УДК 622.673.1 : 681.514.54

Мл. науч. сотр. Б.С. Послед
(ИГТМ НАН Украины)

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАЗПОЗНАВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРОФИЛЕЙ ПРОВОДНИКОВ ЖЕСТКОЙ АРМИРОВКИ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭКСПРЕСС-ИСПЫТАНИЯХ СИСТЕМ «СОСУД-АРМИРОВКА»

У статті представлено вирішення задачі динамічної взаємодії шахтної підйомної судини з локальними дефектами профілів провідників жорсткого армування шахтних стволів. Описано алгоритм визначення динамічної реакції судини як пружного твердого тіла, що просторово деформується, з 5-ма ступенями свободи на дефекти профілів провідників різної конфігурації.

ALGORITHM FOR AUTOMATED RECOGNIZING OF LOCAL DEFECTS OF THE PROFILES OF CONDUCTORS OF RIGID MINE SHAFT REINFORCEMENT UNDER DYNAMIC EXPRESS-TESTING OF SYSTEMS “VESSEL- REINFORCEMENT”

The paper presents a solution to the problem of dynamic interaction mine hoisting vessel with local defects of the profile conductors of the rigid shaft reinforcement. It described an algorithm for determining the dynamic response of the vessel as an elastic of spatial deformable solids with 5 degrees of freedom on the defect of conductors profile of different configurations.

Дефекты пространственного расположения проводников в стволе могут возникать как при их монтаже, так и в процессе эксплуатации ствола (например, при горизонтальной подвижке слоев пород, как на стволах ЗЖРК). Чем дольше эксплуатируется ствол, тем большее количество разнообразных дефектов может возникнуть. Кроме этого, может существенно ухудшаться характер взаимодействия предохранительных башмаков с проводниками в местах локализации дефектов.

Наличие таких дефектов может приводить к систематическому нарушению плавности движения подъемного сосуда на одних и тех же локальных участках ствола. Такой режим движения может привести к возникновению аварийной ситуации или к преждевременному выходу оборудования из строя. К дефектам пространственного расположения проводников в стволе относятся:

- выступ (при движении подъемного сосуда вверх на стыке смежных проводников нижний край верхнего проводника смещен в ствол относительно верхнего края нижнего проводника; при движении подъемного сосуда вниз на стыке смежных проводников верхний край нижнего проводника смещен в ствол относительно нижнего края верхнего проводника; величины выступов могут колебаться от 3 до 10 мм);
- соскок (дефект, противоположный выступу; подъемный сосуд не ударяется в выступающий проводник, а соскакивает с него);
- винтообразный разворот проводников в вертикальной плоскости относительно проектного положения;

- стационарное или локальное параллельное смещение проводников в вертикальной плоскости относительно проектного положения в лоб или бок;

- стационарное или локальное сужение/расширение колеи;

В связи с тем, что срок эксплуатации шахтных стволов Украины значителен, а также в связи с частым проведением ремонтных работ в стволе (в частности, их углублению) задача о взаимодействии предохранительных башмаков подъемных сосудов с дефектами пространственного расположения проводников представляется весьма актуальной. Физическая и математическая постановка такой задачи, обоснование граничных и начальных условий приведены в работах [1, 2]. Там же показано, что исходная задача сводится к задаче об упругих колебаниях балки, нагруженной по торцам сверху и снизу известными (тестовыми) нагрузками. При отсутствии крутильных колебаний математическая постановка задачи имеет следующий вид.

Исходное уравнение:

$$\frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + a^2 \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = 0 \qquad , \tag{1}$$

где z – вертикальная координата точки контакта предохранительного башмака с дефектом, ось направлена вертикально вверх вдоль оси подъемного сосуда;

x – горизонтальная координата точки контакта предохранительного башмака с дефектом, ось направлена горизонтально от оси сосуда через точку контакта башмака с дефектом.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^2 x(0,t)}{\partial z^2} = -M^{\hat{a}}_{\acute{a}\acute{o}} = \eta_0(t); \qquad &&\frac{\partial^3 x(0,t)}{\partial z^3} = -N^{\hat{a}}_{\acute{a}\acute{o}} = \psi_0(t); \\ &\frac{\partial^2 x(l,t)}{\partial z^2} = -M^{\acute{\imath}}_{\acute{a}\acute{o}} = \eta_1(t); \qquad &&\frac{\partial^3 x(l,t)}{\partial z^3} = -N^{\acute{\imath}}_{\acute{a}\acute{o}} = \psi_1(t), \end{aligned} \tag{2}$$

где $M^{\hat{a}}_{\acute{a}\acute{o}}$, $M^{\acute{\imath}}_{\acute{a}\acute{o}}$, $N^{\hat{a}}_{\acute{a}\acute{o}}$, $N^{\acute{\imath}}_{\acute{a}\acute{o}}$ - изгибающие моменты и поперечные силы в точке контакта с дефектом, функции времени, l –длина балки.

Начальные условия:

$$x(z,0) = 0; \quad \frac{\partial x(z,0)}{\partial t} = 0. \tag{3}$$

Цель работы состоит в разработке алгоритма и построении общего решения полученной краевой задачи с учетом фактической формы локального дефекта профиля проводника, взаимодействующего с жестким предохранительным башмаком подъемного сосуда при его вертикальном движении по стволу по заданной диаграмме скорости.

Представляя решение краевой задачи (1)-(3) в виде:

$$x(z,t) = U(z,t) + u(z,t) \tag{4}$$

где *u(z,t)* – решение неоднородного уравнения колебаний, удовлетворяющее однородным граничным условиям; *U(z,t)* - произвольная функция координат z и t, удовлетворяющая неоднородным граничным условиям вида (2),
сводим ее к следующей.

Исходное уравнение:

$$\frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f(z,t) \tag{5}$$

где:

$$f(z,t) = -\left(\frac{\partial^4 U(z,t)}{\partial z^4} + a^2 \frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial t^2} \right) \tag{6}$$

Можно получить соответствующие однородные граничные условия, если подобрать произвольную функцию *U(z,t)* таким образом, чтобы удовлетворялись следующие условия:

$$\begin{aligned} &V(0,t) = \eta_0(t); \quad \frac{\partial V(0,t)}{\partial z} = \psi_0(t); \\ &V(l,t) = \eta_1(t); \quad \frac{\partial\, V(l,t)}{\partial z} = \psi_1(t); \end{aligned} \tag{7}$$

где:

$$V(z,t) = \frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial z^2} \tag{8}$$

В качестве функции *V(z,t)* можно использовать многочлен третьей степени:

$$V(z,t) = \widetilde{A}(t) + \widetilde{B}(t)\cdot z + \widetilde{C}(t)\cdot z^2 + \widetilde{D}(t)\cdot z^3, \tag{9}$$

где:

$$\tilde{A}(t) = \eta_0(t);$$
$$\tilde{B}(t) = \psi_0(t);$$
$$\tilde{C}(t) = \frac{3}{l^2}\left(\eta_1(t) - \eta_0(t)\right) - \frac{1}{l}\left(\psi_1(t) + 2\psi_0(t)\right); \tag{10}$$
$$\tilde{D}(t) = \frac{2}{l^3}\left(\eta_0(t) - \eta_1(t)\right) + \frac{1}{l^2}\left(\psi_0(t) + \psi_1(t)\right).$$

Соответственно, функция *U(z,t)* будет иметь такой вид:

$$U(z,t) = \tilde{A}(t)\cdot\frac{z^2}{2} + \tilde{B}(t)\cdot\frac{z^3}{6} + \tilde{C}(t)\cdot\frac{z^4}{12} + \tilde{D}(t)\cdot\frac{z^5}{20} \tag{11}$$

Кроме того, должны соблюдаться дополнительные условия:

$$\eta_0(0) = 0;\ \psi_0(0) = 0;\ \eta_1(0) = 0;\ \psi_1(0) = 0. \tag{12}$$

Исходя из вышеизложенного, граничные и начальные условия для уравнения (5) будут сдующими:

$$\frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial z^2} = 0;\ \frac{\partial^3 u(0,t)}{\partial z^3} = 0;\ \frac{\partial^2 u(l,t)}{\partial z^2} = 0;\ \frac{\partial^3 u(l,t)}{\partial z^3} = 0. \tag{13}$$

$$u(z,0) = 0;\ \frac{\partial u(z,0)}{\partial t} = 0. \tag{14}$$

Решение краевой задачи (5), (6), (13), (14) ищем в виде:

$$\boldsymbol{u(x,t) = \varphi(z)\cdot T(t)} \tag{15}$$

Подставляя (15) в однородное уравнение, соответствующее (5). Получаем два уравнения:

$$\frac{\varphi^{IV}(z)}{a^2\varphi(z)} = \mu, \tag{17}$$

$$-\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = \mu, \tag{18}$$

где *T(t)* – неизвестная функция времени.

Для того чтобы получилось ограниченное решение, константа μ должна быть вещественной и положительной: $\mu = \lambda^2$. Решение уравнения (18) имеет вид:

$$T(t) = r \cdot \cos(\lambda \cdot t + s) \tag{19}$$

Произвольные константы r и λ определяются в дальнейшем из начальных условий (14).

Уравнение собственных колебаний (17) приобретает вид:

$$\varphi^{IV}(z) - k^4 \varphi(z) = 0, \tag{20}$$

где:

$$k = \sqrt{a \cdot \lambda} \tag{21}$$

k – действительное число, так как ограниченное решение существует при $a\lambda > 0$.

Соответствующие граничные условия получаются из (13):

$$\varphi''(0) = 0;\ \varphi''(l) = 0;\ \varphi'''(0) = 0;\ \varphi'''(l) = 0. \tag{22}$$

Решение уравнения (20) ищем в виде:

$$\varphi(z) = A \cdot \cos(kz) + B \cdot \sin(kz) + C \cdot ch(kz) + D \cdot sh(kz) \tag{23}$$

Учитывая (20), (22) и (23) получаем частотное уравнение относительно собственных частот:

$$ch(kl) \cdot \cos(kl) = 1 \tag{24}$$

Уравнение (24) имеет бесчисленное количество решений. Первые пять из них приведены ниже:

$$\begin{gathered} \alpha_1 = k_1 \cdot l = 4.730041;\ \alpha_2 = k_2 \cdot l = 7.853204;\ \alpha_3 = k_3 \cdot l = 10.995608; \\ \alpha_4 = k_4 \cdot l = 14.137165;\ \alpha_5 = k_5 \cdot l = 17.278759. \end{gathered} \tag{25}$$

Окончательно, собственные функции имеют такой вид:

$$\varphi_i(z)=\left(\cos(k_iz)+ch(k_iz)\right)+\frac{\cos(\alpha_i)-ch(\alpha_i)}{sh(\alpha_i)-\sin(\alpha_i)}\left(\sin(k_iz)+sh(k_iz)\right) \quad (26)$$

Вычисляя определенный интеграл в пределах от 0 до l (по всей длине балки (высоте сосуда)) от произведения $\varphi_i(z)\cdot\varphi_j(z)$, $i\neq j$ с учетом (26), убеждаемся в ортогональности системы собственных функций

$$\int_0^l \varphi_i(z)\cdot\varphi_j(z)dz=0, \quad (27)$$

а, вычисляя определенный интеграл в пределах от *0* до l (по всей длине балки) от квадрата собственных функций с учетом (26), находим нормирующий множитель:

$$\int_0^l \varphi_i^2(z)dz=l \quad (28)$$

На следующем шаге необходимо найти коэффициенты разложения правой части (6) уравнения (5) по собственным функциям $\varphi_i(z)$:

$$f(z,t)=\sum_{i=0}^{\infty} f_i(t)\cdot\varphi_i(z) \quad (29)$$

Для этого сначала преобразуем (16) к виду, удобному для дальнейших вычислений:

$$f(z,t)=K(t)z^5+L(t)z^4+M(t)z^3+N(t)z^2+P(t)z+Q(t), \quad (30)$$

где:

$$K(t)=-\frac{a^2}{20}\left[\frac{2}{l^3}\left(\ddot{\eta}_0(t)-\ddot{\eta}_1(t)\right)+\frac{1}{l^2}\left(\ddot{\psi}_0(t)+\ddot{\psi}_1(t)\right)\right];$$

$$L(t)=\frac{a^2}{12}\left[\frac{3}{l^2}\left(\ddot{\eta}_0(t)-\ddot{\eta}_1(t)\right)+\frac{1}{l}\left(2\ddot{\psi}_0(t)+\ddot{\psi}_1(t)\right)\right];$$

$$M(t)=-\frac{a^2}{3}\ddot{\psi}_0(t);$$

(31)

$$N(t)=-\frac{a^2}{2}\ddot{\eta}_0(t);$$

$$P(t) = -\frac{12}{l^3}\left(\eta_0(t) - \eta_1(t)\right) - \frac{6}{l^2}\left(\psi_0(t) + \psi_1(t)\right)$$
$$Q(t) = \frac{6}{l^2}\left(\eta_0(t) - \eta_1(t)\right) + \frac{2}{l}\left(2\psi_0(t) + \psi_1(t)\right).$$

Произведя необходимые вычисления, получаем:

$$f_i(t) = \frac{2a^2}{l}\left[A_{\eta 0}(k_i)\ddot{\eta}_0(t) + A_{\eta 1}(k_i)\ddot{\eta}_1(t) + A_{\psi 0}(k_i)\ddot{\psi}_0(t) + A_{\psi 1}(k_i)\ddot{\psi}_1(t) \right], \qquad (32)$$

где:

$$A_{\eta 0}(k_i) = \frac{1}{k_i^3}\frac{\cos\alpha_i - ch\alpha_i}{sh\alpha_i - \sin\alpha_i};$$
$$A_{\eta 1}(k_i) = \frac{1}{k_i^3}\frac{\sin\alpha_i sh\alpha_i}{sh\alpha_i - \sin\alpha_i};$$
$$A_{\psi 0} = \frac{1}{k_i^4}\left[\frac{\alpha_i \sin\alpha_i sh\alpha_i + \cos\alpha_i sh\alpha_i - \sin\alpha_i ch\alpha_i}{sh\alpha_i - \sin\alpha_i} - 2\right]; \qquad (33)$$
$$A_{\psi 1} = \frac{1}{k_i^4}\frac{\cos\alpha_i sh\alpha_i - \sin\alpha_i ch\alpha_i}{sh\alpha_i - \sin\alpha_i}.$$

Из выражения (32) видно, что коэффициенты $f_i(t)$ разложения правой части (16) неоднородного уравнения (15) по собственным функциям (26) зависит только от вторых производных по времени от граничных условий $\eta_0(t)$, $\eta_1(t)$, $\psi_0(t)$, $\psi_1(t)$. Реальная зависимость функции дефекта от времени контакта с башмаком сосуда определяется его геометрической формой и скоростью вертикального движения сосуда. Отсюда следует, что чем большую степень нелинейности в разложении по времени будет иметь функция дефекта при встрече с башмаком, тем большим будет его влияние на дальнейшее поведение подъемного сосуда и динамическую деформацию его корпуса.

При экспресс-испытаниях систем «подъемный сосуд-армировка» динамические датчики устанавливаются на верхнем и нижнем поясах сосуда на предохранительных башмаках, а специализированная аппаратура с высокой скоростью развертки по времени в цифровой форме фиксирует поведение каждой точки корпуса, в которой установлены датчики, при соударениях с дефектными участками. Полученная информация позволяет промоделировать колебание корпуса подъемного сосуда, определить параметры его пространственных деформаций. Использование полученных соотношений и наборов цифровых данных со скоростной цифровой аппаратуры в специализированном программном обеспечении путем сопоставительного анализа позволяет оперативно определить форму дефекта и локализовать его по месту в стволе.

Выводы

1. В статье разработан алгоритм решения математической задачи моделирования взаимодействия между шахтным подъемным сосудом, представленным упругим деформируемым твердым телом с 5-тью степенями свободы, и проводниками жесткой армировки шахтного ствола с дефектами пространственного профиля.

2. Показано, что конфигурация дефекта влияет на форму граничных условий задачи в виде возникающих при контакте изгибающих моментов и поперечных сил на верхнем и нижнем поясах рамы сосуда.

3. Определены собственные числа и собственные функции колебательного процесса.

4. Получено общее решение задачи поведения шахтного подъемного сосуда при взаимодействии с локальным дефектом проводника произвольной конфигурации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин, С.Р. Взаимодействие предохранительных башмаков подъемных сосудов с выступами на стыках проводников / С.Р.Ильин, Б.С. Послед // Геотехническая механика: Сб. научных трудов ИГТМ НАН Украины – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2001 – вып. 29. – С.189-195.

2. Ильин, С.Р. Построение диагностической модели для автоматизированного определения мест наезда подъемных сосудов на уступы в стыках проводников жесткой армировки вертикальных стволов / С.Р. Ильин, Б.С. Послед // Геотехническая механика: Сб. научных трудов ИГТМ НАН Украины – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2003 – вып. 40. – С.245-255.

УДК 622.831

Науч. сотр. Ю.Ю. Булич
мл. науч. сотр. С.А. Головко
(ИГТМ НАН Украины)

ВЛИЯНИЕ РАЗРЫХЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРЕДЕЛЬНО-НАПРЯЖЕННЫХ ПОРОД К СНИЖЕНИЮ МИНИМАЛЬНОГО ГЛАВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЗА ПРЕДЕЛОМ ПРОЧНОСТИ

У роботі проведено порівняльний аналіз стаціонарних траєкторій деформування порід за межею міцності зі сталими значеннями компонент бокових напружень із ділянками, де мінімальне напруження зменшувалося. Встановлено, що в умовах нерівно-компонентного стискання зниження мінімальної компоненти головних напружень за межею міцності поряд із розпушенням порід в напрямку цієї компоненти і крихким зниженням несучої здатності, супроводжується аномально високими значеннями коефіцієнта поперекових деформацій.

INFLUENCE OF DILATION ON PARAMETRES OF SENSITIVITY OF EXTREMLY STRESS OF ROCK MATERIAL TO DECREASE OF THE MINIMUM MAIN PRESSURE BEHIND PEAK OF STRENGTH

The publication the comparative analysis of results stationary trajectories of deformation of rock materials behind peak strength where lateral pressure were supported by constants with sites where the minimum main pressure decreased is resulted. It is determine, that in conditions decrease minimum components of the main pressure behind peak strength simultaneously with dilation rock materials in a direction of this components, and by fragile decrease in bearing ability is accompanied is abnormal high values of factor of cross-section deformations.