлифта и интенсивности влияния на величину $\alpha_{\text{эм}}$ (9) увеличения высоты подъема $H_{\text{эм}}$ при постоянном значении h эквивалентного традиционного эрлифта в условиях роста давления в воздухоотделителе в диапазоне $p_{a\text{вз}} = (1,013 \dots 1,250) \cdot 10^5$ Па.

Табл. 1. Результаты расчета параметров работы нагнетательного и традиционного эрлифтов с нагнетателем ЦНВ 200/3,0 в диапазоне абсолютных давлений во всасывающем патрубке нагнетателя $p_{a\text{ в с}}=(1,013\dots 1,250)\cdot 10^5$ Па при $\alpha_0=0,3$

$p_{a\text{ в с}}\cdot 10^{-5}$, Па	1,013	1,050	1,100	1,150	1,200	1,250
$p_{a\text{ н макс}}\cdot 10^{-5}$, Па	3,050	3,163	3,313	3,464	3,614	3,765
ε	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01	3,01
Q_n , м ³ /мин (м ³ /с)	168 (2,80)	174 (2,90)	183 (3,05)	191 (3,18)	199 (3,32)	208 (3,47)
η_n	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781	0,781
h_n , м	20,8	21,9	23,4	25,0	26,5	28,1
H , м	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5	48,5
ΔH_n , м	0,00	0,38	0,89	1,40	1,91	2,42
$\Delta H_{э н}$, м	0,00	1,23	2,83	4,35	5,81	7,21
$H_n=H_{э м}$, м	48,5	48,8	49,3	49,8	50,4	50,9
$\alpha_{э н}$	0,300	0,306	0,314	0,321	0,328	0,335
$q_{э н}$	10,8	10,4	9,82	9,33	8,89	8,50
$\eta_{э н}$	0,393	0,413	0,441	0,469	0,497	0,526
$\eta_{э н н}$	0,307	0,323	0,345	0,366	0,388	0,411
$Q_{э н}$, м ³ /ч (м ³ /с)	930 (0,258)	1008 (0,280)	1115 (0,310)	1228 (0,341)	1314 (0,373)	1465 (0,407)
$\alpha_{э м}$	0,300	0,299	0,297	0,294	0,292	0,290
$q_{э м}$	10,8	10,9	11,1	11,3	11,5	11,7
$\eta_{э м}$	0,394	0,392	0,390	0,388	0,385	0,383
$\eta_{э м н}$	0,307	0,306	0,304	0,303	0,301	0,299
$Q_{э м}$, м ³ /ч (м ³ /с)	930 (0,258)	921 (0,256)	906 (0,252)	892 (0,248)	878 (0,244)	864 (0,240)

Изложенная аналитическая методика исследования параметров рабочего процесса эрлифтных установок позволила получить зависимости КПД нагнетательного (7) и эквивалентного традиционного (10) эрлифтов от начального относительного погружения смесителя α_0 (источник пневмоэнергии ЦНВ 200/3,0, давление во всасывающем патрубке $p_{a\text{ в с}}=1,25\cdot 10^5$ Па) (рис. 6).

Уравнения регрессии также правомерны при использовании в составе эрлифтных установок нагнетателя ЦНВ 200/3,0 и давлении во всасывающем патрубке $p_{a\text{ в с}}=1,25\cdot 10^5$ Па:

$$\eta_{э м} = -0,0447 + 1,86\alpha_0 - 1,13\alpha_0^2 - 0,701\alpha_0^3, \quad (14)$$

$$\eta_{э н} = -0,0649 + 2,37\alpha_0 - 1,53\alpha_0^2 - 0,782\alpha_0^3. \quad (15)$$

Адекватность уравнений (14), (15) подтверждена с использованием критерия Фишера [10]. Уравнения, аналогичные (14) и (15), позволили получить зависимости относительного КПД нагнетательного эрлифта от начального относительного погружения смесителя $\bar{\eta}_{э н} = f(\alpha_0)$ ($\bar{\eta}_{э н} = \eta_{э н} / \eta_{э м}$) для эрлифтных установок, в составе которых в качестве источников пневмоэнергии используются нагнетатели ЦНВ 60/1,6, ЦНВ 100/1,6, 360-22-1 и ЦНВ 80/3,2 (рис. 7).

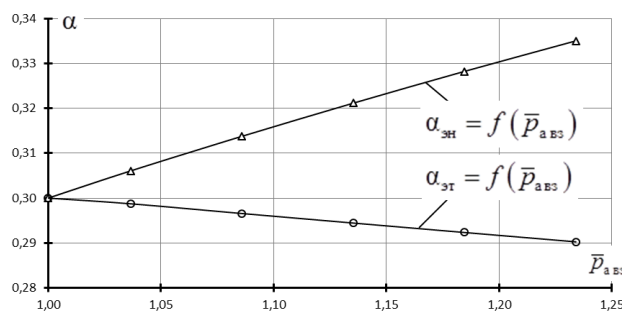


Рис. 4. Зависимости относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе ($\bar{p}_{a\text{ в с}} = p_{a\text{ в с}} / p_0$) при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и $\alpha_0=0,3$

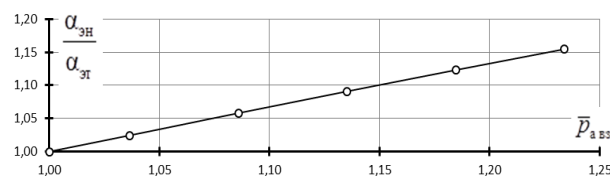


Рис. 5. Зависимость отношения относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от относительного давления в воздухоотделителе $\alpha_{э н} / \alpha_{э м} = f(\bar{p}_{a\text{ в с}})$ ($\bar{p}_{a\text{ в с}} = p_{a\text{ в с}} / p_0$) при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 и $\alpha_0=0,3$

Таким образом, энергоэффективность работы нагнетательного эрлифта в сравнении с традиционным увеличивается для всего ряда приведенных радиальных нагнетателей во всем исследуемом диапазоне начальных относительных погружений смесителя ($0,15 \leq \alpha_0 \leq 0,90$). Так, при $0,15 \leq \alpha_0 \leq 0,80$ наблюдается увеличение энергоэффективности применения нагнетательного эрлифта на 21,9...25,3 %, а при $\alpha_0 > 0,8$ имеет место более интенсивное возрастание энергоэффективности его работы: с нагнетателем ЦНВ 60/1,6 – 26,1 %; ЦНВ 100/1,6 – 29,9 %; 360-22-1 – 25,0 %; ЦНВ 80/3,2 – 25,4 % и ЦНВ 200/3,0 – 27,3 %.

Зависимости относительного КПД нагнетательного эрлифта от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{\eta}_{эн} = f(\bar{p}_{а\ вэ})$ ($\bar{p}_{а\ вэ} = p_{а\ вэ}/p_0$) позволили установить, что максимальные значения относительного КПД при граничном значении $\bar{p}_{а\ вэ} = 1,234$ достигают: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,27; ЦНВ 100/1,6 – 1,28; 360-22-1 – 1,33; ЦНВ 80/3,2 – 1,34 и ЦНВ 200/3,0 – 1,34 (рис. 8).

Получены также зависимости относительной высоты подъема $\bar{H}_{эн} = f(\bar{p}_{а\ вэ})$ ($\bar{H}_{эн} = H_n / H$) (рис. 9) и относительной подачи $\bar{Q}_{эн} = f(\bar{p}_{а\ вэ})$ ($\bar{Q}_{эн} = Q_{эн} / Q_{эм}$) (рис. 10) нагнетательного эрлифта от относительного давления в воздухоотделителе.

Из полученных результатов следует, что максимальные значения относительных высот подъема нагнетательных эрлифтов при граничном значении $\bar{p}_{а\ вэ} = 1,234$ достигают: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,17; ЦНВ 100/1,6 – 1,16; 360-22-1 – 1,07; ЦНВ 80/3,2 – 1,04 и ЦНВ 200/3,0 – 1,05.

Увеличение высоты подъема нагнетательного эрлифта $H_n = H + \Delta H_n$ (рис. 2б) при росте давления в воздухоотделителе $p_{а\ вэ}$ обеспечивается увеличением высоты переподъема нагнетательного эрлифта ΔH_n , которая соответствует значению гидростатического давления в воздухоотделителе.

Максимальные значения относительных подач нагнетательных эрлифтов составляют: при использовании нагнетателя ЦНВ 60/1,6 – 1,34; ЦНВ 100/1,6 – 1,37; 360-22-1 – 1,54; ЦНВ 80/3,2 – 1,59 и ЦНВ 200/3,0 – 1,58.

Увеличение энергоэффективности работы нагнетательного эрлифта в сравнении с эрлифтом традиционной конструкции (рис. 6...10) объясняется особенностью зависимостей $\alpha_{эн} = f(\bar{p}_{а\ вэ})$, $\alpha_{эм} = f(\bar{p}_{а\ вэ})$ (рис. 4...5). Вид данных зависимостей, указывающих на превышение относительно погружения эквивалентного нагнетательного

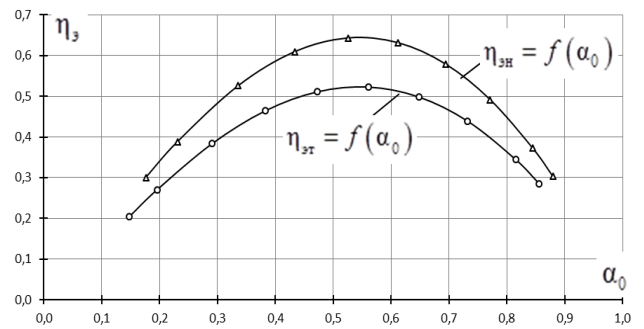


Рис. 6. Зависимости КПД нагнетательного $\eta_{эн} = f(\alpha_0)$ и эквивалентного традиционного $\eta_{эм} = f(\alpha_0)$ эрлифтов от начального относительного погружения смесителя, источник пневмоэнергии ЦНВ 200/3,0, давление во всасывающей патрубке $p_{а\ вэ} = 1,25 \cdot 10^5$ Па

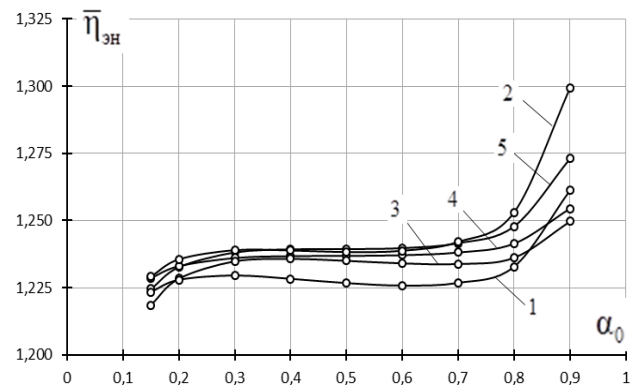


Рис. 7. Зависимости относительных КПД нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: 1 – ЦНВ 60/1,6; 2 – ЦНВ 100/1,6; 3 – 360-22-1; 4 – ЦНВ 80/3,2; 5 – ЦНВ 200/3,0, от начального относительного погружения смесителя $\bar{\eta}_{эн} = f(\alpha_0)$.

Для всех вариантов эрлифтных установок принято $p_{а\ вэ} = 1,25 \cdot 10^5$ Па

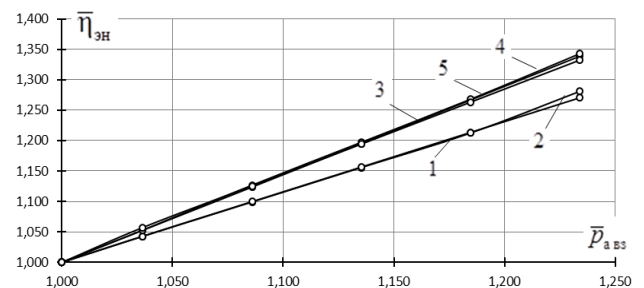


Рис. 8. Зависимости относительных КПД нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: 1 – с ЦНВ 60/1,6; 2 – с ЦНВ 100/1,6; 3 – с 360-22-1; 4 – с ЦНВ 80/3,2; 5 – с ЦНВ 200/3,0, от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{\eta}_{эн} = f(\bar{p}_{а\ вэ})$ при $\alpha_0 = 0,3$

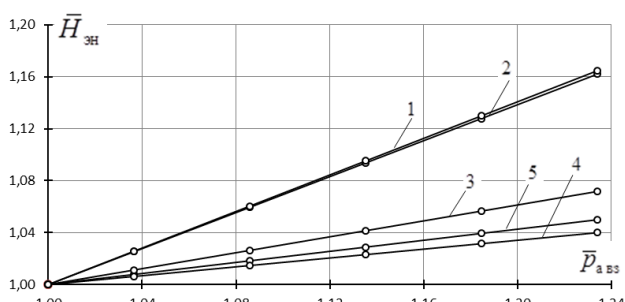


Рис. 9. Зависимости относительных высот подъема нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: 1 – с ЦНВ 60/1,6; 2 – с ЦНВ 100/1,6; 3 – с 360-22-1; 4 – с ЦНВ 80/3,2; 5 – с ЦНВ 200/3,0, от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{H}_{эп} = f(\bar{p}_{а вэ})$ при $\alpha_0=0,3$

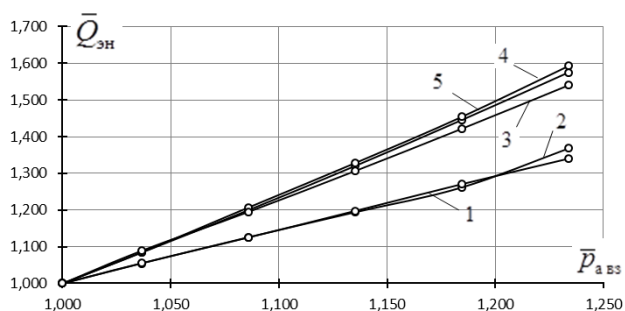


Рис. 10. Зависимости относительных подач нагнетательных эрлифтов с радиальными нагнетателями: 1 – с ЦНВ 60/1,6; 2 – с ЦНВ 100/1,6; 3 – с 360-22-1; 4 – с ЦНВ 80/3,2; 5 – с ЦНВ 200/3,0, от относительного давления в воздухоотделителе $\bar{Q}_{эп} = f(\bar{p}_{а вэ})$ при $\alpha_0=0,3$

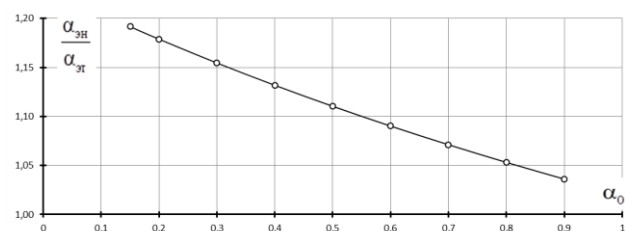


Рис. 11. Зависимость отношения относительных погружений эквивалентных нагнетательного и традиционного эрлифтов от начального относительного погружения смесителя при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3 с $\bar{p}_{а вэ} = 1,234$

эрлифта $\alpha_{эп}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эп}$ в рассмотренном диапазоне значений $\bar{p}_{а вэ}$, характерен для всех нагнетателей ЦНВ 60/1,6, ЦНВ 100/1,6, ЦНВ 200/3,0, 360-22-1, ЦНВ 80/3,2, принятых к анализу.

Однако кривая превышения относительного

погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эп}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эп}$ монотонно убывает при увеличении начального относительного погружения эрлифтов α_0 . ($\alpha_{эп}/\alpha_{эп}=1,192$ при $\alpha_0=0,15$; $\alpha_{эп}/\alpha_{эп}=1,036$ при $\alpha_0=0,90$) (рис. 11).

Превышение относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{эп}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{эп}$ (увеличение энергоэффективности) объясняется значительным увеличением глубины погружения $h_{н}$ (на 35,1 %) и увеличением высоты подъема H_m на величину ΔH_n (на 5 %) (рис. 2б) при увеличении относительного давления в воздухоотделителе до величины $\bar{p}_{а вэ} = 1,234$ (при использовании в составе установки нагнетателя ЦНВ 200/3).

Используемая аналитическая методика анализа параметров позволила построить диаграмму максимальных значений: КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{эп}$, КПД нагнетательного эрлифта $\eta_{эп}$, КПД эквивалентной традиционной эрлифтной установки $\eta_{эп}$ и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{эп}$ для ряда радиальных нагнетателей (рис. 12). Построена также диаграмма относительных значений КПД $\bar{\eta}_{эп}$, относительных подач $\bar{Q}_{эп}$ и относительных высот подъема $\bar{H}_{эп}$ нагнетательного эрлифта (при $\alpha_0=0,3$), максимальных относительных значений КПД нагнетательного эрлифта $\bar{\eta}_{эп макс}$ для данного ряда нагнетателей (рис. 13).

При вычислении безразмерных величин $\bar{\eta}_{эп}$ и $\bar{Q}_{эп}$ в качестве базовых принимались значения соответствующих параметров работы эквивалентной схемы традиционного эрлифта (рис. 2г).

Максимальное значение КПД эквивалентного традиционного эрлифта с рассматриваемым рядом нагнетателей находится в диапазоне $0,369 \leq \eta_{эп} \leq 0,571$, КПД нагнетательного эрлифта – в диапазоне $0,452 \leq \eta_{эп} \leq 0,706$, КПД эквивалентной эрлифтной установки традиционной конструкции – в диапазоне $0,295 \leq \eta_{эп} \leq 0,482$, КПД нагнетательной эрлифтной установки – в диапазоне $0,362 \leq \eta_{эп} \leq 0,596$ (рис. 12).

Из диаграммы (рис. 13) следует, что при использовании рассматриваемого ряда нагнетателей в составе нагнетательных эрлифтных установок значения относительного КПД находятся в диапазоне $1,23 \geq \bar{\eta}_{эп} \leq 1,24$, максимального относительного КПД – в диапазоне $1,25 \geq \bar{\eta}_{эп макс} \leq 1,30$, значения относительной подачи – в диапазоне $1,23 \leq \bar{Q}_{эп} \leq 1,24$, значения относительной высоты подъема – в диапазоне $1,04 \leq \bar{H}_{эп} \leq 1,17$.

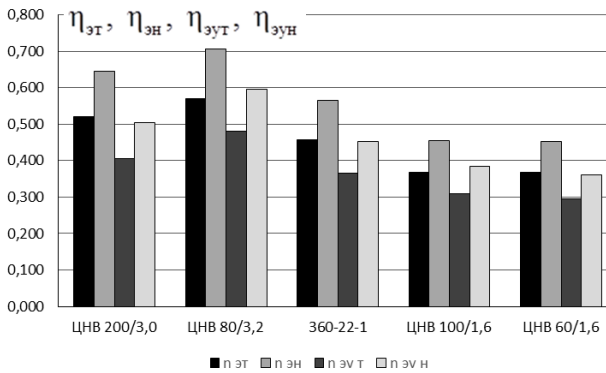


Рис. 12. Диаграмма максимальных значений КПД эквивалентного традиционного эрлифта $\eta_{ЭТ}$, КПД нагнетательного эрлифта $\eta_{ЭН}$, КПД эквивалентной традиционной эрлифтной установки $\eta_{ЭУТ}$ и КПД нагнетательной эрлифтной установки $\eta_{ЭУН}$ для ряда радиальных нагнетателей

Увеличение подачи нагнетательного эрлифта $Q_{ЭН}$ в сравнении с подачей эрлифта традиционной конструкции $Q_{ЭТ}$ объясняется превышением относительного погружения эквивалентного нагнетательного эрлифта $\alpha_{ЭН}$ над относительным погружением эквивалентного традиционного эрлифта $\alpha_{ЭТ}$ при повышенном давлении в воздухоотделителе (рис. 5) при прочих равных условиях.

Результаты анализа работы эрлифтных уста-

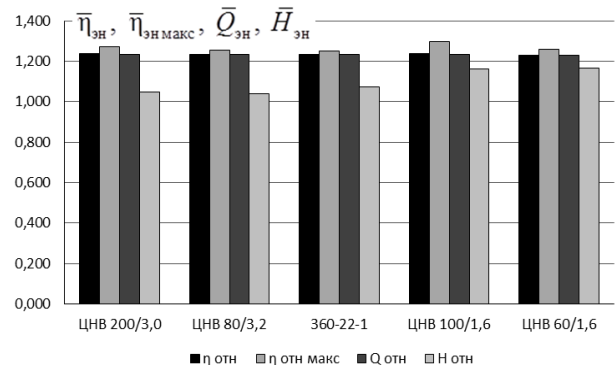


Рис. 13. Диаграмма относительных значений КПД, максимальных относительных значений КПД, относительных подач и относительных высот подъема нагнетательного эрлифта для ряда радиальных нагнетателей

новок [4,9,11...13] традиционной и нагнетательной конструкций при использовании в качестве источников пневмоэнергии рассматриваемого ряда радиальных нагнетателей позволили установить условия максимальной энергоэффективности работы таких установок при максимально возможных значениях высоты подъема H , подачи эрлифта Q и геометрического погружения смесителя h (табл. 2).

Табл. 2. Параметры традиционной и нагнетательной эрлифтных установок при абсолютном давлении во всасывающем патрубке радиального нагнетателя $p_{a\text{ в с}}=1,250 \cdot 10^5$ Па

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя					
		ЦНВ 60/1,6	ЦНВ 100/1,6	360-22-1	ЦНВ 80/3,2	ЦНВ 200/3	
Максимально возможное абсолютное давление сжатого воздуха $p_{a\text{ н макс}} \cdot 10^{-5}$	Па	2,01	2,03	3,01	4,39	3,77	
Производительность нагнетателя Q_n	м ³ /мин (м ³ /с)	69,4 (1,16)	110 (1,83)	322 (5,37)	101 (1,68)	208 (3,47)	
Максимально возможное геометрическое погружение смесителя нагнетательного эрлифта $h_{\text{ макс}}$	м	10,2	10,4	20,4	34,4	28,1	
Относительное погружение эрлифта $\alpha_{ЭН}$ (при $\alpha_0=0,3$)	—	0,312	0,315	0,332	0,337	0,335	
Высота подъема нагнетательного эрлифта $H_n=H+\Delta H_n$	м	17,1	17,3	36,1	63,0	50,9	
КПД эрлифта η (при $\alpha_0=0,3$)	—	традиционной конструкции $\eta_{ЭТ}$	0,276	0,276	0,344	0,431	0,394
		нагнетательного эрлифта $\eta_{ЭН}$	0,350	0,354	0,458	0,578	0,526
КПД эрлифтной установки $\eta_{ЭУ}$ (при $\alpha_0=0,3$):	—	традиционной конструкции $\eta_{ЭУТ}$	0,220	0,234	0,275	0,363	0,307
		нагнетательного эрлифта $\eta_{ЭУН}$	0,280	0,299	0,367	0,488	0,411
Подача эрлифта Q (при $\alpha_0=0,3$):	м ³ /ч (м ³ /с)	традиционной конструкции $Q_{ЭТ}$	312 (0,0867)	494 (0,137)	1444 (0,401)	454 (0,126)	932 (0,259)
		нагнетательного эрлифта $Q_{ЭН}$	418 (0,116)	675 (0,188)	2225 (0,618)	723 (0,201)	1465 (0,407)

Выводы

Выполнен подробный анализ работы эрлифтных установок в нагнетательном режиме при использовании в их составе пяти видах радиальных нагнетателей: ЦНВ 60/1,6; ЦНВ 100/1,6; 360-22-1; ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 200/3 производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», г. Хабаровск, Российская Федерация, что обеспечивает расширение области применения эрлифтных установок.

Вычислены значения параметров, характеризующих работу нагнетательной эрлифтной установки с приведенным рядом нагнетателей в диапазоне абсолютных давлений в воздухоотделителе (во всасывающем патрубке нагнетателя) $p_{a\text{вз}}=(1,013\dots1,250)\cdot 10^5$ Па и диапазоне начальных относительных погружений смесителя $\alpha_0=(0,15\dots0,90)$.

Доказано, что в сравнении с эрлифтной установкой традиционной технологической схемы работа нагнетательной эрлифтной установки в данных условиях обеспечивает увеличение высоты подъема жидкости (гидросмеси) до 16,5 % (при $\alpha_0=0,3$), увеличение подачи эрлифта на (23,1...23,6) % (во всем исследуемом диапазоне относительных погружений смесителя) при увеличении КПД эрлифта до 29,9 % (при $\alpha_0=0,9$).

Для уточнения значений возможных рабочих параметров нагнетательных эрлифтных установок необходимо в аналитических исследованиях учитывать потери давления в воздухопроводе эрлифта.

Список литературы

1. Кононенко, А.П. Обоснование энергетической целесообразности применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – №1(7). – С. 11-19.
2. Кононенко, А.П. Области применения нагнетательных эрлифтных установок с радиальными нагнетателями / А.П. Кононенко, Р.И. Божко // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2018. – Т.14. – №1. – С. 29-37.
3. Кононенко, А.П. Теоретические диапазоны возможных подач эрлифтов с блочным воздухообеспечением центробежными нагнетателями / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – 2011. – Вип.22(195). – С. 116-134.

4. Папаяни, Ф.А. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни [и др.]. – М.: Информсвязьиздат, 1995. – 592 с.
5. 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.
6. Кононенко, А.П. Оптимизация параметров газожидкостных подъемников / А.П. Кононенко, Т.А. Устименко // Промислова гідроліка і пневматика. – 2010. – №3(29). – С. 51-53.
7. Кононенко, А.П. Подача эрлифтов с блочным воздухообеспечением центробежными нагнетателями / А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – Вип.23(196). – С. 110-123.
8. Кононенко, А.П. Подача эрлифтных установок с источниками пневмоэнергии неизменной производительности / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Наукові праці Донецького національного технічного університету: серія гірничо-електромеханічна. – 2012. – Вип.2(24). – С. 118-132.
9. Малеев, В.Б. Водоотлив и дегазация угольных шахт / В.Б. Малеев, В.А. Малашкина. – М.: Недра, 1995. – 208 с.
10. Тимошенко, Г.М. Теория инженерного эксперимента: Учебное пособие / Г.М. Тимошенко, П.Ф. Заря. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 93 с.
11. Kyrychenko, Y. Advanced method for calculation of deep-water airlifts and the special software development / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Taturevych // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 215-222.
12. Kyrychenko, Y. Research of dynamic processes in deep-water pumping hydrohoists lifting two-phase fluid / Y. Kyrychenko, V. Kyrychenko, A. Romanyukov // Technical and Geoinformational Systems in Mining. – London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, 2011. – P. 115-124.
13. Modern Conception of the Hydrotransport Systems Progress in the Sea Mining / G.G. Pivnyak, E.A. Kyrychenko, V.P. Franchuk et al. // 22nd World Mining Congress & Expo, 11-16 September, 2011, Istanbul. – 2011. – Vol.3. – P. 145-152.

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

APPLICATION FEATURES OF RADIAL SUPERCHARGERS IN DISCHARGE AIRLIFT UNITS

Background. In the airlifts of the traditional technological scheme, free transportation of the liquid (hydraulic mixture) from the lifting means to the consumer provided. If the geodetic mark of the user of the pumped liquid (hydraulic mixture) exceeds the maximum possible mark of the center of gravity of the outlet section of the air separator of the traditional airlift, the use of the latter becomes impossible. Discharge airlift units that provide pressure transportation of liquid (hydraulic mixture) from the air separator expand the rational scope of application of gas-liquid lifts. To implement this method of operation of the airlift, it is necessary to provide the required excess pressure in the air separator, which, however, in the traditional scheme of installation leads to a decrease in the energy efficiency of its working process.

Materials and/or methods. Using the developed analytical methods for the parameter analysis of the working process of a discharge airlift unit based on the comparison of the energy efficiency of the equivalent scheme of the discharge airlift and the equivalent scheme of the traditional airlift the parameters of the airlift units studied using radial superchargers as a source of pneumatic energy: CLW 60/1.6; CLW 100/1.6; 360-22-1; CLW 80/3.2, and CLW 200/3.0.

Results. The results of the analysis of the work of airlift units of traditional and discharge designs when using a number of radial superchargers as sources of pneumatic energy, which allowed establishing the conditions of maximum energy efficiency of such units at the maximum possible values of the height of the lift H , the supply of the airlift Q_s , and the geometric immersion of the mixer h , contribute to the expansion of the field of practical application of airlift units.

Conclusion. The values of the parameters characterizing the operation of the discharge airlift unit with the given range of superchargers in the range of absolute pressures in the air separator (in the suction nozzle of the supercharger) calculated $p_{a_{\text{вз}}}=(1.013...1.250)\cdot 10^5$ Pa and the range of initial relative immersions of the mixer $\alpha_0=(0.15...0.90)$ calculated. Proved that in comparison with the airlift of the traditional technological scheme, the operation of the discharge airlift in these conditions provides an increase in the height of the liquid lift (hydraulic mixture) to 16.5 % (at $\alpha_0=0.3$ mm), the increase in airlift supply (23.1...23.6) % (in the whole investigated range of relative mixer immersions) when increasing the efficiency of the airlift to 29.9 % ($\alpha_0=0.9$).

Keywords: radial supercharger, airlift, lift height, supply, energy efficiency.

Сведения об авторах

А.П. Кононенко

SPIN-код: 3828-6755
 Телефон: +380 (71) 334-90-21
 Эл. почта: ap.kononenko@mail.ru

Р.И. Божко

SPIN-код: 2510-2591
 Телефон: +380 (71) 386-16-39
 Эл. почта: bozhko342@mail.ru

Статья поступила 15.10.2018 г.
 © А.П. Кононенко, Р.И. Божко, 2018
 Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабает



Видеожурнал **“ДОНЕЦКИЙ ПОЛИТЕХНИК”**
 смотрите каждую субботу
 на телеканале **ОПЛОТ 2**
 YouTube <https://goo.gl/d2kKr0>