

ДЕТЕРМЕННО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
ТРАНСПОРТНЫХ ТРУБНЫХ СИСТЕМ МИРОВОГО ОКЕАНА

В.И. Самуся¹, Е.А. Кириченко¹, М.В. Холоменюк¹, А.А. Бобришов¹

¹ Украина, Днепр, НТУ «Днепровская политехника»

DETERMINAL PHENOMENOLOGICAL APPROACH TO MODELING
TRANSPORTATION PIPE SYSTEMS OF THE WORLD OCEAN

V.I. Samusya¹, Ye.A. Kirichenko¹, M.V. Kholomenyuk¹, A.A. Bobrishov¹

¹ Ukraine, Dnipro, Dnipro University of technology

Мета. Визначити раціональний діаметра транспортного трубопроводу потужної морської гідропідйому поліметалічних конкрецій.

Методика дослідження. В роботі реалізований інноваційний детерменно-феноменологічний підхід шляхом вирішення варіаційної пов'язаною завдання, що об'єднує дослідження процесів внутрішньої і зовнішньої гідродинаміки. При цьому внутрішня гідродинаміка фокусується на дослідженні процесу транспортування твердих корисних копалин, а зовнішня - пов'язана з обтіканням транспортного трубопроводу морським середовищем і в основному зводиться до встановлення аерогідро-динамічних коефіцієнтів.

Результати досліджень. В результаті досліджень було запропоновано інноваційний детерменно-феноменологічний підхід до моделювання транспортних трубних систем Світового океану, який базується на використанні детерменізованих математичних моделей гетерогенних течій в поєднанні з інженерної ерудицією розробників. Даний підхід може бути корисний при дефіциті наявної інформації за деякими вихідними даними і умовами роботи гідропідйомів, а також може бути поширений і на ступінчасту конструкцію ерліфтного глибоководного гідропідйому на останніх ділянках підйомної труби, а також вибір раціональних конструктивних параметрів всього видобувної става, з урахуванням наявності сателітних трубопроводів.

В теорії гідротранспорту введений і обґрунтований новий термін «неодружена» потужність, а також дано його наукове визначення. Під цим терміном розуміється енергетичні витрати не пов'язані з підйомом твердого матеріалу в транспортному трубопроводі, а витрачаються тільки на його взаємодію з навколишнім морським середовищем при русі судна-носія. «Холоста» потужність має першорядне значення при вирішенні цілого ряду прикладних задач і в кінцевому підсумку відповідає за конкурентоспроможність трубої системи підйому в умовах Світового океану.

Наукова новизна. Вперше вибір раціонального діаметра глибоководного гідропідйому здійснено шляхом мінімізації сумарної енергетичної потужності, що включає витрати енергії і на транспортування поліметалічних конкрецій і на переміщення транспортного трубопроводу в товщі морської води.

Практичне значення полягає в тому, що раціональний діаметра транспортного трубопроводу для підйому 1 млн. Тонн на рік поліметалічних конкрецій з глибини 6 км для ерліфтного гідропідйому дорівнює 0,72 м, а для насосного варіанту глибоководного гідропідйому становить 0,65 м.

Ключові слова: глибоководний гідропідйом, конкреції, трубопровід, насос, ерліфт, діаметр.

Анализ состояния вопроса указывает, что разработка основных месторождений твердых полезных ископаемых (ТПИ) ведется традиционными технологиями подземной и открытой разработок, что приводит к стремительному сокращению континентальных природных ресурсов. В этой связи, особую **актуальность** приобретают вопросы освоения минерального потенциала Мирового океана, в плане замещения рудных месторождений суши – морскими. Это приводит к необходимости отказаться от традиционных стереотипов при исследовании параметров гидротранспортных систем и созданию теоретических основ проектирования и эксплуатации глибоководных установок в составе морских горнодобывающих комплексов (МГК).

По оценкам специалистов [1-3] более 50-60% энергозатрат на добычу ТПИ расходуется на транспортирование горных масс с больших глубин на поверхность сквозь толщу морской воды. В настоящее время является перспективным создание эффективной и надежной морской техники на базе гидравлической системы подъема [1], а используемые насосные и эрлифтные глибоководные гидроподъемы отличаются высокой вероятностью технической реализации и являются конкурентоспособными [8,9]. Это указывает на необходимость коренного пересмотра подхода к выбору рациональных параметров гидроподъемов с учетом специфики новой области их применения.

Насосный глубоководный гидроподъем (НГГ) имеет ряд преимуществ, обусловленных возможностью транспортирования пульп высоких концентраций, большими производительностями и высокими КПД грунтовых насосов. А эрлифтный глубоководный гидроподъем (ЭГГ) является наиболее надежным способом транспортирования горной массы несмотря на высокую энергоемкость установок.

Известно, что НГГ и ЭГГ функционально и конструктивно различаются, тем не менее в данной статье представлен общий детерменно-феноменологический подход к выбору их рациональных параметров. Этот подход базируется на использовании строгих гидродинамических моделей многофазных потоков в сочетании с эвристическими методами, что особенно важно при неопределенности некоторых исходных данных и конкретных условий работы МГК.

В этом плане задача выбора рационального диаметра транспортного трубопровода (ТТ) представляет первостепенный практический интерес для проектировщиков. Тем не менее, известные ранее результаты [4-6] могут быть сведены на нет, в виду наличия некоторых «подводных камней». Дело в том, что известные исследования направлены только на определение энергетических затрат непосредственно на подъем горной массы, а затраты на преодоления сил сопротивления движущегося ТТ в толще морской воды при перемещении судна-носителя (СН), не учитываются. Однако, последние затраты существенны и пропорциональны диаметру ТТ. Рентабельная добыча полиметаллических конкреций (ПМК) с глубин 6-7 км составляет 1-3 млн. тонн в год по «сухому» сырью, а указанные производительности гидроподъемов могут быть реализованы в трубопроводах только большого диаметра. Таким образом, вопрос выбора рационального диаметра ТТ в составе океанского добычного комплекса остается открытым.

В случае НГГ и ЭГГ определение эксплуатационных затрат следует устанавливать принципиально новым способом, с учетом сил сопротивлений при перемещении ТТ в толще морской воды при движении добычного комплекса. На преодоление этих сил расходуется как бы «холостая» мощность, прямо не связанная с транспортированием твердого материала в трубопроводе. В этой связи решение вариационной задачи определения рационального диаметра ТТ целесообразно получать путем минимизации величины суммарной энергетической мощности состоящей из «холостой» и транспортирующей мощностей. «Холостая» мощность играет существенную роль при выборе двигателя СН, рационального диаметра ТТ одного добычного комплекса, снабженным агрегатом сбора и количеством таких комплексов.

Цель данной статьи заключается в определении рационального диаметра ТТ мощного морского гидроподъема полиметаллических конкреций.

Достижение поставленной цели связано с реализацией инновационного детерменно-феноменологического подхода, путем решения вариационной сопряженной задачи, объединяющей исследование процессов внутренней и внешней гидродинамики. При этом внутренняя гидродинамика фокусируется на исследовании процесса транспортирования ТПИ, а внешняя – связана с обтеканием ТТ морской средой и в основном сводится к установлению аэрогидродинамических коэффициентов.

В данной работе использованы аэрогидродинамические коэффициенты, полученные в результате систематических экспериментальных исследований [7] на аэродинамических моделях. В работах [8,9] разработан семияционный математический аппарат и соответствующее программно-алгоритмическое обеспечение, для решения задач внутренней и внешней гидродинамики.

Известно, что традиционно для наземного гидротранспорта определяют оптимальный диаметр трубопровода с учетом его стоимостных показателей, путем минимизации суммарных капитальных и эксплуатационных параметров, причем последние связаны с транспортированием пульпы внутри трубопровода.

Новизна предложенного метода заключается в том, что впервые выбор рационального диаметра глубоководного гидроподъема осуществлен путем минимизации суммарной энергетической мощности, включающей затраты энергии и на транспортирование ПМК и на перемещение ТТ в толще морской воды.

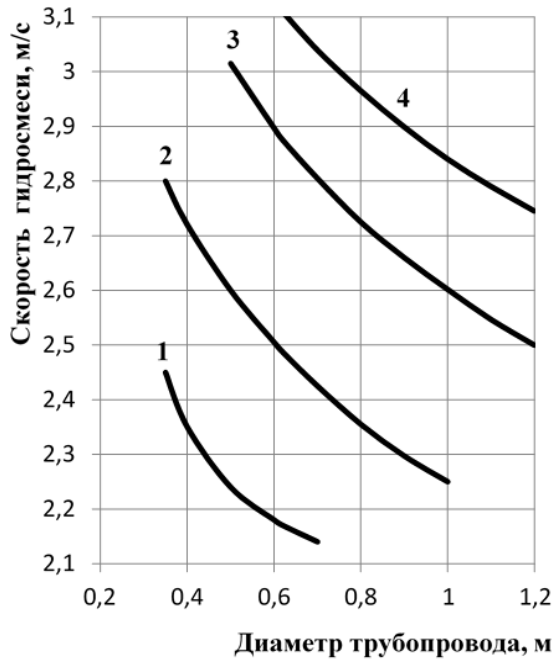
В ходе решения поставленной задачи были усовершенствованы и модифицированы некоторые математические модели, расчетные схемы и алгоритмы в контексте указанной цели. Следует отметить, что согласно использованной **методики** расходные, конструктивные и энергетические параметры глубоководных гидроподъемов определены в результате решения вариационной задачи в сопряженной постановке, что существенно повышает достоверность моделирования.

При моделировании приняты стандартные для расчета НГГ и ЭГГ допущения [9]. Расчеты выполнены для значений диаметра ПМК $d_T=0,02$ м и глубины погружения смесителя $H_{см}=1900$ м.

Ниже выборочно приведены некоторые характерные результаты и комментарии к ним.

ГРАФИКИ

Результаты, представленные на рис. 1...5 относятся к насосному гидроподъёму, а на рисунках 6...10 – к эрлифтному гидроподъёму.



1 – M = 40 кг/с; 2 – M = 80 кг/с; 3 – M = 160 кг/с; 4 – M = 240 кг/с;

Рис. 1. Зависимость изменения скорости гидросмеси от диаметра трубопровода при различных расходах твердого

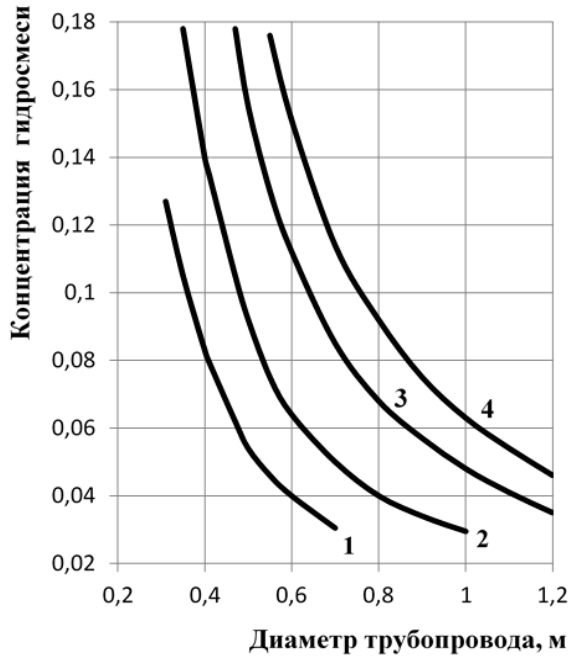
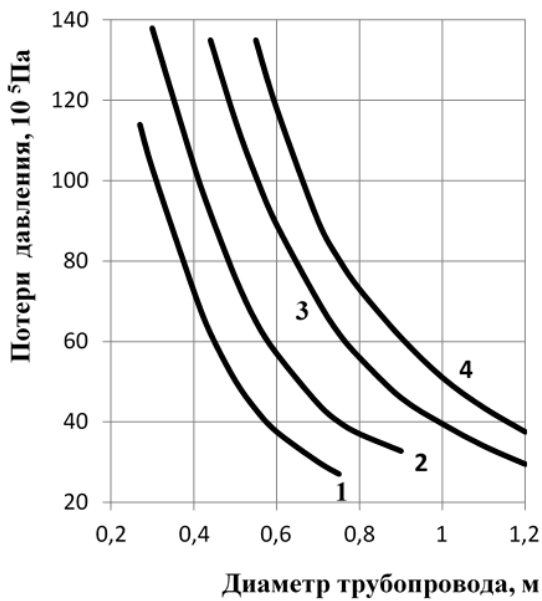


Рис.2. Зависимость истинной концентрации гидросмеси от диаметра трубопровода при различных расходах твердого



1 – M = 40 кг/с; 2 – M = 80 кг/с; 3 – M = 160 кг/с; 4 – M = 240 кг/с;

Рис. 3. Зависимость потерь давления от диаметра трубопровода при различных расходах твердого

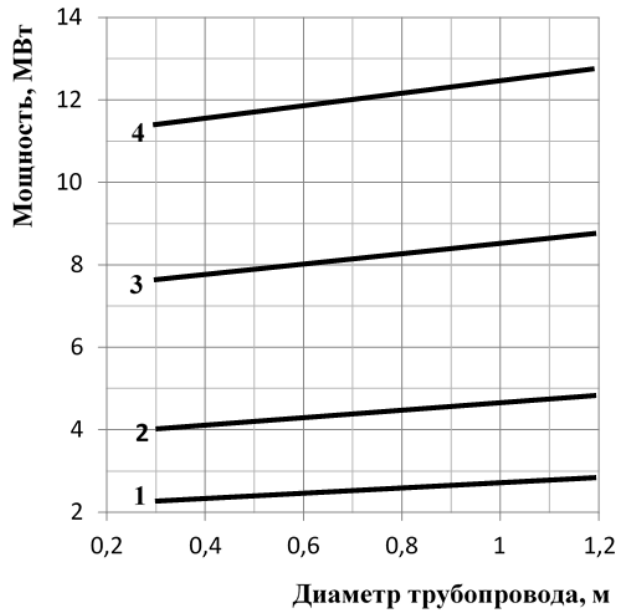


Рис. 4. Зависимость мощности подъема ПМК от диаметра трубопровода при различных расходах твердого

Из рис. 1 следует, что для всех массовых расходов твердого увеличение диаметра приводит к уменьшению скорости. Причем, рост производительности связан с одновременным увеличением и диаметра и транспортирующей скорости.

Для каждого массового расхода твердого увеличение диаметра ТТ приводит к уменьшению истинной концентрации пульпы, причем для увеличения производительности гидроподъема требуется увеличение диаметра трубопровода и концентрации пульпы (рис. 2).

На рис. 3 показано, что при уменьшении диаметра трубопровода потери давления на трение стремительно возрастают для каждого массового расхода твердого. Для уменьшения «холостой» мощности требуется внедрение специальных мероприятий [9], а не уменьшение диаметра.

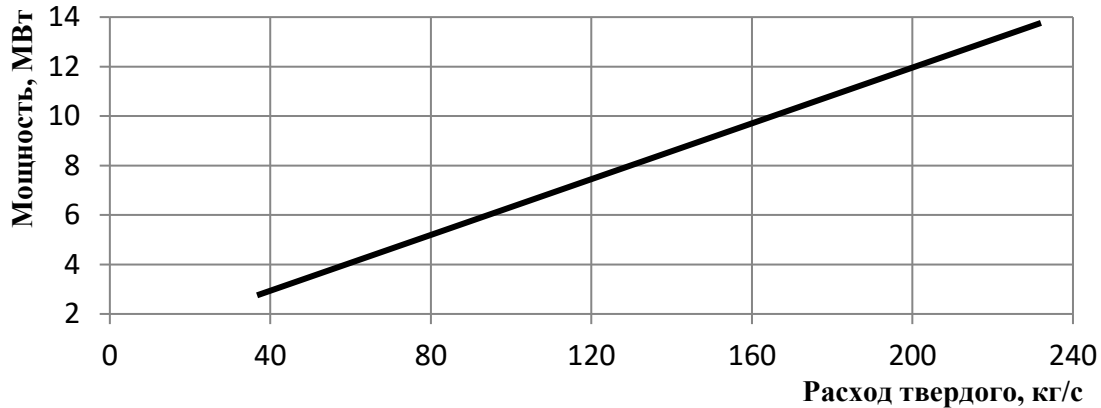
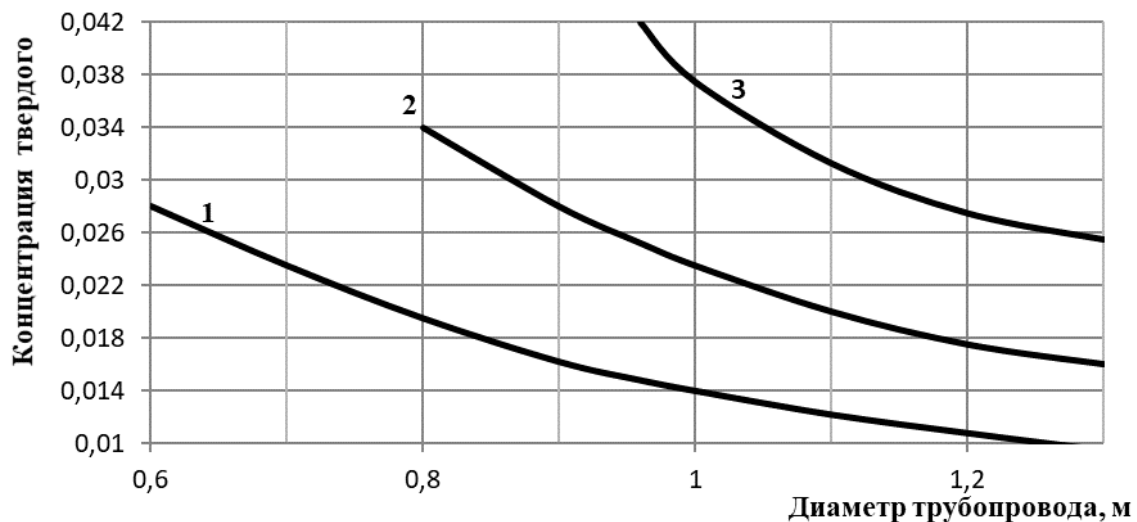


Рис. 5. Зависимость мощности гидроподъема ПМК от массового расхода твердого материала

Из рис. 4 следует, что увеличение транспортирующей скорости с ростом диаметра трубопровода описывается пологой квазилинейной зависимостью. Для каждой производительности увеличение диаметра трубопровода в 2 – 3 раза приводит к росту мощности только на 10 – 14%, что позволяет на данном этапе установить зависимость изменения мощности от массового расхода, абстрагируясь от несущественных приращений мощности (квазиавтомодельная область) с ростом диаметра в указанных диапазонах (рис. 5). Данный эвристический прием может быть эффективен в дальнейшем при оптимизации проектных и эксплуатационных параметров глубоководных гидроподъемов при верификации конкурентоспособности вариантов подъема.

На рис. 6 показано, что характер зависимостей для изменений концентраций при эрлифтном и насосном гидроподъеме подобен. Однако, в эрлифтном варианте реализуются относительно малые концентрации твердого.



1 – M = 40 кг/с; 2 – M = 80 кг/с; 3 – M = 160 кг/с;

Рис. 6. Зависимость истинной концентрации твердого от диаметра трубопровода при различных массовых расходах ПМК

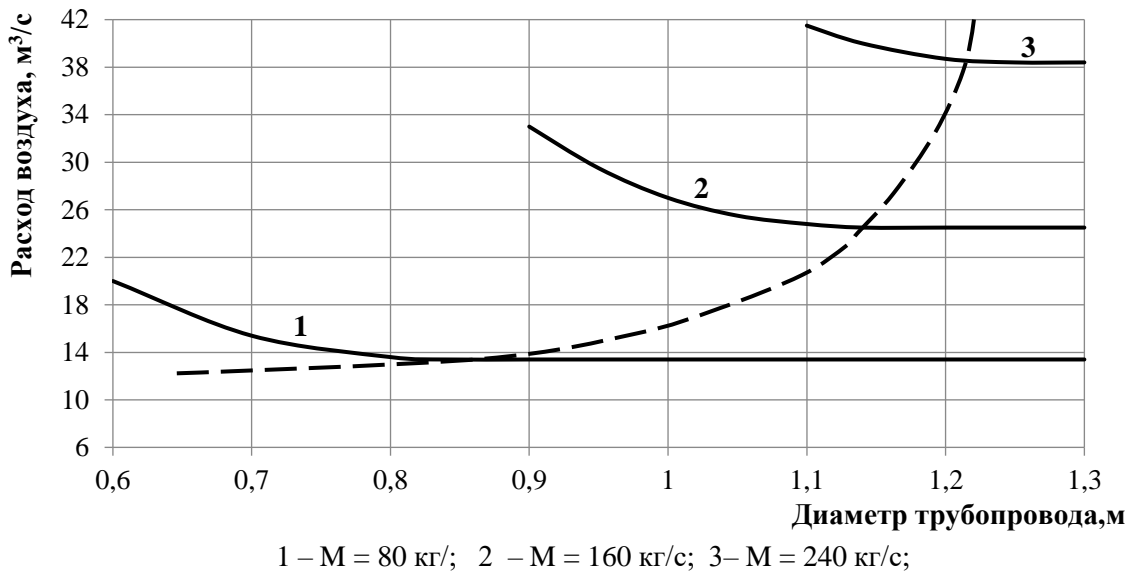
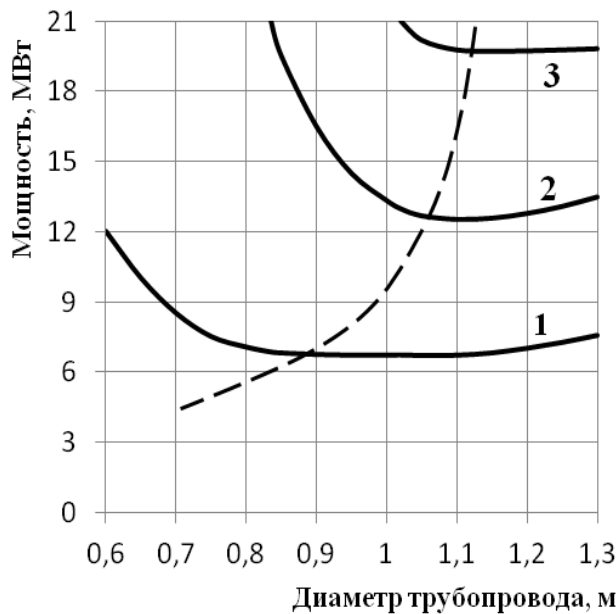


Рис.7. Зависимость объемного расхода воздуха от диаметра трубопровода при различных массовых расходах твердого материала

Из рис. 7 следует, что при увеличении производительности эрлифтного глубоководного гидроподъема требуемый расход воздуха увеличивается для всех диаметра трубопровода, но с различной интенсивностью. Для каждого диаметра трубопровода есть граница, (линия 4) после которой увеличение расхода воздуха существенно ослабевает и можно в большинстве проектных задач на данном этапе считать этот расход практически постоянным (квазиавтомодельная область). Линия 4 удовлетворительно аппроксимируется квазилогарифмической зависимостью.

На рис. 8 показана зависимость транспортирующей мощности от диаметра трубопровода для различных массовых расходов твердого. Очевидно, что характер показанных зависимостей подобен аналогичным зависимостям рис. 7. Этот результат физичен, т.к. в эрлифтном глубоководном гидроподъеме транспортирующая мощность определяется в основном потребным расходом воздуха.



1 – $M = 80$ кг/с; 2 – $M = 160$ кг/с; 3 – $M = 240$ кг/с;

Рис. 8. Зависимость мощности гидроподъема ПМК от диаметра трубопровода при различных массовых расходах твердого материала

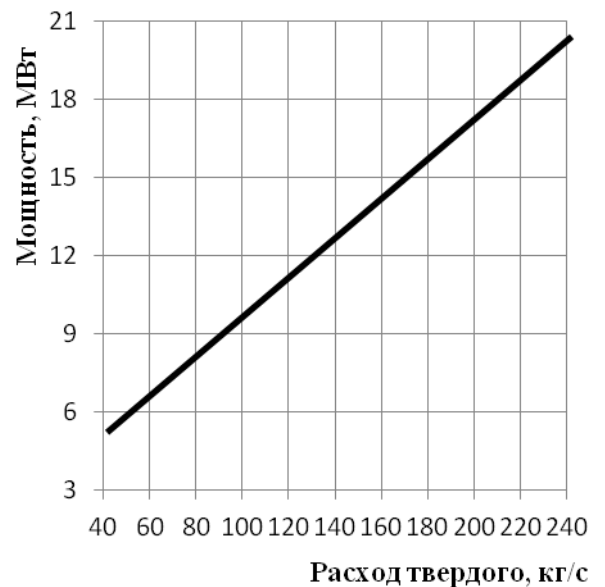


Рис. 9. Зависимость мощности гидроподъема ПМК от массового расхода твердого материала

Кривая 4 является границей после которой с инженерной точностью транспортирующую скорость можно считать постоянной (квазиавтомодельная область). Следует отметить, что кривая 4 может быть аппроксимирована квазиэкспоненциальной зависимостью.

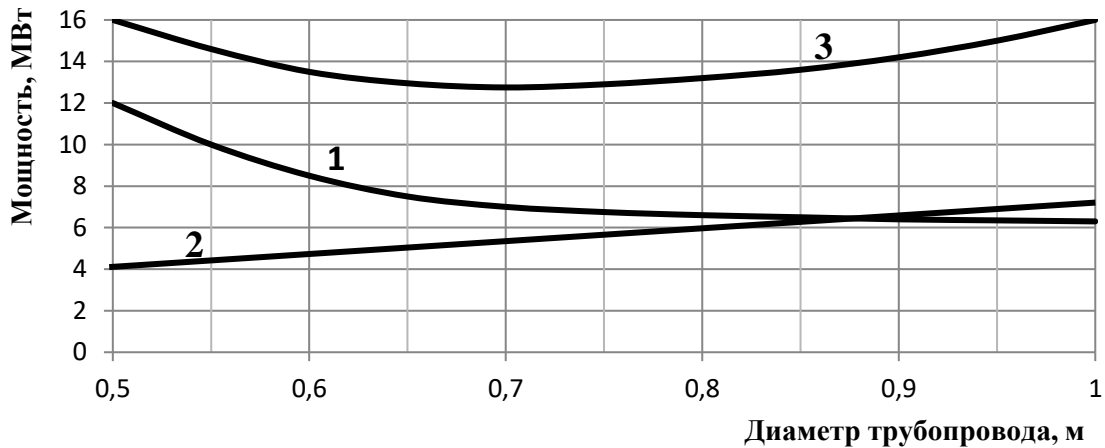


Рис. 10. Зависимость суммарной энергетической мощности от диаметра подъемного трубопровода
1– мощность транспортирования ПМК; 2 – „холодная“ мощность, затрачиваемая на перемещение трубопровода; 3 – суммарная мощность

На рис. 9 показано, что зависимость роста транспортирующей мощности от массового расхода твердого в квазиавтомодельной области можно описать линейной зависимостью с использованием описанного уже эвристического приема (рис. 4, рис. 7, рис. 8). Следует отметить, что презентуемый эвристический прием позволяет избежать применения трудоемкого многофакторного численного эксперимента, связанного с детерминированным подходом к определению конструктивных, расходных и энергетических параметров. Из сравнения графиков рис. 5 и рис. 9 видно насколько эрлифтный глубоководный гидроподъем более энергоемкий по сравнению с насосным вариантом.

На рис. 10 показаны характерные мощности и метод определения рационального диаметра для эрлифтного гидроподъема путем минимизации суммарных энергетических затрат на подъем ПМК и на перемещение трубопровода. Для производительности 1 млн. т. в год и глубины разработки 6 км величина рационального диаметра трубопровода составляет 0,72 м.

Новый научный и практический результат заключается в том, что рациональный диаметра транспортного трубопровода для подъема 1 млн. тонн в год полиметаллических конкреций с глубины 6 км для эрлифтного гидроподъема равен 0,72 м, а для насосного варианта глубоководного гидроподъема составляет 0,65 м.

Выводы

1. Предложен инновационный детерменно-феноменологический подход к моделированию транспортных трубных систем Мирового океана, базирующийся на использовании детерминированных математических моделей гетерогенных течений в сочетании с инженерной эрудицией разработчиков. Данный подход может быть полезен при дефиците имеющейся информации по некоторым исходным данным и условиям работы гидроподъемов, а также может быть распространен и на ступенчатую конструкцию ЭГТ на последних участках подъемной трубы, а также выбор рациональных конструктивных параметров всего добычного става, с учетом наличия сателитных трубопроводов.

2. В теории гидротранспорта введен и обоснован новый термин «холодая» мощность, а также дано его научное определение. Под этим термином понимается энергетические затраты не связанные с подъемом твердого материала в транспортном трубопроводе, а расходуемые только на его взаимодействие с окружающей морской средой при движении судна-носителя. «Холодая» мощность имеет первостепенное значение при решении целого ряда прикладных задач и в конечном итоге отвечает за конкурентоспособность трубной системы подъема в условиях Мирового океана.

3. Впервые сформулирована и решена вариационная задача выбора рационального транспортного трубопровода глубоководного комплекса в сопряженной постановке для совместных исследований процессов гидроподъема горных масс и движения транспортного трубопровода в окружающей морской среде.

4. Разработано методическое обеспечение для решения типичных проектных задач для насосного и эрлифтного вариантов глубоководного гидроподъема при промышленной эксплуатации добычных ком-

плексов производительностью от 1-3 млн. тонн в год по «сухому» сырью с глубин 3-7 км. В результате проработки и тестирования методики определены рациональные проектные параметры для насосного и эрлифтного гидроподъемов, обеспечивающих транспортирование 1 млн. тонн в год конкреций с глубины 6 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко, Е.А. (2001). *Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъема полезных ископаемых*: дис. ... д-ра техн. наук.
2. Pivnyak, G.G. (2008). *Problems of deep-water hydraulic lifting of solid mineral resources*. New technologies in mining 21st World mining congress. Krakow. 49–57.
3. Kyryuchenko, E.A. (2008). *The technology of polymetallic concretions extraction and transporting*. Innovations in Non-Blasting Rock Destruction. 169–178.
4. Кириченко, Е.А. (2013). *Теория и алгоритмы расчета снарядного течения в эрлифте*. Днепропетровск. НГУ.
5. Кириченко, Е.А. (2012). *Моделирование динамических процессов в глубоководных пневмотранспортных системах*. Днепропетровск. НГУ.
6. Кириченко, Е.А. (2010). *Динамика глубоководных гидроподъемов в морском горном деле*. Днепропетровск. НГУ.
7. Гоман, О.Г. (1999). *Экспериментальные исследования аэродинамических характеристик элементов эрлифтных гидроподъемов*. Збагачення корисних копалин. Вып. 4 (45). 46–54.
8. Кириченко, Е.А. (2009). *Механика глубоководных гидротранспортных систем в морском горном деле*. Днепропетровск. НГУ.
9. Кириченко Е.А. (2014). *Основы проектирования систем гидротранспорта полиметаллических руд Мирового океана* Никополь: ФОП Фельдман О.О.

Рекомендовано до друку: д-ром техн.наук, проф. Заболотним К.С.

АННОТАЦИЯ

Цель. Определить рациональный диаметра транспортного трубопровода мощного морского гидроподъема полиметаллических конкреций.

Методика исследования. В работе реализован инновационный детерменно-феноменологический подхода путем решения вариационной сопряженной задачи, объединяющей исследование процессов внутренней и внешней гидродинамики. При этом внутренняя гидродинамика фокусируется на исследовании процесса транспортирования твердых полезных ископаемых, а внешняя – связана с обтеканием транспортного трубопровода морской средой и в основном сводится к установлению аэрогидродинамических коэффициентов.

Результаты исследований. В результате исследований был предложен инновационный детерменно-феноменологический подход к моделированию транспортных трубных систем Мирового океана, базирующийся на использовании детерминированных математических моделей гетерогенных течений в сочетании с инженерной эрудицией разработчиков. Данный подход может быть полезен при дефиците имеющейся информации по некоторым исходным данным и условиям работы гидроподъемов, а также может быть распространен и на ступенчатую конструкцию эрлифтного глубоководного гидроподъема на последних участках подъемной трубы, а также выбор рациональных конструктивных параметров всего добычного става, с учетом наличия сателитных трубопроводов.

В теории гидротранспорта введен и обоснован новый термин «холостая» мощность, а также дано его научное определение. Под этим термином понимается энергетические затраты не связанные с подъемом твердого материала в транспортном трубопроводе, а расходуемые только на его взаимодействие с окружающей морской средой при движении судна-носителя. «Холостая» мощность имеет первостепенное значение при решении целого ряда прикладных задач и в конечном итоге отвечает за конкурентоспособность трубной системы подъема в условиях Мирового океана.

Научная новизна. Впервые выбор рационального диаметра глубоководного гидроподъема осуществлен путем минимизации суммарной энергетической мощности, включающей затраты энергии и на транспортирование полиметаллических конкреций и на перемещение транспортного трубопровода в толще морской воды.

Практическое значение заключается в том, что рациональный диаметра транспортного трубопровода для подъема 1 млн. тонн в год полиметаллических конкреций с глубины 6 км для эрлифтного гидроподъема равен 0,72 м, а для насосного варианта глубоководного гидроподъема составляет 0,65 м.

Ключевые слова: глубоководный гидроподъем, конкреции, трубопровод, насос, эрлифт, диаметр.

ABSTRACT

Objective. Determine the rational diameter of the transport pipeline for a powerful sea hydraulic lift of polymetallic nodules.

Research methodology. The work implements an innovative deterministic-phenomenological approach by solving a variational conjugate problem that combines the study of the processes of internal and external hydrodynamics. At the same time, internal hydrodynamics focuses on the study of the process of transporting solid minerals, while the external one is associated with the flow around the transport pipeline by the marine environment and is mainly reduced to the establishment of aerohydrodynamic coefficients.

Research results. As a result of the research, an innovative deterministic-phenomenological approach to modeling the transport pipe systems of the World Ocean was proposed, based on the use of deterministic mathematical models of heterogeneous flows in combination with the engineering erudition of the developers. This approach can be useful when there is a shortage of available information on some initial data and operating conditions of hydraulic lifts, and can also be extended to the stepped design of a deep-water hydraulic lift in the last sections of the lifting pipe, as well as the choice of rational design parameters of the entire production staff, taking into account the presence of satellite pipelines.

In the theory of hydrotransport, a new term "idle" power has been introduced and substantiated, as well as its scientific definition. This term means energy costs not associated with the lifting of solid material in the transport pipeline, but spent only on its interaction with the surrounding marine environment when the carrier vessel moves. Idle power is of paramount importance in solving a number of applied problems and is ultimately responsible for the competitiveness of the lift pipe system in the oceans.

Scientific novelty. For the first time, the choice of the rational diameter of a deep-water hydraulic lift was carried out by minimizing the total energy capacity, including the energy consumption for both the transportation of polymetallic nodules and the movement of the transport pipeline in the seawater.

The practical meaning significance lies in the fact that the rational diameter of the transport pipeline for lifting 1 million tons per year of polymetallic nodules from a depth of 6 km for airlift hydraulic lift is 0.72 m, and for the pumping version of deep-water hydraulic lift is 0.65 m.

Keywords: deep-water hydraulic lift, nodules, pipeline, pump, airlift, diameter.