

УДК 622.271.6 (075.3)

**КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК**

Козыряцкий Л. Н., канд. техн. наук, доц.,
Федоров О. В., канд. техн. наук, доц.,
Донецкий национальный технический университет.

Предложена зависимость для определения коэффициента полезного действия гидropодъемных установок (в частности эрлифтов), более полно учитывающая выполняемую ими полезную работу

The formula for definition of efficiency of hydroelevating installations (in particular of airlifts), more full taking into account useful work, carried out by them is offered

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Гидромеханизация горно-добычных работ — один из наиболее перспективных способов их комплексной механизации. Использование гидротранспортных и гидropодъемных установок обеспечивает непрерывность технологического процесса и высокую производительность транспортирования, позволяет существенно снизить аварийность, повысить производительность и безопасность труда. Один из существенных недостатков гидротранспортных установок — большой, по сравнению с механическим транспортом, расход энергии. В первую очередь, это относится к таким установкам, как эрлифты и гидроэлеваторы, коэффициент полезного действия которых ниже, чем к. п. д. центробежных грунтовых насосов и углесосов.

Анализ исследований и публикаций. Проблемам гидротранспорта и гидropодъема посвящены работы большого числа отечественных и зарубежных авторов. В частности, эрлифтный подъем горной массы исследовался в работах [1 ... 9]. Особо следует выделить работы [1 ... 7] научной школы ДонНТУ (ДПИ) — ведущей в области создания эрлифтов для горной и других отраслей промышленности.

Постановка задачи. Как известно, одним из основных показателей эффективности машины или установки является ее коэффициент полезного действия (к. п. д.), равный отношению полезной работы, производимой машиной за некоторый промежуток времени, к затраченной за это время энергии. Величина к. п. д. не может быть из-

мерена непосредственно, а определяется путем вычисления по результатам замеров других величин, характеризующих работу машины (для гидротранспортных установок это напоры, давления, подачи, расход электроэнергии и др.). Для расчета к. п. д. используются общепринятые для машин или установок данного типа зависимости. В большинстве случаев, величину затраченной энергии определить относительно просто, а расчет всей полезной работы, производимой машиной или установкой, может вызвать затруднения. Если какая-либо часть этой работы не будет учтена, значение к. п. д. будет занижено.

Изложение материала и результаты. Очевидно, что полезная работа, совершаемая гидropодъемными установками — подъем жидкости или гидросмеси (жидкости со взвешенными в ней твердыми частицами) на некоторую высоту H . При известных расходе жидкости Q и плотности ρ полезная мощность подъема жидкости составит

$$N_{\text{п}} = \rho g H Q, \quad (1)$$

где g — ускорение свободного падения.

Так, для вычисления к. п. д. эрлифта общепринятой является формула [4], числитель которой соответствует (1), а знаменатель определяет энергию сжатого газа (воздуха), который подается в смеситель эрлифта:

$$\eta_3 = \frac{\rho g H Q_3}{Q_{\text{в}} p_{\text{а}} \ln \left(\frac{p_{\text{а}} + p_{\text{см}}}{p_{\text{а}}} \right)} \quad \text{или} \quad \eta_3 = \frac{\rho g H}{q p_{\text{а}} \ln \left(\frac{p_{\text{а}} + p_{\text{см}}}{p_{\text{а}}} \right)}, \quad (2)$$

где H — высота подъема жидкости, рис. 1; Q_3 — подача эрлифта (расход жидкости или гидросмеси); $Q_{\text{в}}$ — расход сжатого воздуха, приведенный к атмосферному давлению; $p_{\text{а}}$ — атмосферное давление; $p_{\text{см}}$ — давление в смесителе; $q = Q_{\text{в}} / Q_3$ — удельный расход воздуха. В работах [2, 3] при вычислении к. п. д. эрлифта предлагалось учесть кинетическую энергию газожидкостной струи на выходе из подъемной трубы эрлифта:

$$\eta_3 = \frac{\rho g \left(H + \frac{v_{\text{ВЫХ}}^2}{2g} \right)}{q p_{\text{а}} \ln \left(\frac{p_{\text{а}} + p_{\text{см}}}{p_{\text{а}}} \right)}, \quad (3)$$

где $v_{\text{ВЫХ}}^2$ — скорость газожидкостной струи на выходе из подъемной трубы. Однако учитывать эту энергию при определении к. п. д. уста-

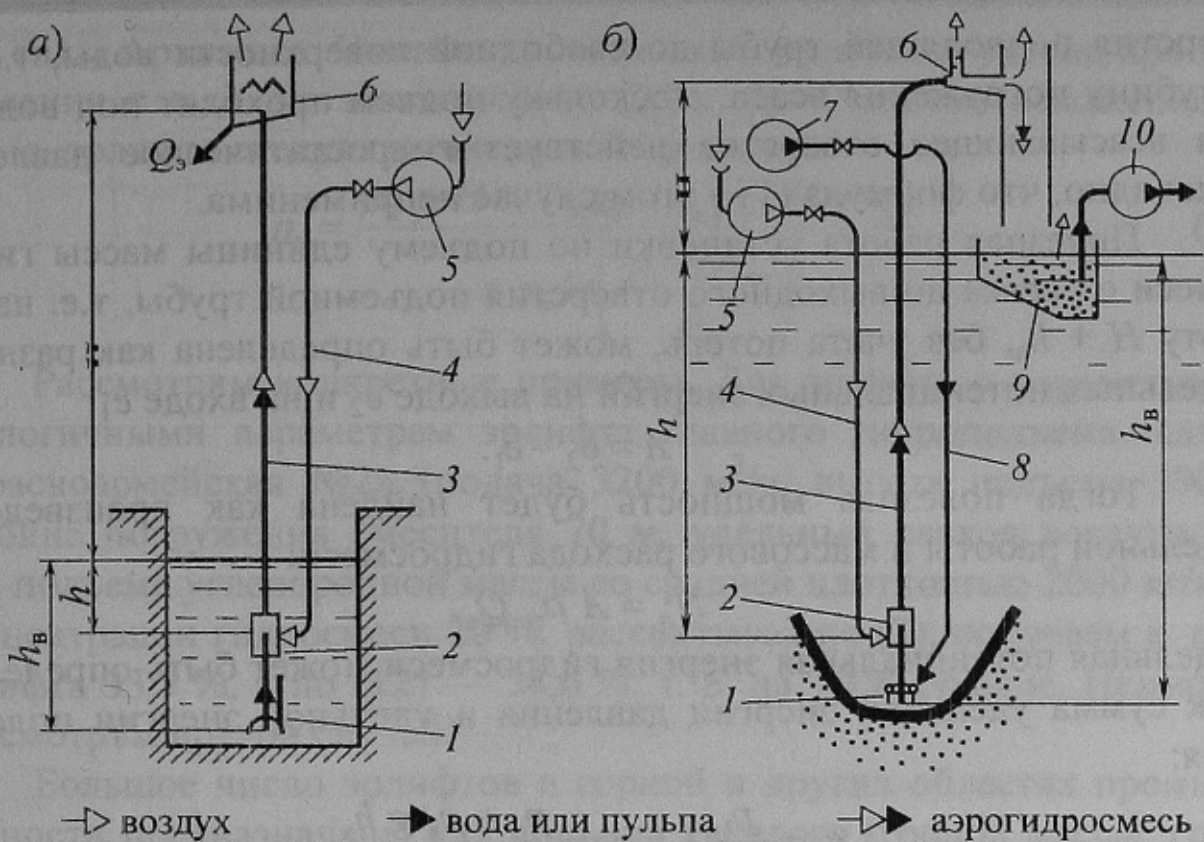


Рисунок 1 – Гидравлические схемы эрлифта (а) и эрлифтно-земснарядного комплекса (б): 1 – всасывающее (грунтозаборное) устройство; 2 – смеситель; 3 – подъемная труба; 4 – воздухоподающая труба; 5 – компрессор; 6 – воздухоотделитель; 7 – вспомогательный насос; 8 – трубопровод размыва; 9 – промежуточная емкость; 10 – грунто-вый насос

новки правомерно лишь в том случае, если эта энергия используется для совершения полезной работы. Например, в некоторых шламовых эрлифтах, применяемых для очистки емкостей, кинетическая энергия выходящей струи используется для разделения трехфазной смеси на дуговом сите [5]. В большинстве же конструкций эрлифтов эта энергия безвозвратно теряется в каналах воздухоотделителя и, следовательно, не может учитываться в к. п. д.

Для эрлифта, перекачивающего чистую воду, зависимость (2) вполне справедлива. Однако следует принять во внимание, что большинство эрлифтов, используемых в горнодобывающей промышленности, служат для подъема твердого – горной массы, шлама, песков, гравия, гальки и др. При этом, помимо работы (1) по подъему гидро-смеси плотностью $\rho_{гс} > \rho_в$, где $\rho_в$ – плотность воды, на высоту H , эр-лифт должен совершить другую полезную работу – поднять эту более тяжелую среду на высоту $h_в$ – расстояние от всасывающего от-

верстия подводящей трубы до свободной поверхности воды, т.е. на глубину погружения всаса. Поскольку подъем проходит под водой и на всасывающее отверстие действует гидростатическое давление, очевидно, что формула (1) в этом случае неприменима.

Полезная работа установки по подъему единицы массы гидросмеси от всаса до выходного отверстия подъемной трубы, т.е. на высоту $H + h_b$, без учета потерь, может быть определена как разность удельных потенциальных энергий на выходе e_2 и на входе e_1 :

$$A = e_2 - e_1. \quad (4)$$

Тогда полезная мощность будет найдена как произведение удельной работы и массового расхода гидросмеси:

$$N_n = A \rho_{гс} Q_3. \quad (5)$$

Удельная потенциальная энергия гидросмеси может быть определена как сумма удельной энергии давления и удельной энергии положения:

$$e_1 = \frac{p_1}{\rho_{гс}} + g z_1 = \frac{p_a + \rho_b g h_b}{\rho_{гс}}, \quad (6)$$

$$e_2 = \frac{p_2}{\rho_{гс}} + g z_2 = \frac{p_a}{\rho_{гс}} + g(H + h_b), \quad (7)$$

где p_1, z_1, p_2, z_2 – абсолютные давления и высоты входного и выходного отверстий ($z_1 = 0; z_2 = H + h_b$); p_a – атмосферное давление; $\rho_b g h_b$ – избыточное давление на глубине h_b . Подставив выражения (6) и (7) в (5) и преобразовав, получим

$$N_n = [\rho_{гс} (H + h_b) - \rho_b h_b] g Q_3, \quad (8)$$

или

$$N_n = [\rho_b H + S (\rho_t - \rho_b)(H + h_b)] g Q_3, \quad (9)$$

где ρ_t – плотность твердого, поднимаемого эрлифтом; S – объемная концентрация твердого в гидросмеси. Сравним полученное выражение с (1). Последнее в случае перекачивания гидросмеси примет вид

$$N_n = \rho_{гс} g H Q_3 = [\rho_b + S (\rho_t - \rho_b)] g H Q_3, \quad (10)$$

При перекачивании чистой воды ($S = 0$) значения, рассчитанные по обоим выражениям, совпадут, но в случае подъема гидросмеси значение N_n , рассчитанное по (9) будет больше на величину

$$\Delta N_n = S (\rho_t - \rho_b) g h_b Q_3. \quad (11)$$

Это полезная мощность подъема твердого со дна емкости или водоема до уровня поверхности воды, рассчитанная с учетом дейст-

вия силы Архимеда. Именно эта мощность и не была учтена при вычислении к. п. д. по зависимостям (2) и (3). С учетом изложенного, к. п. д. эрлифта следует вычислять по формуле

$$\eta_3 = \frac{\rho_b g H + S (\rho_t - \rho_b) g (H + h_b)}{q p_a \ln \left(\frac{p_a + p_{cm}}{p_a} \right)}, \quad (12)$$

Рассмотрим конкретные примеры. Для эрлифта с параметрами, аналогичными параметрам эрлифта главного гидроподъема шахты «Красноармейская №2» (подача 3200 м³/ч, высота подъема 390 м, глубина погружения смесителя 70 м, удельный расход воздуха 66) при подъеме углепородной массы со средней плотностью 2000 кг/м³ и концентрации гидросмеси 20 %, рассчитывая по (2), получаем к. п. д. эрлифта 33,5 %, а по (12) — 34,6 %, т. е. на 1,1% больше. Немного? Рассмотрим другой случай.

Большое число эрлифтов в горной и других областях промышленности предназначены для подъема твердого (горной массы, грунта, шлама, золы и др.) со дна емкости или водоема на поверхность. Это шламовые, багерные эрлифты и эрлифты эрлифтно-земснарядных комплексов. Для последних характерны особо большие глубины расположения всаса — до 120 м и более, при весьма малой высоте подъема гидросмеси над уровнем воды — 2,5 ... 4 м, рис. 1 б. Для примера рассмотрим эрлифтно-земснарядный комплекс, применявшийся для добычи песка на р. Югань (Россия) с глубиной разработки до 50 м. По результатам испытаний [3], проводившихся при $H = 4$ м и $h = h_b = 12$ м, производительность установки по гидросмеси составила 630 м³/ч, концентрация песка плотностью 2300 кг/м³ — 25 %, удельный расход воздуха 1,87. Используя формулу (2), получим к. п. д. эрлифта, равный 32 % — весьма мало в сравнении с грунтонасосами, имеющими к. п. д. до 70 %. Не удивительно, что разработчиков эрлифтов зачастую обвиняли в создании энергетически неэффективных установок. Вычислим к. п. д. эрлифта по тем же данным, используя зависимость (12). Получаем совсем другую величину — 62 %, — сравнимую с к. п. д. центробежных машин!

Анализ зависимостей (9) ... (12) показывает, что доля не учитывавшейся ранее полезной работы (11) в общей полезной работе эрлифта при малых относительных погружениях смесителя невелика — 1 ... 3 %. Однако для эрлифтов с большими относительными погружениями она может достигать 50 % и более, рис. 2 а. Расхождение

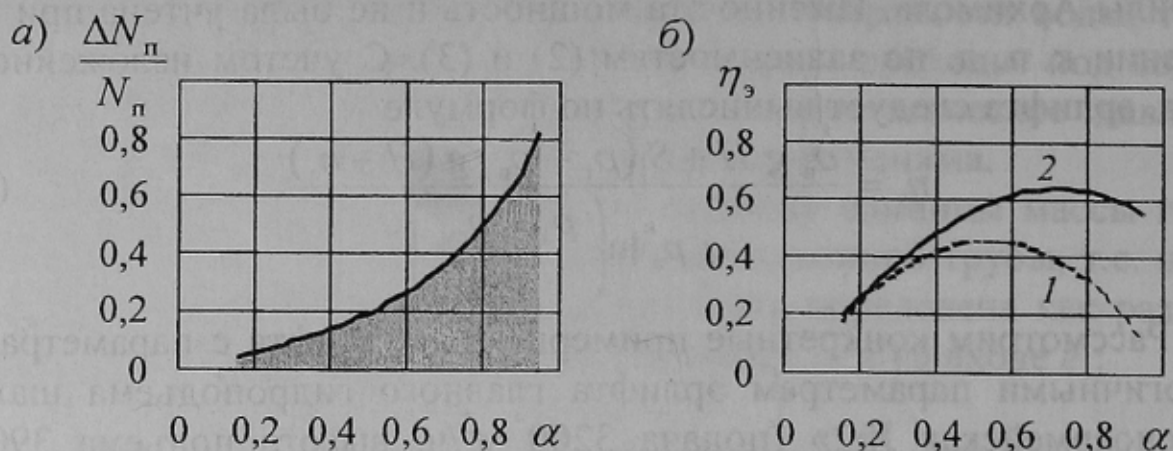


Рисунок 2 – Зависимости доли полезной работы ΔN_p в общей полезной работе эрлифта (а) и к. п. д. эрлифта (б), рассчитанные по общепринятой (1) и предлагаемой (2) зависимостям, от относительного погружения смесителя

между значениями к. п. д., рассчитанными по (12) и (2) с увеличением α возрастают, рис. 2 б. Графики рис. 2 рассчитаны для $\rho_T = 2300 \text{ кг/м}^3$, $S = 0,25$, $h = 12 \text{ м}$ и оптимального режима работы эрлифта. При больших глубинах всасывания (несколько десятков метров) возможно получение режимов с еще более высоким к. п. д. — до 70 ... 75 %.

Следует отметить, что такой подход к определению полезной работы и к. п. д., в частности, зависимость (9), применим не только к эрлифтам, но и к другим установкам, предназначенным для подъема смеси воды и твердого — гидроэлеваторным, углесосным и др.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Эрлифт, использующийся 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 — до 70 ... 75 %. 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.

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 дизельного топлива 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 таких условиях, в которых обычный земснаряд неработоспособен. 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 всас подается подготовленная гидросмесь с постоянной высокой концентрацией, не содержащая крупных кусков; насос работает с небольшим разрежением во всасе, что значительно снижает вероятность работы в кавитационном режиме.

Эрлифт не боится аварийных ситуаций, «смертельных» для насосных установок: может транспортировать горную массу, содержащую круглые 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. Несомненно, что, обладая такими преимуществами, эрлифт может быть востребован (и уже востребован) при гидромеханизированных работах в горной промышленности, строительстве энергетике и других отраслях.

Список источников.

1. Гейер В. Г. Новые технологические схемы и средства шахтного водоотлива. — Донецк: ДПИ, 1972.
2. Эрлифтные установки: Учебное пособие / Гейер В. Г., Козыряцкий Л. Н., Пашенко В. С., Антонов Я. К. — Донецк: ДПИ, 1982.
3. Гидроподъем полезных ископаемых / Антонов Я. К., Козыряцкий Л. Н., Малашкина В. А. и др. — М: Недра, 1995.
4. Гейер В. Г. Энергетическая оценка гидравлических подъемов. // Труды ДПИ. Т. 46. Серия горно-электромеханическая. — Донецк: ДПИ, 1960, Вып 10. — С. 5-20.
5. Методические рекомендации по применению средств механизации очистки шахтных водосборных емкостей/ В. Г. Гейер, В. Б. Малеев, Е. И. Данилов, В. М. Яковлев и др. — Донецк, ЦБНТИ Минуглепрома УССР, 1983.
6. Энциклопедия эрлифтов/ Ф. А. Папаяни, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пашенко, А. П. Кононенко. — Донецк, 1995.
7. Бойко М. Г., Козыряцкий Л. М., Кононенко А. П. Землесосні і ерліфтно-землесосні снаряди. Навч. посібник. — Донецьк: ДонНТУ, 2005.
8. Лезгинцев Г. М., Истомина С. Ю., Контарь Е. А., Применение эрлифтного оборудования для разработки морских россыпей. — М: Цветметинформация, 1973.
9. Weber M. Vertical Hydraulic Conveying of Solids by Air-Lift // Journal of Pipelines, 1982, № 2. — P. 137-152.

Дата поступления статьи в редакцию: 03.05.07