ISSN 1819-432X print / ISSN 1993-3495 online
СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО
СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION
2013, ТОМ 9, НОМЕР 3, 169–173
УДК 622.276.52

ДО ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНОГО ЕРЛІФТА ПРИ ВИКОНАННІ ПІДВОДНИХ БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ

Ф. Ф. Стіфєєв
Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, Донецька область, Україна, 86123.
E-mail: stifeevff@mail.ru

Отримана 4 вересня 2013; прийнята 27 вересня 2013.

Анотація. У статті розглядається можливість застосування вакуумного ерліфта для проведення дно-поглиблювальних будівельних робіт. Поставлено задачу оптимізувати, з позицій мінімізації енергетичних витрат, режими експлуатації таких установок. Встановлено, що ККД вакуумного ерліфта залежить, при інших незмінних параметрах, від абсолютного тиску (вакууму) в його повітровіддільник. Запропоновано залежності для визначення ККД вакуумного ерліфта від тиску в повітровіддільнику та для знаходження оптимального, за даних експлуатаційних параметрів, цього тиску.

Ключові слова: вакуумний ерліфт, густина, пульпа, енергетичні витрати, ККД.

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНОГО ЭРЛИФТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОДВОДНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Ф. Ф. Стифеев
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Донецкая область, Украина, 86123.
E-mail: stifeevff@mail.ru

Получена 4 сентября 2013; принята 27 сентября 2013.

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения вакуумного эрлифта для проведения дноуглубительных строительных работ. Поставлена задача оптимизировать, с позиций минимизации энергетических затрат, режимы эксплуатации таких установок. Установлено, что КПД вакуумного эрлифта зависит, при прочих неизменных параметрах, от абсолютного давления (вакуума) в его воздухоотделителе. Предложены зависимости для определения КПД вакуумного эрлифта от давления в воздухоотделителе и для нахождения оптимального, при данных эксплуатационных параметрах, этого давления.

Ключевые слова: вакуумный эрлифт, плотность, пульпа, энергетические затраты, КПД.

TO THE QUESTION OF VACUUM AIR-LIFT USE WHILE PRODUCING UNDERWATER CONSTRUCTION WORKS

Fedir Stifeev
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makiivka, Donetsk Region, Ukraine, 86123.
E-mail: stifeevff@mail.ru

Received 4 September 2013; accepted 27 September 2013.

Abstract. In this article the possibility of using of vacuum air-lift to execute bottom deepening construction works are considered. The problem of optimization of exploitation regimes of such settings from the position of power inputs minimization has been given. Output-input ratio of vacuum air-lift is depended of absolute pressure (vacuum) in its air separator in subject to condition of other parameters, which do not change. The dependencies for determination of output-input ratio of vacuum air-lift from pressure in air separator, and to find the optimal pressure having exploitation parameters have been suggested.

Keywords: vacuum air-lift, density, pulp, power inputs, output-input ratio.

Формулировка проблемы

Строительство фундаментов опор мостов на местности, покрытой водой, осуществляется в гораздо более сложных условиях, чем на «сухой» поверхности. Сложность возведения таких сооружений заключается в необходимости как применения соответствующих средств для обеспечения ограждений котлованов, так и, главным образом, использования специального оборудования для механизации процессов разрушения и последующей экскавации горной массы.

Специалисты, при проведении дноуглубительных строительных работ, рекомендуют [1–5] использовать эрлифтные установки. Эрлифты отличаются от насосных агрегатов целым рядом преимуществ: отсутствием вращающихся элементов на пути движения гидросмеси, малым износом проточных частей, возможностью плавного регулирования подачи, широким, практически ничем не ограниченным диапазоном рабочих режимов, транспортированием пульпы, содержащей твердый материал различной крупности и плотности, легкостью их управления, высокой надежностью и др. Эрлифт способен поднимать одновременно и песок, и гальку, максимальный размер которой не должен превышать 1/3 диаметра подающей трубы.

Однако при работе на мелководье (глубиной до 3 м) их эксплуатация сопряжена с повышенными энергетическими затратами. В таких ситуациях целесообразнее применить вакуумный эрлифт [6, 7], принципиальное отличие которого от обычного заключается в том, что перепад давления вдоль подъемной трубы изменяется от давления в смесителе, которое несколько ниже атмосферного, до определенного вакуума в воздухоотделителе, обеспечиваемого вакуум-насосом.

Гидравлическая схема вакуумного эрлифта для дноуглубительных работ представлена на рис. 1. Установка в основном состоит из грунтозаборного (дозирующего) устройства 1, телеско-

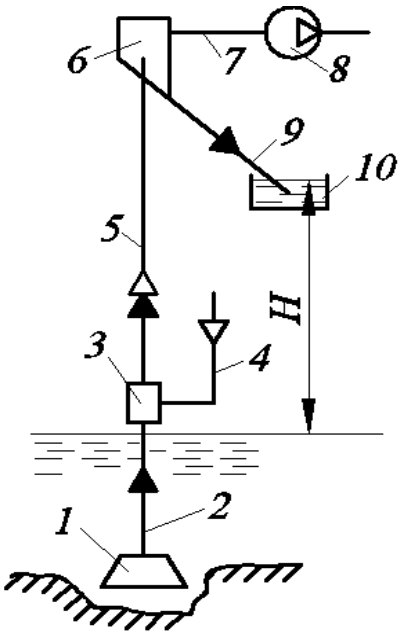

Рисунок 1. Гидравлическая схема вакуумного эрлифта.

пической двойной-тройной раздвижности подающей трубы 2, смесителя 3, воздухопровода 4, подъемной трубы 5, воздухоотделителя 6, вакуумопровода 7, вакуум-насоса 8, сливной трубы 9 и приемной емкости 10. Измерительные приборы и регулирующие аппараты здесь на схеме не показаны. Сливная труба 9, которая заглублена под уровень свободной поверхности воды (гидросмеси) в приемной емкости 10, образует с последней гидравлический затвор, необходимый для поддержания рабочего вакуума в воздухоотделителе 6.

Работа установки происходит следующим образом: в воздухоотделителе 6 посредством вакуум-насоса 8 устанавливается рабочее давление (вакуум), после чего в смеситель 3 подается атмосферный воздух через воздухопровод 4, где смешивается с пульпой, поступающей через грунтозаборное устройство 1 в подающую трубу 2. Далее трехфазная смесь (воздух + вода + грунт) по подъемной трубе 5 поступает в воздухоотделитель 6, в котором разделяется – воздух через вакуумопровод 7 откачивается вакуум-насосом 8, а пульпа из сливной тубы 9 поступает в приемную емкость 10 и далее по назначению.

Наименее исследованным вопросом эксплуатации вакуумного эрлифта остается установление оптимального, с позиций энергетических затрат, давления (вакуума) в воздухоотделителе. В методических рекомендациях [8] предложен расчет вакуумного эрлифта, однако не приведены данные, позволяющие найти это давление в режиме максимального КПД.

Целью настоящей работы является определение оптимального, с позиций минимизации энергетических затрат, абсолютного давления в воздухоотделителе вакуумного эрлифта.

КПД как вакуумного, так и обычного эрлифта [6, 8, 9] определяется зависимостью (пренебрегая кинетическим напором гидросмеси на выходе из подъемной трубы):

$$\eta = \rho_п g H Q_э / Q_в P_а \ln(P_{см} / P_в), \qquad (1)$$

где $\rho_п$ – плотность пульпы (гидросмеси), кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

H – высота подъема, м;

$Q_э$ – подача вакуумного эрлифта, м^3/с;

$Q_в$ – расход воздуха приведенный к атмосферным условиям, м^3/с;

$P_{см}$ – абсолютное давление в смесителе, кПа;

$P_в$ – абсолютное давление в воздухоотделителе, кПа.

Заменяя в (1) $Q_в / Q_э = q$ (q – удельный расход воздуха) и $\rho_п = \rho^* \rho$ (ρ = 1 000 кг/м^3 – плотность воды; ρ^* – относительная плотность пульпы) и считая, что атмосферное давление $P_а$ = 100 кПа, получим следующее выражение:

$$\eta = \rho^* H / 10q \ln(P_{см} / P_в). \qquad (2)$$

В процессе эксплуатации конкретного эрлифта плотность пульпы, давление в смесителе и высота подъема практически не меняются, тогда КПД установки можно считать только функцией давления в воздухоотделителе и удельного расхода воздуха. Исследования [6, 10] показали, что удельный расход воздуха однозначно определяется величиной относительного погружения и определяется эмпирической зависимостью

$$q = 0{,}67 / (\alpha^2 - 0{,}54). \qquad (3)$$

Относительное погружение вакуумного эрлифта определяется по формуле:

$$\alpha = (P_{см} - P_в) / (P_{см} - P_в + \rho_п gH). \qquad (4)$$

Уравнение (3) справедливо при значениях относительного погружения от 0,2 до 0,6.

Таким образом, КПД вакуумного эрлифта зависит от двух параметров – абсолютного давления в воздухоотделителе и относительного погружения, которое, в соответствии с (4), также является функцией абсолютного давления в воздухоотделителе. Из этого следует, что для вакуумных эрлифтов может быть установлена следующая взаимосвязь эксплуатационных параметров. При фиксированных высоте подъема, плотности транспортируемой гидросмеси и абсолютном давлении в смесителе именно давление в воздухоотделителе определяет величину относительного погружения, от которой зависит и значение удельного расхода воздуха. В свою очередь, удельный расход воздуха вместе со значением абсолютного давления в воздухоотделителе определяют величину КПД вакуумного эрлифта, которое после подстановки (3) и (4) в (2) принимает выражение:

$$\eta = \rho^* H (P_{см} - P_в)^2 / [6{,}7(P_{см} - P_в + \rho^* \rho gH)^2 - 5{,}4(P_{см} - P_в)^2] \ln(P_{см} / P_в). \qquad (5)$$

Из (5) следует, что при постоянных в течение эксплуатации H, $\rho_п$ и $P_{см}$, которые определяются различными конструктивными решениями, КПД

вакуумного эрлифта зависит только от давления в воздухоотделителе.

Рассмотрим, как изменяется КПД вакуумного эрлифта от абсолютного давления в воздухоотделителе на следующем примере. Параметры установки: 1) высота подъема пульпы H = 6 м; 2) относительная плотность пульпы $\rho^* = 1$; 3) абсолютное давление в смесителе $P_{см} = 99$ кПа; 4) ускорение свободного падения $g = 9{,}8$ м/с^2. Результаты вычислений согласно зависимости (5) приведены в таблице и показаны на рис. 2.

Как видно из таблицы и графика на рис. 2, функция $\eta = f(P_в)$ имеет ярко выраженный максимум. Для указанных выше параметров вакуумного эрлифта и режима эксплуатации оптимальное давление в воздухоотделителе составляет примерно $P_о = 60$ кПа.

Оптимальное давление в воздухоотделителе $P_о$ можем найти непосредственно из зависимости (5), приравняв нулю первую частную производную от КПД по давлению в воздухоотделителе:

$$1{,}3\,(P_{см} - P_о)^2 + 13{,}4\rho_п gH\,(P_{см} - P_о) + 6{,}7\,(\rho_п gH)^2 - 13{,}4\rho_п gHP_о\,(P_{см} - P_о + \rho_п gH)\ln(P_{см}/P_о)\,/\,(P_{см} - P_о) = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) неизвестная величина – оптимальное давление в воздухоотделителе выражена в неявном виде. Решение этого уравнения следует выполнить либо графическим способом, либо при помощи программы MathCard.

Выводы и направления дальнейших исследований

Получена зависимость КПД вакуумного эрлифта от абсолютного давления (вакуума) воздуха в его воздухоотделителе. Установлено, что эта зависимость имеет экстремум, и предложено уравнение для нахождения этого экстремума.

Результаты работы позволяют уже на стадии проектирования оптимизировать, с позиций энергетических затрат, режимы эксплуатации вакуумных эрлифтов, предназначенных для проведения дноуглубительных строительных работ в условиях мелководья.

В дальнейших исследованиях следует установить зависимость изменения расхода воздуха от плотности транспортируемой вакуумным эрлифтом гидросмеси (пульпы).

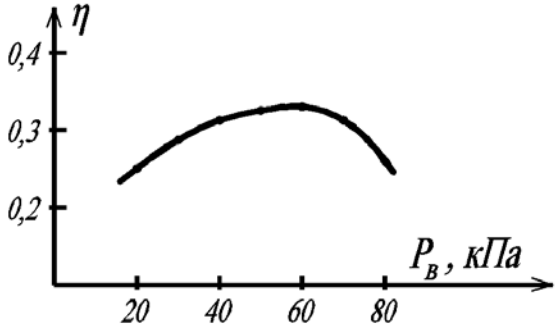

Рисунок 2. График зависимости $\eta = f(P_в)$.

Таблица. Расчетные значения КПД при разном давлении в воздухоотделителе

$P_в$, кПа	20	30	40	50	60	70	80
η	0,250	0,286	0,310	0,325	0,327	0,310	0,263

Литература

1. Бобриков, Б. В. Строительство мостов [Текст] : Учебник для вузов железнодорожного транспорта / Б. В. Бобриков, И. М. Русаков, А. А. Царьков. – М. : Транспорт, 1987. – 304 с.
2. 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 5-901562-54-3. ISBN 5-901562-54-2.
3. Александров, В. Д. Карманный справочник производителя работ ОАО «Мостотрест» [Текст] /

References

1. Bobrikov, B. V.; Rusakov, I. M.; Tsarkov, A. A. Bridge construction: textbook for Institutes of Rail Transportation. Moscow: Transport, 1987. 304 p. (in Russian)
2. Vladimirskii, S. R. Mechanisation of bridge construction: student training manual, for students, which are active in program «Bridges and transport, tunnels». 2nd edition, revised and enlarged. St. Petersburg: Publishing House DNK, 2006. 152 p. ISBN 5-901562-54-3. ISBN 5-901562-54-2. (in Russian)
3. Aleksandrov, V. D. Pocket manual far chief resident engineer OJSC «Mostotrest». 5th edition. Moscow:

В. Д. Александров. – Изд. пятое. – Москва : ООО «Печатный двор "На Алексеевской"», 2008. – 374 с.
4. Мойсейчик, Е. К. Строительство свайных фундаментов на акватории [Текст] : уч.-метод. пособие для студентов дорожных специальностей / Е. К. Мойсейчик, А. С. Мацкевич. – Минск : БНТУ, 2005. – 40 с. – ISBN 985-479-160-2.
5. Стифеев, Ф. Ф. Определение рациональной плотности пульпы в подъемной трубе эрлифта [Текст] / Ф. Ф. Стифеев / Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Донбаська нац. академія будівництва і архітектури. – Макіївка, 2012. – Вип. 2012-5(97) : Будівельні конструкції будівель та споруд. – С. 86–91.
6. Стифеев, Ф. Ф. Разработка эрлифтов для подъема пульп повышенной плотности [Текст] : дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.06 / Стифеев Федор Федорович. – Донецк, 1985. – 262 с.
7. Water delivery capacity of a vacuum airlift [Текст] / Bertrand Barrut, Jean-Paul Blancheton, Jean-Yves Champagne, Alain Grasmick // Aquacultural Engineering. – 2012. – Volume 48. – P. 31–39. – ISSN 0144-8609.
8. Гейер, В. Г. Методические рекомендации по применению средств механизации очистки шахтных водосборных емкостей [Текст] / В. Г. Гейер. – Донецк : ЦБНТИ Минуглепрома УССР, 1983. – 50 с.
9. Clark, N. N. A General Equation for Air Lift Pumps Operating in Slug [Текст] / N. N. Clark, R. J. Dabolt // AIChE Journal. – 1986. – Vol. 32, No. 1. – P. 56–64. – ISSN 1547-5905.
10. Малеев, В. Б. Исследование и разработка сифонно-вакуумного эрлифта для чистки шахтных водоотливных емкостей [Текст] : автореферат дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.06 / Малеев Виктор Борисович. – Донецк, 1980. – 20 с.

Publishing house «In Alekseevsky», 2008. 374 p. (in Russian)
4. Moiseichik, E. K.; Matskevich, A. S. Civil engineering of pile foundation in the waters: teaching and method textbook for students of road specialties. Minsk: BNTU, 2005. 40 p. ISBN 985-479-160-2. (in Russian)
5. Stifeev, F. F. Determination of a pulp's rational density in elevating pipe of airlift. In: *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. Makiivka, 2012. Issue 2012-5(97): Building constructions of buildings and structures, p. 86–91. (in Russian)
6. Stifeev, F. F. Development of air-lift pump for lift motion of sludge of overdensity: PhD thesis in Engineering Science. 05.05.06. Donetsk, 1985. 262 p. (in Russian)
7. Barrut, Bertrand; Blancheton, Jean-Paul; Champagne, Jean-Yves; Grasmick, Alain. Water delivery capacity of a vacuum airlift. In: *Aquacultural Engineering*, 2012, Volume 48, p. 31–39. ISSN 0144-8609.
8. Geier, V. G. Methodological recommendations on the application of mechanical equipment of depuration of mining well tank. Donetsk: TsBNTI Minugleproma USSR, 1983. 50 p. (in Russian)
9. Clark, N. N.; Dabolt, R. J. A General Equation for Air Lift Pumps Operating in Slug. In: *AIChE Journal*, 1986, Vol. 32, No. 1, p. 56–64. ISSN 1547-5905.
10. Maleev, V. B. Research and development of syringe and airvoid air-lift pump for depuration of mining well tank: Authors abstract in Engineering Science: 05.05.06. Donetsk, 1980. 20 p. (in Russian)

Стіфєєв Федір Федорович – к.т.н., доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: дослідження і розробка ерліфтних установок для підйому твердого матеріалу різної крупності і щільності.

Стифеев Федор Федорович – к.т.н., 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.

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