

4. Руководства по применению на шахтах Донбасса акустических способов контроля состояния призабойной части выбросоопасного пласта (согласованы с Госнадзорохрантруда и утверждены Мингулепромом Украины). – Макеевка: МакНИИ, 1996. - 58 с.

5. Зорин А.Н., Колесников В.Г., Минеев С.П., Прусова А.А., Ковтун Е.Д. Управление состоянием горного массива. К.: Наукова думка, 1986. – 211 с.

6. Лунев С.Г., Бунчиков В.Н. К обоснованию параметров аппаратуры для передачи акустического сигнала на поверхность // Вісник НГУ, 1999. - №6. - С. 44-46.

7. А.с. № 1714160, СССР Способ волнового воздействия на горный массив / В.Н. Потураев, А.Г. Червоненко, С.П. Минеев, В.С. Бабенко, А.А. Прусова. - 1992. - Бюл. 7. - 11 с.

8. А.с. № 1652562, СССР Способ управления кровлей на выбросоопасных пластах / В.Н. Потураев, С.П. Минеев, Л.А. Вайнштейн, А.А. Рубинский, В.С. Бабенко, А.А. Прусова. -1991. - Бюл. 20. – 9 с.

**УДК [622.648:621.867.7/.8]:532.5**

Канд. техн. наук, с.н.с. Е.В. Семененко,  
инж. II кат. О.В. Сидорина,  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАПОРНЫХ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК**

Отримана система рівнянь, що описують роботу напірної гідротранспортної установки в несталому режимі. Система враховує характеристики трубопроводу, насосів, зумпфа, гідросуміші та матеріалу, що транспортується. На основі розв'язання запропонованої системи отримані умови стійкості стаціонарних режимів роботи напірної гідротранспортної установки.

### **THE STEADINESS ESTIMATION OF WORKING CONDITIONS OF FORCING HYDROTRANSPORT PLANTS**

The set of equations is received, which circumscribes the work of forcing hydrotransport plant in unsteady conditions. The set of equations takes into account the behaviour of the pipeline, of the pumps, of the sump, of the hydraulic liquid and of the transporting material. On the basis of solution of the offered set of equations stability conditions of the forcing hydrotransport plants time-independent operating mode are obtained.

Опыт работы горных предприятий Украины за последние десять лет свидетельствует о том, что модернизация технологий добычи и переработки минерального сырья в направлении экологической безопасности, а также энерго- и ресурсосбережения невозможна без внедрения систем напорного гидротранспортирования [1-5]. Однако постоянно возрастающая потребность в минерально-сырьевых ресурсах, ограниченность разведанных запасов и ухудшение качества сырья приводят к колебаниям параметров режимов работы гидротранспортных установок, что снижает эффективность и надежность их функционирования. Результаты исследований показывают, что современные гидротранспортные установки горных предприятий до 30-40% времени эксплуатации работают в нестационарных и неустановившихся режимах, а большая часть отказов напорных гидротранспортных установок является следствием таких режимов [1-3].

Ведущие отечественные предприятия и организации, проектирующие горные предприятия, такие, как Кривбасспроект, Укрگیпромез, Укрگیпроруда, а также зарубежные компании, обеспечивающие подбор и поставку оборудования для гидротранспортных комплексов, такие, как GJW, Warman, Sheekar Corporation,

рассматривают при проектировании только стационарные режимы работы, не производя оценки их устойчивости при возмущении основных параметров. Это обусловлено тем, что соответствующие теоретические методы оценки существуют только для трубопроводных систем, перемещающих однородные континуумы [6], а для гидротранспортных комплексов, перемещающих гидросмеси, такие методы отсутствуют. Известны исследования, связанные с расчетом критических скоростей и гидравлических уклонов при движении гидросмеси [3, 4], а также работы по изучению нестационарных и динамических явлений в трубопроводах гидротранспортных установок [5]. Однако эти исследования направлены на описание волновых и колебательных процессов в трубопроводе, возникающих при запуске или внезапной остановке, и не рассматривают вопросы устойчивости режимов работы, а также пути ее обеспечения.

Цель статьи заключается в разработке модели напорной гидротранспортной установки при работе в нестационарном режиме и определении условий, обеспечивающих устойчивость стационарных режимов ее работы.

На основании законов сохранения массы и импульса, а также с учетом расходно-напорных характеристик насоса и трубопровода работу напорной гидротранспортной установки в нестационарном режиме можно описать следующей системой уравнений [7]:

$$2Q \frac{dS}{dt} + (\rho + S) \frac{dQ}{dt} = 0; \quad (1)$$

$$Q \frac{dS}{dt} + (\rho + S) \frac{dQ}{dt} = \wp \rho H_a \left[ \left( \frac{D_0}{D} \right)^2 - 1 \right] + \wp \rho A_0; \quad (1)$$

$$\varphi_1(h) \frac{dS}{dt} + \varphi_2(h) (\rho + S) \frac{dh}{dt} = \frac{Q_S}{C_a} (1 - \rho) + \rho \frac{Q_F}{C_a} - (\rho + S) \Psi; \quad (1)$$

$$\wp = \frac{\pi D^2 g}{4L}; \quad A_0 = (a + [\rho + S] \chi \alpha) Q^2 + \frac{b}{Q} + c - (\rho + S) \chi (\gamma - \beta Q); \quad h = \frac{H_Z}{D_Z};$$

$$\varphi_1(h) = (1 + 2ctg \vartheta h + ctg^2 \vartheta h^2) h; \quad \varphi_2(h) = 1 + 4ctg \vartheta h + 3ctg^2 \vartheta h^2; \quad C_a = \frac{4\psi}{3} D_Z^3;$$

$$\rho = \frac{1}{Ar_1 R_1 + Ar_2 R_2 + Ar_3 R_3}; \quad Ar_i = \frac{\rho_i - \rho_o}{\rho_o}; \quad \delta = 1 - K_0 (0,004R_1 + 0,04R_2 + 0,09R_3);$$

$$\Psi = \frac{2 \cos \left( \frac{1}{3} \arccos \left( - \frac{2 + 9\Phi + 27 \frac{b}{\chi\beta} \left( \frac{a + \alpha\chi}{\chi\beta} \right)^2}{6\sqrt{3} [1 + 3\Phi]^{3/2}} \right) \right) \sqrt{1 + 3\Phi} - \sqrt{3}}{3\sqrt{3} \left( \frac{a + \alpha\chi}{\chi\beta} \right) C_a}; \quad \Phi = \left( \frac{\gamma\chi - c}{\chi\beta} \right) \left( \frac{a + \alpha\chi}{\chi\beta} \right);$$

$$a = \frac{8(1 + 2Ar_1R_1S - Ar_1R_1^2S^2)}{\pi^2 g(1 + Ar_1R_1S)} \left( \xi + 0.11L \frac{\Delta^{0.25}}{D^{1.25}} \right); \quad b = \frac{\pi Ar_2(Ar_2 - Ar_1R_1S)R_2}{12.5(1 + Ar_1R_1S)} SwD^{2.5} L \cos\theta;$$

$$c = \frac{0.3S(Ar_3 - Ar_1R_1S)R_3}{(1 + Ar_1R_1S)S} fL \cos\theta + (Z - Z_0 - H_Z)(1 + Ar_1R_1S); \quad \chi = \frac{\rho + \delta S}{\rho + S} (1 + Ar_1R_1S),$$

где  $K_0$  – коэффициент, зависящий от типа насоса [4];  $R_i$  – объемная доля частиц  $i$ -го типа в транспортируемом материале (1 – тонкие, 2 – мелкие, 3 – кусковые) [3, 5];  $Ar_i$  – параметр Архимеда частиц  $i$ -го типа;  $S$  – объемная доля частиц в потоке;  $\rho_i$  – плотность частиц  $i$ -го типа;  $\xi$  – коэффициент местных гидравлических сопротивлений;  $D$  – диаметр напорного трубопровода;  $\Delta$  – шероховатость внутренней поверхности трубопровода;  $\gamma, \beta, \alpha$  – коэффициенты аппроксимации расходно-напорной характеристики насоса при работе на воде полиномом второй степени  $\gamma - \beta Q - \alpha Q^2$ ;  $Q$  – подача;  $\chi$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации гидросмеси и свойств транспортируемого материала;  $\rho_o$  – плотность воды;  $a, b, c$  – коэффициенты расходно-напорной характеристики магистрали;  $g$  – ускорение свободного падения;  $L$  – длина трубопровода;  $d_2$  – средневзвешенный диаметр мелких частиц;  $\theta$  – угол наклона магистрали к горизонту;  $w$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры гидросмеси на гидравлическую крупность мелких частиц [1, 2, 6];  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц кусковой фракции о стенку трубопровода;  $Z$  – геодезическая отметка конца магистрали;  $Z_0$  – геодезическая отметка начала магистрали;  $H_Z$  – уровень гидросмеси в зумпфе;  $t$  – время;  $C_a$  – акустическая гибкость зумпфа [6, 7];  $\wp$  – акустическая характеристика трубопровода [7];  $\psi$  – коэффициент, учитывающий форму поперечного сечения зумпфа;  $D_Z$  – диаметр дна зумпфа;  $\vartheta$  – угол наклона образующей боковой стенки зумпфа к горизонту;  $h$  – относительная высота уровня гидросмеси в зумпфе;  $D_0$  – диаметр всасывающего трубопровода;  $\Psi$  – функция, выражающая зависимость подачи гидросмеси через трубопровод от концентрации и перепада давлений;  $Q_S$  – объемный расход транспортируемого материала, подаваемого в зумпф;  $Q_F$  – объемный расход воды, подаваемой в зумпф;  $H_a$  – атмосферное давление в метрах водяного столба.

На основании уравнений (1) – (3) производится оценка устойчивости стационарного режима работы, при котором возможны колебания концентрации и расхода гидросмеси в трубопроводе, а также высоты гидросмеси в зумпфе. Для этого все параметры стационарного режима, по которым производится оценка устойчивости, представляют в виде суммы стационарного значения и величины возмущения параметра [6, 7]. После преобразований, сохранив только линейные относительно возмущений члены, получим следующую систему уравнений относительно возмущений исследуемых параметров [7]:

$$2Q_* \frac{dc}{dt} + \eta \frac{dq}{dt} = 0; \quad (4)$$

$$Q_* \frac{dc}{dt} + \eta \frac{dq}{dt} = A_1 q + B_1 c + D_1 p; \quad (5)$$

$$\varphi_1^* \frac{dc}{dt} + \varphi_2^* \eta \frac{dp}{dt} = B_2 c + D_2 p; \quad (6)$$

$$A_1 = \wp \rho \left( 2aQ_* - \frac{b}{Q_*} + \eta \chi (\beta + 2\alpha Q_*) \right); \quad \eta = \rho + S_*;$$

$$B_1 = \wp \rho \left( Q_*^2 \frac{\partial a}{\partial S} + \frac{1}{Q_*} \frac{\partial b}{\partial S} + \frac{\partial \gamma}{\partial S} - \left( \chi + \eta \frac{\partial \chi}{\partial S} \right) (\gamma - \beta Q_* - \alpha Q_*^2) \right); \quad D_1 = -\wp \rho \frac{1 + Ar_1 R_1 S}{D_z};$$

$$B_2 = -\left( \frac{Q_S}{C_a} (1 - \rho) + \rho \frac{Q_F}{C_a} \right) \left( \Psi_* + \eta \frac{\partial \Psi}{\partial S} \right); \quad D_2 = -\left( \frac{Q_S}{C_a} (1 - \rho) + \rho \frac{Q_F}{C_a} \right) \eta \frac{\partial \Psi}{\partial h};$$

где  $\Psi_*$  – значение функции  $\Psi$  при стационарном режиме;  $S_*$  – концентрация гидросмеси при стационарном режиме;  $c$  – возмущение концентрации гидросмеси;  $Q_*$  – подача гидросмеси при стационарном режиме;  $q$  – возмущение подачи гидросмеси;  $h_*$  – относительная величина уровня гидросмеси в зумпфе при стационарном режиме;  $p$  – возмущение относительной величины уровня гидросмеси в зумпфе.

Анализ результатов расчетов производных от величин, входящих в коэффициенты уравнений (4) – (6), показывает, что наиболее существенно эти величины зависят от концентрации гидросмеси (см. рис.1 – 4), тогда как их зависимость от параметра  $h$  при проведении инженерных расчетов может не учитываться.

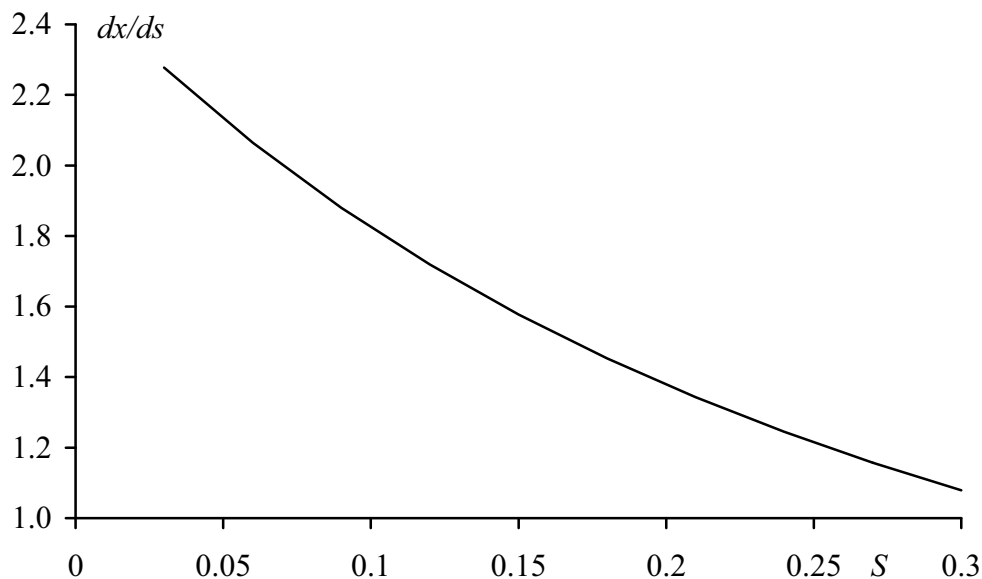


Рис. 1 – Зависимость величины  $\frac{dx}{ds}$  от объемной доли твердого в гидросмеси

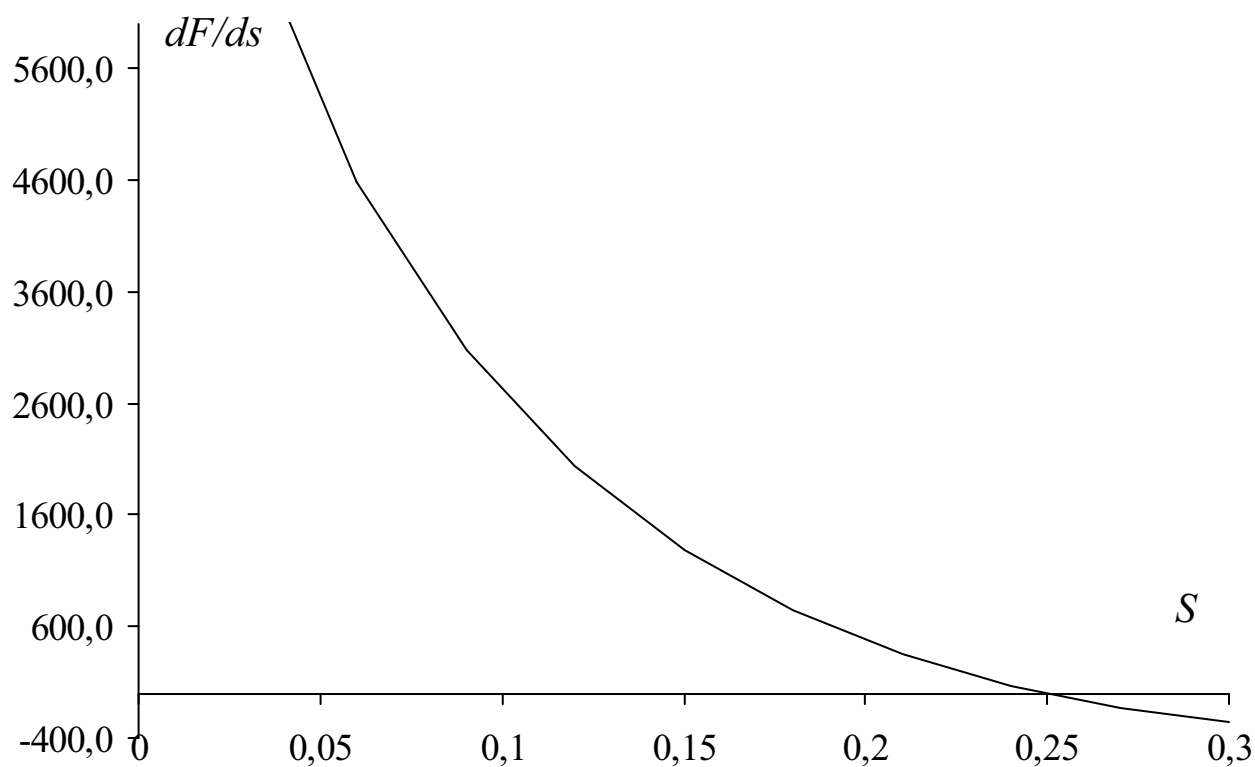


Рис. 2 – Зависимость величины  $\frac{dF}{dS}$  от объемной доли твердого в гидросмеси

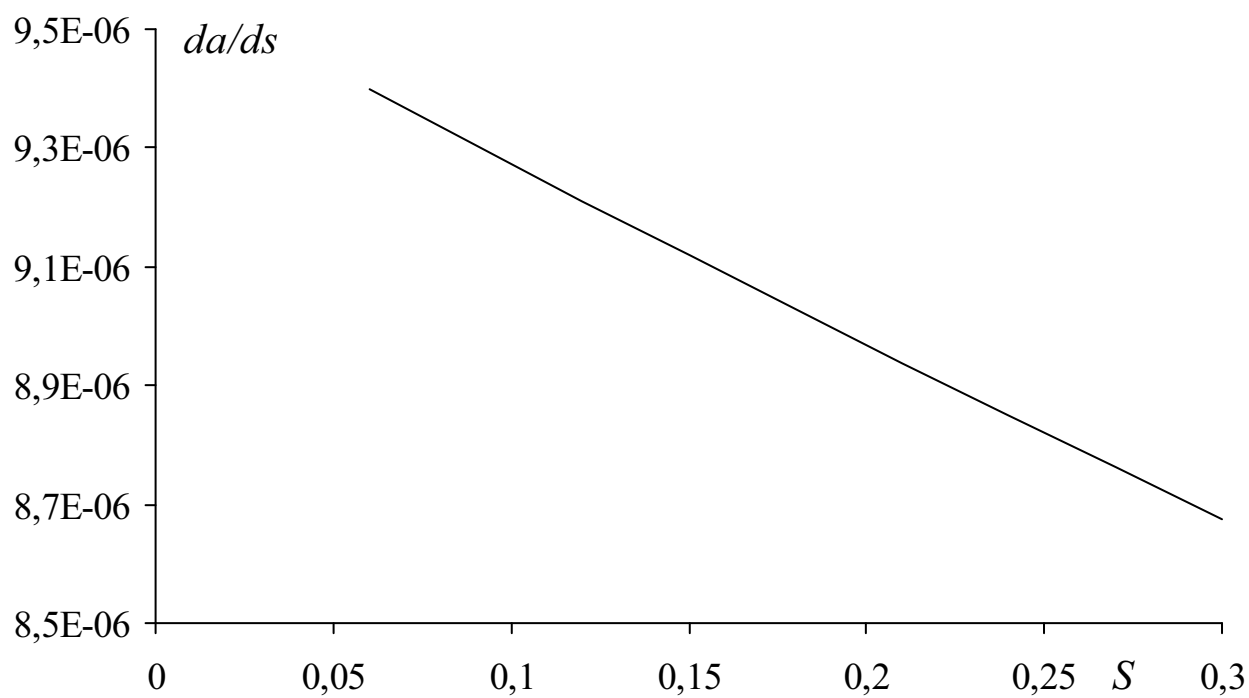


Рис. 3 – Зависимость величины  $\frac{da}{dS}$  от объемной доли твердого в гидросмеси

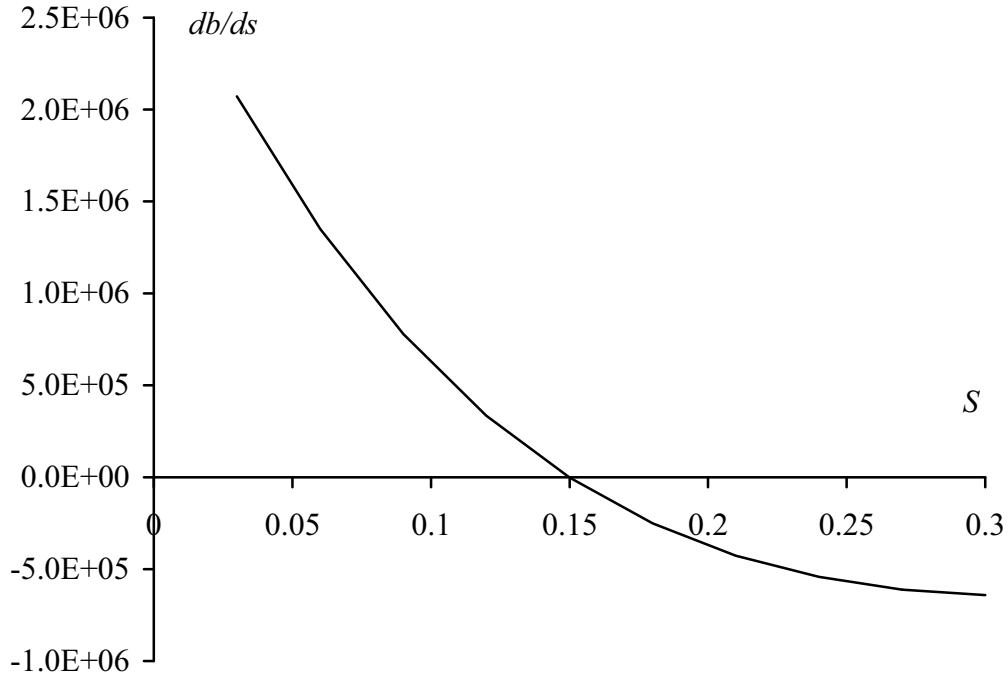


Рис. 4 – Зависимость величины  $\frac{db}{dS}$  от объемной доли твердого в гидросмеси

Из рис. 2-4 видно, что все рассматриваемые величины с увеличением концентрации гидросмеси возрастают, а их производные убывают. При этом зависимости величин  $F$  и  $b$  имеют максимумы при объемной доле твердого в гидросмеси более 10%.

Анализ системы уравнений (4) – (6) показывает, что зависимость величин  $q$  и  $c$  от времени выражается уравнением вида

$$\frac{d^3x}{dt^3} + \varepsilon \frac{d^2x}{dt^2} + \sigma \frac{dx}{dt} = 0; \quad (7)$$

$$\varepsilon = \wp \rho \left( \frac{E_0}{Q^2} + \frac{E_1}{Q} - E_2 - E_3 Q \right); \quad \sigma = \frac{\wp \rho}{\varphi_2^* C_a} \left( \frac{W_0}{Q^2} + \frac{W_1}{Q} - W_2 - W_3 Q \right); \quad \chi_1 = \frac{\chi}{\eta} + \frac{\partial \chi}{\partial S};$$

$$\psi_1 = \Psi_* + \eta \frac{\partial \Psi}{\partial S}; \quad E_1 = \frac{\varphi_1^*}{\varphi_2^*} \left[ \gamma \chi_1 - \frac{\partial b}{\partial S} \right] - \frac{1 + Ar_1 R_1 S}{D_z}; \quad W_0 = \frac{\partial \Psi}{\partial h} \frac{\partial b}{\partial S} - 2b \psi_1;$$

$$E_2 = \beta \left( 2\chi + \gamma \chi_1 \frac{\varphi_1^*}{\varphi_2^*} \right) + \frac{3\psi_1}{\varphi_2^* C_a \wp \rho}; \quad E_0 = \frac{1}{\eta} \left( 2b - \frac{\varphi_1^*}{\varphi_2^*} \frac{\partial b}{\partial S} \right); \quad W_2 = \beta \left[ \frac{\partial \Psi}{\partial h} \chi_1 - 2\chi \eta \psi_1 \right];$$

$$E_3 = 4 \left[ \frac{a}{\eta} + \alpha \chi \right] + \frac{\varphi_1^*}{\varphi_2^*} \left[ \frac{1}{\eta} \frac{\partial a}{\partial S} + \alpha \chi_1 \right]; \quad W_1 = -\frac{1 + Ar_1 R_1 S}{D_z} \psi_1 - \left[ \gamma \chi_1 - \frac{\partial c}{\partial S} \right] \frac{\partial \Psi}{\partial h};$$

$$W_3 = \frac{\partial \Psi}{\partial h} \left[ \frac{\partial a}{\partial S} + \alpha \chi_1 \right] - 4[a + \eta \alpha \chi] \psi_1.$$

Очевидно, что стационарный режим работы гидротранспортной установки будет устойчивым относительно возмущений подачи и концентрации гидросмеси, если решение уравнения (7) будет убывать со временем.

$$x(t) = \begin{cases} C_0 + \left[ C_1 \operatorname{ch}\left(\frac{t}{2}\sqrt{\varepsilon^2 - 4\sigma}\right) + C_2 \operatorname{sh}\left(\frac{t}{2}\sqrt{\varepsilon^2 - 4\sigma}\right) \right] \ell^{-\frac{\varepsilon}{2}t}; & \varepsilon > \sqrt{2\sigma} \\ C_0 + [C_2 + tC_1] \ell^{-\frac{\varepsilon}{2}t}; & \varepsilon = \sqrt{2\sigma} \\ C_0 + C_1 \cos\left(\frac{t}{2}\sqrt{4\sigma - \varepsilon^2}\right) \ell^{-\frac{\varepsilon}{2}t}; & \varepsilon < \sqrt{2\sigma} \\ C_0 + C_1 \cos(\sqrt{\sigma}t); & \varepsilon = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где  $C_0, C_1, C_2$  – произвольные постоянные интегрирования.

Анализ решений уравнения (7) показывает, что условия их невозрастания с течением времени, а также сами решения имеют вид

$$Q^3 + \frac{W_2}{W_3} Q^2 - \frac{W_1}{W_3} Q - \frac{W_0}{W_3} < 0; \quad Q^3 + \frac{E_2}{E_3} Q^2 - \frac{E_1}{E_3} Q - \frac{E_0}{E_3} \leq 0. \quad (9)$$

Неравенства (9) позволяют рассчитать граничную зависимость подачи от концентрации гидросмеси, определяющую устойчивость стационарных режимов работы напорной гидротранспортной установки. Зависимость (9) с учетом формулы для критической скорости гидротранспортирования [1 – 5] может быть преобразована в неравенство для расчета предельно допустимой концентрации гидросмеси, обеспечивающей устойчивые сверхкритические режимы работы.

Параметры колебательных процессов, такие, как коэффициент затухания и частота колебаний, во всех случаях (8) однозначно определяются величинами  $\varepsilon$  и  $\sigma$ , для расчета которых можно использовать формулы

$$\begin{aligned} \varepsilon = \wp \rho \frac{\varphi_1^*}{\varphi_2^*} & \left[ \left( \frac{\gamma}{Q} - \beta\gamma - Q\alpha \right) \left( \frac{\chi}{\eta} + \frac{\partial\chi}{\partial S} \right) - \frac{1 + \eta}{Q\eta} \frac{\partial b}{\partial S} - \frac{Q}{\eta} \frac{\partial a}{\partial S} \right] - \frac{3\Psi_*}{\varphi_2^* C_a} - \\ & - \wp \rho 2\chi(\beta + 2Q\alpha) - \frac{3\eta}{\varphi_2^* C_a} \frac{\partial\Psi}{\partial S} - \frac{2\wp \rho}{\eta} \left( 2Qa - \frac{b}{Q^2} \right) - \wp \rho \frac{1 + Ar_1 R_1 S}{QD_z}, \\ \sigma = \frac{\wp \rho}{\varphi_2^* C_a} & \left[ \frac{1}{Q^2} \frac{\partial b}{\partial S} + \frac{1}{Q} \frac{\partial c}{\partial S} - Q \frac{\partial a}{\partial S} - \left( \frac{\gamma}{Q} + Q\alpha + \beta \right) \left( \frac{\chi}{\eta} + \frac{\partial\chi}{\partial S} \right) \right] \frac{\partial\Psi}{\partial h} + \\ & + \frac{\wp \rho}{\varphi_2^* C_a} \left[ 2\chi\eta(\beta + 2Q\alpha) + 4Qa - \frac{2b}{Q^2} - \frac{1 + Ar_1 R_1 S}{QD_z} \right] \left( \Psi_* + \eta \frac{\partial\Psi}{\partial S} \right). \end{aligned}$$

Обобщая результаты работы, изложенные в настоящей статье, можно сделать следующие выводы. С использованием разработанной математической модели

напорной гидротранспортной установки произведена оценка устойчивости стационарных режимов работы, на основании чего сформулированы ограничения на параметры течения, позволяющие осуществить выбор метода регулирования.

Для напорных гидротранспортных установок зависимости возмущений по расходу и концентрации гидросмеси описываются одинаковыми дифференциальными однородными уравнениями третьего порядка с постоянными коэффициентами, причем условием устойчивости стационарного режима является положительность коэффициентов при первой и второй производной. При этом незатухающие и невозрастающие колебания расхода и концентрации гидросмеси возможны в том случае, когда коэффициент при второй производной равен нулю.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко и др. – Севастополь: «Вебер», 2002. – 247 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко и др. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш. Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
4. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
5. Надежность и долговечность напорных гидротранспортных систем / А.К. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили, Д.Г. Сулаберидзе, Л.А. Алехин. – М.: Недра, 1984. – 119 с.
6. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
7. Моделирование многофазных потоков в системах трубопроводного транспорта горных предприятий: Отчет о НИР (промежуточный) / ИГТМ НАН Украины; Рук. Е. Семененко. – Днепропетровск, 2003. – 35 с.

УДК 622.537.8

М.Г. Тиркель (УкрНИМИ)

## НОВЫЙ ВАРИАНТ ТОМОГРАФИИ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОГНОЗЕ СТРОЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА

У цій статті розглянуті теоретичні основи і наведений приклад практичного застосування методу прогнозу будівництва середовища за допомогою швидкісної і амплітудної томографії на хвилях, відбитих від різкої акустичної границі. Досвід застосування підходу показав доцільність його використання як на етапі попереднього аналізу апріорних даних про модель методами математичного моделювання для вироблення найбільш оптимальних умов проведення експериментів, так і на етапі аналізу їх результатів.

## THE NEW VARIANT OF TOMOGRAPHY AT THE SEISMIC FORECAST OF A STRUCTURE OF A MOUNTAIN MASSIF

This article considers theory and gives a practical example of the method to predict structure of the strata with the help of velocity and amplitude tomography of waves reflected from the sharp acoustic boundary. Experience of approach employment has shown advisability of its use both at the stage for preliminary analysis of a priori data on the model by mathematical modeling (in order to develop the most optimal conditions for making experiments) and at the stage of analysis of their results.

Прогноз строения горного массива сейсмическим методом опирается на использование наборов критериев, свидетельствующих о наличии тех или иных геологических структур и аномалий. При этом одним из наиболее эффективных подходов в определении характеристик аномалий является сейсмическая томография.