

шины“ / Полушина Марина Витальевна; Нац. горн. ун-т. – Д., 1990. – 20 с.: ил., тбл. – Библиогр.: с. 17–18.

Polushyna M.V. study and substantiation of rational parameters of bobbin hoist with driving pulleys and hauling rubber-rope cable: Abstract of the thesis on receiving of Cand. Sci. (Tech.) degree: speciality 05.05.06. “Mining machinery” / Polushyna Marina Vitalyevna; NGU. – D., 1990. – 20 p.: illustrated, tables. – bibliogr.: p. 17–18

3. *Панченко Е.В.* Результаты исследования напряженно-деформированного состояния многослойной намотки резинотросового каната в бобинном подъеме / Панченко Е.В. // Геотехн. механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – 2006. – Вып. 64. – С. 221 – 230.

Panchenko Ye.V. Results of research of multilayer winding of bobbin hoist rubber-rope cable in deflected mode / Panchenko Ye.V. // Geotekhn. mekhanika: Mezhdved. sb. nauch. tr. IGTM NAN Ukrainy. – 2006. – Issue. 64. – P. 221–230.

Изложена методика научных исследований, направленных на усовершенствование метода расчета силовых факторов в витках многослойной намотки резинотросовых канатов бобинных подъемников, в

которой учтено отсутствие продольного сжатия каната и зависимость жесткостных характеристик слоев от параметров многослойной намотки. Показано, что крутильная жесткость для заданных геометрических параметров резинотросового каната может быть определена при помощи аппроксимирующего полинома.

Ключевые слова: *резинотросовый канат, многослойная намотка, тело намотки, крутильная жесткость каната, бобинная подъемная машина*

Scientific-research recommendations aiming development of rating methods of forcing factors in spires of multilayer rubber-rope cable of bobbin hoist is given. This method takes into account the absence of longitudinal cable pressure and dependence of characteristics of hard layers upon parameters of multilayer winding. Torsional hardness for given geometrical parameters of rubber-rope cable can be determined also by means of polynomial.

Keywords: *rubber-rope cable, multilayer winding, winding body, torsional cable hardness, bobbin hoisting machine*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.П. Франчуком. Дата надходження рукопису 26.01.11

УДК 621.695.622.276

Е.А. Кириченко, д-р. техн. наук, проф.,

В.Е. Кириченко, канд. техн. наук,

В.Г. Шворак, канд. техн. наук, доц.,

А.А. Татуревич, Н.Н. Хворостяной

Государственное высшее учебное заведение

„Национальный горный университет“

г. Днепропетровск, Украина,

e-mail: kirichenko@front.ru

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГЛУБОКОВОДНЫХ ГИДРОПОДЪЕМОВ И ПРОГРАММНО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Ye.A. Kirichenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,

V.Ye. Kirichenko, Cand. Sci. (Tech.),

V.G. Shvorak, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,

A.A. Taturevich, N.N. Khvorostyanov

State Higher Educational Institution

“National Mining University”,

Dnipropetrovsk, Ukraine,

e-mail: kirichenko@front.ru

ADVANCED METHOD OF CALCULATION OF DEEP-WATER HYDRAULIC HOISTS AND THE SOFTWARE

Разработан усовершенствованный метод расчета глубоководных эрлифтных гидроподъемов, наиболее полно учитывающий специфику транспортирования твердого материала потоком водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта. Для реализации предложенного метода разработана программа „Exact Calculation“. С ее использованием установлены закономерности влияния конструктивных и расходных параметров на энергоемкость процесса гидроподъема и определены их рациональные значения для базового варианта экспериментальной установки при глубине разработки месторождения 6000 м.

Ключевые слова: *гидротранспорт, эрлифт, гидроподъем, твердые полезные ископаемые, глубоководная добыча*

На протяжении нескольких последних десятилетий мировое сообщество проявляет все больший интерес к освоению месторождений полезных ископаемых Мирового океана, где находятся богатейшие залежи полиметаллических руд, количество которых многократно превышает аналогичные запасы на суше. На сегодняш-

ний день наиболее перспективными, в плане промышленного освоения, являются месторождения полиметаллических конкреций, полиметаллических сульфидных руд, кобальто-марганцевых корок, газогидратов и фосфоритов [1]. Крупнейшие компании США, Великобритании, Канады, Германии ведут активные работы по разработке технических способов и средств добычи полиметаллических руд со дна океана. Интенсивные работы в этом направлении ведутся также: Националь-

ным океанографическим институтом в Индии; акционерной корпорацией по разработке глубоководных океанических ресурсов (ДОРД) в Японии; Научно-исследовательским институтом по эксплуатации морских ресурсов (ИНФЕРМЕР) во Франции; совместной организацией Интерокеанметалл (Болгария, Куба, Польша, Российская Федерация, Словакия и Чешская Республика); Южморгеологией в Российской Федерации; объединением по исследованию и освоению минеральных ресурсов океана (КОИОМРО) в Китае; правительством республики Корея.

По мнению специалистов на сегодняшний день наиболее перспективным способом транспортирования добытого минерального сырья на базовое плавающее средство является глубоководный эрлифтный гидроподъем (ГЭГ) благодаря высоким показателям надежности в сложных условиях больших глубин. Наряду с этим ГЭГ отличается значительной энергоемкостью, поэтому тенденция развития заключается в повышении КПД установок. Одним из путей повышения эффективности гидроподъемов служит выбор их рациональных конструктивных и расходных параметров, минимизирующих энергоемкость процесса транспортирования.

Данная работа посвящена решению **актуальной проблемы** обоснования рациональных конструктивных и расходных параметров, обеспечивающих эксплуатацию гидроподъемов с наиболее высокими технико-экономическими показателями.

Очевидно, что достоверность определения рациональных параметров ГЭГ напрямую зависит от точности используемого расчетного метода.

Критический анализ известных методов расчета ГЭГ [1–8] показал, что существующие методы, основанные как на использовании безразмерных расходных характеристик, так и на интегрировании различной сложности дифференциальных уравнений движения смеси, требуют дальнейшего усовершенствования, поскольку недостаточно учитывают специфику эксплуатации установок, особенности транспортирования твердого материала в составе многофазного потока, а также перенасыщены трудноопределимыми эмпирическими коэффициентами. Кроме того, общим недостатком всех существующих методов является отсутствие их должного экспериментального подтверждения. Поэтому вопрос создания наиболее точного расчетного метода и, как следствие, определение рациональных значений конструктивных и расходных параметров глубоководных гидроподъемов остается открытым.

Целью данной работы является разработка усовершенствованного метода расчета параметров ГЭГ и его программного обеспечения, а также установление закономерностей влияния конструктивных и расходных параметров гидроподъемов на энергоемкость процессов транспортирования.

Известные методы расчета глубоководных гидроподъемов можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, основанные на однородных моделях многокомпонентных течений и „энергетической“ трактовке протекающих в них процессов (ба-

ланс между мощностями полезной и затраченной). Здесь полезная мощность – это гидравлическая мощность, требуемая для транспортирования пульпы, а затраченная – мощность подводимого воздушного потока. В первую группу входят методы Г. Грабова [3] и Уэки-Сиро [4], в основу которых положены существенные допущения, сильно упрощающие используемый математический аппарат, что, однако, отрицательно сказывается на точности результатов. Преимуществом этих методов является оперативность, с которой можно просчитать большое число вариантов для установления качественного влияния различных факторов на эффективность гидроподъема.

Во вторую группу входят методы Полярского [5] и Хазитеодороу [6], базирующиеся на „силовой“ трактовке исследуемых процессов и уравнениях сохранения импульса сил в отдельности для каждой фазы, которые в итоге сводятся к отдельной модели многофазного течения. Методы первой группы дают заниженные оценки расхода воздуха, необходимого для обеспечения заданной производительности установки по твердому, и, таким образом, завышают величину КПД. Главной причиной этого расхождения является принципиальное различие между методами обеих групп при определении суммарного градиента давления. Расчеты, выполненные в широком диапазоне изменения исходных данных, показали несущественное расхождение результатов (не более 4...6%) при определении потерь на трение по методам обеих групп.

С потерями давления на преодоление веса столба гидросмеси дело обстоит иначе. В методах первой группы предполагается, что эти потери связаны, например, в нижней трубе эрлифта с поднятием пульпы в самой воде. В соответствии же с методами Полярского и Хазитеодороу, под потерями на преодоление веса столба гидросмеси понимаются потери давления на подъем в воде исключительно твердых частиц.

При плотностях твердого материала $\rho_1 = 1100 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$ и концентрации твердой фазы $C_1 = 0,03 \dots 0,12$ потери давления на преодоление веса столба гидросмеси в методах второй группы превышают соответствующие потери в методах первой группы на 60...70%. Очевидно, что такое существенное расхождение сильно влияет на значение давления в смесителе и, в итоге, на величину необходимого расхода воздуха.

Ниже приведем краткий комментарий метода Хазитеодороу [6]. Метод базируется на отдельной модели течения многофазного потока, где трехфазный поток рассматривается как наложение двух двухфазных потоков: водовоздушная смесь и пульпа. Суть метода заключается в решении системы из трех уравнений неразрывности и трех уравнений движения для каждой фазы, дополненной соответствующими замыкающими зависимостями и граничными условиями.

В результате решения этой системы определяются давление и удельный вес воздуха, скорости фаз и площади поперечных сечений, занятых каждой фазой, как функции от координаты трубопровода. Начальное значение удельного веса воздуха зависит от давления в смесителе. Методом последовательных

приближений подбираются такие давление и расход сжатого воздуха в смесителе, чтобы в процессе решения уравнений движения по высоте подъемной трубы выйти в верхнем сечении на атмосферное давление. Необходимые начальные значения скоростей и площадей фаз определяются путем решения системы из двух уравнений неразрывности и двух уравнений движения для пульпы в подводящей трубе. Эта система получается путем обнуления воздушной фазы в уравнениях, описывающих течение трехфазного потока в подъемной трубе.

Методы второй группы являются, на сегодняшний день, в большей степени обоснованными и точными, нежели методы первой группы (рис. 1), главным образом из-за того, что базируются на более универсальной раздельной модели многофазного течения, учитывающей влияние межфазных сил. Тем не менее, им присущ ряд недостатков, связанных, в основном, с неправильной трактовкой некоторых физических процессов и неучетом целого ряда факторов, существенно влияющих на эффективность процесса транспортирования.

Например, предположение о том, что твердые частицы в трехфазной смеси транспортируются исключительно жидкостью, не отражает физику формирования „тяговой силы“ эрлифта, что, в конечном итоге, сказывается на расчетной скорости подъема твердых частиц. Также ошибочно принимается, что коэффициент сопротивления трубопровода является величиной постоянной по всей длине подъемной трубы и не зависит от конкретной структуры течения потока. Кроме того, узким местом метода является отсутствие контроля устойчивого транспортирования твердых частиц при колебаниях скорости и многое другое.

Авторы считают, что повышение точности расчетного метода связано с необходимостью наиболее полного учета всех основных факторов, определяющих физику процессов транспортирования твердых частиц. Основываясь на многолетнем опыте работы в данной отрасли, авторы выделяют следующие основные факторы и механизмы:

1. Транспортирование твердых частиц в подъемной трубе глубоководного гидроподъема осуществляется не водой, а водовоздушной смесью. Т.е., основные характеристики течения определяются посредством критериев подобия, зависящих от параметров смеси, а не жидкости.

2. Коэффициент сопротивления подъемной трубы не являются постоянной величиной по длине трубопровода, а зависит от основных параметров течения, выраженных через характеристики смеси и, в первую очередь, от конкретной структуры течения. Каждой структуре течения соответствует своя математическая модель. Зависимости для определения коэффициента сопротивления для различных структур течения смеси приведены в литературе [1]. Также там приведены выражения для определения границ структур течения в подъемной трубе глубоководного гидроподъема в зависимости от определяющих критериев потока. В результате адаптации этих характеристик к базовому ва-

рианту гидроподъема с глубины 6000 м, нами впервые получены следующие значения границ устойчивости структур течения смеси, выраженные с помощью диапазона изменения расходного газосодержания β :

— граница между пузырьковой и снарядной структурами $\beta = 0,25...0,3$;

— граница между снарядной и кольцевой структурами $\beta = 0,65...0,8$;

— граница между кольцевой и дисперсной структурами $\beta = 0,92...0,94$.

3. На каждом шаге интегрирования уравнений движения по длине эрлифтного трубопровода необходимо предусмотреть выполнение условия устойчивого транспортирования твердых частиц, согласно которому транспортная скорость потока должна превосходить критическую скорость на 15...20 % [7]. Для определения критической скорости пульпы в подводящей трубе, с учетом стесненного падения группы частиц, используется следующая формула [7]

$$V_{кр.п} = (1 - 0,35C_{об}) \left(1 - \left(\frac{d_k^c}{D_{мп}} \right)^2 \right) (1 - S)^2 \left(\frac{4 \cdot g \cdot (d_k^c)^2 (\rho_l - \rho_0)}{3C_x \cdot \rho_0} \right)^{0,5},$$

где: S – расходная концентрация твердого в пульпе; C_x – коэффициент сопротивления твердой частицы в воде; ρ_0 – плотность жидкости, ρ_l – плотность твердого материала; $C_{об}$ – объемная консистенция гидро-смеси в подводящей трубе; d_k^c – средний диаметр конкреций; $D_{мп}$ – диаметр трубопровода; g – ускорение силы тяжести.

Соответственно, для подъемной трубы эрлифта применяется следующая зависимость [7]

$$V_{кр.с} = (1 - 0,42C_{об.с}) \left(1 - \left(\frac{d_k^c}{D_{мп}} \right)^2 \right) \left(\frac{4 \cdot g \cdot d_k^c}{3C_{xc}} \left(\frac{\rho_l}{\rho_c} (1 + q_z) - 1 \right) \right),$$

где: $V_{кр.с}$ – критическая скорость трехфазной смеси в подъемной трубе глубоководного гидроподъема; $C_{об.с}$ – объемная консистенция смеси в подъемной трубе; q_z – средний удельный расход воздуха; C_{xc} – коэффициент сопротивления твердой частицы в смеси; ρ_c – плотность смеси.

Дополнительно следует учитывать наличие нисходящей фазы движения твердых частиц в газовых снарядах при снарядной структуре течения. Именно снарядная структура течения представляет наибольшую опасность срыва (кризиса) устойчивого транспортирования твердой фракции вплоть до возможной забутки трубопровода [9].

4. В случаях невыполнения условий устойчивого транспортирования твердых частиц необходимо корректировать расчетную схему метода путем подстройки расходных параметров на обеспечение требуемой транспортной скорости потока.

5. Следует учитывать возможность звукового „запирания“ подъемной трубы (критический расход), ограничивающего эффективность гидроподъемов [1], а также возможность „захлебывания“ потока при кольцевой и дисперсной структурах течения смеси [2].

6. Должно предусматриваться влияние растворимости воздуха и угла наклона транспортного трубопровода на величину истинного объемного газосодержания [1].

7. Необходимо принимать во внимание влияние характеристик питающей пневматической системы (компрессорная станция + пневмопровод) на эксплуатационные режимы работы установок [10].

С учетом перечисленных факторов, авторами разработан усовершенствованный метод расчета гидроподъемов (УМРГ), обеспечивающий повышенную точность результатов.

Для апробации УМРГ был выполнен лабораторный эксперимент [10]. Экспериментальные исследования проводились в условиях лаборатории гидравлики и гидропривода кафедры горной механики Национального горного университета на базе комплексного экспериментального гидравлического стенда, позволяющего осуществлять физическое моделирование одно-, двух- и трехкомпонентных потоков в проточных частях насосной, эрлифтной и насосно-эрлифтной установок [9]. Причем конструкция гидравлического стенда предусматривает варьирование величины относительного динамического погружения смесителя подъемной трубы в диапазоне 0.4...0.95, что позволяет моделировать процессы как коротких шахтных установок, так и глубоководных установок значительной протяженности.

На рис. 1 приведены результаты сравнения расчетных величин, полученных по различным методам (адаптированных для подъема жидкости), с экспериментальными данными.

На приведенном графике видно, что методы Полярского и Хазитеодороу, использующие гетерогенные модели, дают более точные результаты, нежели методы Грабова и Уэки Сиро, базирующиеся на гомогенной модели. Однако наиболее точным расчетным методом является авторский УМРГ, который и выбран в качестве базового для дальнейших исследований.

С целью приближения масштабов экспериментальных установок к натурным горно-морским эрлифтам выполнено сравнение наших расчетных данных с экспериментальными данными других исследований, осуществленных в морских и карьерных условиях. В частности, Донецким политехническим институтом совместно с институтом „ВНИИПрозолото“ проводились испытания морской эрлифтной установки для подъема воды в условиях Балтийского моря вблизи порта Лиепая. Экспериментальные исследования проводились на базе научно-исследовательского судна „Шельф-1“ при глубине моря до 90 м [7].

На рис. 2 показано сравнение экспериментальных (сплошная линия) и рассчитанных по УМРГ (пунктирная линия) данных для указанных параметров установки:

1. $d = 0,1$ м; $L = 5,0$ м; $h = 47,0$ м;
2. $d = 0,15$ м; $L = 8,5$ м; $h = 47,0$ м;
3. $d = 0,1$ м; $L = 0,5$ м; $h = 59,3$ м;
4. $d = 0,1$ м; $L = 21,0$ м; $h = 59,3$ м,

где d – диаметр трубопровода, L – длина подводящей трубы, h – заглубление смесителя.

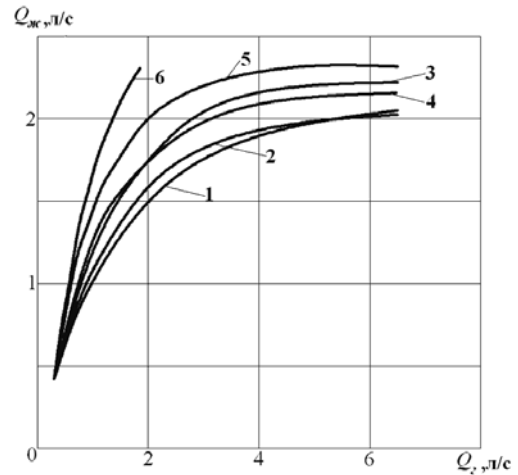


Рис. 1. Зависимости изменения объемного расхода воды Q_w от объемного расхода воздуха Q_a при нормальных условиях: 1 – данные собственного эксперимента; 2 – УМРГ; 3 – метод Хазитеодороу; 4 – метод Полярского; 5 – метод Грабова; 6 – метод Уэки Сиро

Из графиков следует, что погрешность расчетов увеличивается пропорционально расходу воздуха. Максимальная погрешность не превышает 20%.

Сотрудниками университета “Karlsruhe” (Германия) производились экспериментальные исследования по подъему бурого угля, песка и гравия эрлифтным способом [8] на лабораторной и действующей карьерной установках.

Трубопровод лабораторной установки имел диаметр 0,1 м и длину $L = 7,8$ м. При расходе воздуха $0,027$ м³/с на этой установке максимальная подача по твердому составила 3,45 кг/с, а объемные концентрации твердого в подающей трубе достигали 33 % [8].

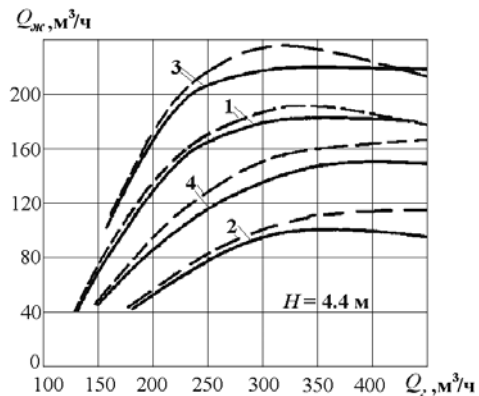


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных расходных характеристик морской эрлифтной установки

В условиях буроугольного карьера „Рейнского акционерного общества“ проводились эксперименты на действующей эрлифтной установке [8] общей длиной 441 м.

Характеристики установки следующие: диаметр трубопровода 300 мм; заглубление смесителя 42...248 м; объемный расход воздуха $0,22...0,713$ м³/с;

максимальная подача по твердому материалу 115 т/ч; полученные концентрации твердого материала 0...8%. Экспериментальные исследования проводились как при короткой подводящей трубе ($L_n = 5...6$ м), так и при длинной ($L_n = 101...341$ м).

В таблице выборочно представлены экспериментальные данные, а также значения расхода воздуха $Q_{\text{вп}}$, рассчитанные нами с использованием УМРГ для приведенных в таблице параметров. Максимальное

расхождение приведенных экспериментальных и расчетных данных не превышает 24 %.

Для реализации предложенного метода авторами написана программа „Exact Calculation“ на языке C++ в виде консольного приложения для платформы win32/64. Программа принимает входные данные в виде XML файла и возвращает результаты также в XML формате. Кроме того, возможен экспорт результатов в файлы Microsoft Excel (xls).

Таблица

Сравнение экспериментальных и расчетных данных эрлифтной установки

Поднимаемая среда	Конструктивные размеры				Расходные параметры					
	h	L_n	H	$\alpha = \frac{h}{h+H}$	$Q_{\text{вз}}$ м ³ /с	Объемная кон- центрация C_T , %	Подача по твер- дому Q_T , м ³ /с	Подача воды $Q_{\text{ж}}$, м ³ /с	$Q_{\text{вп}}$ м ³ /с	δ , %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Гравий $\rho_T=2575$ кг/м ³ $d_k=5$ мм	171	101	7	0.96	0.187	1.13	0.002	0.177	0.168	10.2
	174	101	7	0.961	0.256	2.29	0.0045	0.191	0.214	16.4
	177	101	7	0.962	0.384	3.39	0.0057	0.162	0.313	18.6
	180	101	7	0.962	0.405	3.95	0.0095	0.232	0.335	17.3
	186	101	7	0.964	0.260	1.89	0.0038	0.195	0.230	11.5
	216	101	7	0.969	0.249	2.17	0.0039	0.175	0.205	17.6
	222	101	6.9	0.97	0.329	3.7	0.0077	0.201	0.288	12.6
	225	101	6.9	0.97	0.240	2.51	0.0041	0.160	0.194	19.3
	69	290	6.6	0.912	0.570	2.06	0.004	0.191	0.490	14.0
	111	290	6.6	0.944	0.374	4.13	0.0056	0.124	0.306	18.1
	152	290	7.7	0.952	0.262	1.49	0.0026	0.169	0.211	19.3
	104	341	6.3	0.943	0.544	3.22	0.0053	0.158	0.475	12.6
	246	197	6.8	0.973	0.510	4.46	0.00935	0.200	0.439	13.9
	246	197	7.3	0.971	0.367	2.58	0.0054	0.205	0.306	16.7
	42	6.2	7.2	0.853	0.575	4.74	0.0127	0.255	0.470	18.2
	42	6.2	7.2	0.853	0.390	2.67	0.0068	0.248	0.324	17.0
42	6.2	7.2	0.853	0.233	2.69	0.00535	0.193	0.201	13.8	
Песок $\rho_T=2610$ кг/м ³ $d_k=0.6$ мм	245	197	7.4	0.97	0.484	3.86	0.0075	0.186	0.432	10.7
	246	4.9	6.4	0.971	0.252	2.64	0.0055	0.203	0.223	11.5
	248	4.9	8.4	0.97	0.390	7.1	0.127	0.166	0.354	9.3
	248	4.9	8.4	0.97	0.456	6.4	0.0121	0.178	0.401	12.1
	148	101	8.4	0.946	0.488	5.89	0.0107	0.172	0.455	6.7
	148	101	8.9	0.946	0.220	3.25	0.0052	0.154	0.200	9.1
	148	101	8.4	0.946	0.355	6.01	0.0113	0.176	0.327	8.0
Бурый уголь $\rho_T=1143$ кг/м ³ $d_k=50$ мм	103	341	7	0.936	0.584	6	0.0169	0.263	0.488	16.4
	103	341	7	0.936	0.713	7.5	0.0201	0.249	0.581	18.5
	103	341	7	0.936	0.412	4.8	0.0116	0.232	0.328	20.3
	153	290	6.8	0.957	0.691	8.6	0.0254	0.270	0.535	22.6
	146	296	7.3	0.956	0.527	7.8	0.0211	0.251	0.408	22.5
	245	197	7.4	0.97	0.505	5.4	0.0157	0.274	0.389	23.0
	245	197	7.3	0.97	0.497	4.7	0.0147	0.300	0.383	22.9
245	197	7.3	0.97	0.388	4.7	0.0127	0.259	0.296	23.8	

Для установления закономерностей влияния конструктивных и расходных параметров гидроподъемов на энергоемкость процессов транспортирования выполнены систематические численные исследования для базового варианта глубоководного гидроподъема (производительностью 100000 т/год по „сухому“ сырью с глубины 6000 м). Диапазоны изменения основных варьируемых параметров следующие: истинная объемная концентрация твердого материала $C_1 = 0,02...0,15$; заглубление смесителя $H_{\text{см}} = 1500...3500$ м; массовый расход воздуха $M_2 = 2,5...6,5$ кг/с; массовый расход твердого материала $M_1 = 5...12$ кг/с.

На рис. 3–8 выборочно приведены наиболее представительные результаты.

На рис. 3 отражена взаимосвязь между расходными и энергетическими параметрами эрлифтного гидроподъема, обеспечивающими заданную производительность при фиксированном положении смесителя. Представленные кривые имеют точку перегиба (экстремум), что указывает на существование рациональной концентрации твердого материала, которая при выбранных геометрических параметрах установки соответствует минимальному расходу воздуха.

Как видно из графика, максимальному значению КПД соответствуют минимальные значения удельной мощности и массового расхода воздуха.

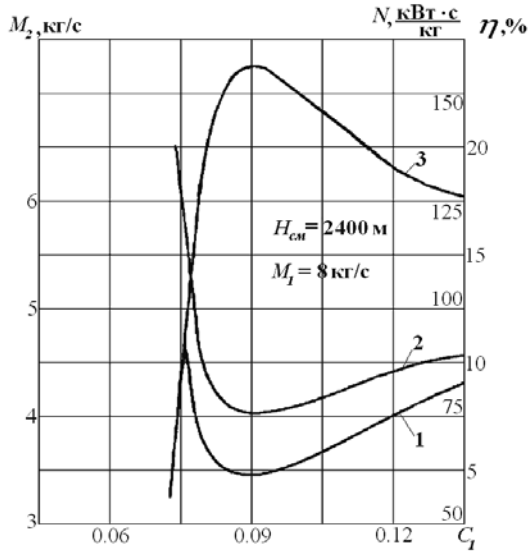


Рис. 3. Зависимость основных параметров эрлифта от истинной объемной концентрации твердой фазы: 1 – удельная мощность (N); 2 – расход воздуха (M_2); 3 – КПД (η)

На рис. 4 показано как влияет концентрация пульпы и производительность глубоководного гидроподъема по твердому при фиксированном заглублении смесителя на КПД установки.

Из графиков следует, что увеличение массового расхода твердого в исследуемом диапазоне приводит к увеличению КПД, при этом каждому значению производительностью по твердому соответствует свое рациональное значение концентрации пульпы.

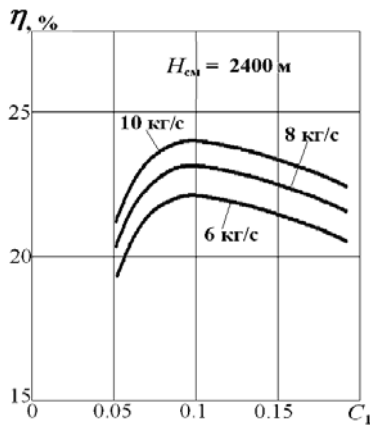


Рис. 4. Зависимость КПД (η) от истинной объемной концентрации твердой фазы C_1 для различных производительностей по твердому

На рис. 5 приведены зависимости массового расхода воздуха и КПД эрлифта от истинной объемной концентрации твердой фазы для заданной производительности по твердому и фиксированном местоположении смесителя при различных диаметрах трубопровода.

Как видно из графиков, наибольший КПД достигается при диаметре трубопровода 0,227 м, что практически совпадает с аналогичными расчетами для базового варианта глубоководного гидроподъема ВНИПИ „Океанмаш“.

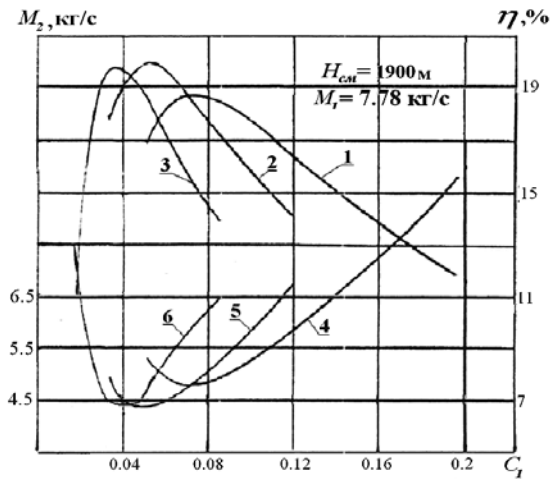


Рис. 5. Зависимости массового расхода воздуха M_2 и КПД от истинной объемной концентрации твердой фазы при различных диаметрах трубопровода: 1, 2, 3 – КПД для диаметров трубопровода 0,20; 0,22; 0,24 м соответственно; 4, 5, 6 – M_2 для диаметров трубопровода 0,20; 0,22; 0,24 м соответственно

На рис. 6 приведены зависимости основных расходных параметров глубоководных гидроподъемов от давления в смесителе при заданной производительности по твердому и фиксированном заглублении смесителя для тех же диаметров трубопровода. Как видно из графиков, с уменьшением расхода воздуха, обеспечивающего заданную производительность установки при выбранном заглублении смесителя, увеличивается как давление в смесителе, так и КПД установки.

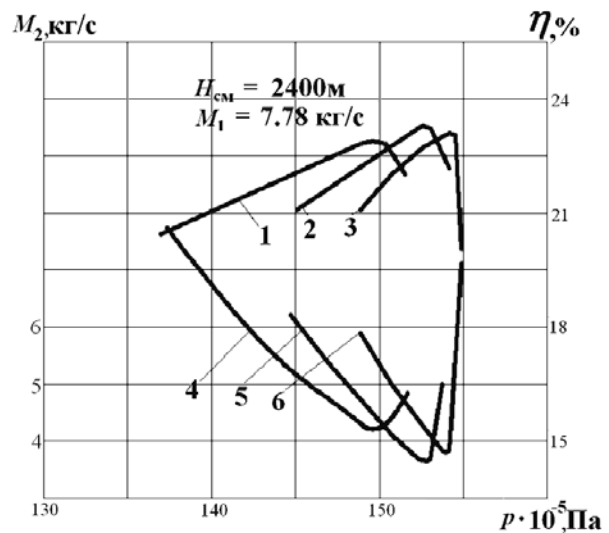


Рис. 6. Зависимость массового расхода воздуха и КПД от давления в смесителе p при различных диаметрах трубопровода: 1, 2, 3 – КПД для диаметров трубопровода 0,22; 0,27; 0,32 м соответственно; 4, 5, 6 – M_2 для диаметров трубопровода 0,22; 0,27; 0,32 м соответственно

Как следует из рисунка 7, минимальный расход воздуха, обеспечивающий заданную производительность, соответствует безразмерному заглублению смесителя $\bar{H}_{ci} = 0,41$, что эквивалентно $H_{cm} = 2380$ м. Следует отметить, что в расчетах ВНИПИ „Океанмаш“ величина заглубления смесителя составляла 1900 м.

Зависимости КПД эрлифта от безразмерной глубины погружения смесителя при различных производительностях по твердому представлены на рис. 8. Из графиков следует, что каждой производительности установки по твердому соответствует рациональное заглубление смесителя, минимизирующее энергоемкость установок. В то же время, на величину КПД эрлифта, в исследуемом диапазоне изменения параметров, заглубление смесителя влияет не в меньшей степени (рис. 8), нежели диаметр трубопровода (рис. 5).

В результате анализа результатов систематических численных экспериментов установлен **новый научный результат**, заключающийся в том, что рациональное безразмерное погружение смесителя эрлифта \bar{H}_{ci} , обеспечивающее максимальный КПД установок в диапазоне изменения производительности эрлифта по твердому 7...10 кг/с и глубин разработки месторождений железомарганцевых конкреций 3500...7000 м, составляет $\bar{H}_{ci} = 0.36...0.42$.

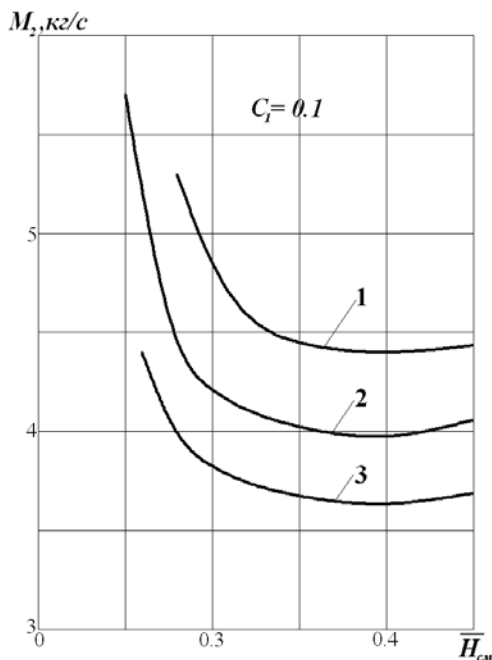


Рис. 7. Зависимость массового расхода воздуха M_2 от безразмерной глубины погружения смесителя \bar{H}_{ci} для различных расходов твердого: 1,2,3 – для расхода твердого $M_1=10; 8; 6$ кг/с соответственно

На основании комплексного анализа и сопоставления представленных зависимостей (рис. 3 – 8), отражающих взаимовлияние конструктивных, расходных и энергетических параметров глубоководных гидро-

подъемов, для базового варианта глубоководного гидроподъема определены следующие рациональные параметры: $C_1 = 0,09$; $H_{cm} = 2380$ м; $M_2 = 4,12$ кг/с, минимизирующие энергоемкость установки.

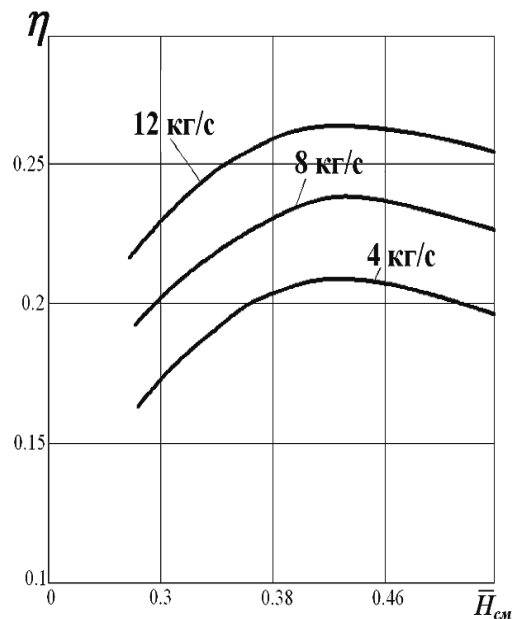


Рис. 8. Зависимости КПД эрлифта от безразмерного заглубления смесителя \bar{H}_{ci} для разных расходов твердого материала M_1

Для осуществления запуска и работы ГЭГ на смесителе, глубина погружения которого превосходит максимальный напор, развиваемый компрессором, авторами статьи на уровне изобретения разработан соответствующий способ [1].

Последующим этапом исследований является разработка графической версии программы, базирующейся на кроссплатформенной библиотеке Qt, которая будет осуществлять визуализацию протекающих в глубоководном эрлифте процессов. Реализация графической версии планируется в трех вариациях: как самостоятельное приложение, как встраиваемый модуль (plug-in) к САПР SolidWorks и как компонент в составе проектируемого авторами САЕ-комплекса для моделирования глубоководных добычных установок.

Выводы:

1. Разработан усовершенствованный метод расчета параметров ГЭГ, обеспечивающий высокую точность результатов за счет наиболее полного учета специфики эксплуатации установок и особенностей транспортирования твердого материала в составе гетерогенной смеси.
2. Точность разработанного метода подтверждена посредством собственного лабораторного эксперимента и сравнения с опытными данными других исследований в морских и карьерных условиях.
3. В качестве программного обеспечения усовершенствованного расчетного метода разработана программа “Exact Calculation” на языке C++ для платформы win32/64.

4. С использованием программы "Exact Calculation" установлены закономерности влияния конструктивных и расходных параметров на энергоёмкость процесса гидроподъёма и определены их рациональные значения для базового варианта экспериментальной установки при глубине разработки месторождения 6000 м.

Список литературы / Reference

1. Кириченко Е.А. Выбор и обоснование рациональных параметров глубоководной эрлифтной установки с учетом влияния питающей пневматической системы: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.06 „Горные машины“ / Кириченко Евгений Алексеевич; Гос. высшее уч. заведение „Нац. горный ун-т“. – Днепропетровск, 1989. – 20 с., включ. обл.: ил. – Библиогр.: с. 15–17.

Kirichenko Ye.A. Choice and of rational parameters of the deep-water airlift installation, subject to the supply pipeline influence: Abstract of the thesis on receiving of Cand. Sci. (Tech.) degree: speciality 05.05.06 "Mining machines" / Kirichenko Yevgeniy Alekseyevich; National Mining University. – Dnipropetrovsk, 1989. – 20 p., – Bibl.: pp. 15–17.

2. Кириченко Е.А. Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъёма полезных ископаемых: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.05.06 „Горные машины“ / Кириченко Евгений Алексеевич; Гос. высшее уч. заведение „Нац. горный ун-т“. – Днепропетровск, 2001. – 38 с., включ. обл.: ил., табл. – Библиогр.: с. 30–33.

Kirichenko Ye.A. Scientific substantiation of pipe system parameters for minerals hydraulic hoisting: Abstract of the thesis on receiving of Dr. Sci. (Tech.) degree: speciality 05.05.06 "Mining machines" / Kirichenko Yevgeniy Alekseyevich; National Mining University. – Dnipropetrovsk, 2001. – 38 p., – Bibl.: pp. 30–33.

3. Grabow G. Optimierung Hydraulischer Förderer fahren sur submarinen. Gewinnung mineralischer fohstoffe. Frieberger Forschung-shefte / Grabow G. – 1978. – No.2. A 586. – 111 p.

4. Уэки Сиро. Изучение возможностей эрлифта (вып.3) / Уэки Сиро. – Сайко то Хоан, 1979. – Т. 25. – № 8.

Uehki Siro. Airlift abilities research (issue. 3) / Uehki Siro. – Sayko to Khoan, 1979. – Vol. 25. – No.8.

5. Полярский Ю. Добыча марганцевых конкреций со дна морей и океанов с использованием пневмогидравлического транспорта / Полярский Ю., Плеве Ф. // Preglad gorniczy. 1982. – С. 152–161.

Polyarskiy Yu. Manganese concretions mining from sea and ocean bottom using pneumatic-hydraulic transport / Polyarskiy Yu, Pleva F. // Preglad gorniczy. 1982. – pp. 152–161.

6. Chaziteodorou G. Entwurf eines Abbanschemas Zur Gewinnung und Fv're tereng von Mangankollen aus der Tiefsee / Chaziteodorou G., Scheffel S., Wienen A. // Meerstechnik. – 1972. – No.2.

7. Адамов Б.И. Исследование и разработка глубоководных эрлифтных установок для подъёма твердого материала: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук / Адамов Борис Исаевич; Донецкий

нац. техн. ун-т. – Донецк, 1982. – 23с. : ил. – Библиогр.: с. 17–19.

Adamov B.I. Research and development of the deep-water airlifts for solid material hoist: Abstract of the thesis on receiving of Cand. Sci. (Tech.) degree / Adamov Boris Isayevich; Donetsk National Technical Univrsity. – Doneeыk, 1982. – 23p. – Bibl.: pp. 17–19.

8. Weber M. Das Airlift-Verfahren und seine Einsetzbarkeit zur Furderung von Mineralien aus der Jiefsee: Inter-ocean ' 76, Int. Kongr. und Austell Meeresterhnic und Meerstorsch, 1976. Dusseldorf / Weber M. – Dusseldorf, 1976. – P. 141–162.

9. Кириченко Е.А. Исследование параметров снарядной структуры течения в подъемной трубе глубоководного эрлифта / Кириченко Е.А., Евтеев В.В., Романюков А.В. // Науковий вісник НГУ. – 2007. – № 9. – С. 66–72.

Kirichenko Ye.A. Study of parameters of flow in pipe of deep-water airlift / Kirichenko Ye.A., Evtseyev V.V., Romanyukov A.V. // Naukoviy visnyk NGU. – 2007. – No.9. – P. 66–72.

10. Кириченко Е.А. Оптимизация проектных параметров глубоководного эрлифта с учетом характеристик питающей пневмосистемы / Кириченко Е.А., Аврахов Ф.И., Самуся В.И. // В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной школы „Технические средства и методы исследования океанов и морей“, Москва, 1989.

Kirichenko Ye.A. Project parameters of deep-water airlift optimization taking into account parameters of feeding pneumatic system / Kirichenko Ye.A., Avrahov F.I., Samusya V.I. // in the book.: Report theses of all-USSR school "Technical means and methods of marine and ocean research", Moscow, 1989.

Розроблено вдосконалений метод розрахунку глибоководних ерліфтних гідропідйомів, що якнайповніше враховує специфіку транспортування твердого матеріалу потоком водоповітряної суміші в підймальній трубі ерліфта. Для реалізації запропонованого методу розроблено програму „Exact Calculation“. З її використанням встановлено закономірності впливу конструктивних і витратних параметрів на енергоємність процесу гідропідйому і визначено їх раціональні значення для базового варіанту експериментальної установки при глибині видобування 6000 м.

Ключові слова: гідротранспорт, ерліфт, гідропідйом, тверді корисні копалини, глибоководний видобуток

The advanced method for calculation the deep-water airlift hydraulic hoists is developed, which totally allow for specificity of the firm material transportation by air-water stream in the airlift pipeline. The program "Exact Calculation" for realization of the offered method is developed. With its use the regularities of the constructive and flow rate parameters influence on power consumption of the hydraulic hoist process are ascertained and their rational values for mining at the 6000-m depths are defined.

Keywords: hydrotransport, airlift, hydraulic hoist, solid minerals, deep-sea mining

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Самусею. Дата надходження рукопису 23.02.11