

The main purpose is to describe the methodology of using non-traditional types of support to maintain the strata workings in difficult geological conditions. Due to its design features rubber-air reinforced lining can be mounted both manual and mechanized methods. When driving mine working it is quite difficult to maintain a predetermined by designers cross-sectional profile. When erecting lining using modules of rubber-air reinforced lining it is no longer a problem. High-speed construction and no need in exact shape of tunnel are the main advantages of this type of roof support. In fact, during installation of the roof support the miners can mount it right be-

hind the plane of production giving no time to the rocks to move into the production tunnel. During manual installation the weight of module reduces speed of rubber-air reinforced lining mounting. Also damage of module is possible that leads to replacement of it. Rubber-air reinforced lining allows solving wide range of problems arising in mines of the Western Donbass.

**Keywords:** *mixed lining, in-seam working, lining installation, mechanization, water influx*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бондаренком. Дата надходження рукопису 05.07.11*

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.,**  
**В.В. Евтеев, Н.Н. Хворостяной**

Государственное высшее учебное заведение  
„Национальный горный университет“, г. Днепропетровск,  
Украина, e-mail: kirichenko@front.ru

## МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ЭРЛИФТНЫХ ГИДРОПОДЪЕМОМ

**Ye.A. Kirichenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,**  
**V.Ye. Kirichenko, Cand. Sci. (Tech.),**  
**V.G. Shvorak, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor,**  
**V.V. Yevteyev, N.N. Khvorostyanoy**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine,  
e-mail: kirichenko@front.ru

## METHODICAL MAINTENANCE OF AUTOMATIC WAY OF TRANSIENT REGIMES CONTROL FOR DEEP-WATER AIRLIFT HYDRAULIC HOISTINGS

Целью данной статьи является создание математического обеспечения для автоматизированного способа управления переходными режимами в глубоководных эрлифтных установках. Поставленная цель достигается путем математического моделирования наиболее характерных переходных процессов в основных технологических звеньях подводного оборудования на мета-, макро- и микроуровнях.

К основным результатам данной статьи относится разработка нестационарных математических моделей базовых элементов эрлифтного гидроподъема: дозатор, подводная и подъемная трубы, смеситель, пневмопровод, компрессор и ресивер. Разработанное математическое обеспечение, описывающее распространение ударных и кинематических волн в пневмогидравлических трактах гидроподъема, а также переходные процессы в силовом оборудовании, послужило основой для разработки программного комплекса, который позволяет определять параметры основных переходных процессов в широком диапазоне изменения производительности установки и глубин разработки месторождений. С помощью разработанного программного комплекса обоснована часовая производительность глубоководной эрлифтной установки в рабочем режиме, обеспечивающая, с учетом длительности переходных процессов, выполнение суточной нормы по подъему минерального сырья. Предложены обладающие патентной чистотой технические решения по сокращению длительности переходных режимов за счет уменьшения числа пусковых операций, гарантированно обеспечивающие устойчивость протекающих нестационарных процессов в элементах гидроподъема.

**Ключевые слова:** *гидротранспорт, автоматизированное управление, эрлифтный гидроподъем, твердые полезные ископаемые, морская добыча, циклограмма*

**Введение.** На протяжении нескольких последних десятилетий мировое сообщество проявляет все больший интерес к освоению месторождений полез-

ных ископаемых Мирового океана, где находятся богатейшие залежи полиметаллических руд, количество которых многократно превышает аналогичные запасы на суше. На сегодняшний день наиболее перспективными, в плане промышленного освоения, являются месторождения полиметаллических конкреций, поли-

металлических сульфидных руд, кобальто-марганцевых корок, газогидратов и фосфоритов. Крупнейшие компании США, Великобритании, Канады, Германии ведут активные работы по разработке технических способов и средств добычи полиметаллических руд со дна океана.

Данная статья посвящена **актуальной проблеме** – разработке эффективных способов и средств освоения рудных месторождений Мирового океана.

По мнению специалистов на сегодняшний день наиболее перспективным способом транспортирования добытого минерального сырья на базовое плавсредство является глубоководный эрлифтный гидроподъем (ГЭГ) благодаря высоким показателям надежности в сложных условиях больших глубин.

В [1] предложен способ запуска ГЭГ на смесителе с оптимальной глубиной погружения, удовлетворяющий следующим требованиям:

- реализация запуска ГЭГ непосредственно на смесителе, глубина погружения которого соответствует максимальному КПД в рабочем режиме;
- обеспечение надежности протекания пусковых операций и устойчивости к разного рода возмущениям;
- обеспечение приемлемой продолжительности запуска ГЭГ с учетом необходимости выполнения суточного задания по подъему минерального сырья.

В работе [2] теоретически обоснована возможность усовершенствования предложенного способа путем согласования параметров переходных режимов в гидроподъеме и добычном оборудовании донного блока. Однако, для синхронизации параметров указанных режимов на практике необходимо располагать точной информацией о длительности переходных процессов в технологических звеньях гидроподъема и донного блока. В то же время абсолютное большинство известных на сегодняшний день методов расчета эрлифтов рассматривают только установившиеся рабочие режимы установок и не распространяются на нестационарные и переходные процессы. Сдерживающим фактором являющегося отсутствие математического аппарата, описывающего нестационарные процессы в элементах добычного и транспортного оборудования.

**Целью** данной статьи является разработка математического обеспечения автоматизированного способа управления переходными режимами в глубоководных эрлифтах.

Как объект управления глубоководный эрлифтный гидроподъем (ГЭГ) является существенно инерционной и нелинейной системой [3]. Это обстоятельство оказывает определяющее влияние на характер протекания и параметры переходных режимов.

На рис. 1 схематически изображено расположение запорно-регулирующей арматуры, задействованной в предложенном способе [1] (задвижки  $Z_1$ ,  $Z_2$  и  $Z_3$ ).

Ниже приводится описание предложенного способа. Процесс запуска можно разбить на 5 характерных временных интервалов:

1. Вытеснение воды из подъемного и пневматического трубопроводов.

2. Подъем воздушных пузырей от смесителя до выходного сечения подъемной трубы.

3. Разгон воды в подводящей трубе.

4. Подъем первой порции твердого материала от шнека-дозатора до смесителя.

5. Подъем первой порции твердого материала от смесителя до выходного сечения подъемной трубы.

А процесс останова на 4 стадии:

1. Освобождение гибкой связи и бункера-накопителя от твердого материала.

2. Вывод компрессора на максимальную производительность.

3. Подъем последней порции твердого материала к смесителю.

4. Подъем последней порции твердого материала к воздухоотделителю.

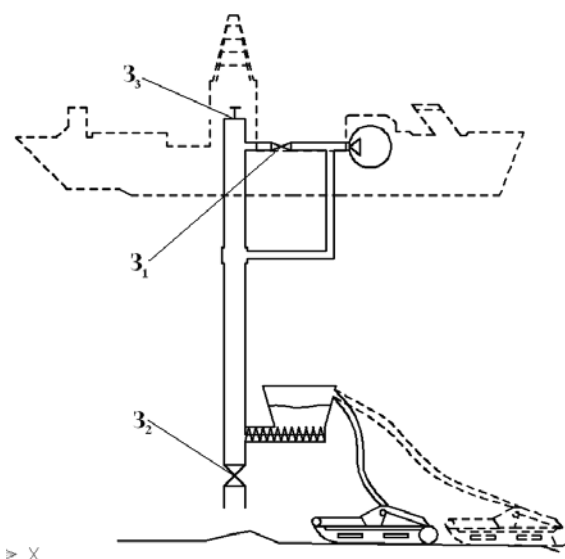


Рис. 1. Упрощенная схема глубоководного добычного комплекса

Для повышения информативности подаваемого материала разработанный способ целесообразно описать с помощью совместного рассмотрения блок-схем алгоритмов [4] (рис. 2) и временных циклограмм [2] (рис. 3) запуска и останова ГЭГ. Поэтому при последующем описании способа в скобках указываются привязки к соответствующим фрагментам алгоритмов и циклограмм. Для удобства изложения материала способ останова рассматривается первым.

Первым действием способа останова является прекращение работы агрегата сбора (АС) (рис. 2, а; блок 1), при этом он либо остается на текущей позиции траектории сбора, либо начинает перемещение на стартовую позицию следующей заходки.

Далее системой контролируется наступление события полной разгрузки гибкой связи (ГС) от твердого материала (рис. 2, а; блок 2 и рис. 3, а; событие  $\dot{m}_{T3} = 0$ ) при помощи оптических или радиационно-плотностных измерительных средств, после чего подается команда на выключение привода насоса ГС (рис. 2, а; блок 3).

Затем аналогичным образом контролируется наступление события освобождения бункера-накопителя (БН) от твердого (рис. 2, а; блок 4 и рис. 3, а; событие  $m_{ТБН} = 0$ ), с последующим выключением привода шнека-дозатора (рис. 2, а; блок 5).

С целью сокращения времени переходных процессов предложенный способ был усовершенствован за счет ряда модификаций (технических решений), которые, по мнению авторов, являются отдельными изобретениями. Например, предусмотрена возможность применения „упрощенной процедуры последующего запуска“ (УППЗ) (рис. 2, а; блоки 7–10 и рис. 2, б; блок 18).



Рис. 2, а. Алгоритм остановки ГЭГ

Смысл УППЗ заключается в остановке глубоководного гидроподъема таким образом, чтобы давление в смесителе было меньше максимально развиваемого компрессором давления, что позволяет осуществить последующий запуск упрощенным способом, прямой подачей сжатого воздуха в смеситель без предварительной процедуры вытеснения воды из трубопроводов (см. описание запуска). Достигается это перекрытием задвижки  $Z_2$  перед выключением компрессора (рис. 2,а; блок 10) в процессе остановки, что приводит в итоге к снижению высоты водяного столба в транспортном трубопроводе (ТТ), а следовательно и к уменьшению давления в смесителе. Выполняется про-

верка необходимости выполнения УППЗ (рис. 2, а; блок 6). В случае надобности выполнения УППЗ компрессор выводится на режим максимальной производительности (рис. 2, а; блок 7 и рис. 3, а; событие  $Q_K = \max$ ). Далее, с помощью оптических датчиков или радиационных измерителей плотности, контролируется прохождение последней порции твердого через смеситель (рис. 2, а; блок 8 и рис. 3, а; событие  $m_{Т4} = 0$ ).

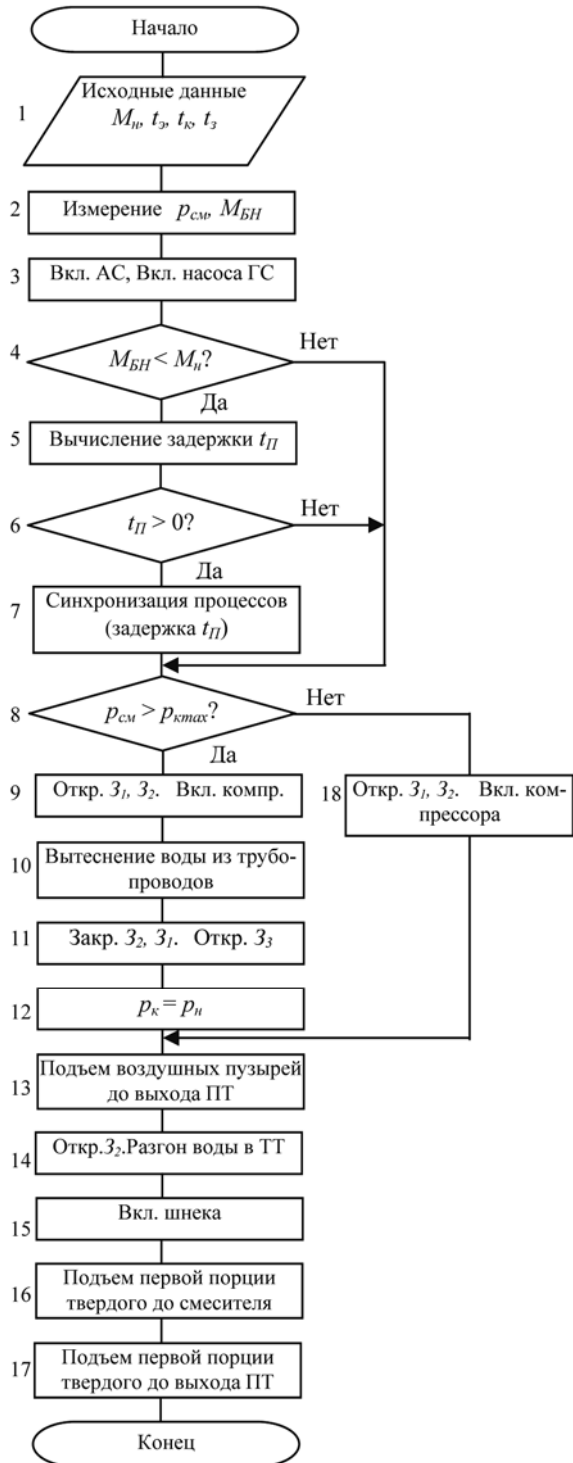


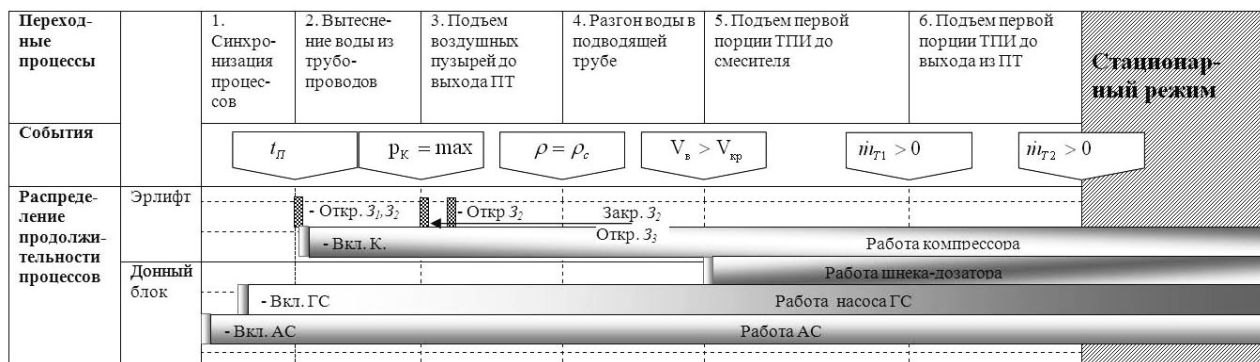
Рис. 2, б. Алгоритм запуска ГЭГ

Аналогично контролируется подъем последней порции твердого к выходному сечению подъемной трубы (ПТ) (рис. 2, а; блок 9 и рис. 3, а; событие  $\dot{m}_{T5} = 0$ ). Как только массовый расход твердого на

выходе ПТ ( $\dot{m}_{T5}$ ) равен нулю, т.е. ПТ освобожден от твердого материала, перекрывается задвижка  $Z_2$  (рис. 2, а; блок 10), прекращая сообщение воды в ПТ с внешней морской водой.



а)



б)

Рис. 3. Комплексная циклограмма запуска и останова ГЭГ: а – останов; б – запуск

Заключительным действием способа останова является выключение компрессора (рис. 2, а; блок 10), в результате чего воздух, наполняющий ПТ в составе водовоздушной смеси, высвобождается через выходное сечение ПТ, а вода в ПТ существенно оседает, что дает возможность осуществления УППЗ, если в ней есть необходимость.

Теперь перейдем к рассмотрению способа запуска (рис. 2, б). В качестве исходного положения перед запуском принимается следующее:

- агрегат сбора выведен на исходную позицию и находится в состоянии ожидания (питание подано, тесты работоспособности и готовности выполнены);
- приводы шнека и насоса ГС выключены;
- компрессор – выключен;
- задвижка  $Z_3$  – закрыта.

Принцип разработанного способа запуска заключается в предварительном снижении давления в смесителе путем выполнения следующих операций. При открытых задвижках  $Z_1$  и  $Z_2$  включается привод компрессора (рис. 2, б; блок 9) и осуществляется вытеснение воды из трубопроводов 1,4 через нижнее сечение ТТ (рис. 2, б; блок 10 и рис. 3, б; процесс 2). Перекрываются задвижки  $Z_1$  и  $Z_2$  (рис. 2, б; блок 11) и пневмопоток перенаправляется через нагнетающий

пневмопровод 4 в смеситель 3. Открывается  $Z_3$  (рис. 2, б; блок 11), что приводит к разгерметизации ТТ и снижению, таким образом, давления в смесителе с последующей подачей в него сжатого воздуха. Далее открывается задвижка  $Z_2$  и эрлифт переходит в рабочий (установившийся) режим.

Для уменьшения продолжительности выхода глубоководного оборудования на рабочий режим предусмотрено параллельное выполнение эрлифтом и донным блоком операций по подготовке к транспортированию сырья. Процесс подготовки донного блока к транспортированию сводится к накоплению в БН необходимого количества твердого ( $M_n$ ) к моменту готовности эрлифта транспортировать пульпу. Длительность процесса подготовки эрлифта, по предварительной оценке специалистов [4], может быть либо меньшей, либо равной длительности процесса подготовки донного блока. Поэтому вычисляется „длительность задержки“  $t_{II}$  (рис. 2, б; блок 5), на которую нужно сместить начало запуска эрлифта относительно начала запуска донного блока (рис. 2, б; блок 7).

$$t_{II} = \frac{M_n - m_{БН}}{\dot{m}_{БНПР}} - t_k - t_2 - t_3,$$

где  $\dot{m}_{БНПР}$  – средний массовый расход заполнения БН твердым;  $m_{БН}$  – масса твердого в БН;  $t_k$  – продолжительность вытеснения воды из трубопроводов через нижнее сечение ТТ;  $t_r$  – продолжительность разгона воды в подводящей трубе;  $t_{\Sigma}$  – суммарная продолжительность времени переключения задвижек.

Ключевой особенностью алгоритмов является применение принципа „параллельности“ процессов в элементах подводного оборудования для синхронизации технологических операций добычи, перекачки и гидроподъема. Согласование операций сводится к тому, что БН, к моменту достижения необходимого значения скорости воды в подводящей трубе ( $t_d$ ), должен содержать необходимое количество твердого ( $M_n$ ), что является неотъемлемым условием для начала процесса подачи твердого в эрлифт. Здесь  $M_n$  – заранее известная величина, зависящая от средней прогнозной скорости заполнения БН твердым.

Команда на включение АС и привода насоса ГС (рис. 2, б; блок 3), входящих в состав донного блока, подается в начале алгоритма запуска. Для того, чтобы при запуске эрлифт не работал „вхолостую“ во время ожидания накопления  $M_n$  в БН, необходимо выдержать паузу  $t_{П}$  перед запуском компрессора (рис. 3, б; процесс № 1).

Если измеряемое давление в смесителе ( $p_{см}$ ) меньше максимального развиваемого компрессором давления ( $p_{кmax}$ ), возможно применение упрощенной процедуры повторного запуска глубоководного гидроподъема (рис. 2, б; блок 8). Для запуска эрлифта упрощенным способом достаточно перекрыть задвижку  $Z_1$  и включить компрессор (рис. 2, б; блок 18).

Если же возможность для упрощенного повторного запуска эрлифта отсутствует, то нужно осуществлять процедуру вытеснения воды из ПТ (рис. 2, б; блок 10 и рис. 3, б; процесс № 2) сжатым воздухом. Для этого открываются задвижки  $Z_1$  и  $Z_2$ , затем закрывается  $Z_3$  и включается компрессор (рис. 2, б; блок 9). За счет давления, создаваемого компрессором, вода вытесняется через нижнее сечение ТТ из ПТ и нагнетательного пневмопровода. Уровень воды в ПТ ( $h_k$ ) остановится на отметке

$$h_k = \frac{p_{кmax} h_{см}}{p_{см}},$$

где  $h_{см}$  – глубина погружения смесителя.

Далее происходит переключение задвижек: закрытие  $Z_2$ , открытие  $Z_3$ , закрытие  $Z_1$  (рис. 2, б; блок 11), причем порядок их переключения имеет значение. При закрытии  $Z_2$  вода внутри ТТ изолируется от морской среды. После открытия задвижки  $Z_3$  воздух выходит через верхнее сечение ТТ. Закрытие задвижки  $Z_1$  прекращает сообщение компрессора с ПТ через дополнительный пневмопровод, что приводит к поступлению сжатого воздуха в смеситель через нагнетательный пневмопровод. Затем, с помощью оптических датчиков или радиационных измерителей плотности, контролируется подъем первых воздушных пузырей до выхода из ПТ (рис. 2, б; блок 13 и рис. 3, б; процесс № 3), после

чего открывается задвижка  $Z_2$  (рис. 2, б; блок 14), что приводит к сообщению эрлифта с морской водой. Осуществляется разгон воды путем увеличения производительности компрессора (рис. 2, б; блок 14 и рис. 3, б; процесс № 4). Когда скорость воды становится достаточной для устойчивого транспортирования твердых полезных ископаемых (ТПИ), дается команда включения привода шнека дозатора (рис. 2, б; блок 15), подающего твердый материал в ТТ. Заключительными действиями алгоритма запуска являются контроль достижения первой порцией ТПИ сечения смесителя (рис. 2, б; блок 16 и рис. 3, б; процесс №5), а затем и выходного сечения ПТ (рис. 2, б; блок 17 и рис. 3, б; процесс №6), что означает выход глубоководного гидроподъема на рабочий режим

Как видно из вышеприведенного материала, переходные режимы в элементах подводного оборудования, в рамках разработанного способа запуска и остановки ГЭГ, связаны с широким спектром неустановившихся процессов как в элементах силового оборудования (запуск-остановка приводов шнека-дозатора, компрессоров, насоса гибкой связи, и др.), так и в проточных частях самого эрлифта (вытеснение воды из подъемной и газовой труб, барботаж, распространение относительно медленных непрерывных (кинематических) волн концентрации фаз, гидроудар при перекрытии задвижкой подводящей трубы и т.д.). Решения этих задач, в зависимости от их постановки, связаны с моделированием исследуемых процессов на мета-, макро- и микро- уровнях и являются самостоятельными обширными исследованиями [2, 4–6]. Ниже фрагментарно приводится математическое описание наиболее характерных процессов в основных технологических звеньях подводного оборудования.

1. Звено „Привод дозатора“ описывается следующим образом. Зависимость выходного параметра – частоты вращения вала дозатора  $n_d(t)$ , от входного, задающего воздействия  $u_{зд}(t)$  определяется решением дифференциального уравнения [7]

$$T_{nd} \frac{dn_d(t)}{dt} + n_d(t) = K_{nd} u_{зд}(t)$$

в виде

$$n_d(t) = K_{nd} (1 - e^{-\frac{t}{T_{nd}}}) u_{зд}(t),$$

где  $T_{nd}$  – определяется по кривым переходного процесса привода при изменении  $u_{зд}(t)$  от номинального значения  $u_{зд}^{ном}$  до  $1.1 u_{зд}^{ном}$ ,

$$K_{nd} = \frac{n_d^{ном}}{u_{зд}^{ном}},$$

где  $n_d^{ном}$  – номинальная частота вращения вала привода.

2. Звено „Дозатор“ имеет следующее описание. Выходной расход  $Q_{мтд}(t)$  определяется по формуле [5]

$$Q_{мтд}(t) = K_{d1} \cdot n_d(t - \tau_{зд}),$$

где  $K_{d1}$  – коэффициент, зависящий от характеристик ТПИ;  $\tau_{зд}$  – время запаздывания при перемещении

твердых частиц из бункера в транспортный трубопровод, значение которого определяется конструктивными параметрами узла дозирования и частотой вращения вала дозатора. Входной размер частиц  $d_c^\delta$  определяется по формуле

$$d_c^\delta = K_{изм}^\delta \cdot d_c,$$

где  $d_c$  – средний размер частиц ТПИ в бункере;  $K_{изм}^\delta$  – коэффициент измельчения частиц дозатором.

3. Звено „подводящая труба“. Входными параметрами являются выходные параметры звена „дозатор“. С учетом технологической схемы гидроподъема, подводящую трубу целесообразно разделить на два участка. Первый участок трубы транспортирует пульпу от уровня шнека-дозатора до смесителя. Быстрые волновые процессы, связанные с возможным гидроударом на этом участке, описываются нестационарной моделью [4]

$$(1 - C_1) \left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_0 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \rho_0 a_0^2 \left( \frac{\partial C_1}{\partial t} + V_0 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + \rho_0 a_0^2 (1 - C_1) \frac{\partial V_0}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

$$C_1 \left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_1 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \rho_1 a_1^2 \left( \frac{\partial C_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + \rho_1 a_1^2 C_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} = 0; \quad (2)$$

$$\left( 1 + \frac{C_1 k_1}{2} \right) \left( \frac{\partial V_0}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} \right) - \frac{C_1 k_1}{2} \left( \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} \right) + \frac{(1 - C_1) \partial p}{\rho_0 \partial x} = -(1 - C_1) g \sin \alpha - \frac{\lambda_n \rho_n |V_n| V_n}{2 D_{mp} \rho_0} - \frac{3}{8} \left[ \frac{C_1 C_{x1}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1) \right]; \quad (3)$$

$$\left( \frac{\rho_1 + k_1}{\rho_0} \right) \left( \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} \right) - \left( 1 + \frac{k_1}{2} \right) \left( \frac{\partial V_0}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\rho_1}{\rho_0} g \sin \alpha + \frac{3}{8} \frac{C_{x1}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1). \quad (4)$$

Используемые в уравнениях (1)–(4) обозначения параметров потока, во избежание повторений, расшифрованы в пункте 5.

Система уравнений (1)–(4) является замкнутой относительно неизвестных  $p$ ,  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $C_1$ . Коэффициент гидравлического сопротивления при движении пульпы  $\lambda_n$  определяется по эмпирическим формулам [2, 8]. Распространение кинематических волн концентрации твердой фазы на первом участке подводящей трубы (см. четвертая стадия запуска) описывается квазистационарной моделью [2]

$$(\rho_1 - \rho_0) \frac{\partial C_1}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} [C_1 V_1 \rho_1 + (1 - C_1) V_0 \rho_0] = 0;$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g [C_1 \rho_1 + (1 - C_1) \rho_0] \sin \alpha + \frac{\lambda_i}{2 D_{\delta \delta}} [C_1 \rho_1 V_1^2 + (1 - C_1) \rho_0 V_0^2] - C_1 \rho_1 V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} - (1 - C_1) \rho_0 V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} = 0;$$

$$V_0 - V_1 = V_\infty (1 - C_1)^{n-1}; \quad \frac{\partial C_1}{\partial t} + V_W \frac{\partial C_1}{\partial x} = f;$$

$$V_W = C_1 V_1 + (1 - C_1) V_0 + \frac{\partial}{\partial C_1} [V_0 (1 - C_1) C_1];$$

$$\lambda_i = \frac{1}{(1.8 \lg Re_i - \delta)^2};$$

$$Re_n = \frac{4(Q_1 + Q_0)}{\pi D_{mp}} \left( \frac{C_1}{v_1} + \frac{1 - C_1}{v_0} \right),$$

где  $\delta$  – абсолютная шероховатость трубы;  $Q_i$  – объемный расход компонентов;  $v_i$  – кинематический коэффициент вязкости компонентов.

Движение морской воды на втором участке, от входного сечения подводящей трубы до уровня шнека-дозатора, описывается следующими уравнениями

$$\left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_0 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \rho_0 a_0^2 \frac{\partial V_0}{\partial x} = 0;$$

$$\left( \frac{\partial V_0}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \sin \alpha - \frac{\lambda_0}{2 D_{mp}} |V_0| V_0.$$

4. Звено „смеситель“. Входными параметрами являются выходные параметры звена „подающая труба“, а именно, расход и плотность пульпы, а также расход воздуха на выходе пневмопровода. На выходе смесителя формируется давление в смесителе  $p(t)$ , расход трехфазной гидросмеси  $Q_{CM}(t)$ , плотность трехфазной смеси  $\rho_{CM}(t)$ . В общем случае [3]

$$p(t) = p^{cm}(t) + \Delta p(t),$$

где  $p^{cm}(t)$  – статическая составляющая, рассчитанная по методике [2];  $\Delta p(t)$  – колебательная составляющая. При  $q(t) \leq 1,1 q_{onm}$

$$\Delta p(t) = \Delta p^{max}(t) \cdot \sin(kt),$$

где  $q_{onm}$  – расчетный оптимальный удельный расход воздуха;  $k$  – частота колебаний, соответствующих снарядной структуре течения потока [6].

При  $q(t) > 1,1 q_{onm}$  колебательная составляющая в смесителе имеет затухающий характер

$$\Delta p(t) = \Delta p^{max}(t) \cdot e^{-nt} \cdot \sin(\sqrt{k^2 - n^2} \cdot t),$$

где  $n$  – декремент затухания.

Следует отметить, что определение колебательной составляющей давления в смесителе, для случая, когда в подъемной трубе реализуется последовательная смена различных структур течения смеси, является самостоятельным исследованием [2].

5. Звено „подъемная труба“. Входными параметрами являются выходные параметры звена „смеситель“. Быстрые волновые процессы при движении трехфазной смеси в подъемной трубе описываются нестационарной моделью [4]

$$(1 - C_1 - C_2) \left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_0 \frac{\partial p}{\partial x} \right) - \rho_0 a_0^2 \left( \frac{\partial C_1}{\partial t} + V_0 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) - \rho_0 a_0^2 \left( \frac{\partial C_2}{\partial t} + V_0 \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) + \rho_0 a_0^2 (1 - C_1 - C_2) \frac{\partial V_0}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

$$C_1 \left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_1 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \rho_1 a_1^2 \left( \frac{\partial C_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial C_1}{\partial x} \right) + \rho_1 a_1^2 C_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

$$C_2 \left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \rho_2 a_2^2 \left( \frac{\partial C_2}{\partial t} + V_2 \frac{\partial C_2}{\partial x} \right) + \rho_2 a_2^2 C_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} = 0; \quad (7)$$

$$\left( 1 + \frac{C_1 k_1}{2} + \frac{C_2 k_2}{2} \right) \left( \frac{\partial V_0}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} \right) - \frac{C_1 k_1}{2} \left( \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} \right) - \frac{C_2 k_2}{2} \left( \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} \right) + \frac{(1 - C_1 - C_2) \partial p}{\rho_0 \partial x} = \phi_0; \quad (8)$$

$$\left( \frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{k_1}{2} \right) \left( \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} \right) - \left( 1 + \frac{k_1}{2} \right) \left( \frac{\partial V_0}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = \phi_1; \quad (9)$$

$$\left( \frac{\rho_2}{\rho_0} + \frac{k_2}{2} \right) \left( \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} \right) - \left( 1 + \frac{k_2}{2} \right) \left( \frac{\partial V_0}{\partial t} + V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = \phi_2, \quad (10)$$

где

$$\phi_0 = -(1 - C_1 - C_2) g \sin \alpha - \frac{\lambda}{2 D_{mp}} \frac{\rho_{cm}}{\rho_0} |V_{cm}| V_{cm} - \frac{3}{8} \left[ \frac{C_1 C_{x1}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1) + \frac{C_2 C_{x2}}{R_2} |V_0 - V_2| (V_0 - V_2) \right];$$

$$\phi_1 = -\frac{\rho_1}{\rho_0} g \sin \alpha + \frac{3}{8} \frac{C_{x1}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1);$$

$$\phi_2 = -\frac{\rho_2}{\rho_0} g \sin \alpha + \frac{3}{8} \frac{C_{x2}}{R_2} |V_0 - V_2| (V_0 - V_2);$$

$$\frac{1}{a_1^2} = \frac{\rho_1}{K_1} + \frac{\rho_1}{F} \left( \frac{\partial F}{\partial p} \right); \quad \frac{1}{a_2^2} = \frac{\rho_2}{K_2} + \frac{\rho_2}{F} \left( \frac{\partial F}{\partial p} \right);$$

$$\frac{1}{a_0^2} = \frac{1}{a_{жс}^2} + \frac{\rho_0}{F} \left( \frac{\partial F}{\partial p} \right); \quad a_{жс}^2 = \frac{K_{жс}}{\rho_0};$$

$$K_1 = \frac{E_1}{3(1 - 2\theta_1)}; \quad \frac{1}{K_2} = \frac{1}{\rho_2} \left( \frac{\partial \rho_2}{\partial p} \right);$$

$$\rho_{cm} = \rho_0^* + \rho_1^* + \rho_2^* = (1 - C_1 - C_2) \rho_0 + C_1 \rho_1 + C_2 \rho_2;$$

$$V_{cm} = \frac{1}{\rho_{cm}} (\rho_0^* V_0 + \rho_1^* V_1 + \rho_2^* V_2),$$

где  $K_1$ ,  $E_1$ ,  $\theta_1$  – модуль объемного сжатия, модуль Юнга и коэффициент Пуассона твердых частиц;  $K_2$  – модуль объемного сжатия газовых пузырей;  $K_{жс}$  – объемный модуль упругости жидкости;  $a_{жс}$  – скорость звука в чистой неограниченной жидкости;  $R_1$ ,  $R_2$  – эквивалентные радиусы твердых частиц и газовых пузырей;  $k_1$ ,  $k_2$  – коэффициенты, учитывающие влияния несферичности, а также концентрации твердых частиц и пузырей воздуха на присоединенные массы;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\alpha$  – угол наклона трубопровода к горизонту;  $D_{mp}$  – диаметр трубопровода;  $\lambda$  – коэффициент Дарси;  $t$  – время;  $C_{xm}$ ,  $C_{xs}$  – коэффициенты сопротивления твердых частиц и пузырей воздуха;  $C_i$  – объемная концентрация фазы;  $\rho$  – давление;  $\rho_i$  – истинная плотность фазы;  $\rho_i^*$  – приведенная плотность фазы;  $V_i$  – скорость фазы;  $x$  – продольная координата; индексы обозначают: “0” – вода; “1” – твердые частицы; “2” – пузыри газа; “см” – трехфазная грунтоводовоздушная смесь;  $F$  – площадь живого сечения трубопровода.

Система из шести уравнений (5)–(10) является замкнутой относительно неизвестных функций  $p$ ,  $V_0$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $C_1$  и  $C_2$  и позволяет исследовать нестационарные процессы при движении трехфазной смеси в подъемной трубе.

Распространение кинематических волн концентрации воздушной фазы (см. вторая стадия запуска) описывается квазистационарной моделью [2]

$$(\rho_0 - \rho_2) \frac{\partial C_2}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} [C_2 V_2 \rho_2 + (1 - C_2) V_0 \rho_0] = 0;$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = g [C_2 \rho_2 + (1 - C_2) \rho_0] \sin \alpha + \frac{\lambda_{cm}}{2D_{mp}} [C_2 \rho_2 V_2^2 + (1 - C_2) \rho_0 V_0^2] - C_2 \rho_2 V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} - (1 - C_2) \rho_0 V_0 \frac{\partial V_0}{\partial x} = 0;$$

$$V_2 - V_0 = V_\infty (1 - C_2)^{n-1}; \quad \frac{\partial C_2}{\partial t} + V_W \frac{\partial C_2}{\partial x} = f;$$

$$V_W = C_2 V_2 + (1 - C_2) V_0 + \frac{\partial}{\partial C_2} [V_2 (1 - C_2) C_2];$$

$$f = -\frac{C_2}{(pV_2)} \cdot \frac{d(pV_2)}{dt}; \quad \lambda_{\bar{n}} = \left\{ 21g \left[ \left( \frac{6,81}{Re_{\bar{n}}} + \frac{\delta}{3,7D_{\delta\delta}} \right) \right] \right\}^{-2};$$

$$Re_c = \frac{4(Q_2 + Q_0)}{\pi D_{mp}} \left( \frac{C_2}{V_2} + \frac{1 - C_2}{V_0} \right),$$

где индексом „с“ обозначены параметры водовоздушной смеси.

6. Звено „пневмопровод“. Входными параметрами являются давление и расход воздуха на выходе из ресивера компрессорной станции, а выходными – давление и расход воздуха на входе в смеситель.

Процесс вытеснения воды из вертикального пневмопровода сжатым воздухом (первая стадия запуска) описывается следующим уравнением [2]

$$\frac{1}{g} \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{d}{D_{mp}} \right)^2 \right] \cdot h_g - x_1 \right\} \cdot \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \frac{1}{2g} (K_1 - K_2) \left( \frac{dx_1}{dt} \right)^2 + x_1 + \frac{P_1 - P_a}{\rho g} = 0,$$

где

$$K_1 = \zeta_1 - 1 + \lambda_{nn} \frac{h_g}{d} + \left( 1 + \frac{h_g}{d} \lambda_0 \right) \left( \frac{d}{D_{mp}} \right)^4; \quad K_2 = \frac{\lambda_{nn}}{D_{mp}} x_1;$$

$d$  – диаметр пневмопровода;  $h_g$  – глубина погружения смесителя;  $x_1$  – вертикальная координата, начало которой совпадает с входным сечением пневмопровода, а положительное направление – с направлением движения воздуха в пневмопроводе;  $P_a$  – атмосферное давление;  $\zeta_1$  – коэффициент местного сопротивления смесителя;  $\lambda_{nn}$ ,  $\lambda_0$  – коэффициенты Дарси для пневмопровода и заполненной морской водой подъемной трубы.

По окончании первой стадии запуска весь пневмопровод будет заполнен сжатым воздухом, неста-

ционарное изотермическое движение которого может быть описано следующей системой уравнений [5]

$$\left( \frac{\partial p}{\partial t} + V_2 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \rho_2 a_2^2 \frac{\partial V_2}{\partial x} = 0;$$

$$\left( \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p}{\partial x} = -g \sin \alpha - \frac{\lambda_2}{2D_{mp}} |V_2| V_2.$$

Учитывая специфику питающей пневмосистемы ГЭГ, общепринятое допущение об изотермичности процесса едва ли приемлемо. Поэтому, установившееся течение в пневмопроводе, с учетом изменения температуры сжатого воздуха, может быть описано следующими уравнениями [9]

$$\frac{dp}{dx_1} \left( 1 - \frac{16M_2 k_g RT}{\pi^2 d^4 p^2} \right) = \lambda_{mn} \frac{8M_2^2 k_g RT}{\pi^2 d^5 p} - \frac{gp}{k_g RT} - \frac{16M_2^2 R}{\pi^2 d^4 p} \frac{dT}{dx_1};$$

$$k_m (T - T_0) dx_1 = C_p M_2 dT + g M_2 dx_1 - \frac{16M_2^3 (k_g RT)^2}{\pi^2 d^4} \frac{dp}{p^3},$$

где  $k_m$  – линейный (отнесенный к единице длины трубы) коэффициент теплопередачи от воздуха к воде;  $M_2$  – массовый расход газа;  $T_0$  – абсолютная температура воды, омывающей трубопровод;  $k_g$  – коэффициент, учитывающий отличия свойств сжатого при высоких давлениях воздуха от свойств идеального газа;  $R$  – газовая постоянная;  $C_p$  – массовая изобарная теплоемкость воздуха. Механизм учета изменения температуры сжатого воздуха на динамику пневмопровода описан в работе [2].

Метаматематическое описание переходных процессов во всех технологических звеньях подводного оборудования не вписывается в ограниченный объем данной статьи. Поэтому авторы вынуждены были ограничиться ссылками на свои работы, в которых подробно описаны следующие переходные режимы (например для стадии запуска):

- Разгон воды в подводящей трубе [2].
- Подъем первой порции твердого материала до выходного сечения подъемной трубы [2].
- Звено „насос – гибкий трубопровод“ [4].

7. Для ресивера использован стандартный модуль аккумуляции в форме для сжимаемого газа. Ресивер описывается линеаризованным уравнением первого порядка [3]

$$T_p \frac{d\Delta Q_p}{dt} + \Delta Q_p = \Delta Q_e,$$

где  $T_p$  – постоянная времени, зависящая от начального режима. Передаточная функция ресивера имеет вид

$$W(p) = \frac{1}{T_p p + 1} = \frac{Q_p(p)}{Q_e(p)},$$

где  $Q_p(p)$  – расход на выходе ресивера;  $Q_e(p)$  – производительность компрессора.



## 8. Описание звена „Компрессорная станция“.

Входной параметр – управляющее воздействие  $u_{зкс}(t)$ . Выходной параметр – расход воздуха на входе в пневмопровод  $Q_{vk}(t)$ . Связь описывается дифференциальным уравнением [10]

$$T_k \frac{dQ_{vk}(t)}{dt} + Q_{vk}(t) = K_{kc} \cdot u_{зкс}(t),$$

где  $T_k$  – постоянная времени компрессора (определяется по переходным характеристикам);  $K_{kc}$  – передаточный коэффициент, определяемый по номинальным данным компрессорной станции

$$K_{kc} = \frac{Q_{vk}^{ном}}{u_{зкс}^{ном}},$$

где  $Q_{vk}^{ном}$  – расход воздуха на выходе компрессорной станции при номинальном давлении нагнетания и номинальной температуре;  $u_{зкс}^{ном}$  – номинальное задающее воздействие компрессорной станции.

На базе приведенного выше математического аппарата разработан программно-вычислительный комплекс для моделирования переходных и нестационарных процессов в элементах ГЭГ. С использованием данного комплекса определены длительности переходных процессов в рамках предложенного автоматизированного способа управления запуском и остановкой глубоководного гидроподъема [1] в следующих диапазонах изменения исходных данных:

- глубина разработки месторождения,  $H_p = 3..7$  км;
- годовая производительность по „сухому“ сырью,  $M_I = 1..3$  млн т./год.

Для указанных диапазонов переходные процессы (запуск + останов) в глубоководных эрлифтах составляет 18 – 24% от продолжительности рабочего режима. Это объясняется значительной протяженностью пневмогидравлических трактов ГЭГ и относительно малой скоростью распространения кинематических волн концентраций компонентов. Данное обстоятельство указывает на необходимость корректировки значения часовой производительности ГЭГ, обеспечивающей суточную норму с учетом длительности переходных процессов.

Обобщение приведенных материалов позволило сформулировать следующий **научный результат**. Разработан математический аппарат для исследования переходных режимов в элементах ГЭГ, комплексно описывающий механизм запуска и остановки силового оборудования, процессы распространения ударных и кинематических концентрационных волн в проточных частях ГЭГ. На базе данного математического аппарата установлены значения временных интервалов длительности переходных процессов в элементах ГЭГ, позволившие впервые обоснованно определить значения необходимой часовой производительности установки, обеспечивающей выполнения суточного задания по подъему ТПИ.

**Выводы:**

1. Для предложенного способа автоматизированного управления глубоководными гидроподъемами

разработан программный комплекс, с использованием которого определены длительности основных переходных процессов в элементах ГЭГ в широком диапазоне изменения производительностей установок и глубин разработки месторождений.

2. Обоснована часовая производительность ГЭГ в рабочем режиме, обеспечивающая, с учетом длительности переходных процессов, выполнение суточной нормы по подъему ТПИ.

3. Предложены, обладающие патентной чистотой, технические решения по сокращению длительности переходных режимов за счет уменьшения числа пусковых операций, гарантированно обеспечивающие устойчивость протекающих нестационарных процессов в элементах ГЭГ.

Дальнейшим этапом исследований является разработка программного обеспечения для описания переходных процессов в элементах добычного подводного оборудования (агрегат сбора с энергетическим модулем, насосный агрегат с гибким трубопроводом, бункер-дозатор со шнековым питателем) с целью согласования и синхронизации параметров переходных режимов гидроподъемов с нестационарными характеристиками машин донного блока.

**Список литературы / References**

1. Пат. 2346161 Российская Федерация, E21C50/00, E21C45/00, F04F1/20. Способ запуска и остановки морского эрлифта и система для его реализации / Пивняк Г.Г., Кириченко Е.А., Евтеев В.В., Шворак В.Г., Кириченко В.Е.; заявитель и правообладатель НГУ. Оpubл. 10.02.2009, Бюл. №4.  
Pivnyak, G.G., Kirichenko, Ye.A., Yevteyev, V.V., Shvorak, V.G. and Kirichenko V.Ye., “The way of starting and stopping of marine airlift and its realization system”, Pat. 2346161 Russian Federation, E21C50/00, E21C45/00, F04F1/20. applicant and owner NGU. Publ. 10.02.2009, Vol. №4.
2. Кириченко Е.А. Механика глубоководных гидротранспортных систем в морском горном деле / Кириченко Е.А. –Днепропетровск: Национальный горный университет, 2009. –334 с. ISBN 978-966-350-170-3.  
Kirichenko, Ye.A. (2009), *Mekhanika glubokovodnykh gidrotransportnykh system v morskoy gornom dele* [Mechanics of Deep-Water Hydrotransport Systems in Deep-Sea Mining], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine, 334 p. ISBN 978-966-350-170-3.
3. Расчет и выбор оптимальных характеристик гидравлического комплекса для добычи железомарганцевых конкреций со дна Мирового океана (Методические рекомендации) / Борисов А.А., Грибанов А.М., Пашенко В.С., Шевченко Ф.Л. – Геленджик: ПО „Южморгеология“, 1990. – 56 с.  
Borisov, A.A., Griбанov, A.M., Pathenko, V.S. and Shevchenko, F.L. (1990), *Rasschet i vybor optimalnykh kharakteristik gidravlicheskogo kompleksa dlya dobychi zhelezomargantsevykh konkretseyi so dna Mirovogo okeana* [Calculation and Choise of Optimal Hydraulic Complex Characteristics for Ferromanganese Mining in Ocean], PO “Yuzhmorgeologiya”, Gelendzhik, Russia, 56 p.

4. Динамика глубоководных гидродъемов в морском горном деле / Кириченко Е.А., Шворак В.Г., Кириченко В.Е., Евтеев В.В. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2010. – 259 с. ISBN 978-966-350-231-1.

Kirichenko, Ye.A., Shvorak, V.G., Kirichenko, V.Ye. and Yevteyev, V.V. (2010), *Dinamika glubokovodnykh gidropodyemov v morskoy gornom dele* [Dynamics of deep-water hydraulic hoists in deep-sea mining], National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine, 259 p. ISBN 978-966-350-231-1.

5. Кириченко В.Е. Обоснование параметров глубоководных эрлифтов с учетом переходных процессов: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.06 „Горные машины“ / Кириченко Владимир Евгеньевич; Гос. высшее уч. заведение „Нац. горный ун-т“. – Днепропетровск: 2009. – 20 с., включ. обл.: ил. – Библиогр.: с. 16.

Kirichenko, V.Ye. (2009), “Substantiation of the rational parameters of deep-water airlift taking into account the transitional processes” Abstract Cand. Sci. (Tech.) dissertation, Dept. Mining Machines, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine, 20 p.

6. Кириченко Е.А. Исследование параметров снарядной структуры течения в подъемной трубе глубоководного эрлифта / Кириченко Е.А., Евтеев В.В., Романюков А.В. // Научный вестник НГУ. – Днепропетровск: 2007. – №9. – С. 66–72.

Kirichenko, Ye.A., Yevteyev, V.V. and Romanyukov, A.V. (2007), “Research of slug flow parameters in rising pipe of deep-water airlift”, *Scientific bulletin of National Mining University*, Dnipropetrovsk, Ukraine, no. 9, pp. 66–72.

7. Спиваковский А.О. Автоматизация трубопроводного транспорта / Спиваковский А.О., Смолдырев А.Е., Зубакин Ю.С. – М.: Недра, 1972. – 338 с.

Spivakovskiy, A.O., Smoldihrev, A.E. and Zubakin, Yu.S., (1972), *Avtomatizatsiya truboprovodnogo transporta* [Automation of pipeline transport], Nedra, Moscow, 338 p.

8. Уолис Г. Одномерные двухфазные течения / Уолис Г. – М.: Мир, 1972. – 440 с.

Uolis, G. (1972), *Odnomernyye dvukhfaznyye tekheniya* [Single Dimension Two-Phase Flows], Mir, Moscow, Russia, 440 p.

9. Кириченко Е.А. Анализ течения сжатого воздуха в пневмосети эрлифта / Кириченко Е.А. // В сб.: Математическое моделирование процессов теплопереноса. – Днепропетровск: ДГУ, 1988.

Kirichenko, Ye.A. (1988), “Analyzing of compressed air flow in airlift pneumatic system”, *Mathematical simulation of heat-and-mass transfer processes*, DGU, Dnipropetrovsk, Ukraine.

10. Гейер Л.Г. Эрлифтные установки: Учебное пособие. / Гейер Л.Г., Козыряцкий Л.Н., Пашенко В.С. – Донецк: ДПИ, 1982. – 64 с.

Geyyer, L.G., Kozhyryatskiy, L.N. and Pashchenko, V.S., 1982, *Erliftnyye ustanovki* [Airlift Installations], Tutorial, DPI, Doneck, Ukraine, 64 p.

Метою статті є створення математичного забезпечення для автоматизованого способу управління

перехідними режимами в глибоководних ерліфтних установках. Поставлена мета досягається шляхом математичного моделювання найбільш характерних перехідних процесів в основних технологічних ланках підводного обладнання на мета-, макро- та мікрорівнях.

До основних результатів цієї статті належить розробка математичного опису базових елементів ерліфтного гідропідйому: дозатор, підвідна та підйомна труби, змішувач, пневмопровід, компресор і ресивер. Розроблено математичне забезпечення, яке описує поширення ударних і кінематичних хвиль у пневмогідравлічних трактах гідропідйому, а також перехідні процеси в силовому обладнанні, послужило основою для розробки програмного комплексу, який дозволяє визначати параметри основних перехідних процесів у широкому діапазоні зміни продуктивності установки і глибин розробки родовищ. За допомогою розробленого програмного комплексу обґрунтована годинна продуктивність глибоководної ерліфтною установки в робочому режимі, що забезпечує, з урахуванням тривалості перехідних процесів, виконання добової норми з підйому мінеральної сировини. Запропоновано технічні рішення щодо скорочення тривалості перехідних режимів за рахунок зменшення числа пускових операцій, що гарантовано забезпечують стійкість протікаючих нестационарних процесів в елементах гідропідйому.

**Ключові слова:** *гідротранспорт, автоматизоване управління, ерліфтний гідропідйом, тверді корисні копалини, морський видобуток, циклограма*

The article is devoted to creation of mathematical support for automated way of transient modes control in deep-water airlift installations.

The purpose is reached by means of mathematical simulation on meta-, macro- and micro- levels of the most typical transient processes in the basic technological units of underwater equipment. The primary result of the research is the mathematical formulation of hydraulic hoisting basic elements: metering device, supply and elevating pipes, mixer, pneumatic pipeline, compressor and receiver. The developed mathematical support describes distribution of shock and kinematic waves in hydraulic hoist pneumatic-hydraulic paths as well as transient processes in the power equipment. It formed the basis for software development which allows defining the basic transient processes parameters for installations with different productivity and mining depths. By means of developed software the productivity of deep-water airlift installation per hour which provides daily norm performance of mineral mining is obtained. The technical solutions which reduce duration of transient processes by the way of reduction of number of starting operations and provide stability of non-stationary processes in elements of hydraulic hoist are offered.

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

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Самусею. Дата надходження рукопису 17.05.11*