

## **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 гидроподъемных 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 гидроподъемных установок обеспечивает непрерывность технологического процесса и высокую производительность транспортирования, позволяет существенно снизить аварийность, повысить производительность и безопасность труда. Один из существенных недостатков гидротранспортных установок — больший, 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 гидроподъема 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 гидроподъемными установками — подъем жидкости или гидросмеси (жидкости со взвешенными в ней твердыми частицами) на некоторую высоту  $H$ . При известных расходе жидкости  $Q$  и плотности  $\rho$  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:

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

где  $H$  — высота подъема жидкости, рис. 1;  $Q_{\text{э}}$  — 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;  $q = Q_{\text{в}} / Q_{\text{э}}$  — 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:

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

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

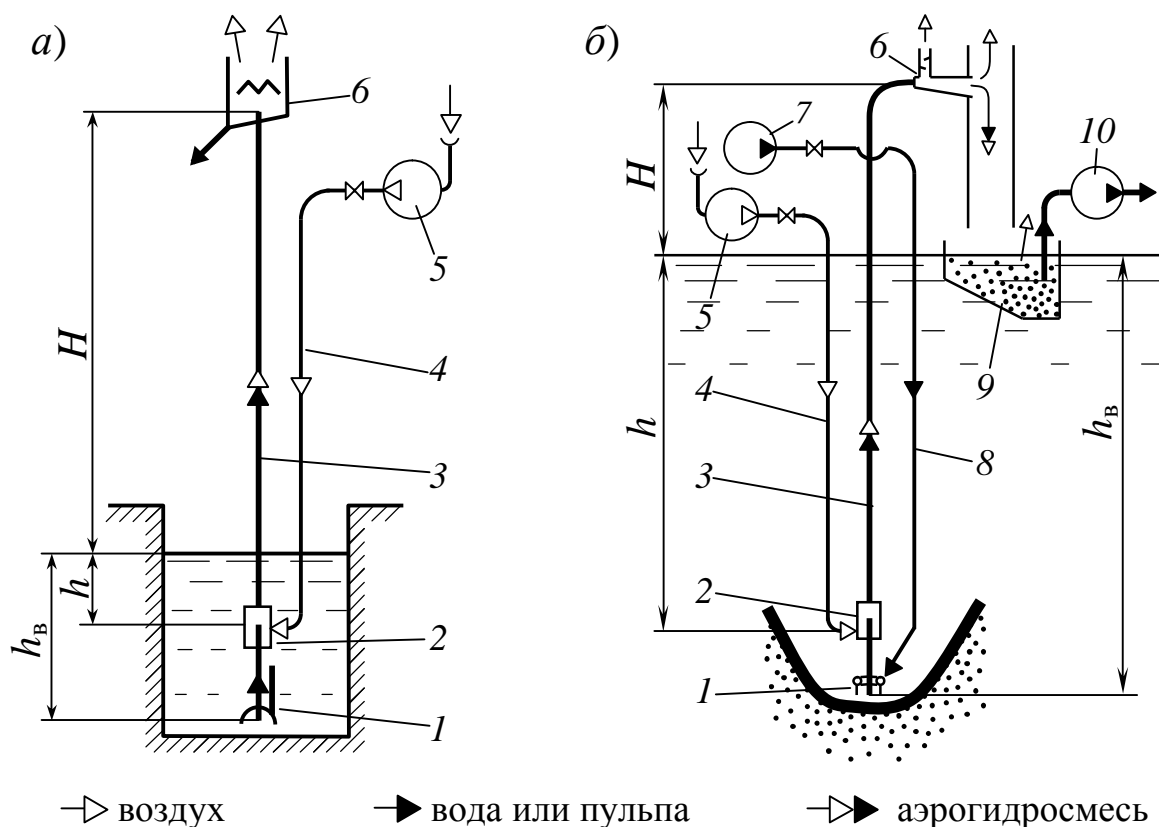


Рисунок 1 – Гидравлические схемы эрлифта (а) и эрлифтно-земснарядного комплекса (б): 1 – всасывающее (грунтозаборное) устройство; 2 – смеситель; 3 – подъемная труба; 4 – воздухоподающая труба; 5 – компрессор; 6 – воздухоотделитель; 7 – вспомогательный насос; 8 – трубопровод размыва; 9 – промежуточная 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 гидросмеси плотностью  $\rho_{гс} > \rho_{в}$ , где  $\rho_{в}$  – плотность воды, на высоту  $H$ , эрлифт 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:

$$N_{\text{п}} = A \rho_{\text{гс}} Q_3. \quad (5)$$

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

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

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

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

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

или

$$N_{\text{п}} = [\rho_b H + S (\rho_{\text{т}} - \rho_b)(H + h_b)] g Q_3, \quad (9)$$

где  $\rho_{\text{т}}$  – плотность твердого, поднимаемого эрлифтом;  $S$  – объемная концентрация твердого в гидросмеси. Сравним полученное выражение с (1). Последнее в случае перекачивания гидросмеси примет вид

$$N_{\text{п}} = \rho_{\text{гс}} g H Q_3 = [\rho_b + S (\rho_{\text{т}} - \rho_b)] g H Q_3, \quad (10)$$

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

$$\Delta N_{\text{п}} = S (\rho_{\text{т}} - \rho_b) g h_b Q_3. \quad (11)$$

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 м<sup>3</sup>/ч, высота подъема 390 м, глубина погружения смесителя 70 м, удельный расход воздуха 66) при подъеме углепородной массы со средней плотностью 2000 кг/м<sup>3</sup> 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 м<sup>3</sup>/ч, концентрация песка плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup> — 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 учтенной 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

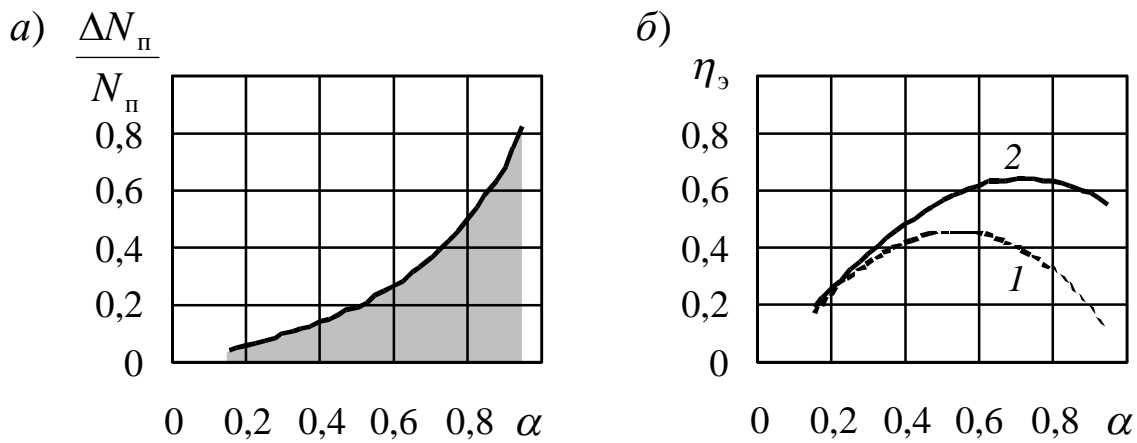


Рисунок 2 – Зависимости доли полезной работы  $\Delta N_{\text{п}}$  в общей полезной работе эрлифта (а) и к. п. д. эрлифта (б), рассчитанные по общепринятой (1) и предлагаемой (2) зависимостям, от относительного погружения смесителя

между значениями к. п. д., рассчитанными по (12) и (2) с увеличением  $\alpha$  возрастают, рис. 2 б. Графики рис. 2 рассчитаны для  $\rho_{\text{т}} = 2300 \text{ кг/м}^3$ ,  $S = 0,25$ ,  $h = 12 \text{ м}$  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 гидро-смесей 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 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 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 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. 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., Истомин 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.