

УДК 622.276.52:532.529

**А.П. Кононенко**, д-р техн. наук, Донецкий национальный технический университет, **В.В. Чернюк**, д-р техн. наук, Национальный университет «Львовская политехника»  
**М.Ю. Карпушин**, аспирант,  
Донецкий национальный технический университет

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ДИАПАЗОНЫ ВОЗМОЖНЫХ ПОДАЧ ЭРЛИФТОВ С БЛОЧНЫМ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ НАГНЕТАТЕЛЯМИ**

*Обоснованы энергетически целесообразные высоты подъема и теоретические диапазоны подач общепромышленных эрлифтов с блочным воздухомоснабжением серийно производимыми центробежными нагнетателями без использования средств регулирования и энергетическая эффективность работы таких эрлифтных установок в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей).*

**Ключевые слова:** эрлифт, высота подъема, центробежный нагнетатель, блочная схема, переменный приток жидкости.

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

Блочная схема воздухомоснабжения эрлифтов общепромышленного назначения центробежными нагнетателями без использования средств регулирования является широко используемой, в том числе и в случае эксплуатации эрлифтных установок в условиях переменных во времени притоков жидкостей (гидросмесей) [1]. При блочном воздухомоснабжении один источник сжатого воздуха - центробежный нагнетатель, обеспечивает пневмоэнергией один эрлифт. Такая схема исключает необходимость в применении достаточно сложных систем автоматического регулирования расхода воздуха (распределения между несколькими потребителями - что используется в групповых или секционных эрлифтах), которые, к тому же, в известной степени снижают надежность работы всей установки

В составе водоотливных (гидроподъемных) эрлифтных установок исходя из условий обеспечения потребных технических параметров и энергетической эффективности работы целесообразно применение ряда серийно производимых центробежных нагнетателей. При блочной схеме воздухомоснабжения каждый из этих нагнетателей может обеспечить определенный диапазон подач эрлифтов заданной высоты подъема, что определяет и возможную область применения

таких эрлифтных установок в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей).

Так как условия эксплуатации эрлифтов с переменными притоками жидкостей (гидросмесей) являются достаточно распространенными, то установление возможного диапазона подач газожидкостных подъемников, высот подъема и показателей энергетической эффективности работы эрлифтных установок при блочном воздухообеспечении центробежными нагнетателями без использования средств регулирования является актуальной научной задачей, имеющей широкое практическое приложение.

**Анализ исследований и публикаций.** Анализ особенностей работы эрлифтной установки с блочным воздухообеспечением центробежным нагнетателем и установление возможных высоты подъема эрлифта, диапазона изменения подачи и энергетической эффективности работы установки при этом в [1] приведен как пример для условий использования в качестве источника пневмоэнергии нагнетателя ЦНВ 200/3, серийно производимого ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (г. Хабаровск, РФ, E-mail: info@dalenergomash.com.ua; dem.ukr@mail.ru).

В составе общепромышленных эрлифтных установок целесообразно использовать ряд центробежных нагнетателей, как правило, производства того же ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования», которые условно могут быть разделены на три классификационные группы – с абсолютным давлением сжатого воздуха  $p_n = 1,32 \div 1,65 \text{ кгс/см}^2 [(1,29 \div 1,62) \cdot 10^5 \text{ Па}]$  и производительностью  $Q_n = 40 \div 260 \text{ м}^3/\text{мин} (0,667 \div 4,33 \text{ м}^3/\text{с})$  (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  $p_n = 1,57 \div 2,48 \text{ кгс/см}^2 [(1,54 \div 2,43) \cdot 10^5 \text{ Па}]$  и производительностью  $Q_n = 115 \div 890 \text{ м}^3/\text{мин} (1,92 \div 14,8 \text{ м}^3/\text{с})$  (ЦНВ 280/2,1; 360-21-1; 360-22-1; ЦНВ 750/2) и с абсолютным давлением сжатого воздуха  $p_n = 2,73 \div 3,50 \text{ кгс/см}^2 [(2,68 \div 3,43) \cdot 10^5 \text{ Па}]$  и производительностью  $Q_n = 75 \div 226 \text{ м}^3/\text{мин} (1,25 \div 3,77 \text{ м}^3/\text{с})$  (ЦНВ 80/3,2; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 130/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3).

Для принятия обоснованных решений при проектировании эрлифтных установок, работающих в условиях переменных притоков жидкостей (гидросмесей), необходимо иметь достоверные данные о технически и энергетически рациональных зонах применения устано-

вок с блочным воздухомоснабженіем центробежными нагнетателями, представляющими каждую из вышеприведенных групп. До настоящего времени возможные зоны рационального использования эрлифтных установок с блочным воздухомоснабженіем серийно производимыми центробежными нагнетателями без использования средств регулирования не установлены.

**Постановка задачи.** Обосновать диапазоны возможных подач и целесообразные высоты подъема эрлифтов с блочным воздухомоснабженіем от серийно производимых центробежных нагнетателей без использования средств регулирования, а также энергетическую эффективность работы таких эрлифтных установок.

**Изложение материала и результаты.** Исходя из опыта применения водоотливных (гидроподъемных) эрлифтных установок, в частности, в технологических системах ТЭС [2], для анализа особенностей работы газожидкостных подъемников с блочной схемой воздухомоснабжения в качестве источников пневмоэнергии приняты пять нагнетателей производства ОАО «Дальневосточный завод энергетического оборудования» (табл. 1), представляющие все три приведенные выше классификационные группы центробежных нагнетателей. Методику анализа работы эрлифтной установки рассмотрим на примере использования в качестве блочного источника пневмоэнергии центробежного нагнетателя ЦНВ 160/3,2.

Для начального варианта анализа работы рассматриваемой эрлифтной установки примем допущение об отсутствии потерь давления в пневмопроводе между нагнетателем и эрлифтом при расходе воздуха  $Q_v$  и равенстве избыточного давления, развиваемого нагнетателем, гидростатическому давлению  $p_{н.с}$  геометрического погружения смесителя  $h$ . Примем также возможную работу гидроподъемника в режиме максимальных притоков жидкости (гидросмеси)  $Q_{пр}$  с уровнем свободной поверхности в зумпфе, соответствующим уровню почвы (пола) – отн. 0.000 (рис. 1). При принятых допущениях диапазон возможных подач эрлифта  $Q_e$  будем считать теоретическим.

Согласно опытной газодинамической характеристики принятого к рассмотрению нагнетателя ЦНВ 160/3,2, устойчивая работа машины гарантируется в пределах параметров -  $p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^5$  Па и  $Q_n = 122$  м<sup>3</sup>/мин,  $p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^5$  Па и  $Q_n = 168$  м<sup>3</sup>/мин. Тогда диапазон возможных геометрических погружений смесителя эрлифта с нагнетателем ЦНВ 160/3,2 определяется из соотношений:

- максимально возможное геометрическое погружение смесителя

$$h_{\max} = \frac{P_{H \max} - P_0}{\rho' \cdot g} =$$

$$= \frac{3,43 \cdot 10^5 - 1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 25,0 \text{ м};$$

- минимально допустимое геометрическое погружение смесителя

$$h_{\min} = \frac{P_{H \min} - P_0}{\rho' \cdot g} =$$

$$= \frac{2,66 \cdot 10^5 - 1 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81} = 17,1 \text{ м},$$

где  $p_0$  – давление окружающей среды (атмосферное давление), принимаем  $p_0 = 1 \cdot 9,81 \cdot 10^4$  Па;

$\rho'$  – плотность перекачиваемой жидкости (гидросмеси), принимаем  $\rho' = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – ускорение свободного падения.

Для максимально энергоэффективной работы эрлифта в подъемной трубе должна иметь место снарядная структура водовоздушной смеси, что обеспечивается при минимальном значении относительного погружения смесителя  $\alpha_{\min} = 0,40$  [3]. При этом условии длина подъемной трубы рассматриваемого эрлифта составит ( $H$  – высота подъема эрлифта)

$$H + h = \frac{h_{\min}}{\alpha_{\min}} = \frac{17,1}{0,40} = 42,75 \text{ м},$$

а максимальное относительное погружение смесителя

$$\alpha_{\max} = \frac{h_{\max}}{H + h} = \frac{25,0}{42,75} = 0,584.$$

Высота подъема эрлифтной установки относительно отметки 0.000 (рис. 1)

$$H' = (H + h) - h_{\max} - h_g =$$

$$= 42,75 - 25,0 - 1,0 = 16,75 \text{ м},$$



$\varphi(z)$  - истинное газосодержание водовоздушной смеси;  $\rho''(z)$  - плотность воздуха в сечении  $z$ .

Решение приведенного уравнения численным методом на ПЭВМ при помощи разработанной программы позволяет определять значения текущих гидродинамических параметров водовоздушной смеси в заданных сечениях подъемной трубы и при заданном расходе воздуха  $Q_e$  [5].

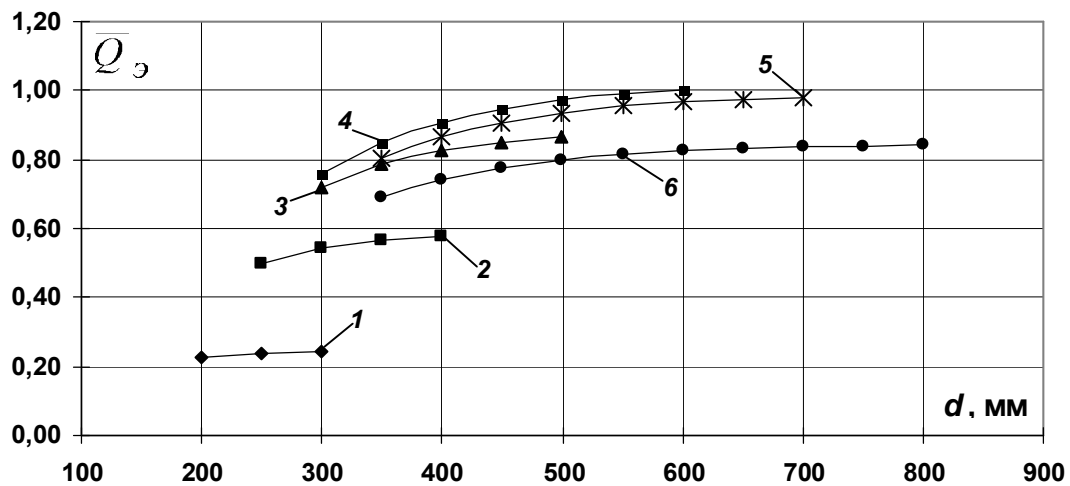
Для эрлифтной установки высотой подъема  $H' = 16,75$  м с блочным нагнетателем ЦНВ 160/3,2 вычисления подач  $Q_3$  и скоростей жидкости (гидросмеси)  $w_{n.m}$  в подающей трубе выполнены в диапазоне диаметров подъемных труб  $D = 300 \div 800$  мм и подающих труб  $d = 200 \div 800$  мм, длине подъемной трубы  $H+h = 42,75$  м и геометрических погружениях смесителя  $h_{мин} = 17,1$  м и  $h_{макс} = 25,0$  м. Каждому из рассмотренных диаметров подъемных труб эрлифтов соответствует максимально возможный диаметр подающей трубы, при котором выполняются, с приемлемой точностью, требования по минимально допустимым скоростям воды (гидросмеси) в данной трубе (водоотливные установки -  $w_{n.m} \geq 2,5 \div 3,0$  м/с, гидроподъемные установки -  $w_{n.m} \geq 3,5 \div 4,0$  м/с). При этом энергетически оптимальное значение диаметра подъемной трубы (при котором обеспечивается максимально возможная подача эрлифта в обоих режимах работы нагнетателя при прочих равных условиях) составляет  $D = 600$  мм (рис. 2), а максимально допустимое значение диаметра подающей трубы при этом составляет для водоотливной установки  $d = 500$  мм, а для гидроподъемной установки -  $d = 400$  мм (рис. 3).

Из-за увеличения потерь давления в подающей трубе с уменьшением ее диаметра, подача водоотливного эрлифта (табл. 2) с тем же диаметром подъемной трубы и прочих равных условиях превышает подачу гидроподъемного эрлифта (табл. 3).

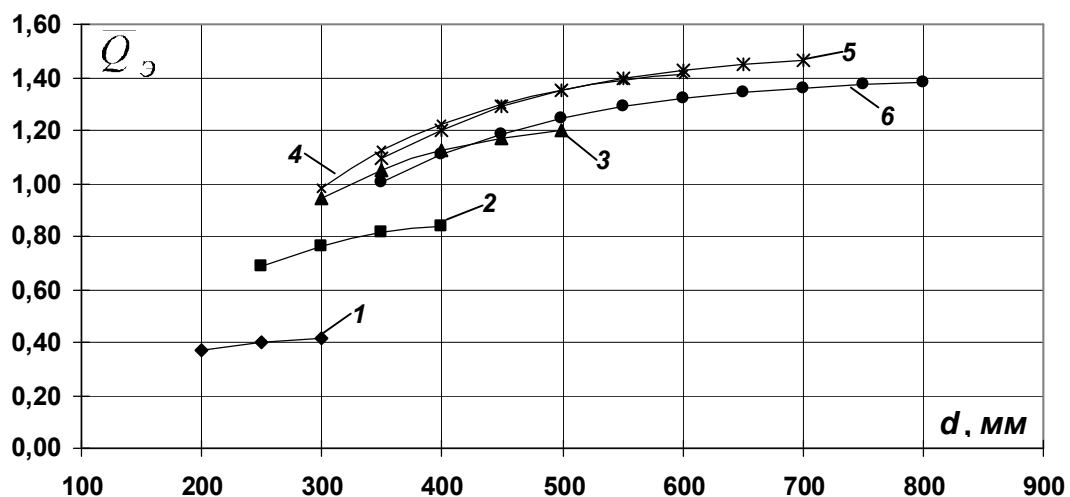
Как следует из результатов расчетов (табл. 2), для условий водоотливной эрлифтной установки с диаметром подъемной трубы  $D = 600$  мм и при  $h_{мин} = 17,1$  м, и при  $h_{макс} = 25,0$  м с достаточной степенью точности выполняются требования по значению транспортной скорости в подающей трубе ( $w_{n.m} \geq 2,5 \div 3,0$  м/с) при диаметре подающей трубы  $d = 500$  мм. Диапазон подач составляет  $Q_3 = 1895,5$  м<sup>3</sup>/ч (при  $h_{мин} = 17,1$  м) и  $Q_{эмакс} = 2634,4$  м<sup>3</sup>/ч (при  $h_{макс} = 25,0$  м)

Таблица 1 – Параметры эрлифтных установок при блочном воздухообеспечении центробежными нагнетателями без использования средств регулирования

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
Давление нагнетателя (абсолютное): - максимально возможное $p_{н.макс} \cdot 10^{-5}$ ; - минимально допустимое $p_{н.мин} \cdot 10^{-5}$ .	Па	1,60 1,51	2,43 2,01	3,34 2,50	3,43 2,66	3,06 2,70
Производительность нагнетателя $Q_n$ при: - максимально возможном давлении $p_{н.макс}$ ; - минимально допустимом давлении $p_{н.мин}$ .	м <sup>3</sup> /МИН (М <sup>3</sup> /с)	56,5 (0,942) 74,0 (1,233)	260 (4,33) 360 (6,0)	82 (1,37) 115 (1,92)	122 (2,03) 168 (2,80)	168 (2,80) 228 (3,80)
Мощность нагнетателя $N_{потр}$ при: - максимально возможном давлении $p_{н.макс}$ ; - минимально допустимом давлении $p_{н.мин}$ .	кВт	66,5 79,5	585 735	268 344	390 490	505 572
Геометрическое погружение смесителя эрлифта: - максимально возможное $h_{макс}$ ; - минимально допустимое $h_{мин}$ .	м	6,30 5,35	14,8 10,5	24,0 15,5	25,0 17,1	21,2 17,5
Длина подъемной трубы эрлифта $H+h$ при $\alpha = 0,4$	м	13,38	26,25	38,75	42,75	43,75
Высота подъема эрлифтной установки $H'$ относительно отметки 0.000	м	6,48	10,45	13,75	16,75	21,55



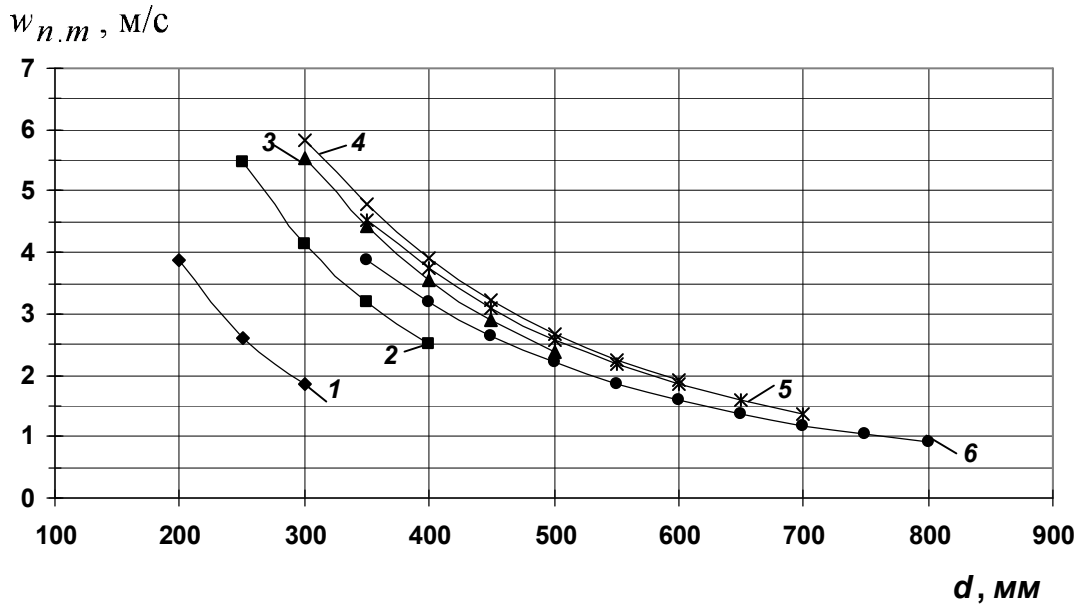
а)



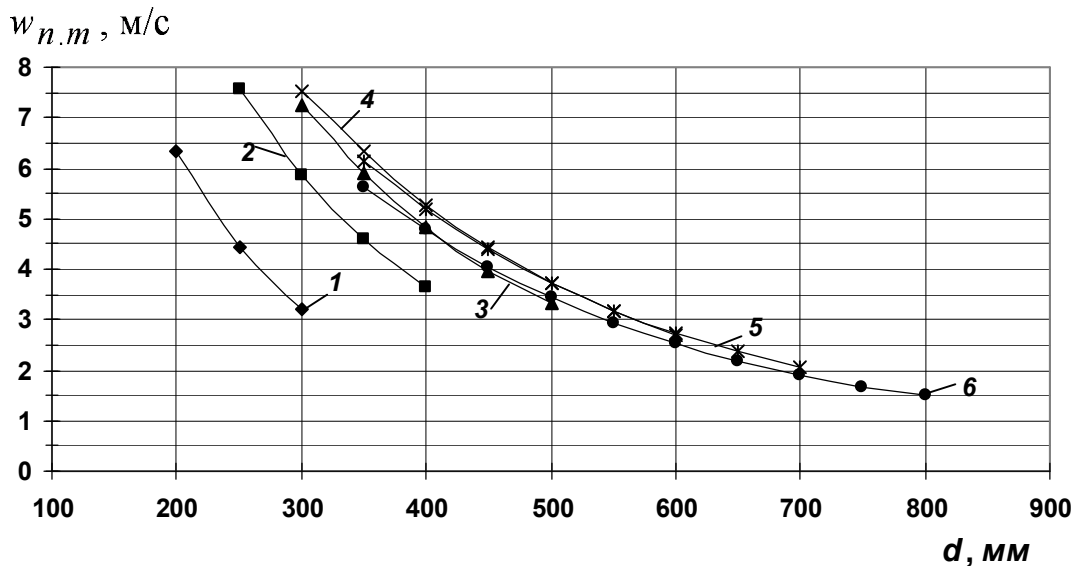
б)

Рис. 2. - Зависимости безразмерной подачи эрлифта от диаметров подъемной и подающей труб  $\bar{Q}_3 = f(D, d)$  при блочном воздушно-снабжении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: а) - режим работы нагнетателя:  $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  (геометрическое погружение смесителя  $h_{мин} = 17,1 \text{ м}$ ); б) - режим работы нагнетателя:  $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  (геометрическое погружение смесителя  $h_{макс} = 25,0 \text{ м}$ ); 1 –  $D = 300 \text{ мм}$ ; 2 –  $D = 400 \text{ мм}$ ; 3 –  $D = 500 \text{ мм}$ ; 4 –  $D = 600 \text{ мм}$ ; 5 –  $D = 700 \text{ мм}$ ; 6 –  $D = 800 \text{ мм}$  (высота подъема  $H' = 16,75 \text{ м}$ ; базисное значение подачи эрлифта  $Q_{3 баз} = 1950,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ )





а)



б)

Рис. 3. - Зависимости скоростей в подающей трубе от диаметров подъемной и подающей труб  $w_{n.m} = f(D, d)$  при блочном воздухо-снабжении от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: а) - режим работы нагнетателя:  $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $p_{n.\text{мин}} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  (геометрическое погружение смесителя  $h_{\text{мин}} = 17,1 \text{ м}$ ); б) - режим работы нагнетателя:  $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $p_{n.\text{макс}} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$  (геометрическое погружение смесителя  $h_{\text{макс}} = 25,0 \text{ м}$ ); 1 –  $D = 300 \text{ мм}$ ; 2 –  $D = 400 \text{ мм}$ ; 3 –  $D = 500 \text{ мм}$ ; 4 –  $D = 600 \text{ мм}$ ; 5 –  $D = 700 \text{ мм}$ ; 6 –  $D = 800 \text{ мм}$  (высота подъема  $H' = 16,75 \text{ м}$ )

Таблица 2 – Гидродинамические параметры водоотливной эрлифтной установки высотой подъема  $H'=16,75$  м при блочном воздушнонагнетателем ЦНВ 160/3,2

Диаметр трубы, мм:		Режим работы нагнетателя: $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па};$ $N_{номр} = 490 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{мин} = 17,1 \text{ м}$ )				Режим работы нагнетателя: $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па};$ $N_{номр} = 390 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{макс} = 25,0 \text{ м}$ )				Коэффициент увеличения подачи $k_Q$	Коэффициент снижения удельного энергопотребления $k_{N_э}$
подъемной, $D$	подающей, $d$	Подача эрлифта, $Q_э, \text{ м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе, $w_{н.т}, \text{ м/с}$	Удельное энергопотребление $n_э, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_э_{мин} (n_э_{мин} = 0,0088 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м})$	Подача эрлифта, $Q_э, \text{ м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе, $w_{н.т}, \text{ м/с}$	Удельное энергопотребление $n_э, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_э_{мин} (n_э_{мин} = 0,0088 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м})$		
300	250	463,2	2,62	0,0632	7,18	780,7	4,42	0,0298	3,39	1,69	2,12
400	400	1130,5	2,50	0,0259	2,94	1640,3	3,63	0,0142	1,61	1,45	1,82
500	500	1685,5	2,39	0,0174	1,97	2340,5	3,31	0,0099	1,13	1,39	1,74
600	500	1895,5	2,68	0,0154	1,75	2634,4	3,73	0,0088	1,00	1,39	1,75
700	500	1824,4	2,58	0,0160	1,82	2632,8	3,73	0,0088	1,00	1,44	1,81
800	450	1512,6	2,64	0,0193	2,20	2317,2	4,05	0,0100	1,14	1,53	1,92

Таблица 3 – Гидродинамические параметры гидроподъемной эрлифтной установки высотой подъема  $H'=16,75$  м при блочном воздуходобывании центробежным нагнетателем ЦНВ 160/3,2

Диаметр трубы, мм:		Режим работы нагнетателя: $Q_n = 168 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.мин} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ Па};$ $N_{номр} = 490 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{мин} = 17,1 \text{ м}$ )				Режим работы нагнетателя: $Q_n = 122 \text{ м}^3/\text{мин}; p_{н.макс} = 3,43 \cdot 10^{-5} \text{ Па};$ $N_{номр} = 390 \text{ кВт}$ (геометрическое погружение смесителя $h_{макс} = 25,0 \text{ м}$ )				Коэффициент увеличения подачи $k_Q$	Коэффициент снижения удельного энергопотребления $k_{N_э}$
подъемной $D$	подающей $d$	Подача эрлифта $Q_э,$ $\text{м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе $w_{н.т},$ м/с	Удельное энергопотребление $n_э,$ $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_{э.мин}$ ( $n_{э.мин} = 0,0097 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$ )	Подача эрлифта $Q_э,$ $\text{м}^3/\text{ч}$	Скорость в подающей трубе $w_{н.т},$ м/с	Удельное энергопотребление $n_э,$ $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$	Безразмерное удельное энергопотребление $n_э/n_{э.мин}$ ( $n_{э.мин} = 0,0097 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{м}$ )		
300	200	437,9	3,87	0,0668	6,89	715,8	6,33	0,0325	3,35	1,63	2,05
400	300	1056,3	4,15	0,0277	2,86	1493,0	5,87	0,0156	1,61	1,41	1,78
500	400	1607,5	3,56	0,0182	1,88	2188,0	4,84	0,0106	1,10	1,36	1,71
600	400	1769,6	3,91	0,0165	1,70	2388,6	5,28	0,0097	1,00	1,35	1,70
700	400	1688,2	3,73	0,0173	1,79	2348,0	5,19	0,0099	1,02	1,39	1,75
800	350	1345,7	3,89	0,0217	2,24	1951,3	5,64	0,0119	1,23	1,45	1,82

(рис. 4), т.е. возможное увеличение подачи равно  $k_Q = Q_{эмакс} / Q_{эмин} = 2634,4 / 1895,5 = 1,39$  раза. Мощность водоотливной установки, в соответствии с характеристикой  $N_{потр} = f(Q_H)$  нагнетателя ЦНВ 160/3,2, составляет:  $N_{потр} = 490$  кВт при  $h_{мин} = 17,1$  м и  $N_э = 390$  кВт при  $h_{макс} = 25,0$  м, а удельное энергопотребление на транспортирование единицы объема жидкости на единичную высоту  $n_{эмин} = N_{потр} / (Q_{эмин} \cdot H') = 490 / (1895,5 \cdot 16,75) = 0,0154 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \cdot \text{м}$  при  $h_{мин} = 17,1$  м,  $n_{эмакс} = N_{потр} / (Q_{эмин} \cdot H') = 390 / (2634,4 \times 16,75) = 0,0088 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \cdot \text{м}$  при  $h_{макс} = 25,0$  м, т.е. снижение удельного энергопотребления во втором случае достигает  $k_{N_э} = n_{эмин} / n_{эмакс} = 1,54 \cdot 10^{-2} / 0,88 \cdot 10^{-2} = 1,75$  раза.

Для гидроподъемной эрлифтной установки с диаметром подъемной трубы  $D = 600$  мм требование по значению транспортной скорости в подающей трубе ( $w_{n.m} \geq 3,5 \div 4,0$  м/с) для обоих режимов работы обеспечивается в эрлифте с подающей трубой  $d = 400$  мм (табл. 3). Диапазон подач при этом составляет  $Q_{эмин} = 1769,6$  м<sup>3</sup>/ч (при  $h_{мин} = 17,1$  м) и  $Q_{эмакс} = 2388,6$  м<sup>3</sup>/ч (при  $h_{макс} = 25,0$  м), т.е. возможное увеличение подачи равно  $k_Q = Q_{эмакс} / Q_{эмин} = 2388,6 / 1769,6 = 1,35$  раза. Удельное энергопотребление на транспортирование единицы объема гидросмеси на единичную высоту  $n_{эмин} = N_{потр} / (Q_{эмин} \times H') = 490 / (1769,6 \cdot 16,75) = 0,0165 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \cdot \text{м}$  при  $h_{мин} = 17,1$  м и  $n_{эмакс} = N_{потр} / (Q_{эмакс} \cdot H') = 390 / (2388,6 \cdot 16,75) = 0,0097 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3 \cdot \text{м}$  при  $h_{макс} = 25,0$  м, снижение удельного энергопотребления во втором случае достигает  $k_{N_э} = n_{эмин} / n_{эмакс} = 1,65 \cdot 10^{-2} / 0,97 \times 10^{-2} = 1,70$  раза.

Повысить степень увеличения подачи  $k_Q$  рассматриваемых как водоотливной (рис. 5), так и гидроподъемной (рис. 6) установок с блочным воздухомоснабжением от нагнетателя ЦНВ 160/3,2 возможно за счет снижения энергоэффективности их работы. Так, при использовании подъемной трубы диаметром  $D = 300$  мм коэффициент увеличения подачи указанных установок составит  $k_Q = 1,63 \div 1,69$ , однако энергоэффективность их работы снизится в  $n_э / n_{эмин} = 3,39 \div 7,18$  раза

при уменьшении абсолютного значения подачи эрлифта в  $3,34 \div 4,09$  раза.

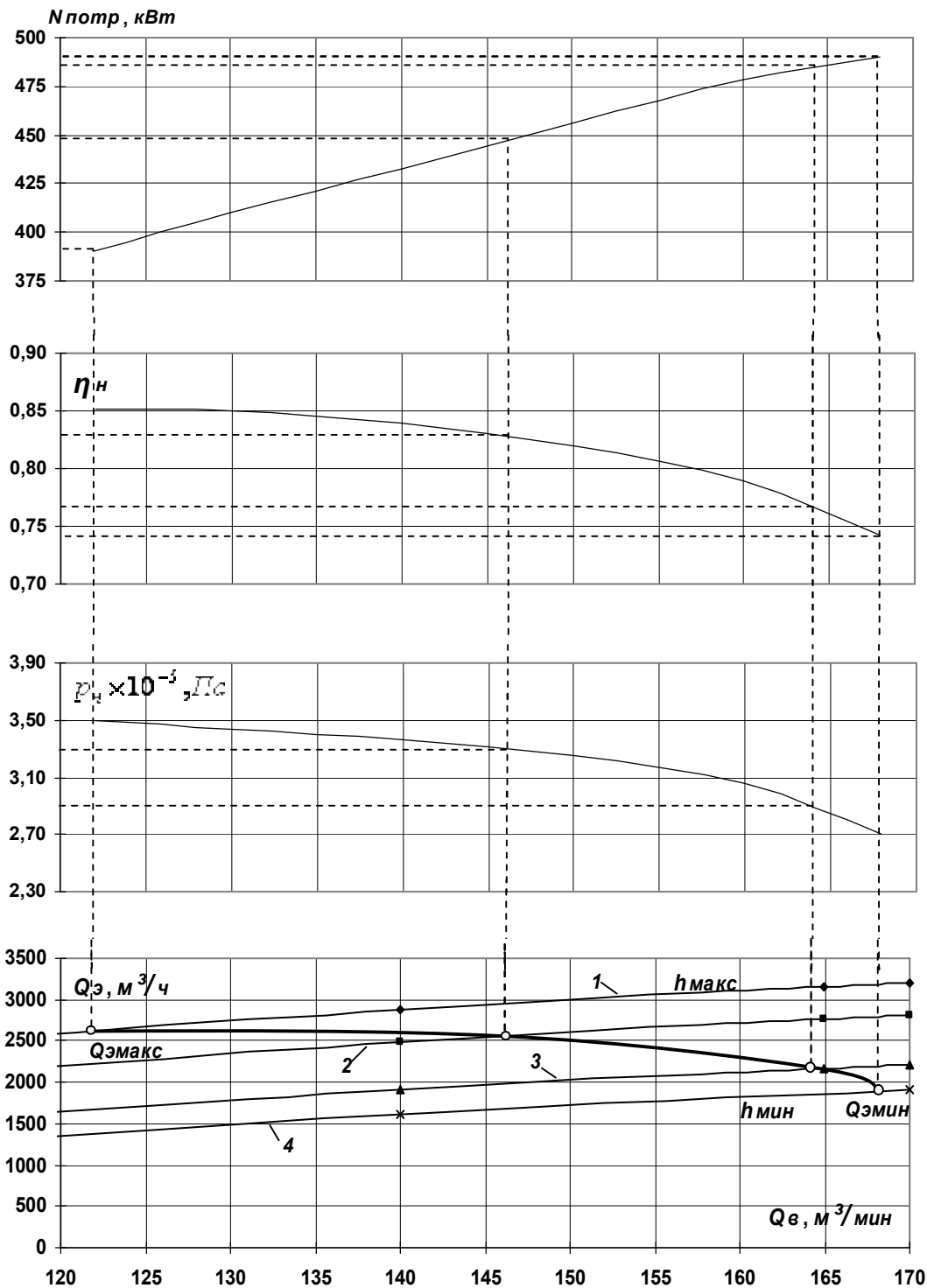


Рис. 4. – Рабочий режим водоотливной эрлифтной установки с блочным воздухомоснабжением от центробежного нагнетателя ЦНВ 160/3,2 ( $H+h = 42,75$  м,  $D = 600$ ,  $d = 500$  мм): 1÷4 -  $Q_э = f(Q_в)$  при 1 -  $h = h_{макс} = 25$  м; 2 -  $h = 22,6$  м; 3 -  $h = 19$  м; 4 -  $h = h_{мин} = 17,1$  м

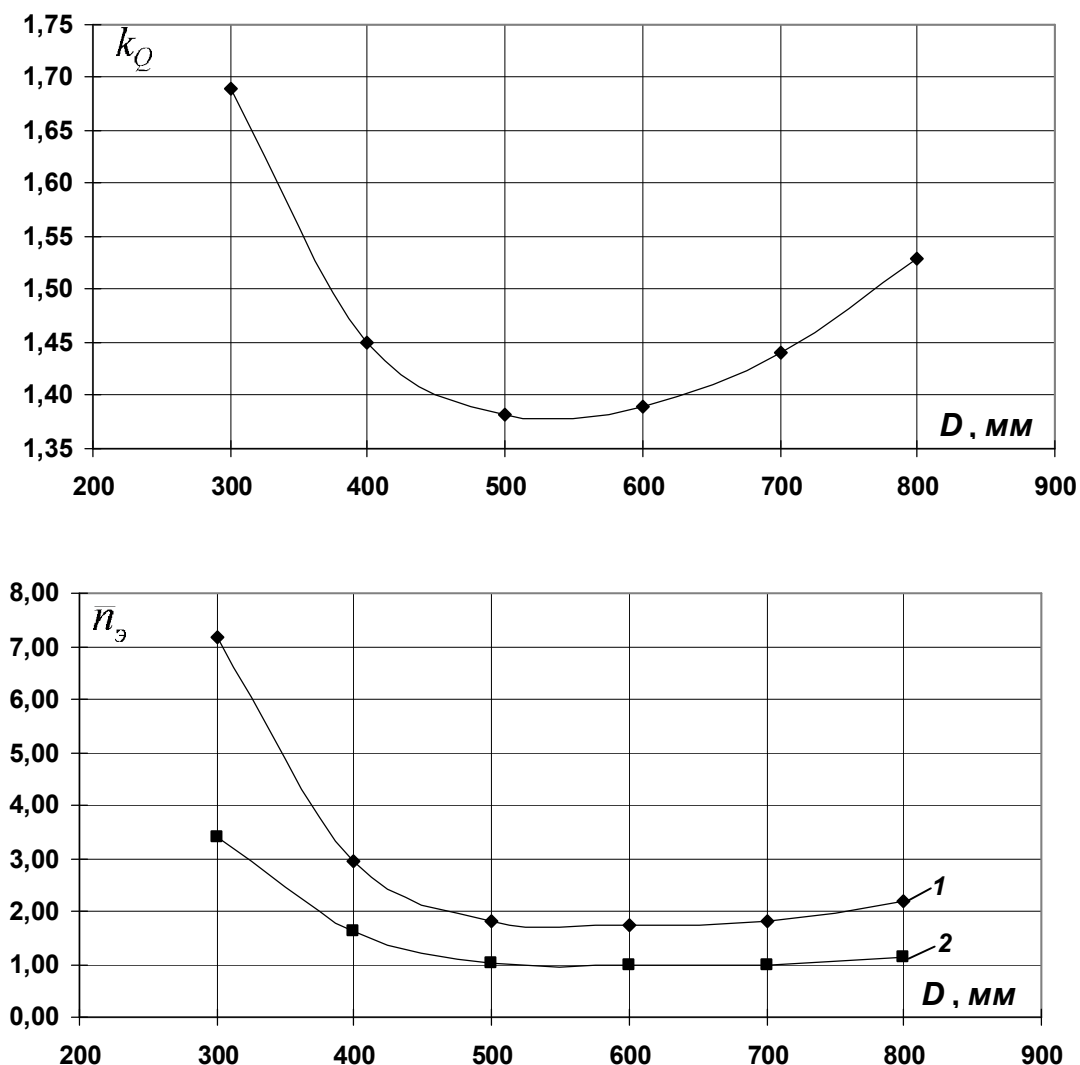


Рис. 5. - Зависимость степени увеличения подачи  $k_Q = f(D)$  и безразмерного удельного энергопотребления  $\bar{n}_9 = n_9/n_{9\text{мин}} = f(D)$  от диаметра подъемной трубы  $D$  при блочном воздухообеспечении водоотливной установки от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: 1 – при  $h_{\text{мин}} = 17,1$  м; 2 – при  $h_{\text{макс}} = 25,0$  м (высота подъема  $H' = 16,75$  м; базисное значение удельного энергопотребления  $n_9 = 0,0088$  кВт·ч/м<sup>3</sup>·м)

Аналогичный анализ работы и характеризующих ее гидродинамических параметров выполнен для эрлифтных установок с другими, принятыми к рассмотрению, блочными центробежными нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 200/3. Результаты вычислений позволили установить условия максимальной энергоэффективности работы водоотливных и гидropодъемных эрлифтных установок высотами подъема  $H'$ , то есть определить обеспечивающие эти условия значения энергетически оптимальных диаметров подъемных

труб  $D$ , максимально допустимых диаметров подающих труб  $d$ , подач эрлифтов  $Q_э$  при граничных значениях геометрических погружений смесителя  $h_{мин}$  и  $h_{макс}$ , степень увеличения подачи  $k_Q$  и удельное энергопотребление эрлифтной установки  $n_э$  (табл. 4, 5).

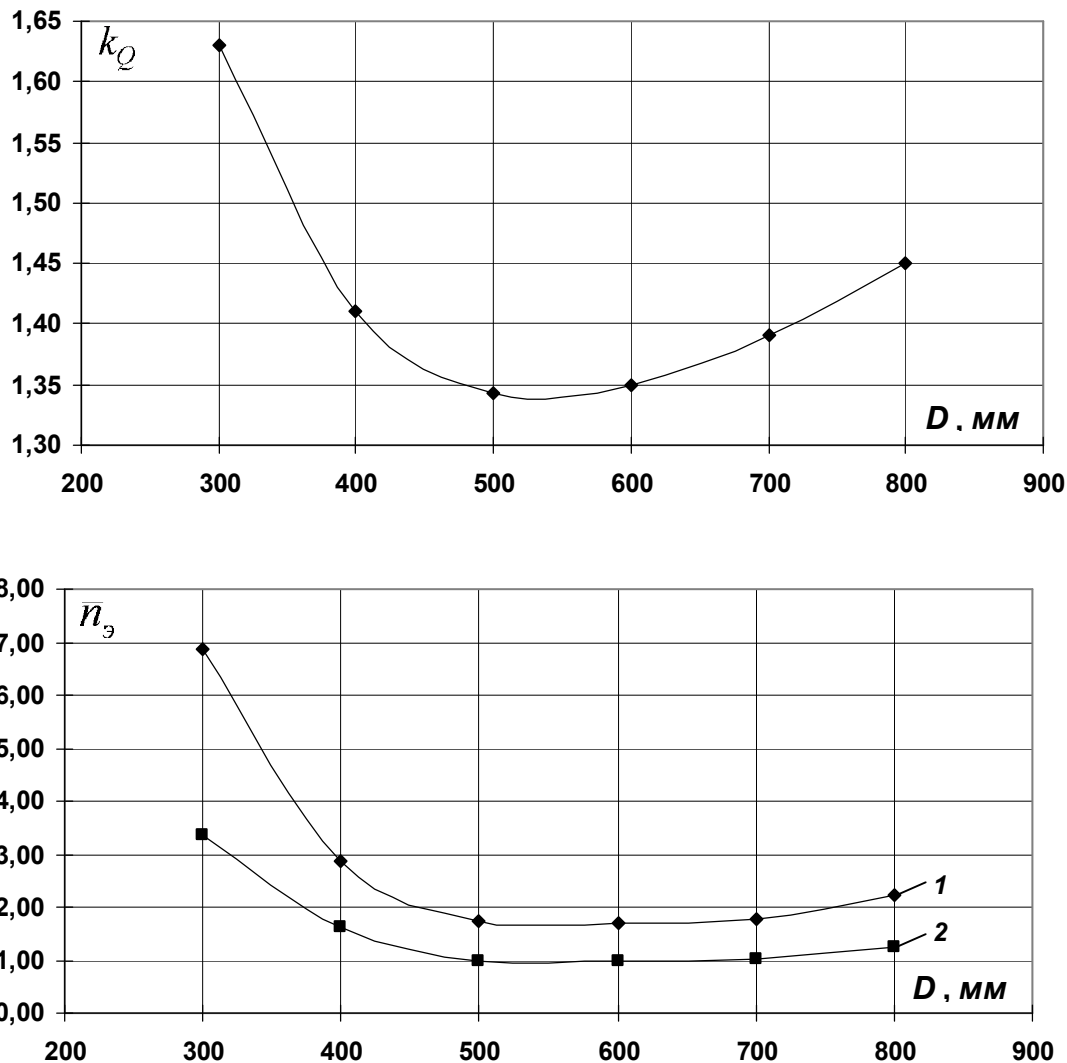


Рис. 6. - Зависимость степени увеличения подачи  $k_Q = f(D)$  и безразмерного удельного энергопотребления  $\bar{n}_э = n_э/n_{э,мин} = f(D)$  от диаметра подъемной трубы  $D$  при блочном воздухообеспечении гидроподъемной установки от нагнетателя ЦНВ 160/3,2: 1 – при  $h_{мин} = 17,1$  м; 2 – при  $h_{макс} = 25,0$  м (высота подъема  $H' = 16,75$  м; базисное значение удельного энергопотребления  $n_э = 0,0097$  кВт·ч/м<sup>3</sup>·м)

Как следует из результатов вычислений, в эрлифтных установках с высотами подъема  $H'$  и блочным воздухообеспечением центробежными нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2;

ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3 в режимах максимальной энергоэффективности работы степень увеличения подачи водоотливных эрлифтов составляет  $k_Q = 1,03 \div 1,49$ , а гидроподъемных эрлифтов -  $k_Q = 1,02 \div 1,45$ , что зачастую не удовлетворяет практическим потребностям.

Изложенная методика анализа работы эрлифтной установки с блочным воздухомоснабжением от принятого центробежного нагнетателя позволяет определить энергетически оптимальные высоту подъема  $H'$ , диаметр подъемной трубы  $D$  эрлифта и максимально возможный диаметр подающей трубы  $d$  для условий водоотливных и гидроподъемных установок. Значения степени увеличения подачи  $k_Q$  и удельного энергопотребления  $n_\varepsilon$ , как критерия энергетической эффективности работы эрлифтной установки, следует считать предварительными и подлежащими уточнению, а диапазон возможных подач эрлифтов - теоретическим. Это вызвано тем, что при определении режимов совместной блочной работы нагнетателя и эрлифта из-за громоздкости вычислений не учитывалось действительное давление в смесителе эрлифта  $p_{см}$ , как разница между гидростатическим давлением геометрического погружения смесителя  $p_{н.с}$  и потерями давления в подающей трубе  $\Delta p_{н.т}$ . В действительности режим работы блочного центробежного нагнетателя будет определяться именно этим, действительным давлением  $p_{см}$ , что может в известной мере привести к изменению как степени увеличения подачи  $k_Q$  эрлифта, так и удельного энергопотребления  $n_\varepsilon$ , как критерия энергоэффективности работы установки в целом.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** В эрлифтных установках с блочным воздухомоснабжением центробежными нагнетателями ЦНВ 60/1,6; 360-22-1; ЦНВ 100/3,2; ЦНВ 160/3,2; ЦНВ 200/3, представляющими все три классификационные группы нагнетателей, рациональных в использовании в составе общепромышленных установок с энергетически целесообразными высотами подъема, степень увеличения подачи водоотливных эрлифтов составляет  $k_Q = 1,03 \div 1,49$ , а гидроподъемных эрлифтов -  $k_Q = 1,02 \div 1,45$ , что определяет теоретические диапазоны возможных подач газожидкостных подъемников в режимах максимально энергоэффективной работы. Для уточнения диапазонов возможных подач газожидкостных подъемников необходимо в аналитических исследованиях работы эрлифтных установок с блочным воздухомоснабжением центробежными нагнетателями учитывать потери давления в подающих трубах эрлифтов.



Таблица 4 – Параметры эрлифтных водоотливных установок с блочным воздухомоснабжением от центробежных нагнетателей при работе в режиме максимальной энергоэффективности

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
1	2	3	4	5	6	7
Диаметр трубы: - подъемной (энергетически оптимальный), $D$ ; - подающей (максимально допустимый), $d$ .	мм	500 350	900 800	500 400	600 500	700 600
Подача эрлифта $Q_э$ при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$ ; - максимально возможном $h_{макс}$ ;	$м^3/ч$ ( $м^3/с$ )	984,0 (0,273) 1027,9 (0,286)	4590,5 (1,275) 6043,4 (1,679)	1316,9 (0,366) 1958,6 (0,544)	1895,5 (0,527) 2634,4 (0,732)	2561,8 (0,712) 2626,1 (0,729)
Степень увеличения подачи, $k_Q$	-	1,04	1,32	1,49	1,39	1,03
Удельное энергопотребление эрлифтной установки $n_э$ при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$ ; - максимально возможном $h_{макс}$ .	$\frac{кВт \cdot ч}{м^3 \cdot м}$	0,0125 0,0100	0,0153 0,0093	0,0190 0,0100	0,0154 0,0088	0,0104 0,0089

Таблица 5 – Параметры эрлифтных гидроподъемных установок с блочным воздухообеспечением от центробежных нагнетателей при работе в режиме максимальной энергоэффективности

Параметр эрлифтной установки	Ед. измерения	Тип нагнетателя				
		ЦНВ 60/1,6	360-22-1	ЦНВ 100/3,2	ЦНВ 160/3,2	ЦНВ 200/3
1	2	3	4	5	6	7
Диаметр трубы: - подъемной (энергетически оптимальный), $D$ ; - подающей (максимально допустимый), $d$ .	мм	500 300	900 650	500 350	600 400	700 500
Подача эрлифта $Q_3$ при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$ ; - максимально возможном $h_{макс}$ .	$м^3/ч$ ( $м^3/с$ )	865,2 (0,240)	4198,8 (1,166)	1261,2 (0,350)	1769,6 (0,492)	2443,0 (0,679)
Степень увеличения подачи, $k_Q$	-	1,05	1,28	1,45	1,35	1,02
Удельное энергопотребление эрлифтной установки $n_3$ при геометрическом погружении смесителя: - минимально допустимом $h_{мин}$ ; - максимально возможном $h_{макс}$ .	$\frac{кВт \cdot ч}{м^3 \cdot м}$	0,0142 0,0113	0,0168 0,0104	0,0198 0,0106	0,0165 0,0097	0,0109 0,0094

## Список літератури

1. Кононенко А.П. О согласовании подачи эрлифта с притоком жидкости (гидросмеси) / А.П. Кононенко, М.Ю. Карпушин // Промислова гідраліка і пневматика. – 2009. – № 4(26) – С. 32 - 38.
2. 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.
3. Кононенко А.П. Структуры двухфазных потоков в подъемных трубах эрлифтов / А.П. Кононенко // Вісник Сумського державного університету. Серія - Технічні науки. – 2005. – №12 – С. 38-48.
4. Кононенко А.П. Модель рабочего процесса эрлифта со снарядной структурой водовоздушного потока / А.П. Кононенко // Промислова гідраліка і пневматика. – 2006. – №1(11). – С. 34-37.
5. Бойко Н.Г. Расчетные характеристики эрлифта со снарядной структурой водовоздушной смеси / Н.Г. Бойко, А.П. Кононенко // Наукові праці ДНТУ. Серія: "Гірничо-електромеханічна". – 2006. – Вип. 104. – С. 17-29.

Стаття надійшла до редколегії 20.11.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Г. Бойко

**А.П. Кононенко, В.В. Чернюк, М.Ю. Карпушин.** Теоретичні діапазони можливих подач ерліфтів із блочним повітропостачанням відцентровими нагнітачами. Обґрунтовані енергетично доцільні висоти підйому та теоретичні діапазони подач загальнопромислових ерліфтів з блочним повітропостачанням відцентровими нагнітачами, що серійно виробляються, без використання засобів регулювання та енергетична ефективність роботи таких установок в умовах змінних припливів рідин (гідросумішей).

**Ключові слова:** ерліфт, висота підйому, відцентровий нагнітач, змінний приплив рідини, блочна схема.

**A. Kononenko, V. Chernuk, M. Karpushin.** Theoretical Range of Possible Feeds of Airlifts with Block Air Supply by Centrifugal Compressors. The energetically reasonable lifting heights and theoretical ranges of the feed of the industrial airlifts with the block air supply made by centrifugal blowers without the application of the control facilities and the power efficiency of the operation of such airlifts under the conditions of the variable fluid influxes (hydro mixtures) have been grounded.

**Keywords:** airlift, power efficiency, variable fluid, centrifugal blowers, block air supply.

© Кононенко А.П., Чернюк В.В., Карпушин М.Ю., 2011