

Е.А.Кириченко, В.Г.Шворак, В.В.Евтеев, В.Е.Кириченко

Национальный горный университет, г.Днепропетровск

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА СПОСОБА И СРЕДСТВ ГИДРОПОДЪЕМА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МИРОВОГО ОКЕАНА

Разработаны методы расчета глубоководных эрлифтных и насосных гидроподъемов, учитывающие влияние изменения гранулометрического состава транспортируемого материала на параметры установок. Сформулированы критерии технического обоснования целесообразности выбора варианта гидроподъема в составе горно-морского предприятия с учетом специфики разработки подводных месторождений Мирового океана.

Актуальность вопроса. В связи с истощением запасов на суше, Мировой океан, как потенциальная база обеспечения минеральным сырьем на долгосрочную перспективу различных отраслей промышленности, является объектом интенсивных исследований развитых стран. Среди твердых полезных ископаемых (ТПИ) наибольший интерес представляют железомарганцевые конкреции, кобальтомарганцевые корки, фосфатные конкреции, полиметаллические сульфиды, металлизированный ил и др. Согласно решению Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 мая 2008 г. «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави», введенным в действие указом Президента Украины № 463/2008 от 20 мая 2008 г., предусматривается разработка новой «Національної програми досліджень і використання ресурсів Азово-Чорноморського басейну, інших районів Світового океану на 2009-2034 роки». Согласно документам Международного органа ООН по морскому дну и Международного трибунала по морскому праву геологические работы должны, в основном, закончиться в период с 2010 по 2012 гг. Следующий этап связан с экспериментальной добычей полиметаллических конкреций, поэтому на первый план выходят задачи по созданию высокоэффективных способов и средств освоения глубоководных месторождений полезных ископаемых [1]. Функционирование уникальных горно-морских предприятий (ГМП) в основном связано с многоплановой работой машиностроителей, технологов и специалистов по системам управления.

Функциональное назначение составных элементов ГМП следующее. На базовом плавсредстве размещается все надводное оборудование, спускоподъемные средства, бортовая система обогащения сырья, система приема и временного хранения сырья. Также на судне размещается система определения местоположения и подсистема динамической стабилизации движения судна, которая требует использования дополнительных активных средств управления движением. К ним относятся подруливающие устройства и выдвижные движительно-рулевые колонки. Для осуществления сборки трубопровода на судне существует специальная вышка. Трубопровод в связке с компрессором, смесителем и воздухопроводом образует эрлифтную уста-

© Е.А.Кириченко, В.Г.Шворак, В.В.Евтеев, В.Е.Кириченко, 2008

новку, обеспечивающую подъем ТПИ на судно. На нижнем конце трубопровода находится технологическая платформа, которая располагается на удалении нескольких десятков метров от дна и содержит бункер-накопитель, предназначенный для промежуточного хранения запаса ТПИ и дозирования подачи ТПИ в трубопровод. Агрегат сбора (АС) осуществляет непосредственный сбор ТПИ со дна океана, отмыв их от донных осадков и передачу ТПИ на технологическую платформу через гибкий шланг. Навигационный модуль обеспечивает обзор донной поверхности в районе движения АС. Его основными функциями являются обнаружение препятствий по курсу движения АС, определение направления и скорости придонных течений, гидролокация донной обстановки, получение информации о залежании конкреций.

Систематические исследования по разработке добычного оборудования (агрегат сбора), средств гидроподъема (насосный и эрлифтный варианты), обогатительного оборудования и системы управления начаты в Национальном горном университете (НГУ) совместно с ВНИПИОкеанмаш с 1980 г. За это время по данной проблеме написаны сотни научных статей, защищены докторская и кандидатские диссертации, более ста изобретений подтверждены патентами Украины и других стран.

Предметом данной статьи является разработка средств доставки полезного ископаемого на базовое плавсредство.

Постановка задачи. Наиболее приемлемым для технической реализации при современном уровне техники является применение морских добычных комплексов на базе гидравлической системы подъема [1, 2]. Применительно к подводной разработке месторождений полезных ископаемых выделяют насосные [3 – 5] и эрлифтные [6, 7] системы, а также различные их комбинации [8 – 12].

Специфика условий подводной разработки месторождений ТПИ со дна Мирового океана при глубинах до 6000 м определяет необходимость создания систем эффективного гидроподъема как крупную и сложную комплексную научно-техническую проблему. Комплексность проблемы, с одной стороны, заключается в необходимости обеспечения параметров взаимосвязанной эффективной работы процессов сбора и подъема ТПИ, а с другой – выполнением, кроме основной функции подъема ТПИ, также связующего звена между базовым плавсредством и агрегатом сбора. Кроме того, трубный став, является несущей конструкцией для всего подводного оборудования добычного комплекса. Таким образом, схема судового добычного комплекса с гидравлической системой подъема предусматривает необходимость выполнения всех видов функциональных связей: технологической, кинематической и конструктивной [13].

Известные на сегодняшний день разработки по определению рациональных параметров систем подъема ТПИ рассматривают транспортирование полезных ископаемых в отрыве от процессов добычи и перекачки их в бункер-дозатор, что в большинстве случаев приводит к попыткам оптимизации параметров нереализуемых на практике рабочих режимов.

Цель работы – определение приоритетных направлений в разработке эффективных способов и средств гидроподъема полезных ископаемых в со-

стве морских горных предприятий и установление рациональных областей применения соответствующего варианта гидроподъема.

Идея работы состоит в определении рациональных параметров гидроподъема в рамках системного подхода с учетом влияния параметров процессов добычи и перекачки ТПИ.

В основу подхода технического обоснования целесообразности выбора варианта гидроподъема положены следующие **критерии**:

- надежность работы установок (величина коэффициента готовности);
- к.п.д. установок;
- эффективность алгоритмов управления установками и локальных систем регулирования;
- степень функциональной совместимости со смежными технологическими операциями и адаптации к новым условиям эксплуатации;
- изменение гранулометрического состава твердого материала в процессе транспортирования.

Коэффициент готовности (K_r) в абсолютных величинах для различных систем гидроподъема определяется на основании статистических данных за определенный период их эксплуатации. Критерий K_r для систем гидротранспорта ТПИ в океане на стадии его проектных разработок целесообразно рассматривать, базируясь на опыте эксплуатации шахтных эрлифтных и насосных установок, которые являются наиболее близкими аналогами транспортирования ТПИ.

Результаты расчетов для шахтных установок показывают, что для эрлифтной системы гидроподъема $K_r \approx 1$, для насосной $K_r \approx 0,4$ [13]. Принимая во внимание этот фактор, производительность системы подъема с погружными насосами должна быть не менее чем в 2,5 раза выше по сравнению с эрлифтной при условии обеспечения выполнения одинаковой плановой производительности по твердому материалу. Это приводит к увеличению установленной мощности модулей комплекса технических средств, составляющих последовательную технологическую цепь процесса добычи ТПИ. При этом возрастают массовые и габаритные характеристики всех элементов, включая и транспортный трубопровод, а соответственно и энергозатраты на буксировку подводной части оборудования комплекса. Кроме того, значительную часть календарного времени комплекс будет работать в режиме монтажа-демонтажа подводного оборудования [13].

На основании энергетического баланса мощностей, затрачиваемых на подъем ТПИ установлены максимумы к.п.д., которые можно достичь при применении базовых вариантов эрлифтного и насосного гидравлических подъемов. Для единых исходных данных по производительности, глубине разработки и характеристикам ТПИ установлено, что значение к.п.д. системы с погружными электронасосными агрегатами при работе на гидросмеси достигает до 25 – 30 %. Эрлифтный способ при изотермическом к.п.д. компрессора $\eta_k = 60$ % обеспечивает достижение к.п.д. системы подъема «по твердому» 12 – 14 % [1, 2].

Основные результаты исследований насосного варианта гидроподъема отображены в работах [14 – 18]. Основной недостаток насосных систем состоит в непосредственном взаимодействии твердого материала с лопатками

рабочего колеса. В связи с этим в большинстве случаев возникает переизмельчение частиц полезных ископаемых и быстрый износ грунтовых насосов, что приводит к понижению надежности системы в целом.

В НГУ разработан ряд способов и насосных систем для их реализации, позволяющих избегать транспортирование твердых частиц через насосы [3 – 5] при использовании простых технических решений. Авторами патентов [3-5] также разработаны соответствующие НОУ-ХАУ, обеспечивающие техническую реализацию этих разработок.

Таким образом, с учетом показателей к.п.д. и надежности глубоководные эрлифтные установки (ГЭУ), несмотря на высокую энергоемкость, конкурируют с погружными насосами.

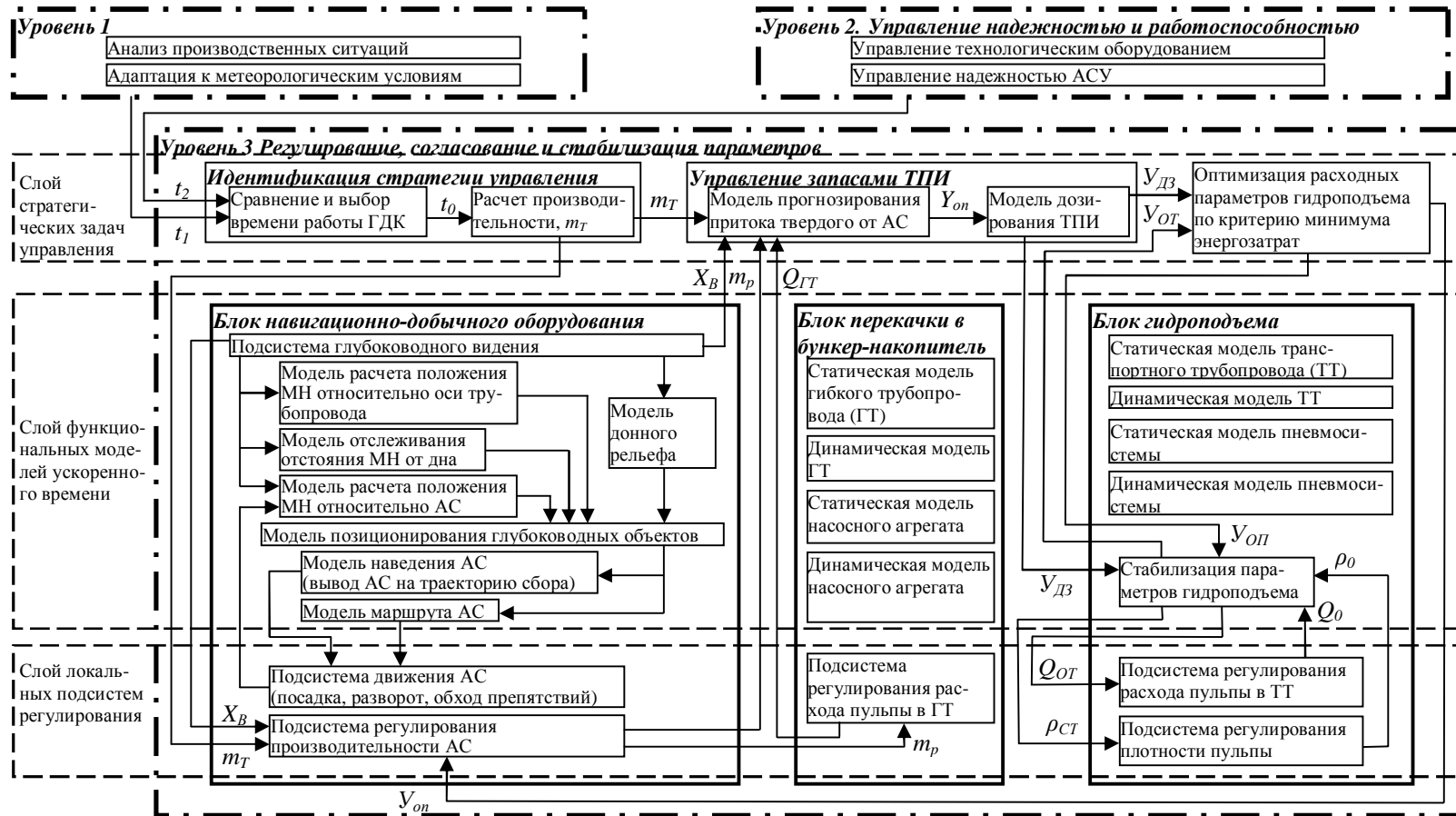
Для средних океанских глубин осуществление эффективного транспортирования добытого сырья может быть достигнуто за счет использования совместной работы компрессора и насоса, что подтверждено оригинальными разработками авторов статьи на уровне изобретений [9 – 13].

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых попутно происходит извлечение элементов, которые не содержат компонентов полезных ископаемых, но естественно входят в состав разрабатываемого слоя дна, что приводит к значительному ухудшению подводной экосистемы. Одним из возможных путей решения этой проблемы является совмещение процессов транспортирования и обогащения ТПИ [10, 11], что, в свою очередь, позволит снизить энергоемкость процесса транспортирования отделенных от ила ТПИ.

Имеются также разработки, позволяющие повышать рентабельность подводной разработки при использовании альтернативных источников энергии [8, 12].

На рис.1 представлена укрупненная функционально-оптимизационная схема АСУ процессами добычи, перекачки и подъема ТПИ в соответствии с предлагаемой идеологией [19 – 22]. Двойными стрелками отражена полимерность связей объекта. Структура включает три иерархических уровня управления. Первый уровень решает задачи определения времени рабочего цикла ГДК (количество рабочих часов в сутки), в зависимости от метеоусловий и различных производственных ситуаций. Во втором уровне управления надежностью и работоспособностью решаются задачи диагностики состояния, прогнозирования работоспособности и управления надежностью оборудования и элементов АСУ. В третьем – решаются задачи обоснования используемых алгоритмов управления запасами ТПИ в технологических емкостях, оптимизации режимных параметров по критерию минимума энергозатрат путем стабилизации режимных параметров на уровне локальных систем регулирования и согласования режимов работ подсистем комплекса.

Функционирование АСУ начинается с решения верхних уровневых задач, задающих ограничения либо параметры для задач нижних уровней. В первый уровень входят два блока: «блок анализа производственных ситуаций» и «блок адаптации к метеоусловиям». В блоке анализа производственных ситуаций решаются задачи «реакции» на внештатные ситуации глобального характера, выводящие систему из строя. В блоке адаптации к метеоусловиям решаются задачи адаптации производственного процесса к кон-



Р и с . 1 . Функционально-оптимизационная схема АСУ технологическими процессами.

кретным метеоусловиям, от чего зависит время работы установки. В зависимости от изменения времени работы добычного комплекса могут изменяться и тактические цели АСУ. Так, например, режим заданной производительности комплекса при минимальных энергозатратах может быть заменен на режим максимальной производительности, в случае штормового предупреждения и др.

Второй уровень содержит два блока: управления надежностью технологического оборудования и управления надежностью АСУ. Сюда со всех подсистем поступает информация, характеризующая состояние узлов и агрегатов ГДК, их текущие режимы, а также состояние и режимы элементов самой АСУ. На диагностических моделях и моделях надежности с помощью диагностических тестов определяется состояние и исправность оборудования, прогнозируется работоспособность и показатели надежности ГДК. Результат решения задач уровня управления надежностью и работоспособностью в виде рекомендаций на оптимальное резервирование, замену оборудования и элементов АСУ поступает диспетчерам и операторам, а также в третий уровень в виде ограничений по общему времени работы ГДК.

Третий уровень делится на три слоя задач, в соответствии с частотой и приоритетом их решения. В первый слой стратегических задач управления входят задачи идентификации стратегии управления, управления запасами ТПИ и оптимизации расходных параметров по критерию энергозатрат. Задача идентификации стратегии управления включает определение общего времени работы ГДК ($T_{общ}$), с учетом экономической рентабельности и различных временных ограничений, на основании которого определяется производительность по твердому (m_T). Назначение задачи управления запасами твердого материала в технологических емкостях заключается в обеспечении стабильной, непрерывной подачи ТПИ в гидродъем при прерывистом, неравномерном потоке ТПИ от АС.

Решение задачи обеспечивается с помощью бункера-накопителя, локальными системами регулирования и с использованием моделей прогнозирования притока твердого от АС и дозирования подачи ТПИ в транспортный трубопровод (ТТ).

Авторами статьи разработан новый концептуальный подход, в рамках которого транспортирующий тракт одновременно является и обогатительным. Комплексный подход, включающий детальное изучение механизма взаимодействия частиц материала с трубой, несущей средой, а также между собой, обработку результатов выполненных численных экспериментов и экстраполяцию данных из смежных областей гидротранспорта позволил сформулировать нижеизложенные качественные результаты [23].

Конкреции могут разрушаться также в результате вытеснения жидкости из порового пространства частиц газом, который расширяется при переходе частицы в области с более низким давлением. На конкрецию изнутри начинают действовать силы, работающие на ее разрушение, что приводит к распаду частицы на более мелкие. Для частиц, не имеющих газа в поровом пространстве, но пропитанных жидкостью характерен аналогичный процесс, однако разрушение в этом случае происходит менее интенсивно. Степень разрушения частицы зависит от ее пористости и режима течения пульпы по трубопроводу.

Каждый из режимов течения имеет характерные особенности дезинтеграции транспортируемых частиц (рис.2, б).

Алгоритм метода расчета параметров ГЭУ. На рис.2 представлен укрупненный алгоритм расчета параметров глубоководного эрлифта [23].

В первом блоке вводятся исходные данные: значение глубины разработки месторождения H_p , производительность установки по твердому M_m , физико-механические параметры смеси.

В пяти последующих блоках задаются поочередно массивы значений диаметра эрлифтного става $\{D_{э_i}\}$, диаметров воздухопровода $\{D_{п_j}\}$, глубин погружения смесителя $\{H_{см_k}\}$, объемных консистенций пульпы $\{C_{об_m}\}$, расходов воздуха $\{Q_{э_s}\}$. В седьмом блоке в рамках метода Е.А.Кириченко [2] путем численного интегрирования дифференциальных уравнений движения многофазной смеси в элементах ГЭУ выполняется расчет давлений P_1 на входе в пневмопровод и у компрессора P_2 , удельных изотермических мощностей компрессора $N_{э_i}$ для различных комбинаций элементов вводимых массивов. При помощи условных операторов в блоках 8-12 производится полный перебор всех элементов описанных выше массивов. В блоке 13 из массива вычисленных в седьмом блоке параметров в результате оптимизации по приведенным годовым затратам ($P_i \rightarrow \min$) выбираются расход сжатого воздуха и давление у компрессора. В блоке 14 из имеющейся номенклатуры компрессорного оборудования выбираются агрегаты с наиболее близкими параметрами. В блоке 15 выбираются значения оптимальных конструктивных и расходных параметров ГЭУ, а также вычисляется КПД установки, далее результаты выводятся на печать в блоке 16.

Отдельной блок-схемой на рис.2, б показан вычислительный процесс блока 7, подробное описание которого приведено в [23].

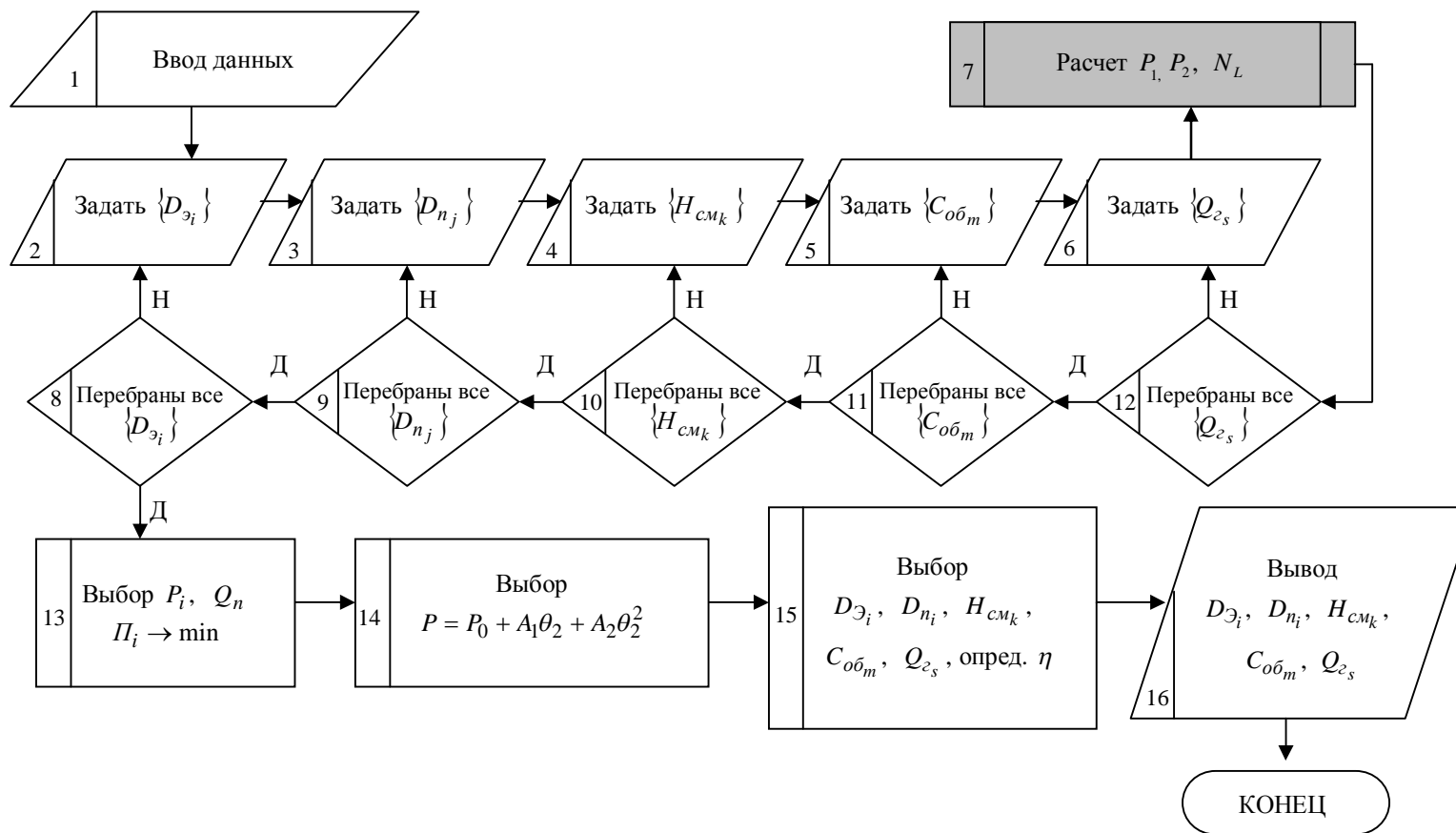
С использованием разработанного программно-алгоритмического обеспечения были проведены систематические численные эксперименты в широком диапазоне изменения гранулометрического состава и физико-механических свойств транспортируемого материала.

Анализ полученных результатов позволяет считать, что не учет изменения гранулометрического состава материала при транспортировании снижает точность существующих на сегодняшний день методов расчета насосных и эрлифтных гидроподъемов.

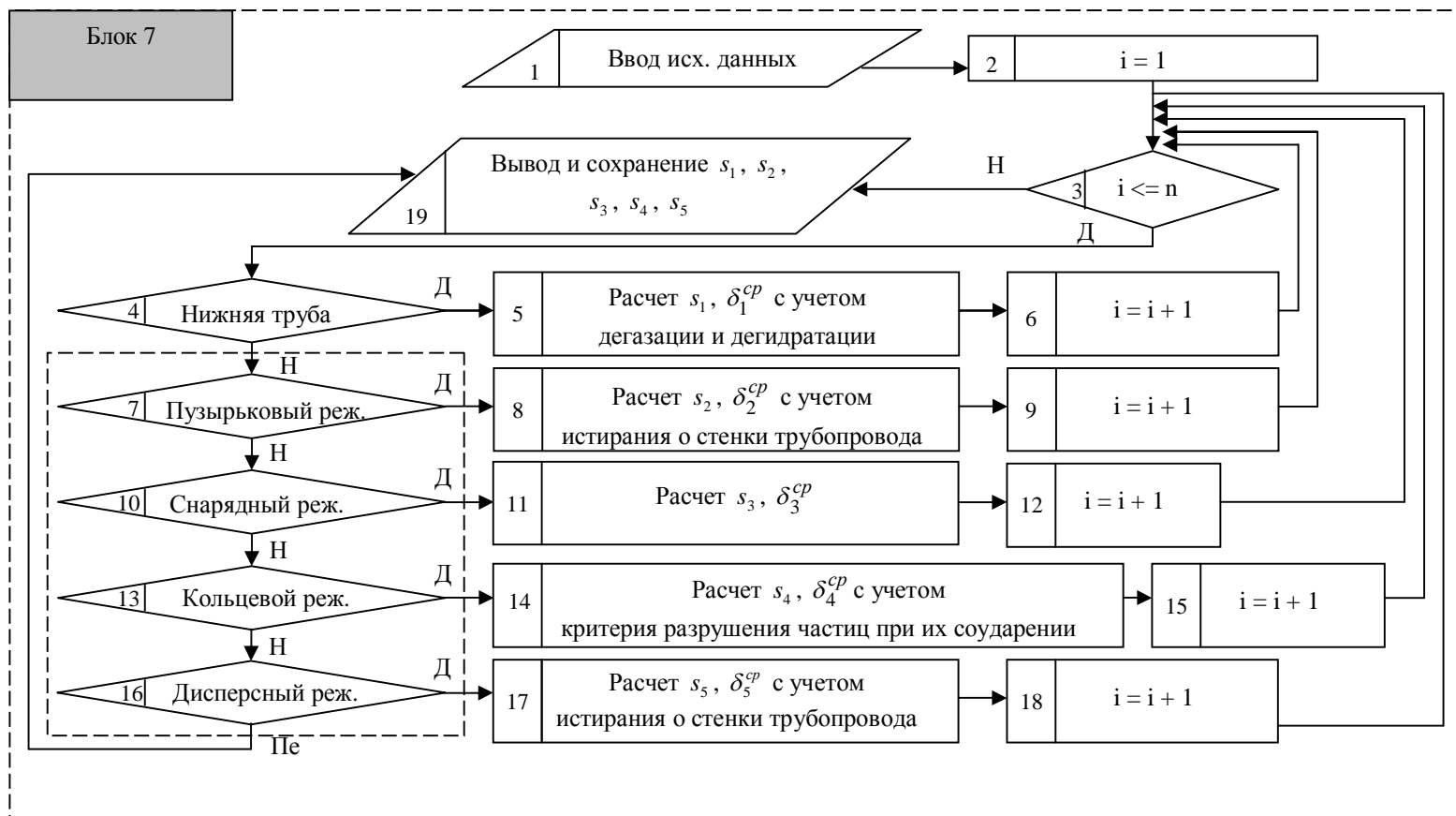
Предложены усовершенствованные, физически обоснованные методы расчета ГЭУ и насосных гидроподъемов, учитывающие влияние изменения гранулометрического состава транспортируемого материала на параметры установок.

Полученные результаты являются исходными данными для разработки технического задания на предварительное дробление материала при эрлифтом гидроподъеме либо исключения его как такового.

В силу значительного измельчения частиц на первых километрах магистрали, для насосного варианта гидроподъема возможен перенос одной или нескольких насосных станций на расстояние от морского дна, соответствующее пути наибольшего измельчения материала. Это позволит уменьшить



Р и с . 2 , а . Укрупненная блок-схема алгоритма расчета параметров ГЭУ.



Р и с . 2 , б . Блок-схема алгоритма расчета процесса дезинтеграции твердого материала.

мощность переносимых насосных агрегатов и, как следствие, энергозатраты на гидроподъем в целом.

В результате исследования функциональных особенностей насосного и эрлифтного вариантов гидроподъемов в рамках системного подхода установлены закономерности, определяющие эффективность установок в составе горно-морских добычных предприятий с учетом специфики разработки глубоководных месторождений, что является **новым научным результатом**.

Дальнейшим этапом работы является разработка специализированных моделирующих программно-вычислительных комплексов, являющихся основой методического обеспечения АСУ ТП гидроподъемов в составе горно-морских добычных предприятий.

Выводы.

1) Разработаны критерии технического обоснования целесообразности выбора варианта гидроподъема в составе горно-морских предприятий с учетом специфики разработки подводных месторождений Мирового океана.

2) При современном уровне развития морской техники насосный и эрлифтный варианты гидроподъема в широком диапазоне изменения глубин разработки месторождений и производительностей установок являются конкурентоспособными.

3) При глубинах свыше 5300 – 5600 м на первый план выходит эрлифтный гидроподъем благодаря высоким показателям надежности в сложных условиях больших глубин. При этом тенденция развития эрлифтного варианта заключается в разработке «замкнутых» схем, направленных на купирование пневматической энергии и использовании низкотемпературного потенциала глубинных вод, что приводит к существенному увеличению к.п.д. установок.

4) При глубинах до 200 – 400 м предпочтение отдается насосному гидроподъему, тенденция развития которого состоит в повышении надежности и долговечности установок путем разработки специальных конструкций, исключающих непосредственное взаимодействие твердого материала с лопатками рабочих колес насосных агрегатов.

5) В диапазоне средних глубин наиболее целесообразно применение гибридных установок принципиально нового типа, которые сочетают достоинства насосного и эрлифтного вариантов, эффективно используют аккумулярованную океаном энергию и отличаются повышенными технико-экономическими показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кириченко Е.А.* Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъема полезных ископаемых: Дис....докт. техн. наук: 05.05.06.– Д., 2001.– 181 с.
2. *Кириченко Е.А.* Выбор и обоснование рациональных параметров глубоководной эрлифтной установки с учетом влияния питающей пневмосистемы: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06.– Д., 1989.– 172 с.
3. *Пат. 2310097 РФ, F04D7/04, F04D13/08.* Способ работы гидротранспортной установки и устройство для его реализации / Пивняк Г.Г., Кириченко Е.А., Франчук В.П., Евтеев В.В.– Оpubл. 10.11.2007, Бюл. № 31.
4. *Пат. 2310098 РФ, F04D7/04, F04D13/08.* Способ подъема гидросмеси с больших глубин и устройство для его реализации / Пивняк Г.Г., Франчук В.П., Ки-

- риченко Е.А., Шворак В.Г.– Оубл. 10.11.2007, Бюл. № 31.
5. *Пат.* 2310099 РФ, F04D7/04, F04D13/08. Способ транспортирования гидросмеси с больших глубин и устройство для его реализации / Пивняк Г.Г., Франчук В.П., Кириченко Е.А., Шворак В.Г.– Оубл. 10.11.2007, Бюл. № 31.
 6. *Пат.* 30145 України, F21C45/06, F04F1/20. Спосіб управління роботою глибинного ерліфта / Кириченко Є.О., Вишняк Є.О., Накидайло А.С.– Оубл. 15.05.2002, Бюл. № 5.
 7. *Пат.* 30168 України, F04F1/00, F04F1/20. Спосіб управління роботою ерліфта та ерліфтна установка / Кириченко Є.О., Вишняк Є.О., Накидайло А.С.– Оубл. 15.02.2002, Бюл. № 2.
 8. *Пат.* 2321747 РФ, E21C50/00, E21C45/00, F04F1/20. Способ электрификации технологии подводной разработки месторождений полезных ископаемых и система для его реализации / Пивняк Г.Г., Кириченко Е.А., Франчук В.П., Егурнов А.И., Евтеев В.В.– Оубл. 10.04.2008, Бюл. № 10.
 9. *Пат.* 2321748 РФ, E21C50/00, E21C45/00, F04F1/20. Способ работы морского эрлифта и система для его реализации / Пивняк Г.Г., Кириченко Е.А., Франчук В.П., Егурнов А.И., Евтеев В.В.– Оубл. 10.04.2008, Бюл. № 10.
 10. *Пат.* 2324055 РФ, E21C50/00, E21C45/00, F04F1/20. Способ экологической сепарации в эрлифтном подъеме подводных месторождений полезных ископаемых и система для его реализации / Пивняк Г.Г., Кириченко Е.А., Франчук В.П., Егурнов А.И., Шворак В.Г.– Оубл. 10.05.2008, Бюл. № 13.
 11. *Пат.* 82228 України, E21C45/00, F04F1/20. Спосіб збагачення корисних копалин підводних родовищ та система для його реалізації / Пивняк Г.Г., Кириченко Є.О., Франчук В.П., Егурнов О.І., Шворак В.Г.– Оубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.
 12. *Пат.* 78004 України, F04F1/20. Спосіб роботи морського газліфта та система для його здійснення / Кириченко Є.О., Шворак В.Г., Євтеєв В.В.– Оубл. 15.02.2007, Бюл. № 2.
 13. *Борисов А.А., Грибанов А. М., Пащенко В.С., Шевченко Ф.Л.* Расчет и выбор оптимальных характеристик гидравлического комплекса для добычи железомарганцевых конкреций со дна Мирового океана (Методические рекомендации).– Геленджик: ПО «Южморгеология», 1990.– 56 с.
 14. *Гоман О.Г., Кириченко Е.А., Вишняк Е.А.* К расчету гидродинамических нагрузок на элементы погружных конструкций глубоководных пульпопроводов // Системные технологии.– Дніпропетровськ: РВК НМетА України, 1999.– вып.8. – С.17-23.
 15. *Гоман О.Г., Кириченко Е.А., Вишняк Е.А.* Методика определения собственных частот поперечных колебаний вертикального пульпопровода глубоководного гидроподъема // Вибрации в технике и технологиях.– 1999.– № 3.– С.44-45.
 16. *Кириченко Е.А.* Исследование собственных частот продольных колебаний трубного става глубоководного гидроподъема // Геотехническая механика.– Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2000.– вып.18.– С.75-80.
 17. *Кириченко Е.А.* Основные уравнения гидродинамики жидкости в подвижном деформированном упругом трубопроводе // Геотехническая механика.– Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 1999.– вып.15.– С.99-108.
 18. *Франчук В.П., Зиборов А.П., Кириченко Е.А.* Исследование напряженно-деформированного состояния транспортного трубопровода глубоководного гидроподъема // Геотехническая механика.– Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 1999.– вып.13.– С.57-65.

19. *Кириченко Е.А.* Разработка стратегии проектирования и регулирования глубоководных эрлифтных гидроподъемов // Гірнична електромеханіка та автоматика.– 2000.– вип.65.– С.114-121.
20. *Кириченко Е.А.* Численное моделирование переходных процессов в глубоководном эрлифте // Гірнична електромеханіка та автоматика.– 1998.– вип.1.– С.116-124.
21. *Кириченко Е.А., Самуся В.И., Кириченко В.Е.* Блочно-иерархический подход к разработке технологии управления глубоководными добычными комплексами // Гірнична електромеханіка та автоматика.– 2008.– вип.80.– С.101-109.
22. *Кириченко Е.А., Самуся В.И., Кириченко В.Е.* Особенности разработки экспериментальной автоматизированной системы управления морскими горными добычными комплексами // Збірник наукових праць національного гірничого університету.– 2008.– вип.30.– С.112-120.
23. *Кириченко Е.А., Евтеев В.В., Романюков А.В., Кириченко В.Е.* Разработка методики расчета параметров глубоководных гидроподъемов с учетом изменения гранулометрического состава материала // Науковий вісник НГУ.– 2007.– № 10.– С.45-52.

Материал поступил в редакцию 03.10.2008 г.
После доработки 15.12.2008 г.