

УДК 622.232.5

Л.Н. Козыряцкий, канд. техн. наук,
О.В. Федоров, канд. техн. наук,
О.А. Геммерлинг, канд. техн. наук
Донецький національний технічний університет

БАЛАНС МОЩНОСТИ В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

Визначено корисну потужність, потужність, направлену на подолання опору в ерліфті, а також потужність вихідного струменя. Отримано формулу визначення продуктивності ерліфта.

In work the useful power, power directed on overcoming of resistance in airlift and power of stream going out is defined. Expression the productivity of airlift is got.

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами

В горной промышленности, гидромеханизации, энергетике, строительстве и других отраслях для подъема воды или гидросмеси (смеси воды с твердыми частицами) все шире применяют эрлифтные установки (эрлифты), в которых используется энергия сжатого воздуха. Так, эрлифт является одним из средств гидромеханизации горно-добычных работ. Использование гидротранспортных и гидрорподъемных установок обеспечивает непрерывность технологического процесса и высокую производительность транспортирования, позволяет существенно снизить аварийность, повысить производительность и безопасность труда. Эрлифт может использоваться для подъема твердого со дна емкости или водоема (например, эрлифт эрлифтно-земснарядного комплекса), может работать с весьма высоким к. п. д., сравнимым с к. п. д. центробежных машин. При этом эрлифт обладает рядом несомненных преимуществ, главные из которых — простота и надежность в работе, а также возможность транспортирования гидросмесей с высокой концентрацией твердой фракции — до 35–40 %, (грунтовые насосы и углесосы согласно заводским инструкциям по эксплуатации должны работать с концентрацией 10 %). Эрлифт не имеет движущихся и быстроизнашиваемых частей, не требует постоянного наблюдения и обслуживания, как того требует грунтовый центробежный насос, прост и недорог в изготовлении.

Эрлифт не боится аварийных ситуаций, «смертельных» для насосных установок: может транспортировать горную массу, содержащую крупные куски, мусор, металлические предметы, работает, даже если всасывающее (грунтозаборное) устройство завалено горной массой. Эрлифт не создает высоких давлений в подъемной трубе, прост и безопасен в обслуживании.

Обладая такими преимуществами, эрлифт может быть востребован (и уже востребован) при гидромеханизированных работах в различных отраслях.

Анализ исследований и публикаций

В работах [1, 2] приведена теория работы и конструкции эрлифтных установок различного назначения. В работе [3] приведена теория работы, гидравлический расчет и конструкции эрлифтов и их элементов, результаты экспериментальных исследований эрлифтных установок. В работах [4–5] решаются вопросы комплексного использования эрлифтных установок для гидромеханизированных предприятий.

Цель работы

Работа является продолжением указанных публикаций и предназначена для решения вопроса по определению мощности необходимой для подъема воды (гидросмеси) на заданную высоту.

Эти исследования необходимы для проектирования эрлифтно-земснарядных комплексов для добычи полезных ископаемых со дна водоема, а также для проектирования эрлифтных установок различного назначения.

Результаты исследований

Эрлифты представляют собой систему трубопроводов без каких-либо движущихся деталей (рис. 1), что обеспечивает высокую надежность, долговечность, простоту эксплуатации.

Приращение гидравлического напора в эрлифтах жидкость получает за счет работы сжатого воздуха, подаваемого в смеситель.

Мощность, передаваемая сжатым воздухом $N_{сж.в}$ воде, используется на подъем воды (полезная мощность) N_n , на преодоление сопротивления в эрлифте N_c , на мощность выходящей струи N_e , то есть

$$N_{сж.в} = N_n + N_c + N_e. \quad (1)$$

Мощность, передаваемая сжатым воздухом воде, принимая изотермический процесс расширения, может быть найдена по формуле

$$N_{сж.в} = p_a q Q \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где P_a — атмосферное давление, Па; q — удельный расход воздуха (объем воздуха, непосредственно приходящийся на 1 м^3 воды в смеси: $q = Q_a / Q$), $\text{м}^3/\text{с}$; Q_a — расход воздуха, отнесенный к условиям всасывания, $\text{м}^3/\text{с}$; Q — производительность эрлифта по воде, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; h — глубина погружения смесителя, м.

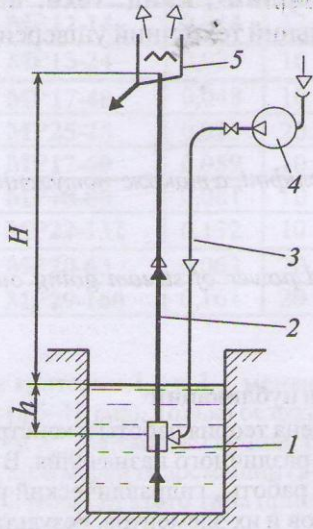


Рис. 1. Гидравлическая схема эрлифта: 1 — смеситель; 2 — подъемная труба; 3 — воздухоподающая труба; 4 — компрессор; 5 — воздухоотделитель.

Полезная мощность по подъему воды

$$N_n = \rho g H Q, \quad (3)$$

где H — высота подъема воды, м, которую можно выразить через относительное погружение смесителя:

$$\alpha = \frac{h}{H+h}, \quad (4)$$

тогда $N_n = \rho g Q h \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right).$ (5)

Мощность потока аэрогидросмеси, выходящего из трубопровода,

$$N_e = Q_m \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

где Q_m — массовый расход смеси, $\text{кг}/\text{с}$,

$$Q_m = \rho Q + \rho_a Q_a = Q(\rho + \rho_a q), \quad (7)$$

ρ_a — плотность воздуха при атмосферном давлении, $\text{кг}/\text{м}^3$; v — скорость струи при выходе,

$$v = \frac{4Q}{\pi D_e^2} (1+q), \quad (8)$$

D_e — диаметр подъемного трубопровода в выходном сечении.

Тогда мощность выходящей струи

$$N_e = \frac{8Q^3}{\pi^2 g D_e^4} (\rho + \rho_a q) (1+q)^2. \quad (9)$$

Мощность, расходуемая на покрытие потерь напор в подъемном трубопроводе эрлифта,

$$N_c = g H_n Q_m, \quad (10)$$

где H_n — потери напора в подъемной трубе эрлифта,

$$H_n = \lambda \frac{(L+L_s)}{D} \frac{V_{cp}^2}{2g}, \quad (11)$$

где L, L_s — длина подъемной трубы эрлифта и эквивалентная длина всех местных сопротивлений; для большинства эрлифтов можно принять $L_s = 0,1L$ или $L+L_s = 1,1(H+h)$; V_{cp} — средняя скорость смеси, $\text{м}/\text{с}$; тогда

$$N_c = \frac{1,1 \lambda V_{cp}^2 Q (\rho + \rho_a q) (H+h)}{2D}.$$

Средняя скорость смеси в подъемном трубопроводе определяется по формуле

$$V_{cp} = \frac{4 Q_{см.ср}}{\pi D^2}, \quad (12)$$

где $Q_{см.ср}$ — средний объемный расход аэрогидросмеси по длине подъемного трубопровода. Объемный расход смеси изменяется с высотой вследствие расширения воздуха величина его на некоторой произвольной глубине z будет

$$Q_z = Q + Q_a \frac{P_a}{P_z} = Q \left(1 + q \frac{P_a}{P_z} \right), \quad (13)$$

P_z — давление в подъемной трубе на глубине z . Принимаем линейный закон изменения давления по высоте

$$P_z = P_a + \rho g h \frac{z}{H+h} = P_a + \rho g \alpha z; \quad (14)$$

тогда $Q_z = Q \left(1 + q \frac{P_a}{P_a + \rho g \alpha z} \right).$

Среднюю величину объемного расхода аэрогидросмеси найдем, проинтегрировав полученное выражение по длине подъемной трубы

$$\begin{aligned} Q_{см.ср} &= \frac{1}{H+h} \int_0^{H+h} Q_z dz = \\ &= \frac{1}{H+h} \int_0^{H+h} Q \left(1 + q \frac{P_a}{P_a + \rho g \alpha z} \right) dz = \\ &= \frac{Q}{H+h} \left(\int_0^{H+h} dz + q \int_0^{H+h} \frac{dz}{1 + \frac{\rho g \alpha}{P_a} z} \right) = \\ &= \frac{Q}{H+h} \left(H+h + \frac{q P_a}{\rho g \alpha} \ln \left((H+h) \frac{\rho g \alpha}{P_a} + 1 \right) \right) = \\ &= Q \left(1 + \frac{q P_a}{\rho g h} \ln \frac{P_a + \rho g h}{P_a} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда средняя скорость смеси определяется по формуле

$$V_{cp} = \frac{4Q}{\pi D^2} \left(1 + \frac{q p_a}{\rho g h} \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a} \right). \quad (16)$$

Подставляя в формулу (12) соответствующие значения (16), получим:

$$N_c = \frac{1,1 \lambda \cdot 16 Q^3 (\rho + \rho_0 q) (H + h)}{2 \pi^2 D^5} \times \left(1 + \frac{q p_a}{\rho g h} \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a} \right)^2. \quad (17)$$

Подставляя далее в формулу (1) соответствующие значения мощностей из (2), (5), (9) и (17), получим следующее выражение для производительности эрлифта (в м³/с):

$$Q = \frac{\pi D^{2,5}}{4} \sqrt{\frac{2 \left(q p_a \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a} - \rho g H \right)}{(\rho + \rho_0 q) \left[\left(1 + q^2 \right) \frac{D^5}{D_0^4} + 1,1 \lambda (H + h) \left(1 + \frac{q p_a}{\rho g h} \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a} \right)^2 \right]}}. \quad (18)$$

Эту формулу можно представить так:

$$Q = C D^{2,5}, \quad (19)$$

где C — коэффициент производительности эрлифта:

$$C = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2 \left(q p_a \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a} - \rho g H \right)}{(\rho + \rho_0 q) \left[\left(1 + q^2 \right) \frac{D^5}{D_0^4} + 1,1 \lambda (H + h) \left(1 + \frac{q p_a}{\rho g h} \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a} \right)^2 \right]}}. \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что при одних и тех же условиях (глубине погружения смесителя и высоте подъема смеси, диаметре трубы и пр.) производительность эрлифта будет зависеть от удельного расхода воздуха q . Существует некое минимальное значение удельного расхода воздуха q_{min} , при котором производительность эрлифта равна нулю (смесь воды с воздухом поднимается на всю высоту подъемной трубы, но вода ещё не выливается). Определить q_{min} можем из (20), приравняв числитель подкоренного выражения нулю:

$$q_{min} = \frac{\rho g H}{p_a \ln \frac{p_a + \rho g h}{p_a}}. \quad (21)$$

На рис. 2 изображены графики зависимости величины q_{min} от величины относительного погружения a для различных глубин погружения смесителя.

Выводы и направления дальнейших исследований

Как видно из рис. 2, при значениях удельного погружения менее 0,25 удельный расход воздуха существенно увеличивается. Следовательно, использование эрлифтов наиболее целесообразно при больших величинах погружения смесителя. Примером может служить эрлифт эрлифтно-земснарядного комплекса, предназначенного для добычи полезных ископаемых (песка, песчаногравийной смеси и др.) со дна водоемов.

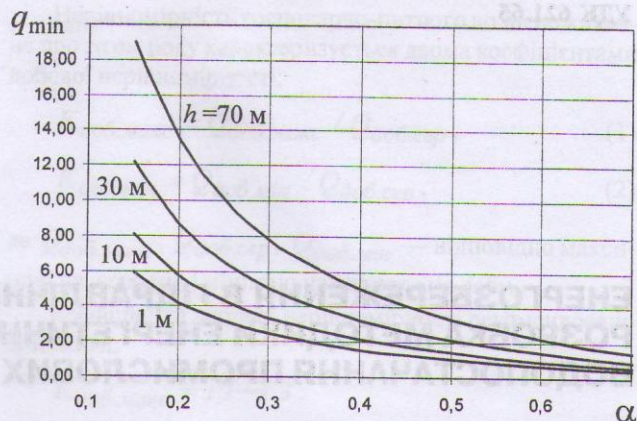


Рис. 2. Графики зависимости величины q_{min} от величины относительного погружения a для различных глубин погружения смесителя.

Опыт эксплуатации эрлифтно-земснарядных комплексов по добыче песка из рек и водоемов [3] показал их исключительные преимущества перед обычными землесосными снарядами. Несмотря на несколько (порядка 20%) больший расход электроэнергии или дизтоплива себестоимость добытого ими материала ниже, чем для земснаряда, за счет более высокой концентрации получаемой гидросмеси, стабильной и безаварийной работы комплекса. Помимо этого, комплекс имеет во много раз большую глубину разработки — до 70 м и более, позволяет вести разработку в условиях, в которых обычный земснаряд не работоспособен. Имеется опыт эксплуатации эрлифтно-земснарядного комплекса в зимних условиях, а также при расположении его в предельно малом по глубине и пространству водоеме (в болотных условиях). В эрлифтно-земснарядном комплексе обеспечиваются благоприятные условия работы грунтового насоса — на всасывание подается подготовленная гидросмесь с постоянной высокой концентрацией, не содержащая крупных кусков; насос работает с небольшим разрежением во всасывании, что значительно снижает вероятность работы в кавитационном режиме.

Литература

1. Гейер, В.Г., Козыряцкий, Л.Н., Пашенко, В.С., Антонов Я.К. Эрлифтные установки: Учебное пособие. — Донецк: ДПИ, 1982.
2. Антонов, Я.К., Козыряцкий, Л.Н., Малашкина, В.А. и др. Гидроподъем полезных ископаемых. — М: Недра, 1995.
3. Энциклопедия эрлифтов / Ф.А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий, В.С. Пашенко, А.П. Кононенко. — Донецк, 1995.
4. Бойко, М.Г., Козыряцкий, Л.М., Кононенко, А.П. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди: Навч. посібник. — Донецк: ДонНТУ, 2005.
5. Бойко, М. Г., Моргунов, В. М., Козыряцкий, Л. М., Федоров, О.В. Гідромеханізація: Навч. посібник. — Донецк: ДонНТУ, 2010.

Надійшла 06.12.2010 р.