

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 621.695.622.276

Е.А. Кириченко, д-р техн. наук, проф.,
В.Г. Шворак, канд. техн. наук, доц.,
В.Е. Кириченко, канд. техн. наук,
А.В. Романюков, А.А. Татуревич

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

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ГЛУБОКОВОДНЫХ НАСОСНЫХ ГИДРОПОДЪЕМОВ, ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ ДВУХФАЗНЫЕ СМЕСИ

Ye.A. Kirichenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.G. Shvorak, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,
V.Ye. Kirichenko, Cand. Sci. (Tech.),
A.B. Romanyukov, A.A. Taturevich

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

COMPREHENSIVE METHODOLOGY OF CALCULATION OF THE DYNAMICS OF DEEP-WATER PUMP-BASED HYDRAULIC HOIST PUMPING TWO-PHASE COMPOUNDS

Впервые разработана комплексная методика расчета динамики двухфазных потоков, позволяющая исследовать весь спектр нестационарных и переходных процессов в глубоководных насосных установках и обеспечивающая точность, необходимую для данного класса задач. На базе разработанной методики составлен программный комплекс HydroWorks 2p, пригодный для расчета параметров нестационарных и переходных режимов в глубоководных насосных установках. С использованием данного комплекса установлено, что колебания давлений и вызванные ими динамические напряжения часто достигают критических значений, что может представлять опасность в плане работоспособности установки и нарушения ее целостности.

Ключевые слова: гидросмесь, гидроподъем, насосный гидроподъем, твердые полезные ископаемые, глубоководная добыча

На сегодняшний день в Украине ощущается дефицит некоторых стратегических цветных металлов, добываемых из материковых месторождений традиционным способом. В связи с этим, дальнейшее наращивание минерально-сырьевой базы Украины тесно связано с освоением рудных месторождений Мирового океана.

Одним из наиболее перспективных способов транспортирования твердых полезных ископаемых с морского дна является насосный гидроподъем [1].

Решением Совета национальной безопасности и обороны Украины от 16 мая 2008 года „О мероприятиях по обеспечению развития Украины как морского государства“, приведенным в действие указом Президента Украины № 463/2008 от 20 мая 2008 года, предусмотрена разработка новой „Национальной программы исследований и использования ресурсов

Азово-Черноморского бассейна, других районов Мирового океана на 2009–2034 годы“. Таким образом, разработка технических средств подъема полезных ископаемых с морского дна является одним из приоритетных направлений исследований. Данная статья посвящена **актуальной проблеме** освоения минерального потенциала Мирового океана, решение которой напрямую связано с разработкой эффективных способов регулирования и управления глубоководными насосными установками.

При этом подъем минерального сырья на базовое плавсредство связан с решением ряда задач расчета динамики двухфазных (вода и твердые частицы) потоков, что обусловлено множеством переходных и нестационарных процессов, которые сопровождают работу насосной установки. Вообще говоря, в связи с большой протяженностью гидравлических трактов и особенностями эксплуатации, глубоководные насосные гидроподъемы (ГНГ) практически постоянно работают в нестационарных или квазистационарных режимах.

Существующие на сегодня методики расчета насосных установок, транспортирующих гидросмеси (пульпы), в основном базируются на представлении о смеси, как об однородной жидкости [2]. Авторы этих методик, как правило, сконцентрированы на проблемах гидроудара в трубопроводных системах, отводя твердым частицам в потоке пассивную роль, сводящуюся только к повышению плотности смеси [3], [4], [5], [6]. Такой подход позволяет использовать для расчетов упрощенный математический аппарат [5], [7], базирующийся на гомогенной модели, что существенно снижает точность получаемых результатов, т.к. вода и твердые частицы обладают различными инерционными свойствами. Очевидно, такие методики с приемлемой для инженерных расчетов точностью позволяют рассчитывать параметры наземного гидротранспорта, который можно проектировать с „запасом“ по прочности. Однако, по мнению авторов данной статьи, при расчете таких уникальных машиностроительных объектов, как ГНГ, такой подход едва ли является приемлемым, т.к. не учитывает специфику эксплуатации горно-морского оборудования в сложных условиях больших глубин.

Трубный став в ГНГ является несущей конструкцией для всего подводного оборудования и, ввиду больших протяженностей и массогабаритов, характеризуется опасными на разрыв продольными статическими напряжениями [8]. При движении судноносителя конструкция трубного става со свободным ходовым концом принимает изогнутую деформированную неравновесную форму и испытывает динамические нагрузки, обусловленные волновой качкой, а также различными видами аэрогидроупругой неустойчивости со стороны окружающей морской среды (эоловые колебания, галопирование, флаттер). Также возможны потери дивергентной устойчивости става и возникновение параметрического резонанса вследствие взаимодействия со стационарным и пульсирующим потоком транспортируемой жидкости. Кроме того, процессы, связанные с пуском и остановом насосных агрегатов, при неэффективном управлении могут сопровождаться явлением гидроудара. Перечисленные факторы неизбежно приводят к возникновению дополнительных динамических напряжений, что может привести к нарушению целостности системы.

Таким образом, одним из сдерживающих факторов развития глубоководных гидроподъемов является отсутствие эффективных систем управления, упреждающих перечисленные выше опасные эффекты. Разработка таких систем, в свою очередь, сдерживается отсутствием результатов исследований нестационарных режимов и динамических процессов в элементах глубоководных гидроподъемов, а также математического описания переходных процессов и, в конечном итоге, отсутствием достаточно точной и физически обоснованной методики расчета параметров ГНГ, ее программной реализации. Необходимо учитывать, что системы управления должны обеспечивать возможность оперативной „подстройки“ текущих параметров в условиях многофакторных воз-

мушающих воздействий, т.е. обладать достаточной эффективностью и быстродействием.

Исходя из вышеперечисленных особенностей эксплуатации, методика расчета ГНГ должна удовлетворять таким основным требованиям:

- высокая точность в связи с отсутствием „запасов“ в прочностных параметрах ГНГ;
- комплексность и оперативность, что подразумевает возможность исследования всего спектра нестационарных и переходных процессов в рамках единого математического аппарата, базирующегося на дифференциальных уравнениях одного типа;

Ранее строгий корректный расчет динамических процессов в гидротранспортных системах, перекачивающих гетерогенные смеси, не представлялся возможным, главным образом, из-за отсутствия адекватной, физически обоснованной математической модели, наиболее полно учитывающей специфику глубоководного гидротранспорта и весь спектр динамических эффектов, а также отсутствия закономерности изменения скорости звука в двухфазной гидросмеси [9].

Однако, после того как авторами данной статьи в работе [10] такая модель движения двухкомпонентной среды была получена, в работе [11] выведены характеристические соотношения для этой модели, а в работах [12], [13] получены закономерности изменения скорости звука, впервые открылась возможность разработки комплексной методики расчета динамики гетерогенных потоков в проточных частях ГНГ, которая бы удовлетворяла сформулированным выше требованиям.

Такая методика автоматически обеспечит возможность расчета параметров всего спектра динамических процессов в глубоководных насосных гидроподъемах от медленных концентрационных волн, сопровождающих процессы, связанные с пуском системы, до быстрых нестационарных процессов при различных вариантах аварийного останова и т.д.

Целью данной статьи является разработка методики расчета динамики двухфазных потоков в гидравлических трактах глубоководных насосных систем для исследования нестационарных и переходных процессов.

Кратко остановимся на основных составляющих методики. В работе [10] рассмотрен взвесенесущий поток жидкости с твердыми частицами. В одномерном приближении, уравнения, описывающие движение двухфазной среды, полученные в работе [10], выглядят так

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

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

$$\left(1 + \frac{C_1 k_1}{2}\right) \frac{\partial V_0}{\partial t} - \frac{C_1 k_1}{2} \frac{\partial V_1}{\partial t} + \frac{(1 - C_1)}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = \phi_0; \quad (3)$$

$$\left(\frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{k_1}{2}\right) \frac{\partial V_1}{\partial t} - \left(1 + \frac{k_1}{2}\right) \frac{\partial V_0}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = \phi_1; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \phi_0 &= -(1 - C_1)g \sin \alpha - \frac{\lambda}{2D} \frac{\rho_{см}}{\rho_0} |V_{см}| V_{см} - \\ &\quad - \frac{3}{8} \left[\frac{C_1 C_{xm}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1) \right]; \\ \phi_1 &= -\frac{\rho_1}{\rho_0} g \sin \alpha + \frac{3}{8} \frac{C_{xm}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1); \\ \frac{1}{a_1^2} &= \frac{\rho_1}{K_1} + \frac{\rho_1}{F} \left(\frac{\partial F}{\partial p} \right); \\ \frac{1}{a_0^2} &= \frac{1}{a_{жс}^2} + \frac{\rho_0}{F} \left(\frac{\partial F}{\partial p} \right); \quad a_{жс}^2 = \frac{K_{жс}}{\rho_0}; \\ K_1 &= \frac{E_1}{3(1 - 2\nu_1)}; \\ \rho_{см} &= \rho_0^* + \rho_1^* = (1 - C_1)\rho_0 + C_1\rho_1; \\ V_{см} &= \frac{1}{\rho_{см}} (\rho_0^* V_0 + \rho_1^* V_1) \end{aligned}$$

K_1, E_1, ν_1 – модуль объемного сжатия, модуль Юнга и коэффициент Пуассона твердых частиц; $K_{жс}$ – объемный модуль упругости жидкости; $a_{жс}$ – скорость звука в чистой неограниченной жидкости; R_1 – эквивалентный радиус твердых частиц; k_1 – коэффициент, учитывающий влияние несферичности, а также концентрации твердых частиц на присоединенные массы; g – ускорение силы тяжести; α – угол наклона трубопровода к горизонту; D – диаметр трубопровода; λ – коэффициент Дарси; t – время; C_{xm} – коэффициент сопротивления твердых частиц; C_i – объемная концентрация фазы; p – давление; ρ_i – истинная плотность фазы; ρ_i^* – приведенная плотность фазы; V_i – скорость фазы; x – продольная координата; индексы обозначают: “0” – вода; “1” – твердые частицы; “см” – смесь.

Заметим, что производная от концентрации C_1 входит только в уравнения неразрывности (1) и (2).

Поэтому, выразив производную $\frac{\partial C_1}{\partial t}$ из уравнения (2) и подставив ее в уравнение (1), получим общее уравнение неразрывности вида

$$\rho_0 a_0^2 (1 - C_1) \frac{\partial V_0}{\partial x} + \rho_0 a_0^2 C_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} + \left[(1 - C_1) + \frac{\rho_0 a_0^2 C_1}{\rho_1 a_1^2} \right] \frac{\partial p}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

При этом общая система уравнений (1)–(4) разбивается на две подсистемы: первая подсистема, которая состоит из уравнений (3)–(5) и содержит производные только от величин V_0, V_1 , и p , но не содержит производных от концентрации C_1 , и вторая подсистема, состоящая из уравнения (2), которое содержит производные по времени от C_1 и связано с первой подсистемой через производные от величин p и V_1 . В

свою очередь, первая подсистема связана со второй подсистемой только через значение концентрации C_1 (но не ее производной), которая входит как в коэффициенты первой подсистемы, так и в правые части выражений для ϕ_0, ϕ_1 .

Из первой подсистемы (3)–(5) определяются скорости распространения возмущений в смеси и характеристические соотношения на фронтах возмущений. А уравнение (2) представляет собой, по сути дела, обыкновенное дифференциальное уравнение для определения изменения концентраций C_1 с течением времени в каждой фиксированной точке x трубопровода после того, как на каждом временном слое времени t уже определены значения V_0, V_1 и p как функции координаты x .

При содержании в транспортируемой жидкости значительного количества твердых частиц (движение пульпы) волновой процесс в трубопроводе имеет определенные особенности, которые связаны со сжимаемостью твердых частиц, наличием в общем случае относительного скольжения твердой и жидкой фаз, отличием инерционных свойств твердого вещества и несущей жидкости и др.

Отметим, что в [11] выведено наиболее полное выражение для скорости звука в двухфазной смеси D_0

$$D_0 = \frac{1}{\sqrt{\rho_y \left(\frac{(1 - C_1)}{K_0} + \frac{C_1}{K_1} + \frac{1}{F} \frac{\partial F}{\partial p} \right)}}, \quad (6)$$

где

$$\rho_y = \mu \cdot \rho_0, \quad \mu = \frac{A}{B};$$

$$A = \frac{\rho_1}{\rho_0} \left(1 + \frac{C_1 k_1}{2} \right) + \frac{k_1}{2} (1 - C_1);$$

$$B = \frac{\rho_1}{\rho_0} (1 - C_1)^2 + (2 - C_1) C_1 + \frac{k_1}{2}.$$

На рис. 1 показаны зависимости изменения скорости звука от истинной объемной концентрации твердого в пульпе (далее от объемной концентрации пульпы) для различных значений волнового числа трубопровода, плотности твердых частиц сферической формы диаметром 0,005 м. Из сравнения графиков, приведенных на этих рисунках, следует, что характер кривых практически не зависит от плотности твердого материала.

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать ряд выводов. Величина скорости звука в пульпе в общем случае зависит от параметров как пульпы, так и трубопровода, конкурирующее взаимовлияние которых определяют три характерных области.

Первая область находится левее прямой 1 (рис. 1) $D_0 = -2124.7 C_1 + 1630$ и соответствует нисходящему характеру кривых с увеличением концентрации твердого материала за счет опережающего роста плотности пульпы по отношению к увеличению ее эффективного коэффициента объемного сжатия.

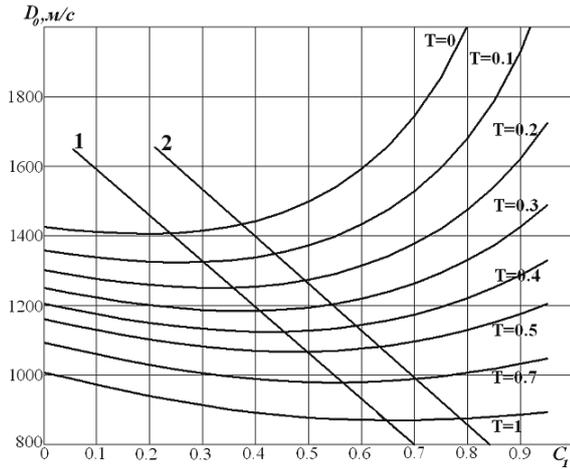


Рис. 1. Зависимости скорости распространения возмущений от концентрации твердого материала в пульпе при различных параметрах трубопровода ($C_2=0$; $\rho_1=1600 \text{ кг/м}^3$; $K_1=4,5 \cdot 10^{10}$)

Вторая область расположена между первой линией и линией $D_0 = -2101,8C_1 + 1870$, и соответствует, при фиксированных значениях волнового числа трубопровода, квазипостоянной скорости звука. В диапазоне изменения концентрации твердого материала между указанными линиями плотность пульпы изменяется пропорционально изменению эффективного коэффициента ее сжатия. В этой области величина скорости звука в пульпе однозначно определяется только значениями волнового числа трубопровода, что значительно сокращает объем вычислений при разработке инженерных методик, и в первом приближении может быть определена по формуле

$$D_0 = -575T + 1415,$$

где

$$T = \frac{K_0 \cdot D_{\text{од}}}{E \cdot \delta}$$

– это волновое число трубопровода.

Третья область находится правее линии 2 и соответствует восходящему характеру кривых с увеличением концентрации твердого материала за счет опережающего роста эффективного коэффициента объемного сжатия пульпы по отношению к увеличению ее плотности.

По рис. 2 можно сделать вывод, что уменьшение плотности твердого материала при прочих равных условиях приводит к увеличению скорости звука.

Полученные результаты заставляют коренным образом переосмыслить установившиеся стереотипы в плане утверждения, что присутствие твердой фазы в несущей жидкости приводит только к увеличению скорости звука в пульпе [13].

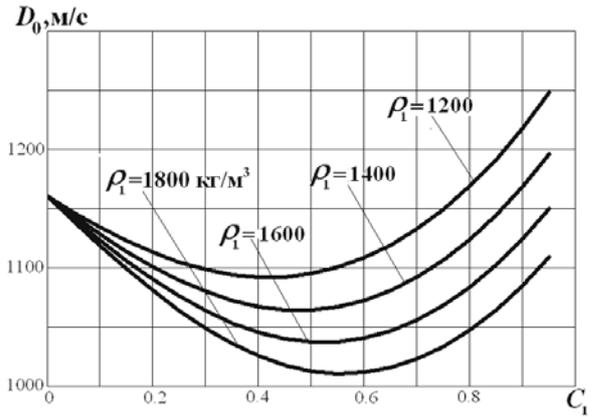


Рис. 2. Зависимости скорости звука от концентрации твердого материала при различных его плотностях ($C_2=0$; $T = 0,5077$; $K_1 = 4,5 \cdot 10^{10}$)

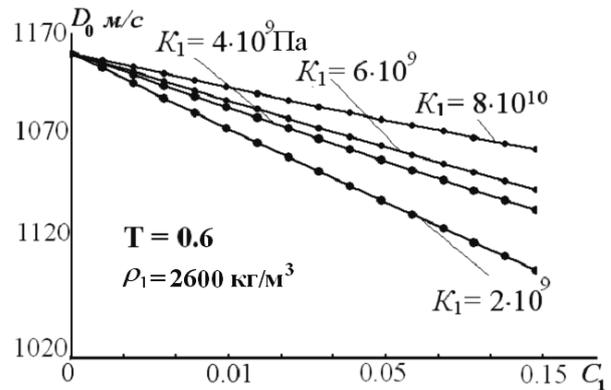


Рис. 3. Зависимости скорости звука в подводящей трубе от концентрации твердого материала для различных значений коэффициента объемного сжатия твердых частиц ($C_2 = 0$; $T = 0,5077$; $\rho_1 = 1600 \text{ кг/м}^3$)

На скорость звука влияет также коэффициент объемного сжатия твердых частиц K_1 (рис. 3): чем выше его значение, тем выше при прочих равных условиях скорость звука.

Характеристические соотношения. В работе [11] показано, что для системы (1)–(4) справедливы характеристические соотношения на трех семействах характеристик

$$dp + \mu\rho_0 D_0 [(1 - C_1)dV_0 + C_1 dV_1] - \frac{\mu\rho_0 D_0}{A} \psi dt = 0; \tag{7}$$

$$-dp + \mu\rho_0 D_0 [(1 - C_1)dV_0 + C_1 dV_1] - \frac{\mu\rho_0 D_0}{A} \psi dt = 0 \tag{8}$$

для акустических характеристик вида

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_1 = D_1 = D_0; \quad (9)$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)_2 = D_2 = -D_0 \quad (10)$$

и

$$\begin{aligned} & \left[(1-C_1) \left(1 + \frac{k_1}{2} \right) + 1 + \frac{C_1 k_1}{2} \right] dV_0 - \\ & - \left[(1-C_1) \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} + \frac{k_1}{2} \right) + \frac{C_1 k_1}{2} \right] dV_1 - \Omega_1 dt = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

для характеристик вида

$$D = 0, \quad (12)$$

где $D = x'(t)$ – скорость распространения фронта возмущений.

$$\begin{aligned} \psi &= \varphi_{жс} g \sin \alpha - \frac{\lambda \rho_{см} |V_{см}| V_{см}}{2 D_{мп} \rho_0} \varphi_{мп} + \\ & \frac{3}{8} \frac{C_{xm}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1) \varphi_1; \\ \varphi_{жс} &= -(1-C_1) \varphi_{мп} - C_1 \frac{\rho_1}{\rho_0} \left(1 + \frac{k_1}{2} \right); \\ \varphi_{мп} &= (1-C_1) \frac{\rho_1}{\rho_0} + C_1 + \frac{k_1}{2}; \\ \varphi_1 &= C_1 (1-C_1) \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_0} \right); \\ \Omega_1 &= (1-C_1) \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} - 1 \right) g \sin \alpha - \frac{\lambda \rho_{см} |V_{см}| V_{см}}{2 D_{мп} \rho_0} - \\ & - \frac{3}{8} \frac{C_{xm}}{R_1} |V_0 - V_1| (V_0 - V_1). \end{aligned}$$

Подчеркнем, что характеристические соотношения (7), (8) на акустических характеристиках представляют собой связь между полными дифференциалами функций p , V_0 и V_1 вдоль этих характеристик, но они не содержат дифференциалов концентрации C_1 .

Характеристическое условие (11) выполняется вдоль линий $x = \text{const}$ так, что содержащиеся в них дифференциалы dV_0 и dV_1 означают приращения соответствующих функций по времени в каждом фиксированном сечении трубопровода.

Отметим, что характеристическое соотношение (11) не содержит дифференциалов от концентрации C_1 .

Таким образом, в общем случае смеси жидкости с твердой дискретной фазой имеется три семейства характеристик, вдоль каждого из которых выполняется некоторая связь между полными дифференциалами искомых функций dp , dV_0 и dV_1 .

Дифференциал концентрации dC_1 в эти характеристические соотношения не входит. Значение концентрации C_1 подлежит определению из решения дифференциального уравнения (2), которое по отно-

шению к $\frac{\partial C_1}{\partial t}$ являются, по сути дела, обыкновенным дифференциальным уравнением, что позволяет осуществить его численное интегрирование с помощью конечно-разностных схем.

Полученные характеристические соотношения могут быть положены в основу численного расчета нестационарных характеристик гидросмеси при помощи комплексной методики, представляющей собой комбинацию метода характеристик для гидродинамических параметров p , V_0 , V_1 и конечно-разностного метода определения концентрации C_1 .

Используя описанные выше результаты, построим **комплексную методику расчета динамики двухфазных потоков.**

1. Задание исходных данных. В качестве исходных данных для расчета нестационарных процессов в гидросистеме используются:

- принципиальная схема гидросистемы (длины отдельных участков и типоразмеры трубопроводов; отметки высоты их стыковочных сечений; углы наклона каждого участка; места расположения основных устройств и элементов арматуры системы (насосы, обратные клапаны, задвижки и пр.); производительность системы; расходная концентрация твердой фазы и ее гранулометрический состав; отметки приемного сечения и сечения выхода гидросмеси из системы);

- данные гидравлического расчета стационарного рабочего режима гидросистемы (расходно-напорные характеристики насосов, их рабочие точки; гидравлические уклоны отдельных участков трубопроводов и распределение давления по всей системе в рабочем режиме; рабочие скорости движения несущей среды и дискретной фазы по всей системе; коэффициенты гидравлических потерь отдельных участков λ_i и коэффициенты местных потерь на элементах арматуры; распределение полей концентрации твердого материала вдоль системы и др).

Данные гидравлического расчета служат в качестве начальных условий для расчета нестационарных явлений и явления гидроудара в гидросистеме, возникающих в результате резкого изменения режима работы одного или нескольких агрегатов или элементов арматуры системы (обесточивание насоса или его аварийный выход из строя; внезапное полное или частичное перекрытие задвижек; плановое или аварийное срабатывание обратных клапанов).

2. Расчет нестационарных параметров гидросистемы начинается с разбиения всей гидролинии на конечное число расчетных элементов, при этом трубопровод первоначально разбивается на отдельные участки длиной Δl_i , концы которых A_i и являются расчетными точками для определения гидродинамических параметров, а каждый агрегат сети и элемент арматуры рассматривается как отдельный „нулевой“ расчетный элемент, который имеет нулевую протяженность, но имеет свой „вход“ A_k и свой „выход“ A_{k+1} (рис. 4).

Все начальные параметры гидросмеси в момент времени t_0 , начиная с которого возникает подлежащий расчету нестационарный процесс, определяются во всех точках A_i на основании данных гидравличе-

ского расчета. Предполагается, что для каждого „нулевого“ расчетного элемента (т.е. для насосов, запорных устройств и других элементов арматуры) известен гидравлический закон этого элемента, т.е. конечное или дифференциальное уравнение, определяющее связь между перепадом давления на входе и выходе этого элемента с расходом смеси.

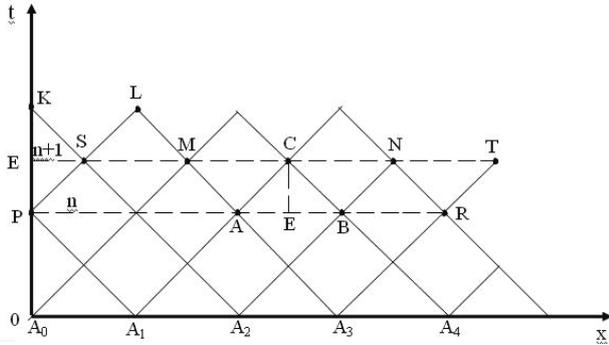


Рис. 4. Схема применения комбинированного метода характеристик для расчета нестационарных параметров гидросмеси

3. Расчет нестационарных параметров гидросистемы строится численно следующим образом.

3.1. Из гидравлического расчета гидросистемы определяется начальное распределение давления, скоростей V_0 , V_1 и концентрации твердого материала C_1 во всех узлах A_i^0 ($x_i^0, t = 0$)

3.2. Координаты точек A_i^1 нового временного слоя и новых точек наблюдения (x_i^1, t_i^1) определяются из совместного решения системы алгебраических уравнений характеристик, полученных из уравнений (9), (10) путем замены дифференциалов конечно-разностными отношениями

$$x - x_A = (D_0)_A (t - t_A); \quad (13)$$

$$x - x_B = -(D_0)_B (t - t_B). \quad (14)$$

При этом для всех нулевых элементов координаты x_i^1 остаются прежними, а для распределенных элементов координаты точек наблюдения x_i^1 изменяются.

3.3. Расчет давления P , и компонентов скорости несущей жидкости V_0 и твердой фазы V_1 на новом временном слое во всех внутренних узлах A_i^1 осуществляется из решения алгебраической системы уравнений

$$p_C - p_A + (a_{00})_A (V_{0C} - V_{0A}) + (a_{01})_A (V_{1C} - V_{1A}) = (b_0)_A (t_C - t_A); \quad (15)$$

$$-(p_C - p_B) + (a_{00})_B (V_{0C} - V_{0B}) + (a_{01})_B (V_{1C} - V_{1B}) = (b_0)_B (t_C - t_B); \quad (16)$$

$$(a_{10})_E (V_{0C} - V_{0E}) + (a_{11})_E (V_{1C} - V_{1E}) = (b_1)_E (t_C - t_E), \quad (17)$$

полученной путем замены дифференциалов конечно-разностными отношениями в уравнениях характеристик (7), (8) и (11). Здесь коэффициенты a_{ij} и b_i определяются путем сопоставления уравнений (15)–(17) с уравнениями (7), (8) и (11) соответственно.

Концентрация твердых частиц вычисляется при помощи уравнения (2)

$$(C_1)_C = \left[(C_1)_E 1 - \left(\frac{1}{\rho_1 a_1^2} \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_C + \left(\frac{\partial V_1}{\partial x} \right)_C \right) \times (t_C - t_E) \right]_F \quad (18)$$

где C_{1E} выражается интерполяцией по соседним узлам A и B , а производная $\left(\frac{\partial V_1}{\partial x} \right)_C$ определяется с использованием значений функции V в узлах, соседних с узлом C , используя информацию из предыдущего расчетного шага.

При этом скорость распространения возмущений (скорость распространения ударной волны) D вычисляется по формуле (6).

3.4. Расчет гидродинамических параметров в пограничных узлах (входное и выходное сечение), а также на „нулевых“ элементах осуществляется на основе тех же уравнений (7), (8), (11) и (18) с привлечением соответствующих граничных условий или гидравлического закона каждого отдельного такого элемента.

3.5. Расчет каждого нового временного слоя осуществляется повторением процедуры, описанной в п. 3.3.–3.4.

Апробация методики. Численный эксперимент. На базе изложенной методики разработан программный комплекс HydroWorks 2p, предназначенный для расчета динамики двухфазных потоков. Комплекс совместим с CAD-платформой SolidWorks 2010/2011 и поддерживает операционные системы Windows Vista (x32, x64) и Windows 7 (x32, x64). Пользователю предлагаются два режима установки пакета: добавление (add-in) к SolidWorks и автономное (stand-alone) приложение, позволяющее производить расчет без наличия пакета SolidWorks. Приложение состоит из следующих модулей:

- Расчетный модуль – библиотека классов (Dynamic-link library – dll), реализующая методику расчета динамики движения многофазных смесей. Библиотека имеет открытый API-интерфейс и может быть интегрирована в другие CAD/CAE-системы.

- Модуль-добавление (dll), интегрированный в среду SolidWorks.

- Автономное Windows-приложение (executable – exe).

- Визуализатор (dll). Формирование отчетов, отображение графиков и таблиц.

Среди основных функциональных возможностей можно выделить:

- построение сложных параметрических трубопроводных систем;
- полное интегрирование со средой SolidWorks;
- сохранение результатов во внешние форматы (excel, word, txt).

С использованием разработанного программного комплекса было проведено множество численных экспериментов и получены распределения давлений, скоростей и концентраций для динамических задач в различной постановке. В качестве примера использования разработанной методики приведем только отдельные, наиболее характерные результаты для определения амплитуд волн давления в транспортном трубопроводе ГНГ. Одним из вариантов такого гидродобыча является ГНГ, оборудованный тремя погружными электронасосами Н1-Н3 (рис. 5).

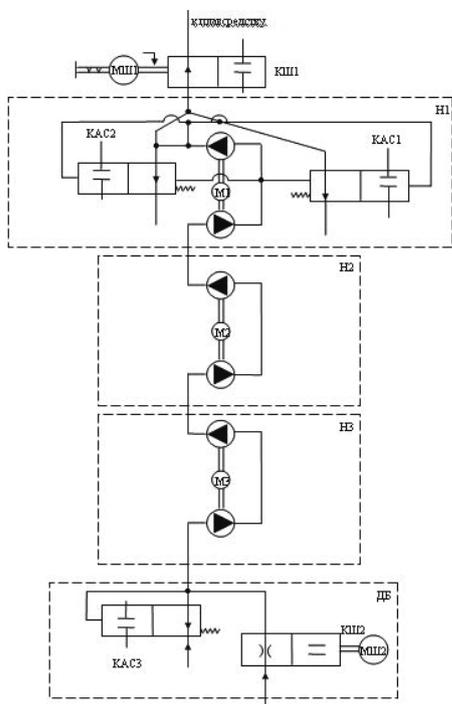


Рис. 5. Гидравлическая схема ГНГ

Подача пульпы ведется с глубины 6000 м. Насосы Н1-Н3 установлены на расстоянии 3500, 2000 и 500 м от морского дна соответственно (рис. 6) и включены последовательно при закрытых клапанах аварийного сброса пульпы (КАС1-КАС3) и открытых шаровых кранах (КШ1, КШ2). Регулирование кранов КШ1 и КШ2 осуществляется с помощью электроприводов МШ1 и МШ2. Электродвигатели насосных агрегатов М1-М3 имеют возможность регулирования при помощи частотных преобразователей. Допускается также и прямое включение электродвигателей в бортовую сеть.

Клапаны аварийного сброса пульпы КАС1-КАС3 установлены параллельно трубопроводному ставу насосной гидротранспортной системы и в открытом состоянии сообщаются с окружающей средой.

Рассмотрим последовательный пуск насосных агрегатов при плановом запуске глубоководной насосной добычной установки на воде. Такой пуск подразумевает

пошаговое включение насосов один за другим с некоторым заданным интервалом времени при заполненном однородной средой (водой) трубопроводном ставе.

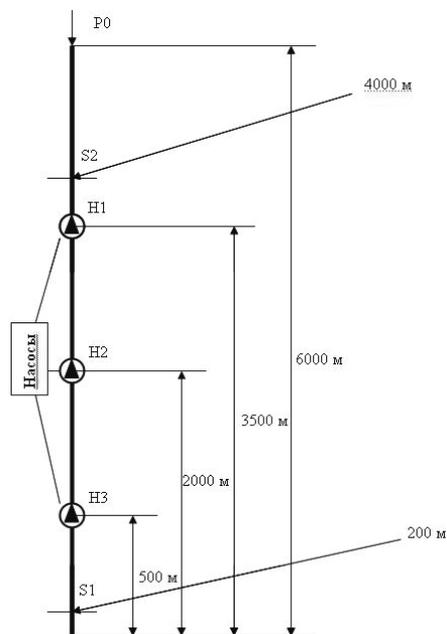


Рис. 6. Схема расположения насосных агрегатов ГНГ

Для первого численного эксперимента был выбран пошаговый пуск насосных агрегатов, начиная с Н3 и заканчивая Н1, с интервалом между подачей питания на них в 5 с.

Альтернативой пошагового пуска насосных агрегатов является залповый пуск, когда питание одновременно подается на все насосы. Исследование проводилось с учетом подключения двигателей всех насосов к частотным преобразователям, при этом разгон валов насосов до номинальной скорости в обоих случаях происходит за 5 с.

В качестве контрольных для исследования динамических параметров ГНГ были выбраны сечения транспортного трубопровода S1 и S2, находящиеся на отметках 200 и 4000 м соответственно.

На рис. 7 показаны графики зависимости давления пульпы от времени в сечении S1 при залповом и пошаговом пуске насосных установок при описанных выше условиях.

Как видно из рис. 7, амплитуда колебаний давления пульпы при пошаговом запуске насосных агрегатов в сечении S1 существенно отличается от аналогичной амплитуды для залпового пуска. Полученные данные свидетельствуют о том, что максимальная амплитуда колебаний давления пульпы для залпового пуска наблюдается на первом пике колебаний и составляет $9,17 \cdot 10^4$ Па. Для последовательного пуска такой максимум существенно меньше ($6,08 \cdot 10^4$ Па) и наблюдается на первом и на третьем пиках колебаний давления, что связано с неодновременным возникновением волн давления в трубопроводе и их последующей суперпозицией. Разница между максимальными отклонениями давлений от гидростатического в сечении S1 для залпового и пошагового пусков составляет $3,09 \cdot 10^4$ Па.

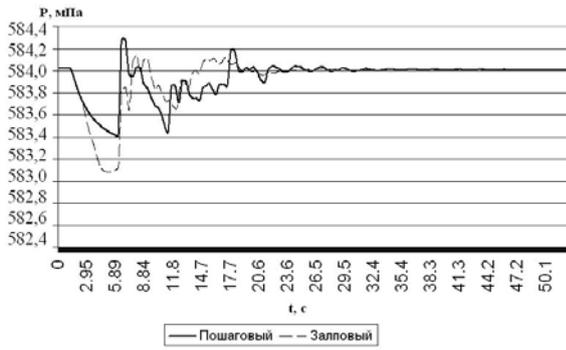


Рис. 7. Зависимость давления (P , мПа) от времени (t , с) при пошаговом и залповом пуске насосных агрегатов на воде в сечении S1

На рис. 8 приведены графики зависимости давления пульпы от времени в сечении S2 для случая очередного и залпового запуска насосов.

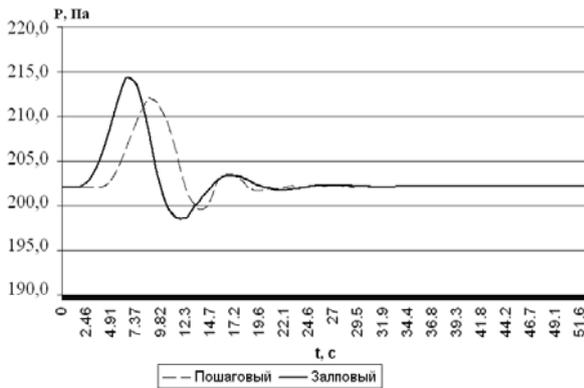


Рис. 8. Зависимость давления (P , мПа) от времени (t , с) при пошаговом и залповом пуске насосных агрегатов на воде в сечении S2

Результаты численного эксперимента показывают, что максимальная амплитуда колебаний давления пульпы для залпового пуска наблюдается на первом пике колебаний и составляет $21,17 \cdot 10^5$ Па, а при очередном – $9,83 \cdot 10^5$ Па и также соответствует первому пику колебаний.

Как видно из проведенных численных экспериментов, залповый пуск насосных агрегатов существенно усугубляет риск повреждения глубоководной насосной гидротранспортной системы из-за значительно большей амплитуды колебаний давления пульпы (в 1,3–1,5 раза). При пошаговом пуске насосных агрегатов система более мягко приходит к своему стационарному режиму работы, однако при таком пуске есть смысл замедлить время разгона вала первого запускаемого насоса до номинальной скорости вращения, чтобы избежать повышенной нагрузки на него при пуске (рис. 9, 10).

Рассмотрим последовательный пуск насосных агрегатов при плановом запуске глубоководной насосной добычной установки на воде. Такой пуск подразумевает пошаговое включение насосов один за другим с некоторым заданным интервалом времени при заполненном однородной средой (водой) трубопроводном ставе.

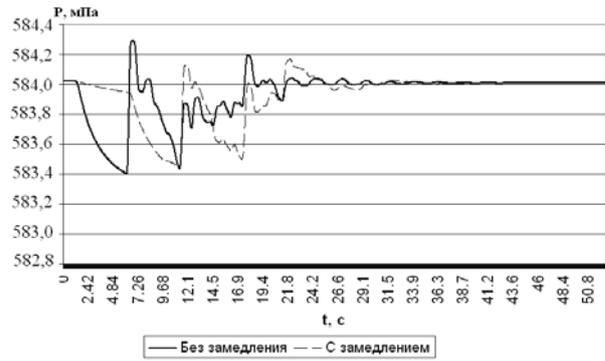


Рис. 9. Зависимость давления (P , мПа) от времени (t , с) при пошаговом пуске насосных агрегатов на воде без замедления и с замедлением в сечении S1

Как видно из проведенных численных экспериментов, за счет увеличения времени разгона вала насоса удалось снизить значения давления в пиках до $5,58 \cdot 10^4$ и $7,55 \cdot 10^5$ Па соответственно в сечениях S1 и S2.

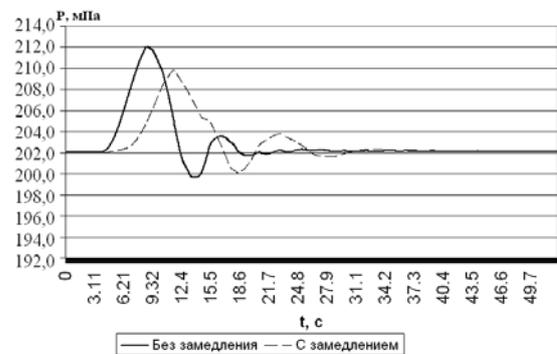


Рис. 10. Зависимость давления (P , мПа) от времени (t , с) при пошаговом пуске насосных агрегатов на воде без замедления и с замедлением в сечении S2



Рис. 11. Зависимость давления пульпы (P , мПа) от времени (t , с) при резкой аварийной остановке насосных групп в сечении S1

Особый интерес представляет аварийная остановка системы, когда один или несколько насосов выходит из строя и резко перекрывает своим рабочим колесом сечение трубопровода. Характерной особенностью данного переходного процесса является то, что в момент остановки трубопровод заполнен жидко-

стью с твердыми частицами и гидроудар происходит в двухфазной смеси (рис. 11, 12, 13).

На рис. 12 и 13 показаны переходные процессы при плановой остановке системы, начиная с насосного агрегата Н1 и заканчивая агрегатом Н3 и наоборот, с интервалом между отключениями питания насосов в 20 с в сечениях S1 и S2 соответственно.

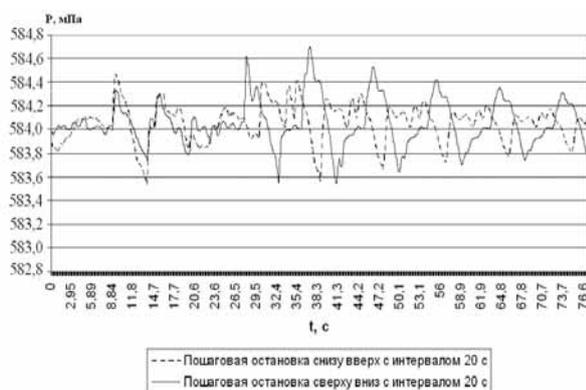


Рис. 12. Зависимость давления пульпы (P , мПа) от времени (t , с) при плановой остановке насосных групп в сечении S1

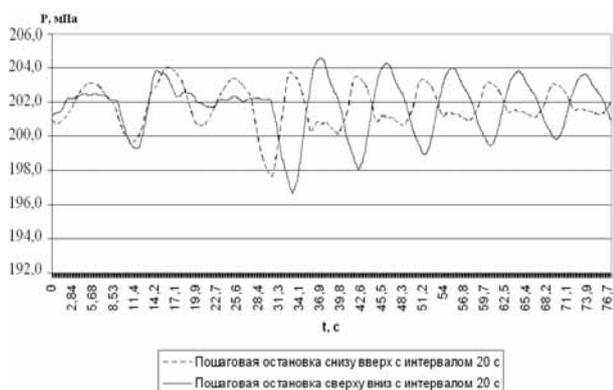


Рис. 13. Зависимость давления пульпы (P , мПа) от времени (t , с) при плановой остановке насосных групп в сечении S2

В случае аварийной остановки системы пиковые значения давлений превышают в несколько раз соответствующие значения при плановой остановке. Это может привести к повреждению как насосных агрегатов, так и самого трубопровода с плохо прогнозируемыми последствиями. В случае же плановой остановки, из рисунков 12 и 13 видно, что амплитуды колебаний давления при алгоритме остановки насосов „снизу вверх“ всегда существенно ниже соответствующих амплитуд при останове „сверху вниз“, что позволяет выбрать правильную схему остановки насосных агрегатов.

Анализируя полученные результаты, для трех схем запуска системы можно утверждать, что максимальная амплитуда колебаний давления наблюдалась для случая залпового пуска насосных агрегатов и составила $21,17 \cdot 10^5$ Па, что является весьма нежелательным в плане возможных повреждений насосного оборудования и трубопровода в целом, а также увеличивает износ и уменьшает долговеч-

ность элементов системы. Наименьший прирост давления соответствует пошаговому пуску с замедлением первого насоса и составляет $7,55 \cdot 10^5$ Па, что не представляет опасности и не создает проблем в плане негативных последствий гидравлического удара. При такой схеме обеспечивается максимальная эффективность запуска-останова добычного комплекса, а риск повреждения минимален благодаря уходу от прямого гидроудара.

На базе изложенного материала можно сформулировать следующий **научный и практический результат**. Впервые разработана комплексная методика расчета динамики двухфазных потоков, позволяющая оперативно и с высокой степенью точности исследовать весь спектр нестационарных и переходных процессов в глубоководных насосных установках в рамках единого математического аппарата.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать следующие **выводы**. В результате изучения состояния вопроса, установлено, что на сегодняшний день не существует методики расчета нестационарных и переходных процессов в элементах глубоководных гидроподъемов, учитывающей особенности их эксплуатации в сложных условиях больших глубин и обеспечивающей достаточную точность для данного класса задач.

На базе разработанной методики составлен программный комплекс HydroWorks 2p, позволяющий решать различные задачи, связанные с двухфазными течениями и определять параметры нестационарных и переходных режимов в глубоководных насосных добычных установках. Разработанный комплекс пригоден для расчета всего спектра переходных режимов, от запуска системы на воде до процессов, связанных с регулированием и остановом при работе установки на пульпе.

С использованием данного программного комплекса исследованы переходные процессы в глубоководной насосной установке и получены основные зависимости параметров системы от времени в различных сечениях трубопровода. Установлено, что колебания давлений и вызванные ими динамические напряжения могут достигать критических значений и существенным образом влиять на работоспособность установки вплоть до нарушения ее целостности.

Дальнейшим этапом работы является применение разработанного комплекса HydroWorks 2p для решения различных прикладных задач по расчетам глубоководных добычных установок и внесение соответствующих усовершенствований и надстроек в существующий программный комплекс.

Список литературы / References

1. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах / Фокс Д.А. – М.: Энергоиздат, 1981. – 248 с.
Foks D.A. Hydraulic analysis of un-steady flow in conduits / Foks D.A. – М.: Energoizdat, 1981. – 248 p.
2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Нигматулин Р.И. – М.: Наука, 1987, ч. 1. – 464 с.
Nigmatulin R.I. Dynamics of polyphase medium / Nigmatulin R.I. – М.: Nauka, 1987, part. 1. – 464 p.

3. *Картвелишвили Н.А.* Динамика напорных трубопроводов / Картвелишвили Н.А. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
Kartvelishvili N.A. Pressure conduit dynamics / Kartvelishvili N.A. – М.: Energiya, 1979. – 224 p.
4. *Махарадзе Л.И.* Нестационарные процессы в напорных гидротранспортных системах и защита от гидравлических ударов / Махарадзе Л.И., Кирмелашвили Г.И. – Тбилиси: Мецниереба, 1986. – 152 с.
Makharadze L.I. Non-stationary processes in pressure hydrotransportation system and hydraulic shock protection / Makharadze L.I., Kirmelashvili G.I. – Tbilisi: Metsniereba, 1986. – 152 p.
5. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения / Уоллис Г. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
Wollis G. Univariate two-phase flows / Wollis G. – М.: Mir, 1972. – 440 p.
6. *Кириченко В.Е.* Исследование параметров гидроудара при переходных режимах в глубоководных гидроподъемах / Кириченко В.Е., Романюков А.В., Татуревич А.А. // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2009. – №1. – С. 37–45.
Kirichenko V.Ye. Hydraulic shock parameters study during transitional mode in deep-water hydraulic hoist / Kirichenko V.Ye., Romanukov A.V., Taturevich A.A. // Naukovyi visnyk NGU. – Dnipropetrovsk: NGU. – 2009. – No.1. – P. 37–45.
7. *Чарный И.А.* Неуставившееся движение реальной жидкости в трубах / Чарный И.А. – М.: Недра, 1975. – 296 с.
Charny I.A. Un-steady flow of real liquid in pipes / Charny I.A. – М.: Nedra, 1975. – 296 p.
8. *Кириченко Є.О.* Наукове обґрунтування параметрів трубних систем для гідропідйому корисних копалин: Автореф. дис. ... доктора техн. наук / Кириченко Євген Олексійович; Національна гірнична академія України. – Д., 2001.
Kurychenko Ye.O. Scientific substantiation of pipe system parameters for hydraulic hoisting of minerals: Abstract of the thesis ... Dr Sci. (Tech.) / Kurychenko Yevgen Oleksiovych; Natsionalna hirnycha akademiia Ukrainy. – D., 2001.
9. *Вуд А.* Звуковые волны и их применение / Вуд А. – М.–Л.: Гостехтеоретиздат, 1934. – 284 с.
Wood A. Sound waves and their application / Wood A. – М.–Л.: Gostekhizdat, 1934. – 284 p.
10. *Разработка многофункциональной динамической модели многофазной среды применительно к эрлифтному гидроподъему* / [О.Г. Гоман, Е.А. Кириченко, В.Е. Кириченко и др.] // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2008. – №8. – С. 89 – 93.
Design of multifunctional dynamic model of polyphase medium concerning airlift hydraulic hoisting / [O.G. Goman, Ye.A. Kirichenko, V.Ye. Kirichenko, A.V. Romanukov] // Naukovyi visnyk NGU. – Dnipropetrovsk: NGU. – 2008. – No.8. – P. 89–93.
11. *К вопросу разработки численного метода для расчета динамики многофазных потоков* / Е.А. Кириченко, В.Г. Шворак, В.Е. Кириченко, А.В. Романюков, А.А. Татуревич // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2011. – №2. – С. 141 – 148.
On the issue of numerical method designing for calculation of multiphase flow dynamics / Ye.A. Kirichenko, A.V. Romanukov, V.G. Shvorak, A.V. Romanukov, A.A. Taturevich // Naukovyi visnyk NGU. – Dnipropetrovsk: NGU. – 2011. – No.2. – P. 141–148.
12. *Определение скорости распространения волн давления в элементах глубоководного эрлифтного гидроподъема* / [О.Г. Гоман, Е.А. Кириченко, В.Е. Кириченко и др.] // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2008. – №9. – С. 77 – 81.
Estimation of pressure-wave travel speed in components of deep-water airlift hydraulic hoist / [O.G. Goman, Ye.A. Kirichenko, V.Ye. Kirichenko et al.] // Naukovyi visnyk NGU. – Dnipropetrovsk: NGU. – 2008. – №9. – P. 77–81
13. *Кириченко В.Е.* Обоснование параметров глубоководных эрлифтов с учетом переходных процессов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кириченко Владимир Евгеньевич; Національна гірнична академія України. – Д., 2009.
Kirichenko V.Ye. substantiation of deep-water airlift parameters taking into account of transient processes: Abstract of a thesis ... Dr Sci. (Tech.) / Kirichenko Vladimir Yevgenyevich. Natsionalna hirnycha akademiia Ukrainy. – D., 2009.
- Уперше розроблено комплексну методику розрахунку динаміки двофазних потоків, що дозволяє досліджувати весь спектр нестационарних та перехідних процесів у глибоководних насосних установках та забезпечує точність, необхідну для даного класу задач. На базі розробленої методики складено програмний комплекс HydroWorks 2p, що дозволяє визначати параметри нестационарних та перехідних режимів у глибоководних насосних установках. З використанням даного комплексу встановлено, що коливання тисків ти спричинені ними динамічні напруження часто досягають критичних значень, що може бути небезпечним у плані працездатності установки та порушення її цілісності.
- Ключові слова:** *гідросуміш, гідропідйом, насосний гідропідйом, тверді корисні копалини, глибоководний видобуток*
- A comprehensive methodology for the calculation of dynamics of two-phase flows has been first developed. The methodology allows studying the whole spectrum of transient processes in the deep-water pump-based installations and provides the precision level needed for such kind of problems. On the basis of the developed methodology special HydroWorks 2p software has been developed. It allows defining the parameters of transient processes in the deep-water pumping installations. By using the software it has been determined that pressure oscillations and ensuing dynamic stresses often reach critical values, which may endanger operability of the installation and lead to violation of its integrity.
- Keywords:** *slurry, hydraulic hoist, pump-based hydraulic hoist, solid minerals, deep-sea mining*
- Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Самусею. Дата надходження рукопису 25.01.11*