

УДК 622.276.52

**Ф. Ф. СТИФЕЕВ**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ПУЛЬПЫ В ПОДЪЕМНОЙ ТРУБЕ ЭРЛИФТА

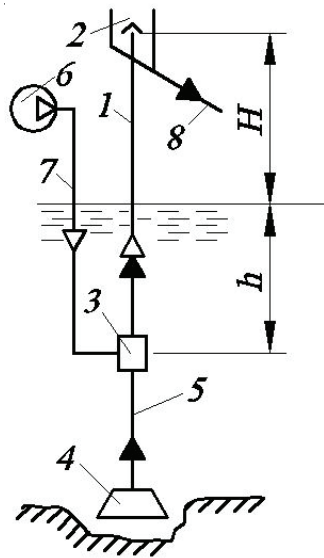
Автором впервые поставлена и решена задача об определении рациональной плотности транспортируемой эрлифтом пульпы в условиях, когда этот параметр не ограничен технологическим регламентом. Получены зависимости для нахождения оптимальной, с позиций энергетических затрат, плотности пульпы.

**эрлифт, плотность, пульпа, энергетические затраты, КПД**

### ВВЕДЕНИЕ

Эрлифтные установки нашли широкое применение не только в горнодобывающей промышленности и на обогатительных фабриках [1] в качестве средства транспорта пульпы, параметры которой заданы технологическими требованиями, но и в строительстве [2–4] для подъема гидросмеси, плотность которой не регламентируется. В процессе производства земляных работ при строительстве мостов рекомендуют [3, 4] использовать эрлифт производительностью 5...20 м<sup>3</sup>/ч «при насыщении пульпы грунтом от 5 до 20 %». Однако указанная плотность (насыщенность) не обоснована ни теоретическими исследованиями, ни практическими испытаниями.

Гидравлическая схема эрлифта для дноуглубительных работ представлена на рис. 1.



**Рисунок 1** — Гидравлическая схема эрлифтной установки.

Установка, в основном, состоит из подъемной трубы 1, воздухоотделителя 2, смесителя 3, грунтозаборного (дозировющего) устройства 4, подающей трубы 5, нагнетателя сжатого воздуха (компрессора или воздуходувки) 6, воздухопровода 7, сливного патрубка 8.

По принципу действия (ГОСТ 17318-72) эрлифты относятся к динамическим насосам трения. В них гидросмесь (пульпа) поднимается под действием сил, возникающих при относительном движении воздуха и пульпы.

Работа установки происходит следующим образом: воздух от компрессора 6 по воздухопроводу 7 подается в смеситель 3, где смешивается с пульпой, поступающей через грунтозаборное устройство 4 и подающую трубу 5. Из смесителя трехфазная среда (воздух + вода + грунт) по подъемной трубе 1 движется вверх и поступает в воздухоотделитель 2, в котором разделяется — воздух уходит в атмосферу, а пульпа по сливному патрубку 8 отводится либо в приемную емкость (на рис. 1 — не показана), либо в специально отведенное место водоема.

Расходная характеристика эрлифта (зависимость массовой подачи эрлифта от расхода воздуха при прочих неизменных параметрах) приведена на рис. 2.

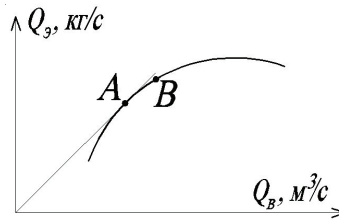


Рисунок 2 — Расходная характеристика эрлифта.

Здесь на графике выделены точки, соответствующие следующим режимам эксплуатации: А — оптимальному, т. е. режиму работы с максимальным КПД; В — расчетному, который характеризуется большим на 30 % расходом воздуха по сравнению с режимом оптимальным. Работа на расчетном режиме, хотя и приводит к некоторому снижению КПД, является предпочтительней, т. к. эксплуатация на оптимальном режиме сопровождается значительными периодическими нагрузками на элементы подъемной трубы и воздухоотделителя.

**Целью** настоящей работы является определение оптимальной плотности пульпы в подъемной трубе эрлифта в условиях, когда этот параметр не ограничен технологическим регламентом.

При **определении рациональной плотности пульпы в подъемной трубе эрлифта** будем рассматривать энергетические затраты на транспорт воды как неизбежные сопутствующие потери энергии, так как подъем эрлифтом твердых масс без жидкой фазы невозможен. При этом полезная мощность эрлифтного подъема, отнесенная к массовой подаче, определяется соотношением:

$$N = \rho_{\text{ТВ}} g H Q_{\text{ТВ}}, \quad (\text{Дж}), \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ТВ}}$  — средняя плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  — ускорение свободного падения, (в дальнейшем будем принимать  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ );  
 $H$  — высота подъема пульпы эрлифтом, м;  
 $Q_{\text{ТВ}}$  — объемная подача твердых масс, м<sup>3</sup>/с.

Мощность, подводимая к смесителю эрлифта, обеспечивающая подъем как твердых масс, так и воды, равна:

$$N_1 = Q_{\text{В}} P_{\text{а}} \ln(P_{\text{с}} / P_{\text{а}}), \quad (\text{Дж}), \quad (2)$$

где  $Q_{\text{В}}$  — расход воздуха, приведенный к атмосферным условиям, м<sup>3</sup>/с;  
 $P_{\text{а}}$  — атмосферное давление, Н/м<sup>2</sup>;  
 $P_{\text{с}}$  — давление в смесителе эрлифта, Н/м<sup>2</sup>.

Таким образом, КПД эрлифта по подъему твердых масс:

$$\eta = \rho_{\text{ТВ}} g H Q_{\text{ТВ}} / Q_{\text{В}} P_{\text{а}} \ln(P_{\text{с}} / P_{\text{а}}). \quad (3)$$

Объемную подачу  $Q_{\text{ТВ}}$  найдем из следующих соображений. Массовая подача эрлифта в единицу времени:

$$G = G_{\text{ТВ}} + G_{\text{В}}, \quad (4)$$

где  $G_{\text{ТВ}}$  и  $G_{\text{В}}$  массовые подачи эрлифта по твердым фракциям и воде соответственно, кг/с.

Учитывая, что  $G = \rho Q$ ,  $G_{\text{ТВ}} = \rho_{\text{ТВ}} Q_{\text{ТВ}}$  и  $G_{\text{В}} = \rho_{\text{В}} Q_{\text{Ж}}$  (где  $\rho$  и  $\rho_{\text{В}}$  — плотности пульпы и воды, а  $Q$  и  $Q_{\text{В}}$  — объемная подача эрлифта и объемная подача эрлифта только по воде, соответственно), уравнение (4) примет вид:

$$\rho Q = \rho_{\text{ТВ}} Q_{\text{ТВ}} + \rho_{\text{В}} Q_{\text{Ж}}.$$

Естественно, что  $Q_{\text{Ж}} = Q - Q_{\text{ТВ}}$ . Тогда:

$$\rho Q = \rho_{\text{ТВ}} Q_{\text{ТВ}} + \rho_{\text{В}} (Q - Q_{\text{ТВ}}). \quad (5)$$

Из уравнения (5) получим:

$$Q_{\text{ТВ}} = Q(\rho - \rho_{\text{В}}) / (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{В}}).$$

Аналогично определяется и подача эрлифта по воде:

$$Q_{\text{Ж}} = Q(\rho_{\text{ТВ}} - \rho) / (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{В}}).$$

Таким образом, КПД эрлифта, отнесенный к подъему только твердых масс, определяется выражением:

$$\eta = \rho_{\text{ТВ}} g H Q (\rho - \rho_{\text{В}}) / Q_{\text{В}} P_{\text{а}} (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{В}}) \ln(P_{\text{с}} / P_{\text{а}}),$$

или, после преобразований:

$$\eta = \rho_{\text{ТВ}}^* H (\rho^* - 1) / 10 q (\rho_{\text{ТВ}}^* - 1) \ln(P_{\text{с}} / P_{\text{а}}), \quad (6)$$

где  $\rho_{\text{ТВ}}^*$  — относительная плотность твердых масс (отношение плотности твердых масс к плотности воды);  
 $\rho^*$  — относительная плотность пульпы (отношение плотности пульпы к плотности воды);  
 $q$  — удельный расход воздуха, равный отношению расхода воздуха (в м<sup>3</sup>/с) к объемной подаче эрлифта (также измеряемой в м<sup>3</sup>/с).

Анализ уравнения (6) показывает, что КПД эрлифта по транспорту твердых фракций зависит от плотности твердого материала, плотности пульпы, высоты подъема, давлений в смесителе и в воздухоотделителе и удельного расхода воздуха. Для конкретной эрлифтной установки, как правило, известными параметрами являются: высота подъема, плотность твердого материала, плотность пульпы, которая регулируется при помощи различных дозирующих устройств, давление в смесителе, зависящее, в основном, от его геометрического погружения. Давление в воздухоотделителе эрлифта обычно равно давлению атмосферному. Наибольшую трудность при нахождении  $\eta$  представляет определение удельного расхода воздуха, так как этот параметр зависит от геометрических размеров установки, относительного погружения, плотности пульпы и плотности твердого материала, положения режимной точки на расходной характеристике эрлифта и т. д.

Удельный расход воздуха при транспорте эрлифтом только воды с достаточной для практики точностью определяется зависимостью, предложенной Л. Н. Козыряцким [6]:

$$q_{\text{В}} = 0,767 \alpha^{-2,2}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  — относительное погружение эрлифта (один из главных критериев подобия эрлифтных установок), равное отношению высоты подъема пульпы  $H$  ко всей длине подъемной трубы  $(h + H)$ .

Зависимость (7) справедлива для коротких эрлифтов, для которых отношение  $(h + H) / D \leq 200$  при ограничении заглубления смесителя под свободный уровень воды  $h \leq 20$  м. Здесь  $D$  — диаметр подъемной трубы эрлифта. Для длинных эрлифтов, у которых отношение  $(h + H) / D \leq 200$  и заглубление смесителя в пределах  $h = 40 \dots 120$  м, рекомендуется [6] следующая зависимость:

$$q_{\text{В}} = 60 \epsilon^{-9\alpha}. \quad (8)$$

Параметры установок, применяемых при дноуглубительных работах в строительстве мостов и других подобных сооружений, относятся, как правило, к эрлифтам коротким. Поэтому, в дальнейшем, при исследовании энергетических зависимостей, будем рассматривать только короткие эрлифты.

Эмпирические зависимости (7) и (8) дают возможность определить значение удельного расхода воздуха только при транспорте эрлифтом воды и не учитывают влияния ни плотности пульпы, ни

плотности поднимаемого твердого материала. Для установления влияния указанных параметров автором [7] были проведены достаточно представительные экспериментальные исследования эрлифтных установок при транспорте морского песка ( $\rho = 2\,500 \text{ кг/м}^3$ ) и металлургической окалины ( $\rho = 5100 \text{ кг/м}^3$ ). При этом предельные значения объемной консистенции составили Т:Ж=2:3 (песок) и Т:Ж=2:5 (окалина), а массовой консистенции — 1:1 и 9:10 соответственно. Анализ экспериментальных исследований эрлифтов (как проведенных автором), так и В. Н. Метревели [8] позволил установить поправочный коэффициент  $k$ , учитывающий и плотность пульпы, и плотность твердого материала (в относительных единицах):

$$k = \sqrt{3}(\rho_{\text{ТВ}}^* - 0,65)(\rho^* - 1) + 1. \quad (9)$$

Таким образом, удельный расход воздуха при транспорте эрлифтом пульпы различной плотности с включениями твердых фракций установленной плотности может быть определен следующим соотношением:

$$q = kq_{\text{в}}. \quad (10)$$

В процессе работы эрлифта на рекомендуемых эксплуатационных режимах давление в его смесителе уменьшается за счет потерь давления в дозирующем устройстве и в подающей трубе. Поэтому, как показывает практика, натуральный логарифм в знаменателе соотношения (6) можем записать следующим образом:

$$\ln(P_c / P_a) = \ln(1 + 0,082h\rho^*). \quad (11)$$

Следовательно, уравнение (6) с учетом выражений (7), (9), (10) и (11) будет иметь вид

$$\eta = \rho_{\text{ТВ}}^* N(\rho^* - 1) / 7,67\alpha^{-2,2} \left[ \sqrt{3}(\rho_{\text{ТВ}}^* - 0,65)(\rho^* - 1) + 1 \right] (\rho_{\text{ТВ}}^* - 1) \ln(1 + 0,082h\rho^*). \quad (12)$$

Исследование на экстремум уравнения (12) позволило получить зависимость для определения оптимальной плотности пульпы (в относительных единицах):

$$\rho_{\text{ТВ}}^* N \left[ \sqrt{3}(\rho_{\text{ТВ}}^* - 0,65)(\rho^* - 1) + 1 \right] \ln(1 + 0,082h\rho^*) - (\rho^* - 1) \left\{ \sqrt{3}(\rho_{\text{ТВ}}^* - 0,65) \right\} \ln(1 + 0,082h\rho^*) + \left[ \sqrt{3}(\rho_{\text{ТВ}}^* - 0,65) + 1 \right] \cdot 0,082h / (1 + 0,082h\rho^*) = 0 \quad (13)$$

В уравнении (13) искомая величина  $\rho^*$  выражена в неявном виде, поэтому для ее нахождения целесообразно воспользоваться программой MathCad.

Исследуем знаменатель частной производной  $\partial\eta/\partial\rho^*$  на предмет установления, при каких значениях  $\rho_{\text{ТВ}}^*$  и  $\rho^*$  он может стремиться к нулю. Знаменатель:

$$7,67\alpha^{-2,2} \cdot (\rho_{\text{ТВ}}^* - 1) \left\{ \left[ \sqrt{3}(\rho_{\text{ТВ}}^* - 0,65)(\rho^* - 1) + 1 \right] \ln(1 + 0,082h\rho^*) \right\},$$

при реальных условиях эксплуатации эрлифта с параметрами  $\alpha = 0,4 \dots 0,8$  и плотностью твердых фракций  $\rho_{\text{ТВ}} \text{ кг/м}^3$  всегда будет больше нуля.

В таблице приведены значения изменения КПД при подъеме твердых масс эрлифтом, параметры которого: 1) высота подъема  $H = 8,5 \text{ м}$ ; 2) заглубление смесителя  $h = 5,5 \text{ м}$ ; плотность поднимаемого твердого материала  $\rho_{\text{ТВ}} = 2\,500 \text{ кг/м}^3$  (морской или речной песок). Расчеты будем выполнять до предельного по массе соотношения Т:Ж=1:1, т.е. до значения плотности пульпы, примерно равного  $1\,750 \text{ кг/м}^3$ .

**Таблица** — Расчетные значения КПД в зависимости от плотности пульпы

|            |     |     |     |     |     |      |     |      |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|
| $\rho^*$   | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6  | 1,7 | 1,75 |
| $\eta, \%$ | 3,9 | 5,9 | 7,0 | 7,6 | 7,9 | 8,04 | 8,1 | 8,08 |

Как следует из представленных вычислений, оптимальное, с позиций энергетических затрат, значение плотности пульпы рассматриваемого эрлифта составляет  $1\,700 \text{ кг/м}^3$ .

Полученные результаты позволяют уже на стадии проектирования оптимизировать режимы эксплуатации эрлифтных установок, предназначенных для проведения дноуглубительных строительных работ.

В дальнейших исследованиях следует установить изменения расхода воздуха и производительности эрлифта в зависимости от плотности транспортируемой пульпы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия эрлифтов [Текст] / Ф. А. Папаяни, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пашенко, А. П. Кононенко. — М. : Информсвязьиздат, 1995. — 592 с.
2. Бобриков, Б. В. Строительство мостов [Текст] : Учебник для вузов железнодорожного транспорта / Б. В. Бобриков. — М. : Транспорт, 1978. — 296 с.
3. Владимирский, С. Р. Механизация строительства мостов [Текст] : учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Мосты и транспорт. тоннели» / С. Р. Владимирский. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — СПб. : Изд-во ДНК, 2006. — 152 с. — ISBN 5-901562-54-2.
4. Александров, В. Д. Карманный справочник производителя работ ОАО «Мостотрест» [Текст] / В. Д. Александров. — Изд. пятое. — Москва : ООО «Печатный двор "На Алексеевской"», 2008. — 374 с.
5. Экспериментальные исследования режимов работы эрлифтных установок [Текст] / Н. Г. Логвинов, Н. И. Скорынин, Ф. Ф. Стифеев, И. В. Дикуха // Разработка месторождений полезных ископаемых. — Киев : Техника, 1987. — № 78. — С. 9–15.
6. Эрлифтные установки [Текст] : Учебное пособие / В. Г. Гейер, Л. Н. Козыряцкий, В. С. Пашенко, Я. К. Антонов. — Донецк : ДПИ, 1982. — 64 с.
7. Стифеев, Ф. Ф. Разработка эрлифтов для подъема пульпы повышенной плотности [Текст] : дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.06 / Стифеев Федор Федорович. — Донецк, 1985. — 262 с.
8. Метревели, В. Н. Применение эрлифтных установок в условиях обогатительных фабрик Чиатурского месторождения [Текст] / В. Н. Метревели // Труды XV науч.-техн. конференции ГрузПИ. — Тбилиси, 1970. — Вып. 16. — С. 61–69.

Получено 08.10.2012

Ф. Ф. СТИФЕЄВ

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ГУСТИНИ ПУЛЬПИ У ПІДЙОМНІЙ ТРУБІ  
ЕРЛІФТА

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Автором вперше поставлена і розв'язана задача про визначення раціональної густини пульпи, що переміщується ерліфтом, в умовах, коли цей параметр не обмежений технологічним регламентом. Отримано залежності для знаходження оптимальної, з позиції енергетичних витрат, густини пульпи.  
**ерліфт, густина, пульпа, енергетичні витрати, ККД**

FEODOR STIFEEV

DETERMINATION OF A PULP'S RATIONAL DENSITY IN ELEVATING PIPE OF  
AIRLIFT

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The problem about determination of rational closeness of the pulp transported by airlift in the conditions has beer given when this parameter is unreserved by technological regulation. Dependences and solved by the author for being optimal, from positions of power expenses, closeness of pulp have beer taken in.  
**airlift, density, pulp, energy consumption, efficiency factor**

**Стифеев Федір Федорович** — кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження та розробка ерліфтних установок для підйому твердого матеріалу різної фракції та густини.

**Стифеев Федор Федорович** — кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: исследование и разработка эрлифтных установок для подъема твердого материала различной крупности и плотности.

**Feodor Stifeev** – PhD (Eng.), the Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific researches: research and development of airlift installations for solid material of various size and density lift.