

## РЕСУРС ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СИСТЕМ “СОСУД-АРМИРОВКА” ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Храмов А.А.,

Донецкий государственный технический университет

*Исследовано движение подъемного сосуда в непрямолинейных и изношенных проводниках жесткой армировки вертикального шахтного ствола при наличии зазоров в кинематической паре «направляющее устройство – проводник». Установлен ресурс динамической устойчивости изнашиваемой системы «сосуд – армировка».*

*The movement of rising vessel in distorting and threadbaring guides of the hard armouring of vertical mining shaft with chinks in the kinematical pair “direction mechanism – guide” is investigated. The resource dynamicing of a stability distorting of system “vessel – armouring” is determined.*

Результаты исследований, изложенные в [1], позволяют обнаружить качественные особенности изменения динамических свойств рассматриваемой системы “сосуд-армировка” при износе конструктивных элементов: проводников и расстрелов.

Количественные критерии динамической устойчивости изнашиваемой системы возможно оценить при исследовании движения сосуда в непрямолинейных и определенным образом изношенных проводниках при наличии зазоров в кинематической паре “направляющее устройство-проводник”.

Уравнения движения в нелинейной постановке могут быть получены из линейной системы, приведенной в работе [2], путем замены восстанавливающих сил типа

$$C_{ix}(z+a) \cdot (x+a\psi \pm s\theta), \quad C_{iy}(z+a) \cdot (x+a\varphi)$$

нелинейными реакциями упругих проводников. Последние обращаются в ноль, когда модули перемещений направляющих устройств на сосуде

$$|x+a\psi \pm s\theta|, |x-b\psi \pm s\theta|, |y+a\varphi|, |y-b\varphi|$$

меньше соответствующих среднестатических боковых  $\Delta_B = \Delta_X = const$  и лобовых  $\Delta_L = \Delta_Y = const$  зазоров в кинематических парах скольжения.

Если проводники непрямолинейны (рис. 1) и искривления, отсчитываемые от некоторой условной вертикальной прямой по на-

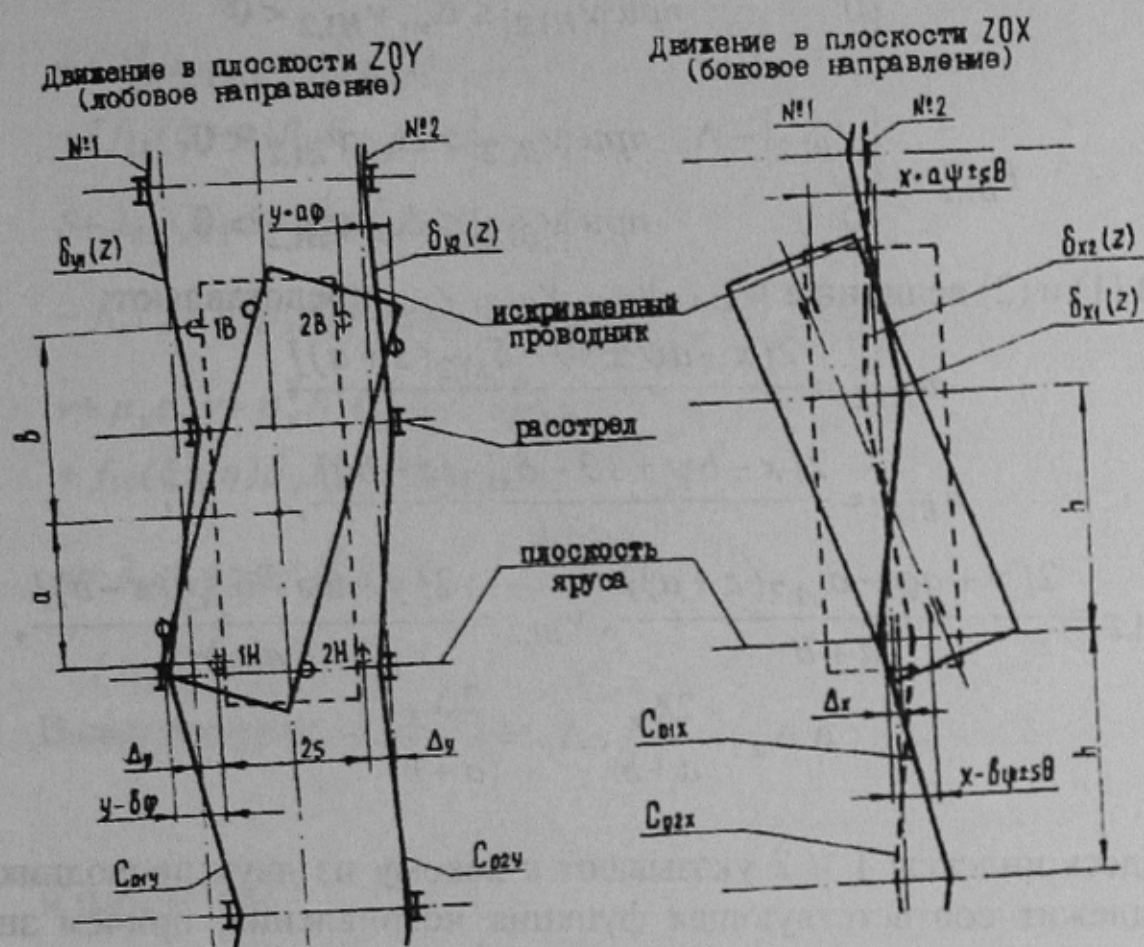


Рисунок 1 – Расчетная схема движения подъемного сосуда в искривленных проводниках жесткой армировки с зазорами в направляющих устройствах.

правлению осей X и Y, описываются случайными функциями  $\delta_x(z)$  и  $\delta_y(z)$ , то нелинейные восстанавливающие силы определяются не модулем перемещений направляющих устройств, а выражениями соответственно для бокового направления

$$F_{H1,2} = \begin{cases} (|u_{H1,2}| - \Delta_u) \text{sign} u_{H1,2} & \text{при } |u_{H1,2}| > \Delta_u \\ 0 & \text{при } |u_{H1,2}| \leq \Delta_u \end{cases}$$

$$F_{B1,2} = \begin{cases} (|u_{B1,2}| - \Delta_u) \text{sign} u_{B1,2} & \text{при } |u_{B1,2}| > \Delta_u \\ 0 & \text{при } |u_{B1,2}| \leq \Delta_u \end{cases}$$

и лобового

$$P_{H1,2} = \begin{cases} |v_{H1,2}| - \Delta_v & \text{при } |v_{H1,2}| > \Delta_v, v_{H1,2} > 0 \\ 0 & \text{при } |v_{H1,2}| \leq \Delta_v, v_{H1,2} < 0 \end{cases},$$

$$P_{B1,2} = \begin{cases} |v_{B1,2}| - \Delta_v & \text{при } |v_{B1,2}| > \Delta_v, v_{B1,2} < 0 \\ 0 & \text{при } |v_{B1,2}| \leq \Delta_v, v_{B1,2} > 0 \end{cases}$$

В (1) и (2) величины  $u_{H1,2}$ ,  $u_{B1,2}$ ,  $v_{H1,2}$ ,  $v_{B1,2}$  представляют:

$$u_{H1,2} = \frac{2[x + a\psi \pm s\theta - \delta_{x1,2}(z + a)]}{a + b},$$

$$u_{B1,2} = \frac{2[x - b\psi \pm s\theta - \delta_{x1,2}(z - b)]}{a + b},$$

$$v_{H1,2} = \frac{2[y + a\varphi - \delta_{y1,2}(z + a)]}{a + b}, \quad v_{B1,2} = \frac{2[y - b\varphi - \delta_{y1,2}(z - b)]}{a + b},$$

$$\text{а } \Delta_u = \frac{2\Delta_x}{a + b}, \quad \Delta_v = \frac{2\Delta_y}{a + b}.$$

Здесь индексы 1 и 2 указывают к какому из двух проводников принадлежит соответствующая функция искривления, причем знак минус относится к индексу 1, а знак плюс – к индексу 2. Индекс “Н” соответствует нижним, а индекс “В” – верхним направляющим устройствам сосуда.

Имеющие место непрямолинейности профиля проводников и наличие зазоров между их рабочими поверхностями и направляющими устройствами способствуют установлению в параметрических системах стационарных колебаний, независимых от начальных условий. Предполагая, что рассеивание энергии происходит за счет сил неупругих сопротивлений пропорционально первой степени скорости перемещений, нелинейные дифференциальные уравнения движения подъемного сосуда в соответствии с расчетной схемой рисунка и согласно [3] в безразмерной форме записи имеют вид:

$$\begin{aligned}
 & \ddot{u} + \mu_x q_x \dot{u} + \mu_x^2 [f_{1x}(\xi) \beta_x F_{H1} + f_{2x}(\xi) F_{H2} + \\
 & + f_{1x}(\xi + \eta) \beta_x F_{B1} + f_{2x}(\xi + \eta) F_{B2}] = 0, \\
 & \ddot{\psi} + \lambda_\varphi^2 \mu_x q_x \dot{\psi} + \lambda_\psi^2 \mu_x^2 \{ [f_{1x}(\xi) \beta_x F_{H1} + f_{2x}(\xi) F_{H2}] (1+e) - \\
 & - [f_{1x}(\xi + \eta) \beta_x F_{B1} + f_{2x}(\xi + \eta) F_{B2}] (1-e) \} = 0, \\
 & \ddot{\vartheta} + \lambda_\theta \mu_x q_x \dot{\vartheta} + \lambda_\theta^2 \mu_x^2 [-f_{1x}(\xi) F_{H1} + f_{2x}(\xi) F_{H2} - \\
 & - f_{1x}(\xi + \eta) \beta_x F_{B1} + f_{2x}(\xi + \eta) F_{B2}] - \lambda_\theta^2 \lambda_0 \ddot{\varphi} = 0, \\
 & \ddot{v} + \mu_y q_y \dot{v} + \mu_y^2 \{ [f_{1y}(\xi) \beta_y P_{H1} + f_{2y}(\xi) P_{H2} + \\
 & + f_{1y}(\xi + \eta) \beta_y P_{B1} + f_{2y}(\xi + \eta) P_{B2}] = 0, \\
 & \ddot{\varphi} + \lambda_\varphi \mu_y q_y \dot{\varphi} + \lambda_\varphi^2 \mu_y^2 \{ [f_{1y}(\xi) \beta_y P_{H1} + f_{2y}(\xi) P_{H2}] (1+e) - \\
 & - [f_{1y}(\xi + \eta) \beta_y P_{B1} + f_{2y}(\xi + \eta) P_{B2}] (1-e) \} - \lambda_\varphi^2 \lambda_0 \ddot{\vartheta} = 0. \tag{3}
 \end{aligned}$$

В системе уравнений (3) введены безразмерные переменные

$$\xi = \frac{Vt}{h}, \quad u = \frac{2x}{a+b}, \quad v = \frac{2y}{a+b}, \quad \vartheta = \frac{2s\theta}{a+b}$$

и параметры

$$f_{1,2x}(\xi) = \frac{f_{1,2x}^*(\xi)}{1 + f_{1,2x}^*(\xi) \lambda_{1,2x}}, \quad f_{1,2y}(\xi) = \frac{f_{1,2y}^*(\xi)}{1 + f_{1,2y}^*(\xi) \lambda_{1,2y}},$$

$$\lambda_{1x} = \frac{C_{01x}}{C_{Cx}}, \quad \lambda_{2x} = \frac{C_{02x}}{C_{Cx}}, \quad \lambda_{1y} = \frac{C_{01y}}{C_{Cy}}, \quad \lambda_{2y} = \frac{C_{02y}}{C_{Cy}},$$

$$\mu_x^2 = \frac{C_{02x} h^2}{mV^2}, \quad \mu_y^2 = \frac{C_{02y} h^2}{mV^2}, \quad \beta_x = \frac{C_{01x}}{C_{02x}}, \quad \beta_{2y} = \frac{C_{01y}}{C_{02y}},$$

$$\lambda_\varphi^2 = \frac{m(a+b)^2}{4J_\varphi}, \quad \lambda_\psi^2 = \frac{m(a+b)^2}{4J_\psi}, \quad \lambda_\theta^2 = \frac{ms^2}{J_\theta},$$

$$\lambda_0 = \frac{2J_{\varphi\theta}}{ms(a+b)}, \quad \eta = \frac{a+b}{h}, \quad e = \frac{a-b}{a+b},$$

физическое и геометрическое толкование которых дано в работе [2].

Символами  $q_x$  и  $q_y$  обозначены коэффициенты, учитывающие затухание пропорционально первой степени скорости перемещений  $u$ ,  $V$ ,  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\vartheta$ .

В уравнениях (3) дифференцирование произведено по безразмерному параметру  $\xi$ . Решение системы (3) осуществлялось численным методом с использованием ЭВМ. Интегрирование уравнений проведено по итерационной схеме Эйлера с шагом интегрирования  $\Delta\xi = 0,01$ :

$$\ddot{u} = \frac{u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}}{(\Delta\xi)^2}, \quad \dot{u} = \frac{u_{n+1} - u_{n-1}}{2\Delta\xi}, \quad u = u_n,$$

$$\ddot{v} = \frac{v_{n+1} - 2v_n + v_{n-1}}{(\Delta\xi)^2}, \quad \dot{v} = \frac{v_{n+1} - v_{n-1}}{2\Delta\xi}, \quad v = v_n$$

и т.д. для остальных переменных  $\varphi, \psi, \vartheta$ .

На печать выдавались через  $\Delta\xi = 0,1$  значения амплитуд  $A$  лобовых и боковых горизонтальных перемещений точек подъемного сосуда в местах установки направляющих устройств, соответственно первому и второму проводникам, и местоположение движущегося сосуда по глубине ствола. После прохождения сосудом одного яруса армировки печатались лобовые и боковые отклонения каждой нитки проводников.

Необходимые исходные данные о системе – фактические отклонения профиля проводников от вертикали, среднестатистические зазоры в кинематической паре “направляющее устройство-проводник”, динамические характеристики подъемного сосуда, жесткостные показатели армировки – вводились в машину в виде числовой информации.

Для исследования устойчивости движения подъемного сосуда в искривленных проводниках изнашиваемой армировки рассмотрены принципиально различные конструкции яруса для клетового и скипового стволов с соответствующими конструктивными элементами и характеристиками подъемных сосудов.

Фактические режимы работы подъемных установок в дорезонансной области с допустимыми запасами устойчивости в лобовом и боковом направлениях приняты по результатам соответствующих расчетов динамической системы “сосуд-армировка”.

При решении системы уравнений (3) непрямолинейность проводников задавалась в форме случайных чисел. При этом амплитуды  $\delta_{x_{\max}}$  и  $\delta_{y_{\max}}$  относительных отклонений профиля от прямолинейности на ярусах не превышали 2,5; 5; 10 и 15 мм. Рассматривалось также движение сосуда в прямолинейных проводниках, когда  $\delta_{x_{\max}} = \delta_{y_{\max}} = 0$ . Среднестатистические зазоры в кинематической паре

“направляющее устройство-проводник” ( $\Delta_L, \Delta_B$ ) принимались равными 5; 10 и 15 мм.

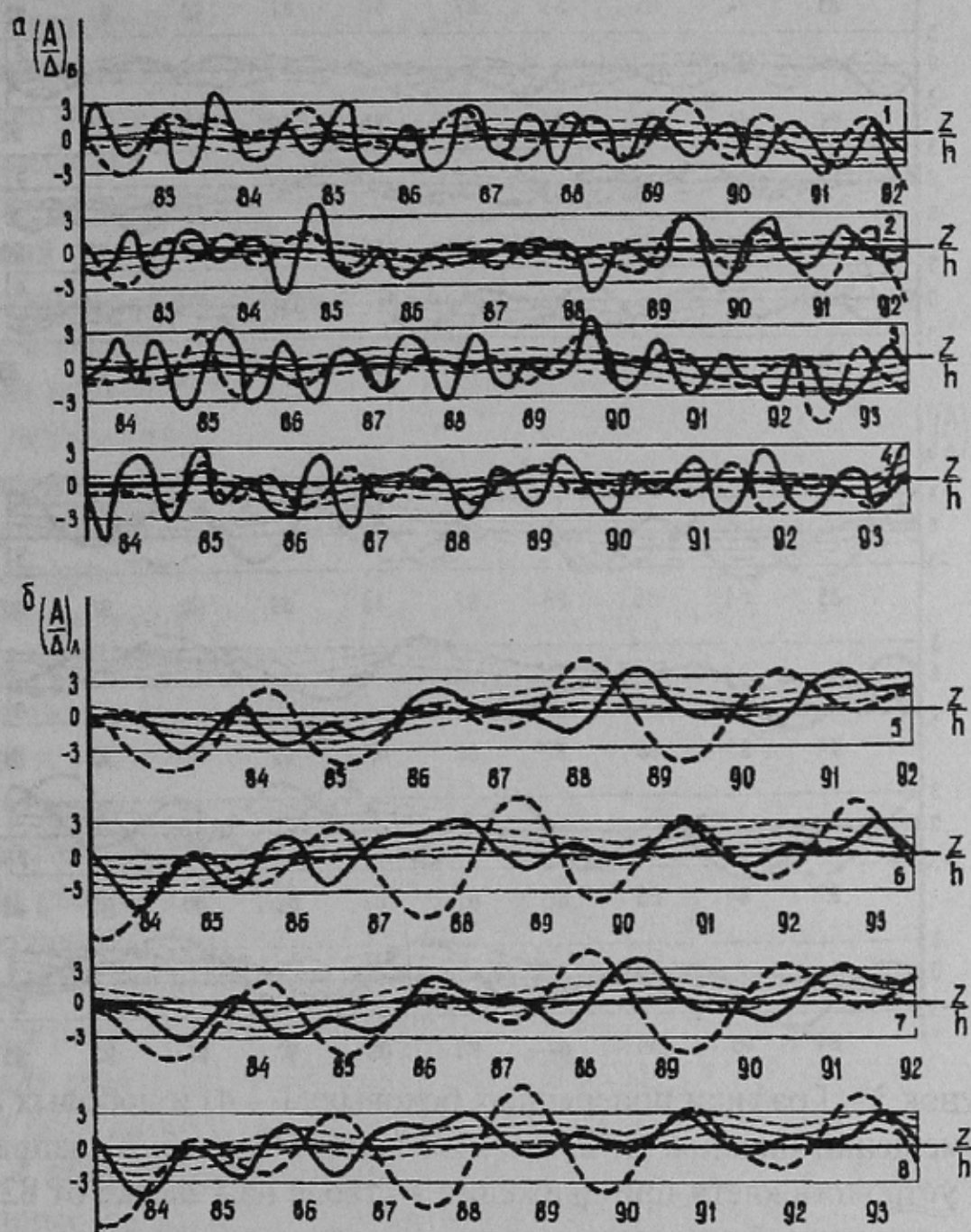


Рисунок 2 – Графики поперечных боковых (1 – 4) и лобовых (5 – 8) перемещений нижних (1, 2, 5, 7) и верхних (3, 4, 6, 8) направляющих устройств скипа при движении в стволе на участке от 82 по 93 ярус новой армировки (сплошные линии) и изношенной – износ проводников по 16 мм, расстрелов по 4 мм на сторону – (пунктирные).

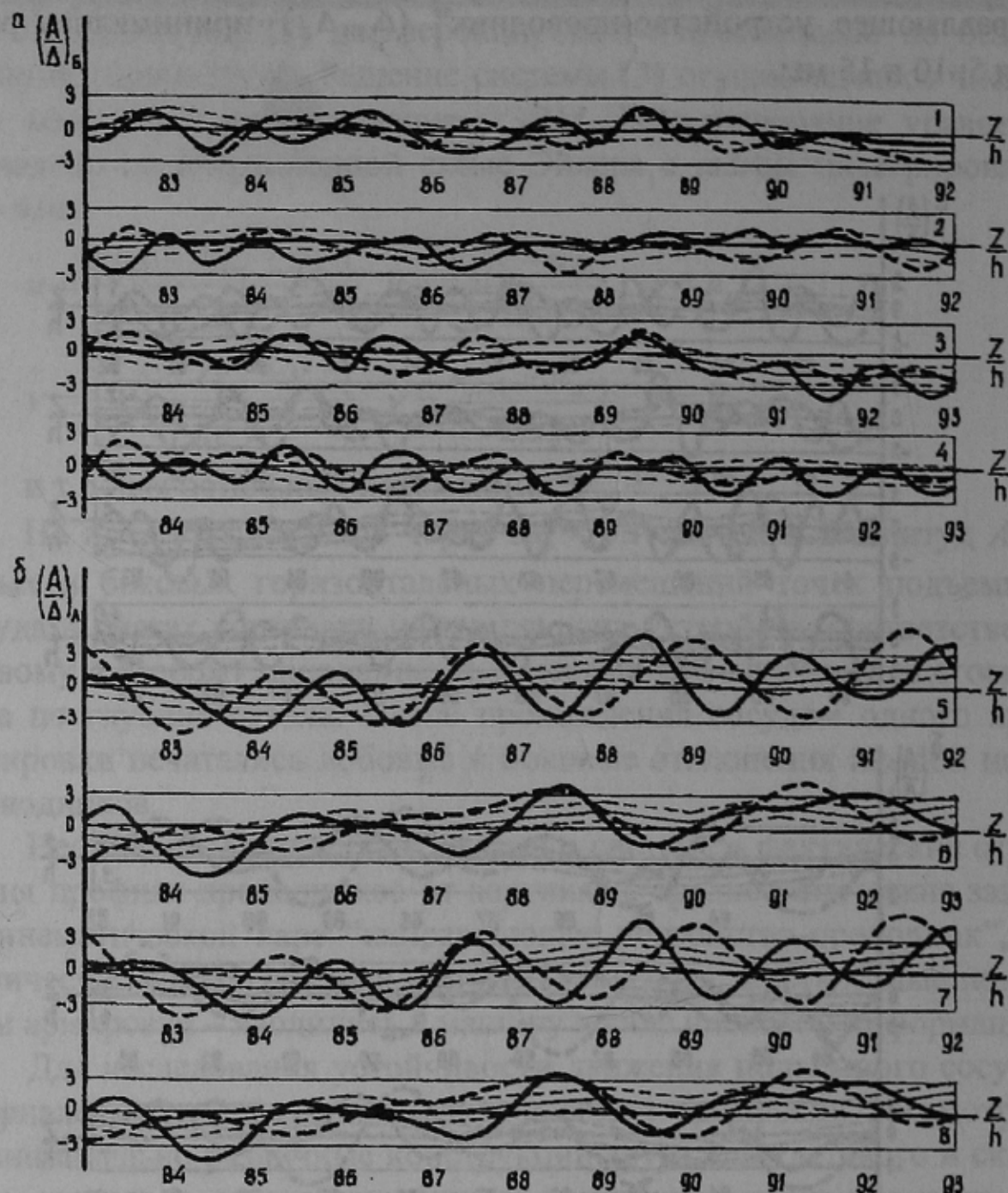


Рисунок 3 – Графики поперечных боковых (1 – 4) и лобовых (5 – 8) перемещений нижних (1, 2, 5, 7) и верхних (3, 4, 6, 8) направляющих устройств клетки при движении в стволе на участке от 82 по 93 ярус изношенной армировки: износ проводников по 4 мм, расстрелов по 1 мм на сторону (сплошные линии) и соответственно по 12 мм и 3 мм (пунктирные).

В результате решений дифференциальных уравнений (3) движения сосуда с максимальной тахограммой скоростью  $V_{\phi}$  в искривленных проводниках армировки были получены лобовые и боковые перемещения каждого из направляющих устройств в функции  $z/h$  положения сосуда по глубине ствола.

Результаты вычислений представлены в виде графиков боковых и лобовых перемещений нижних и верхних направляющих устройств сосудов, построенные на участке ствола с максимальной тахограммой скоростью применительно к условиям скиповой (рис.2) и клетевой (рис. 3) армировок. Полученные графики колебаний для новых и изношенных скиповой и клетевой армировок свидетельствуют о том, что более опасными являются лобовые колебания. В этом направлении колебания происходят практически с демультимпликационной частотой по отношению к частоте “внешнего” возмущения (частота колебаний сосуда в два раза меньше частоты изменения периодической функции жесткости), несмотря на то, что в рассматриваемой системе имеются зазоры и искривления проводников.

Для клетевой армировки, в отличие от скиповой, колебания сосуда с демультимпликационной частотой имеют место по всем четырем направляющим устройствам и в боковом направлении, когда конструкция значительно изношена. В этом случае вполне обосновано утверждение о том, что в нелинейной параметрической системе реализуется одночастотный режим колебаний [3].

Из полученных графиков видно, что по мере износа конструктивных элементов жестких армировок происходит рост амплитуд колебаний и уменьшение их частоты, что связано с приближением рабочих точек на диаграмме устойчивости к правой границе зоны параметрического резонанса.

По результатам решений уравнений (3) выполнен анализ свыше 200 различных вариантов, охватывающих широкий диапазон изменяющихся в процессе эксплуатации параметров реальных систем.

Для ряда наиболее характерных случаев сделаны обобщения полученных результатов. В частности, например, приведены усредненные по всей глубине ствола значения максимальных амплитуд колебаний  $A$  движущегося сосуда на интервале каждого шага армировки, отнесенные к среднестатистическому зазору  $\Delta$ . Значения  $A/\Delta$  даны отдельно по лобовому направлению для всех ( $1H, 2H, 1B, 2B$ ), а по боковому – для нижней пары ( $1H, 2H$ ) направляющих устройств контактирующих с левым (1) и правым (2) проводниками (рис 1). Для сравнительной оценки работоспособности изнашиваемой системы по запасам устойчивости даны численные значения параметров  $(K/[K])_L$  и  $(K/[K])_B$ , которые характеризуют ресурс системы “сосуд-армировка” соответственно в лобовом и боковом направлениях.



Прежде всего полученные данные свидетельствуют о том, что для новой системы, рассчитанной согласно действующему нормативному документу, всегда выполняется требование  $A/\Delta \leq 3$  [4]. Но даже для эксплуатируемой системы при определенных износах проводников и расстрелов соблюдается условие  $A/\Delta \leq 3$ , при котором максимальные напряжения в несущих элементах конструкции армировки не могут достигнуть опасных значений. Анализ показывает, что это проявляется в системах с различными конструкциями яруса армировки и подъемными сосудами.

Сравнение численных значений  $A/\Delta$ , полученных, например, для скиповой армировки, свидетельствует о том, что в зависимости от принятых конструктивных параметров армировки опасные деформации в системе могут наступить при различных износах проводников и расстрелов. При этом с увеличением типоразмера проводников динамически устойчивая работа системы возможна при больших износах конструктивных элементов армировки.

Анализ полученных результатов при изменении кинематических зазоров  $\Delta_L$ ,  $\Delta_B$  и искривлений профиля проводников  $\delta_{x_{max}}$ ,  $\delta_{y_{max}}$  подтверждает существенное их влияние на уровень амплитуд колебаний сосуда. Наиболее благоприятным случаем является отсутствие искривлений проводников, т.е. когда  $\delta_{x_{max}} = \delta_{y_{max}} = 0$ . Однако, в реальных конструкциях этого достичь практически невозможно, так как монтаж проводников армировки всегда выполняется с определенными отклонениями от проектной прямой. Как показывает анализ, обеспечение приемлемого динамического режима движения сосуда возможно при соблюдении условий

$$\frac{\delta_{x_{max}}}{\Delta_L} \leq 0,5, \quad \frac{\delta_{y_{max}}}{\Delta_B} \leq 0,5,$$

т.е. максимальные отклонения лобовых и боковых рабочих поверхностей проводников от проектной прямой не должны превышать соответствующих кинематических зазоров. Этот важный для практики вывод, полученный при исследовании динамических свойств изнашиваемой системы, когда движущийся в искривленных проводниках армировки сосуд рассматривается как тело с пятью степенями свободы, подтверждает результаты решения системы с одной степенью свободы для случая регулярно искривленных по косинусоиде проводников.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что отвечающие действующим нормативным материалам системы "сосуд-армировка" обладают определенным ресурсом несущей способности, который позволяет безопасно эксплуатировать и изнашивать их до тех пор, пока относительные амплитуды колебаний сосуда не превысят 3. Этот критерий количественной оценки динамически приемлемого режима работы системы достаточно обоснован [4] и подтверждается тридцатилетним опытом эксплуатации свыше 150 реконструированных неработоспособных и вновь построенных армировок вертикальных шахтных стволов. Поэтому, несмотря на то, что при износах неизменно имеет место уменьшение расчетных запасов устойчивости и это, как правило, особенно ощутимо проявляется в лобовом направлении  $\left(\frac{K}{[K]}\right)_л < 1$ , тем не менее, в реальных системах допустим определенный износ проводников и расстрелов. Анализ полученных результатов позволил найти численные значения ресурса системы по запасам устойчивости  $K_л$  и  $K_б$ , базируясь на предельный критерий  $\frac{A}{\Delta} \leq 3$ .

В итоге установлено, что рассматриваемая динамическая система "сосуд-армировка" обладает в обоих направлениях (лобовом и боковом) определенным ресурсом, который для армировок с проводниками из рельсов составляет

$$q_{л,б}^{(P)} = \frac{K_{л,б}}{0,95[K]_{л,б}},$$

а из коробчатого прямоугольного профиля

$$q_{л,б}^{(K)} = \frac{K_{л,б}}{0,8[K]_{л,б}}.$$

Список источников:

1. Храмов А.А. Устойчивость движения подъемного сосуда в проводниках изнашиваемой армировки ствола.- В сб. "Шахтный подъем", №42. Донецк, 1976, с. 35-41.
2. Гаркуша Н.Г., Дворников В.И. Рациональный выбор параметров подъемных сосудов и жестких армировок вертикальных стволов.- "Шахтное строительство". 1968, №1. с. 4-8.
3. Гаркуша Н.Г., Дворников В.И. О нелинейных уравнениях движения шахтного подъемного сосуда в искривленных упругих проводниках ствола.- "Прикладная механика", 1969, т.5, вып. 9, с. 1-5.
4. Ветров А.П., Гаркуша Н.Г., Дворников В.И. К обоснованию запасов устойчивости движения шахтного подъемного сосуда.- В сб. "Проектирование и строительство угольных предприятий", №1. М., ЦНИЭИуголь. 1968, с. 55-57.