

## РОЗДІЛ «МАШИНОБУДУВАННЯ. МЕХАНІКА»

УДК 621.791.9(75)

ЧЕРЕДНИК Е.А., ст. преподаватель  
 ОЛЕЙНИК Л.А.\*, к.ф.-м.н., доцент, директор  
 РЕЙДЕРМАН Ю.И., к.т.н., доцент  
 ПЕРЕМИТЬКО В.В., к.т.н., доцент

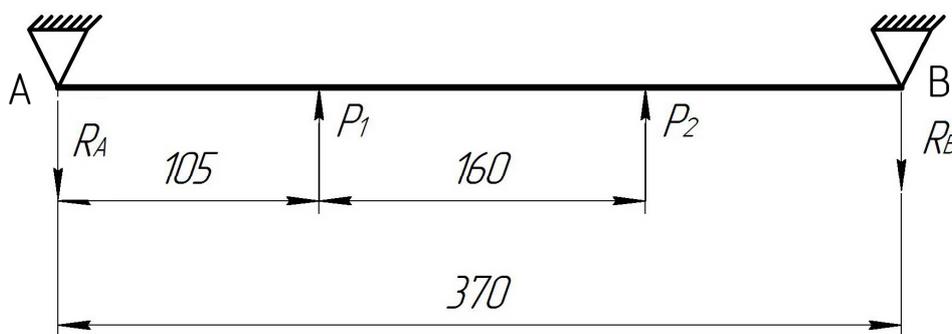
Днепродзержинский государственный технический университет  
 \*Днепродзержинский технологический колледж

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ХОДОВОЙ ЧАСТИ МАШИН, РАБОТАЮЩИХ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНОСЕ

**Введение.** Контактирующие неровности под воздействием сил трения могут разрушаться различным образом. Тот или иной вид разрушения зависит как от свойств трущихся тел, так и от внешних условий, нагрузки и скорости скольжения. Первая количественная зависимость, связывающая износ со свойствами материалов и внешними условиями трения, была сформулирована применительно к абразивному износу Крагельским И.В. [1] и получила свое подтверждение и развитие в исследованиях Хрущова М.М. и Бабичева М.А [2]. Детали гусеничного хода машин (катки, натяжные колеса, звенья и башмаки гусениц, ведущие колеса, звездочки) в процессе эксплуатации подвержены значительным умеренным нагрузениям и абразивному изнашиванию, которые являются главным фактором, ограничивающим их ресурс.

**Постановка задачи.** Задачей исследований является определение усилий, возникающих в контактной паре каток-звено.

**Результаты работы.** Для определения усилий, возникающих во время работы между контактными поверхностями катка и звена, выбрана расчетная схема, приведенная на рис.1, где представлены значения параметров.



$P_1$  и  $P_2$  – усилия, возникающие в центре беговой дорожки катка, Н;  
 $R_a$  и  $R_b$  – реакции опор катка, Н

Рисунок 1 – Расчетная схема определения усилий

Усилия  $P_1$  и  $P_2$  определяем через опорные реакции

$$\sum M_{P_1} = R_a \cdot 105 - P_2 \cdot 160 - R_b \cdot 105 = 0;$$

$$P_2 \cdot 160 = R_b \cdot (160 + 105) - R_a \cdot 105;$$

$$P_2 = R_b \cdot \frac{160 + 105}{160} - R_a \cdot \frac{105}{160};$$

$$P_2 = 1,655 \cdot R_b - 0,655 \cdot R_a; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_{P_2} &= R_B \cdot 105 - R_A(160 + 105) + P_1 \cdot 160 = 0; \\ P_1 \cdot 160 &= R_A(160 + 105) - R_B \cdot 105; \\ P_1 &= R_A \cdot \frac{160 + 105}{160} - R_B \cdot \frac{105}{160}; \\ P_1 &= 1,655 \cdot R_A - 0,655 \cdot R_B. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнения (1) и (2) вошли неизвестные величины опорных реакций  $R_A$  и  $R_B$ . Для их определения в местах крепления оси катка к раме тележки установлены устройства для замера усилий, возникающих на опорах осей катков. Определив эти усилия, можно из уравнений (1) и (2) определить усилия между катком и звеном при различных режимах работы бульдозера.

*Выбор и расчет мездозы.* Исходя из расчетной схемы (рис.1) и конструкции оси катка (рис.2), для определения усилий между катком и звеном в качестве измерительного устройства выбрали мездозы.

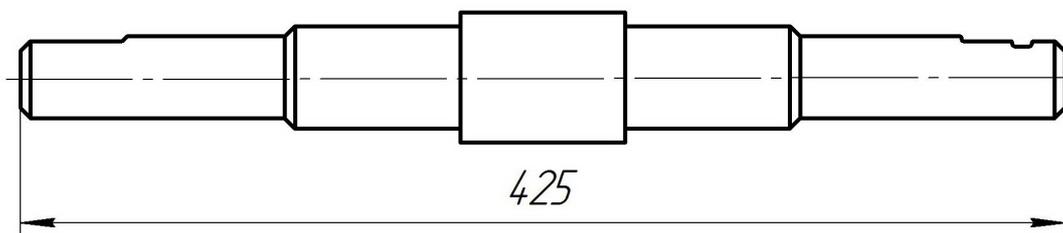


Рисунок 2 – Конструкция оси катка

Так как ось катка имеет на одном конце плоский срез, а на другом – плоский срез с поперечной трапециевидальной канавкой, было изготовлено два вида мездоз. Мездозы в обоих случаях представляли собой балку на двух опорах (рис.3 и 4).

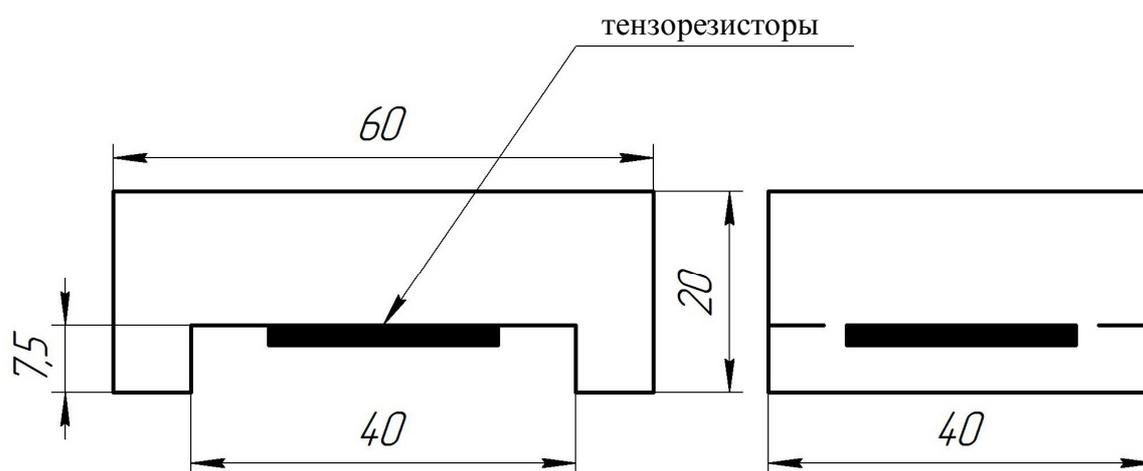


Рисунок 3 – Мездоза, устанавливаемая на плоский срез оси

Мездозы изготавливали из стали 45 и подвергали закалке и последующему отпуску при температуре 300°C.

В результате были получены следующие механические свойства стали 45:

$$\begin{array}{lll} \sigma_T = 930 \dots 1360 \text{ МПа}; & \sigma_B = 1080 \dots 1530 \text{ МПа}; & \delta = 3 \dots 4\%; \\ \psi = 25 \dots 40\%; & \alpha_K = 0,1 \dots 0,2 \text{ МДж/м}^2; & \text{НВ} = 3020 \dots 4180 \text{ МПа}. \end{array}$$

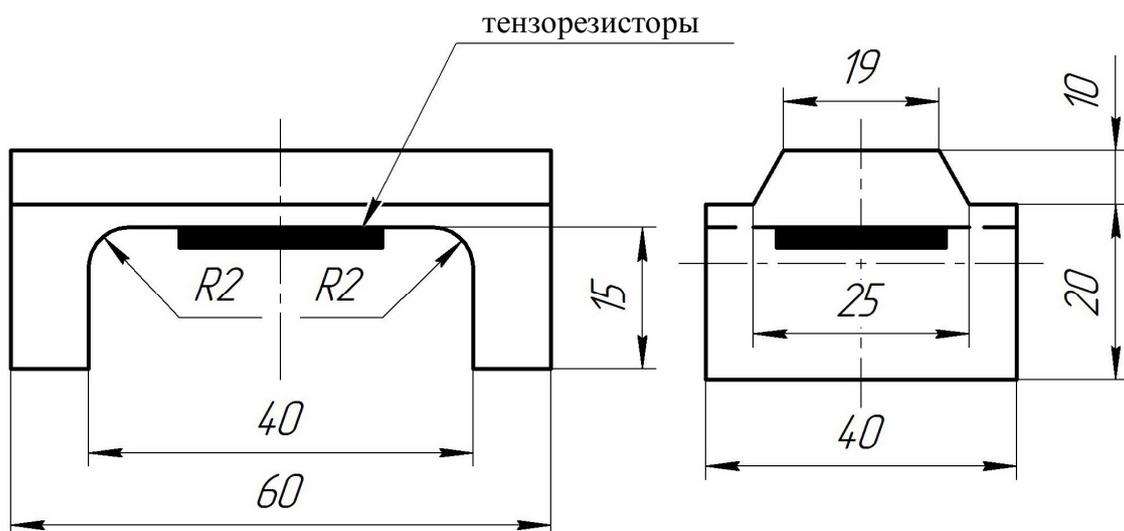


Рисунок 4 – Месдоза, устанавливаемая на плоский срез оси с трапецидальной канавкой

Усилие на месдозу от оси катка передается в центре через шарик. Расчетная длина месдозы 40 мм (рис.5).

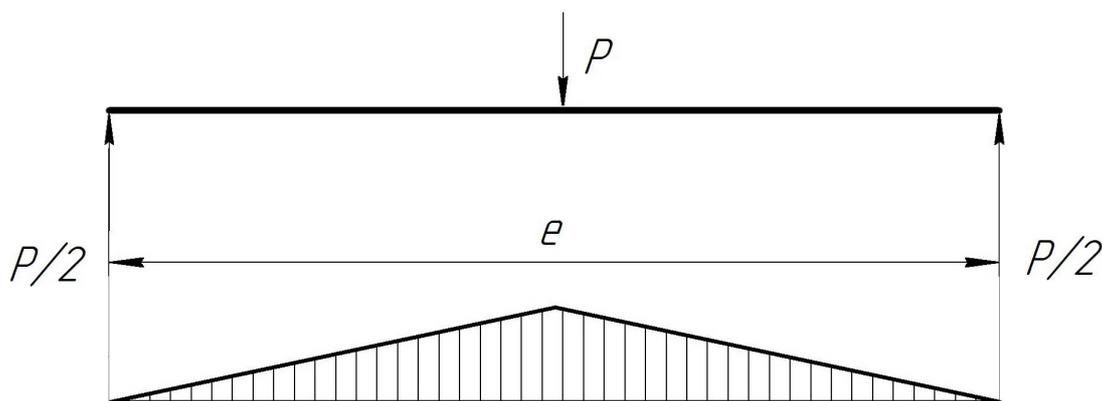


Рисунок 5 – Расчетная схема месдозы

Для месдозы, устанавливаемой на плоский срез оси катка

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{изг}}}{W} \leq [\sigma],$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимально допустимое напряжение, Па;

$M_{\text{изг}}$  – изгибающий момент, Н·м;

$W$  – объемное сечение, м<sup>3</sup>;

$[\sigma]$  – допустимое напряжение, Па.

Для бруса прямоугольного сечения

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6},$$

где  $b$  – ширина месдозы, м;

$h$  – высота рабочей части месдозы, м;

$$M_{\text{изг.max}} = \frac{P \cdot l}{4},$$

где  $P$  – максимальная допустимая нагрузка на месдозу, Н;

$l$  – расчетная длина месдозы, м;

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\text{изг}}}{W} = \frac{P \cdot l \cdot 6}{4 \cdot b \cdot h^2} \leq [\sigma],$$

откуда

$$P \leq \frac{[\sigma] \cdot 4 \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot l}.$$

При решении неравенства получаем условие для загрузки:

$$P \leq \frac{100 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot (12,5 \cdot 10^{-3})^2}{6 \cdot 40 \cdot 10^{-3}} = 10416,7 \text{ Н} = 10,4 \text{ кН},$$

т.е. месдоза может выдерживать нагрузку, при которой наибольшие напряжения в месдозе будут подчиняться закону Гука и материал не получит остаточных деформаций.

Для месдозы, устанавливаемой на ось с плоским срезом и трапециевидальной канавкой, расчет ведется из условия равнопрочности обеих месдоз, т.е. воспринимаемая нагрузка должна быть такая же.

Для упрощения расчета месдозы с трапециевидальным выступом принимаем сечение месдозы, указанное на рис.6.

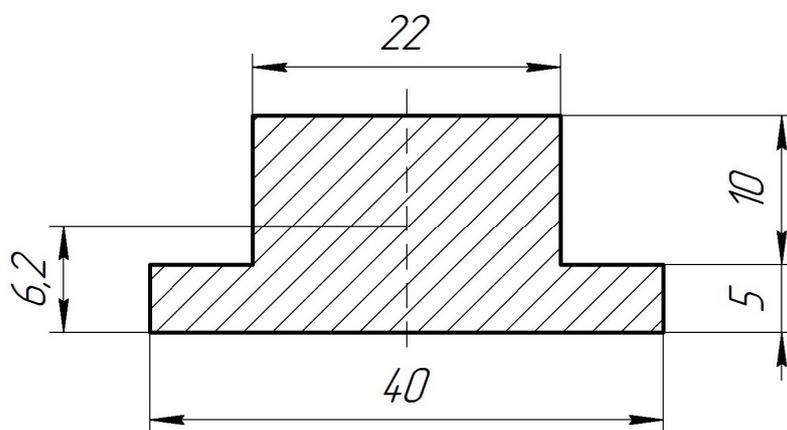


Рисунок 6 – Расчетное сечение месдозы с трапециевидальным выступом

Определяем момент инерции сечения:

$$J_{xc} = J_{xc}^{(1)} + J_{xc}^{(2)},$$

где  $J_{xc}$  – момент инерции суммарного сечения относительно его центральной оси,  $\text{м}^4$ ;

$J_{xc}^{(1)}$  – момент инерции первого сечения относительно центральной оси суммарного сечения,  $\text{м}^4$ ;

$J_{xc}^{(2)}$  – момент инерции второго сечения относительно центральной оси суммарного сечения,  $\text{м}^4$ .

Определяем момент инерции первого и второго сечений относительно центральной оси суммарного сечения

$$J_{xc}^{(1)} = J_{xc1}^{(1)} + a_{c1}^2 F^{(1)},$$

где  $J_{xc1}^{(1)}$  – момент инерции первого сечения относительно собственной центральной оси,  $\text{м}^4$ ;

$F^{(1)}$  – площадь первого поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$a_{c1}^2$  – расстояние между центральными осями первого сечения и суммарного сечения,  $\text{м}$ .

$$J_{xc1}^{(1)} = \frac{b_1 \cdot h_1^3}{12} + a_{c1}^2 \cdot b_1 \cdot h_1$$

или после подстановки чисел

$$J_{xc1}^{(1)} = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot (5 \cdot 10^{-3})^3}{12} + (3,7 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 3154,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4.$$

$$J_{xc}^{(2)} = J_{xc2}^{(2)} + a_{c2}^2 \cdot F^{(2)},$$

где  $J_{xc2}^{(2)}$  – момент инерции второго сечения относительно собственной центральной оси,  $\text{м}^4$ ;

$F^{(2)}$  – площадь второго поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$a_{c2}^2$  – расстояние между центральными осями второго сечения и суммарного,  $\text{м}$ .

$$J_{xc2}^{(2)} = \frac{b_2 \cdot h_2^3}{12} + a_{c2}^2 \cdot b_2 \cdot h_2,$$

или после подстановки чисел

$$J_{xc2}^{(2)} = \frac{22 \cdot 10^{-3} \cdot (10 \cdot 10^{-3})^3}{12} + (3,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 22 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 4684,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4.$$

Объединяем два выражения:

$$J_{xc} = 3154,7 \cdot 10^{-12} + 4684,5 \cdot 10^{-12} = 839,2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4.$$

Определяем центр тяжести этого сечения:

$$X_o = \frac{S \cdot b}{F} = \frac{F_1 \cdot X_1 + F_2 \cdot X_2}{F_1 + F_2},$$

где  $S_1$  – расстояние до центра тяжести нижнего прямоугольника,  $\text{м}$ ;

$S_2$  – расстояние до центра тяжести верхнего прямоугольника,  $\text{м}$ ;

$F_1$  – площадь сечения нижнего прямоугольника,  $\text{м}^2$ ;

$F_2$  – площадь сечения верхнего прямоугольника,  $\text{м}^2$ .

$$X_o = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} + 2,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 10^{-6} + 220 \cdot 10^{-6}} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6,2 \text{ мм}.$$

Тогда

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot h_l \leq [\sigma],$$

где  $M = \frac{P \cdot l}{4}$  – максимальный изгибающий момент,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

После подстановки чисел

$$M = \frac{10416,7 \cdot 370 \cdot 10^{-3}}{4} = 963,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Определяем максимальное напряжение

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{J_{xc}} \cdot y_{\max},$$

$$\sigma_{\max} = \frac{963,5}{7839,2 \cdot 10^{-12}} \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} = 1060 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1060 \text{ МПа},$$

$$\sigma_{\max} = 1060 \text{ МПа} < [\sigma] = 1080 \dots 1530 \text{ МПа}.$$

$[\sigma] = 1080 \dots 1530$  МПа – для стали 45, закаленной в воде с последующими отпуском при 300°C.

На основании приведенного выше расчета принимаем сечения и размеры мездоз, указанные на рис.3 и 4.

**Выводы.** Предложенные исследования рабочих поверхностей контактной пары каток-звено позволяет существенно повысить служебные характеристики деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного износа с умеренными нагрузками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В. Трение и износ деталей машин / Крагельский И.В. – М.: Машиностроение, 1962. – 383с.
2. Хрущов М.М. Абразивное изнашивание / М.М.Хрущов, М.А.Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 251с.
3. Чигарев В.В. Условия нагружения и повышение сроков эксплуатации сопряженной пары каток-звено / В.В.Чигарев, Е.А.Чередник, В.В.Перемитько // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь. – 2004. – Вып.7. – С.241-245.

*Поступила в редколлегию 19.06.2013.*

УДК 681.004.942:62-192

БОЙКО В.И., д.т.н., профессор  
МЕЩАНИНОВ С.К., д.т.н. профессор  
ВОЛОШИН Р.В., магистр

Днепродзержинский государственный технический университет

### **СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**Введение.** В настоящее время необходимость прогнозирования состояния сложных технических систем (СТС) объясняется, в первую очередь, тем, что в процессе своего функционирования они испытывают воздействие множества внешних и внутренних факторов, причем эти факторы находятся в постоянном взаимодействии между собой. Это приводит к непредсказуемому поведению СТС, ее неожиданным отказам, которые могут оказаться катастрофическими как с экономической, так и с социальной точек зрения. Решение задач прогнозирования состояния СТС актуально как для их создателей, так и для специалистов, их эксплуатирующих, так как прогнозирование обеспечивает создание долговечных и надежных технических объектов. Прогнозирование позволяет перейти от эксплуатации «по ресурсу» к эксплуатации «по техническому состоянию» – более рациональному и прогрессивному принципу использования технических объектов. Это достигается выполнением периодических оценок технического состояния объектов в процессе их эксплуатации. В идеале контроль осуществляется непрерывно (в «on-line» режиме). С помощью прогнозирования на требуемый интервал времени можно ускоренно оценить работоспособность и долговечность сложных технических объектов и значительно уменьшить период их разработки за счет сокращения методами прогнозирования сроков продолжительных производственных испытаний.

**Постановка задачи.** Надежность функционирования СТС в условиях неопределенности информации о действии внутренних и внешних факторов определяется, в общем случае, значениями коэффициентов готовности составляющих ее элементов и подсистем. При сравнительно малом значении коэффициента готовности того или иного элемента или подсистемы для поддержания надежности СТС на требуемом уровне предусматривается активная деятельность, направленная на обеспечение работоспособно-

сти ее элементов и подсистем путем адаптации к реальным условиям функционирования. Это позволяет выбирать управляющие стратегии и способы обеспечения надежного функционирования СТС. Оценка надежности безопасности СТС по известным показателям надежности ее элементов предполагает переход от показателей надежности элементов и подсистем к показателям надежности всей СТС. В этом контексте следует сказать, что на сегодняшний день, подобные задачи возможно решить только с использованием синергетического метода исследований [1, 2]. На основе их решения могут быть разработаны меры по поддержанию заданного уровня надежности функционирования СТС, а также созданы более достоверные по сравнению с существующими методы контроля и прогноза надежности функционирования СТС. Идея синергетики состоит в том, что при принятии решения полагаются на подобие между данной ситуацией и предыдущей. Поиск сходства является распознаванием образов. В распознавании образа, как и в принятии решений, идентифицируется единственный образ или решение соответственно. Предполагается, что поступающий образ сравнивается с некоторыми шаблонами (прототипами). Но хранение шаблона требует большого количества информации. Поэтому только наиболее характерные черты хранятся в виде параметров порядка и могут быть при необходимости вызваны для воссоздания целиком всего образа во всех деталях [3].

*Целью работы* является исследование возможностей использования синергетического подхода к прогнозированию надежности функционирования СТС на протяжении всего ее жизненного цикла.

**Результаты работы.** Предположим, что на СТС действует  $n$  видов опасных факторов с параметрами  $q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)$ , которые являются некоторыми нестационарными случайными функциями времени. Реакция системы на их действие  $R = c_1q_1 + c_2q_2 + \dots + c_nq_n$  – линейная функция. Отказ системы произойдет, когда величина  $R$  превысит некоторое критическое значение  $R^*$ . То есть условие отказа системы имеет следующий вид:

$$R[Q(t)] \geq R^*, \quad (1)$$

где  $Q(t) = f(q_1, q_2, \dots, q_n, t)$ .

Используя данные работы [4], вероятность развития аварии  $P_a$  можно представить как совмещение двух независимых событий:  $P_1$  и  $P_2$  – вероятности подавления и активизации процесса развития аварийной ситуации соответственно:

$$P_a = P_1 \cdot P_2. \quad (2)$$

Изменение уровня надежности функционирования СТС с использованием вероятностно-статистического подхода является аддитивным случайным процессом изменения вероятности безаварийной работы [2]:

$$P(t) = P'(t) + P''(t), \quad (3)$$

где  $P'(t)$  – стационарная составляющая вероятности безаварийной работы;  $P''(t)$  – стохастическая составляющая вероятности безаварийной работы СТС. синергетический подход к анализу эволюции (в нашем случае – функционирования) системы, в общем случае, сводится к анализу совместного действия внешних и внутренних факторов, могущих в той или иной степени повлиять на эволюцию этого объекта. Аналитически это можно выразить следующим образом:

$$\Psi = \Psi(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n), \quad n \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где  $\Psi$  – некоторый обобщенный функционал, характеризующий эволюцию системы (объекта);  $\psi_n$  – функция многих переменных, характеризующая эволюционный

«вклад»  $n$ -й підсистеми розглядаваної системи (об'єкта), естественно, при її умовному розділенні на сукупність таких підсистем. Проаналізуємо зміну стану СТС при зміні якого-либ параметра, визначаючого її функціонування, як цілої системи. Якщо прийняти  $E_0$  – надійність СТС, працюючої в нормальному режимі, а  $E_j$  –  $j$ -й «вклад» в зміну рівня надійності  $E_0$  при зміні  $i$ -го фактора її функціонування, то ступінь зміни надійності, обумовленої зміненою  $j$ -го фактора, викликаючої цю зміну, описується виразом [5]:

$$\partial_j = (E_0 - E_j) / E_0. \quad (5)$$

Здесь следует отметить, что упрощенно уровень надежности  $E_0$  принимается в качестве начального значения, соответствующего начальному этапу эксплуатации СТС (рис.1). Обозначим через  $S_i$   $i$ -й фактор, вызывающий  $j$ -е изменение надежности. количественно влияние  $i$ -го фактора на  $j$ -е изменение надежности характеризуется информационной мерой – количеством информации, содержащимся в  $S_i$  относительно состояния надежности:

$$a_{\psi_i, S_i} = \lg \frac{P(\delta_i / S_i)}{P(\delta_i)}, \quad (6)$$

где  $P(\delta_i / S_i)$  – вероятность изменения состояния надежности при наличии фактора  $S_i$ ;  $P(\delta_i)$  – априорная вероятность изменения состояния  $\delta_j$ . Для системы факторов  $\varphi_k(S_1, S_2, \dots, S_k)$

$$a_{\psi_i, S_i} = \lg \frac{P(\varphi_k / \delta_i)}{P(\varphi_k)}. \quad (7)$$

Существенной является возможность вычисления информационной меры системы факторов  $\varphi_k(S_1, S_2, \dots, S_k)$  по информационным мерам отдельных параметров:

$$a_{\partial_j, \varphi_k} = a_{\partial_j, S_1} + a_{\partial_j, S_2} + a_{\partial_j, S_2 / S_1} + \dots + a_{\partial_j, S_k / S_1, \dots, S_{k-1}}, \quad (8)$$

где  $a_{\partial_j, S_k / S_1, \dots, S_{k-1}} = \lg \frac{P(\partial_j / S_1 \dots S_k)}{P(\partial_j / S_1, \dots, S_{k-1})}$ .

Распределение показателей надежности по элементам СТС представляет, в общем случае, задачу нелинейного программирования, где функцией цели является минимум функции какого-либо технико-экономического показателя, а граничными условиями – условия вида

$$ПНС \geq ПНС_{зад} = f(ПНЭ), \quad (9)$$

где  $ПНС$  – показатель надежности системы;  $ПНС_{зад}$  – заданный показатель надежности системы;  $ПНЭ$  – показатель надежности элемента. С синергетической точки зрения всякая СТС может быть условно разбита на подсистемы:

$$П = \{П_1, П_2, \dots, П_n\}. \quad (10)$$

Любая СТС обладает многоцелевым поведением, управляющие воздействия –  $\vec{U} = (\vec{U}_1, \vec{U}_2, \vec{U}_3, \vec{U}_4)$ , с помощью которых обеспечивается поддержание заданного уровня надежности функционирования. Значения управляющих воздействий лимитируются следующими ограничениями:

$$\min \vec{U}_j < \vec{U}_j < \max \vec{U}_j, j = 1,2,3,4, \quad (11)$$

где  $j$  – число подсистем СТС.

Входные контролируемые воздействия  $\vec{G} = (\vec{G}_1, \vec{G}_2, \vec{G}_3, \vec{G}_4)$  содержат факторы, определяющие систему в отношении потребления и переработки (электроэнергия, ресурсы, и т. п.). Их значения также ограничены:

$$\min \vec{G}_j < \vec{G}_j < \max \vec{G}_j, j = 1,2,3,4. \quad (12)$$

Выходные величины:  $\vec{V} = (\vec{V}_1, \vec{V}_2, \dots, \vec{V}_k), k = 1,2, \dots, n$ , где  $n$  – число показателей, характеризующих работу СТС. Простейшей схемой, отображающей модель управления применительно к СТС – очистному забою (ОЗ) угольной шахты, является [6]:

$$\vec{U} \rightarrow \vec{I} \rightarrow \vec{S}. \quad (13)$$

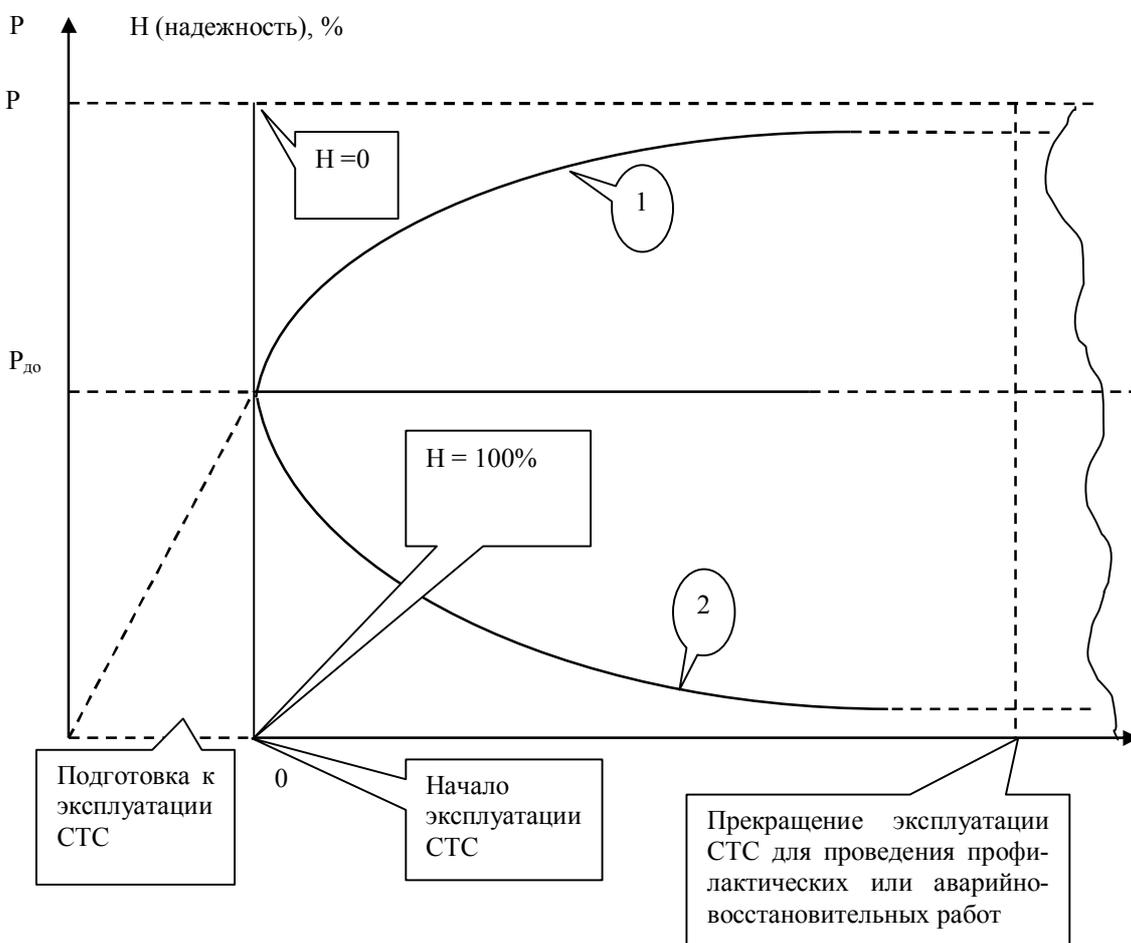


Рисунок 1 – Начальный этап в эксплуатации СТС (период от ввода в эксплуатацию до ее первой остановки для ликвидации опасности); две ветви параболы 1 и 2 схематически иллюстрируют соответственно 2 возможных варианта эволюции системы: №1 – «реальный» вариант, при котором сразу же после начала эксплуатации происходит рост опасности; №2 – гипотетический вариант, при котором после начала эксплуатации без выполнения соответствующих мероприятий уровень опасности уменьшается

Блок вектора  $\vec{S}$  – пространство состояний:

$$\vec{S} = (\vec{S}_i) = (\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3), i = 1,2,3, \quad (14)$$

где  $\vec{S}_1, \vec{S}_2, \vec{S}_3$  – соответственно векторы состояний: «работа в нормальном режиме», «допустимый режим работы», «работы прекратить, опасно».

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}, \quad (15)$$

где  $P$  – весь ОЗ как СТС;  $P_1$  – подсистема «Атмосфера ОЗ»;  $P_2$  – подсистема «Приконтурная область»;  $P_3$  – подсистема «Технологическое оборудование»;  $P_4$  – подсистема «Обслуживающий персонал». Блок вектора  $\vec{I}$  также состоит из четырех компонентов:

$$\vec{I} = (\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{I}_3, \vec{I}_4), \quad (16)$$

где  $\vec{I}_1, \vec{I}_2, \vec{I}_3, \vec{I}_4$  – соответственно критерии адаптации подсистем ОЗ. Обозначим траекторию реакции ОЗ на управляющие воздействия

$$\Omega(\vec{U}) = \{\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}\}, \quad (17)$$

где  $\vec{X}$  – вектор качественных характеристик (например, размеры кусков отбитого угля, вид управления кровлей в выработанном пространстве и т.п.);  $\vec{Y}$  – вектор количественных характеристик (например, объем добываемого за смену угля, скорость вентиляционной струи в лаве, скорость ОЗ в сутки и т. п.);  $\vec{Z}$  – вектор количественных непрерывных параметров (например, нагрузка на крепь, энергопотребление механизированным комплексом, концентрация метана в рабочем пространстве ОЗ и т.п.). В таком случае каждая из подсистем ОЗ ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ) имеет свою траекторию реакции на управляющие и другие внешние воздействия:

$$\Omega_j(\vec{U}) = \{\vec{X}_j, \vec{Y}_j, \vec{Z}_j\}, j = 1, \dots, 4. \quad (18)$$

Пересечения траекторий между подсистемами

$$\Omega_{lj} = \Omega_l \cap \Omega_j, l \neq j. \quad (19)$$

Функции  $\Omega_{lj}$  являются связями подсистем ОЗ в пространстве управления. Аналогично под функциями  $\omega_{lj}$  следует понимать связи элементов подсистем ОЗ:  $\omega_{lj}^1$  – связи элементов подсистемы «Атмосфера ОЗ»;  $\omega_{lj}^2$  – связи элементов подсистемы «Приконтурная область»;  $\omega_{lj}^3$  – связи элементов подсистемы «Технологическое оборудование» и  $\omega_{lj}^4$  – связи элементов подсистемы «Обслуживающий персонал». Формированию каждого  $\Phi_i$ -го процесса предшествует возникновение необходимого и достаточного условий. Первое – вложенность потенциальных зон  $\Omega(\varphi_i)$  одновременного протекания всех процессов:

$$\Omega(\varphi_i) = \Omega_0(\varphi_0) \subset \Omega_1(\varphi_1) \subset \dots \subset \Omega_{i-1}(\varphi_{i-1}). \quad (20)$$

Это условие означает, что энергетический источник для формирования  $\Phi_i$ -го процесса должен обеспечиваться изменением потенциалов  $(i-1)$  уровней процессов. Достаточное условие ограничивает пространственные размеры и определяет местоположение формирования  $\Phi_i$ -го процесса; возникновение нового процесса возможно только в такой зоне, в которой значения  $\varphi_i$  ( $i-1$ ) потенциалов процессов находятся в определенных пределах:

$$\Omega_i(\varphi_i) = \bigcap_{i=0}^{i-1} \Omega_i, \left( \overset{\vee}{\varphi_i} < \varphi_i < \overset{\wedge}{\varphi_i} \right), \quad (21)$$

где  $\overset{\vee}{\varphi_i}$  и  $\overset{\wedge}{\varphi_i}$  – соответственно верхняя и нижняя границы значений потенциалов процессов. Нарушение этого условия неизбежно сопровождается затуханием  $\Phi_i$ -го процесса. Источник  $g_i$  формирования  $\Phi_i$ -го процесса определяется как разность энергий [7] и характеризует внутреннюю самоорганизацию термодинамического ансамбля процессов:

$$g_i = - \sum_{k,j=0}^n \left[ \tau_{jn}^* \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} - \tau_{ki}^* \frac{\partial \varphi_k}{\partial t} \right], \quad i = \overline{1, n}. \quad (22)$$

Из условия (29) следует, что при отсутствии  $k$ -х процессов ( $k > i$ ) источник протекания  $\Phi_i$ -го процесса положителен (формирование ядра  $i$ -го процесса). При ликвидации  $j$ -х процессов ( $j < i$ ) источник протекания  $i$ -го процесса отрицателен (затухание процесса). В случае  $g_i > 0$  при условии существования  $j$ -х и  $k$ -х процессов наступает стадия устойчивого протекания  $\Phi_i$ -го процесса. Одновременно положительность всех источников  $g_i > 0$  для термодинамического ансамбля процессов возможна только в изолированной системе. Синергетическим системам свойственна стохастичность, то есть их временную зависимость нельзя предсказать с абсолютной точностью. Поэтому простейшее эволюционное уравнение имеет следующий вид:

$$\dot{q} = \alpha \cdot q + f(t), \quad (23)$$

где  $f(t)$  – слагаемое, учитывающее флуктуацию сил во времени. В случае, если система состоит из  $n$  элементов (подсистем), то предлагаемый подход требует введения многих переменных – переменных состояния  $q_1, q_2, \dots, q_n$ . Рассмотрим множество  $\Omega_n$  всех  $2^n$  возможных состояний  $\omega = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n)$  системы  $S$ , характеризующих нормальную работу и выход из строя элементов (подсистем) ОЗ. Функцию  $p_i$  представим как бернуллиеву переменную, которая в соответствии с двумя возможными исходами может принимать только 2 значения:  $p_i = 1$ , если  $S_i$  находится в состоянии  $A_i^p$  и  $p_i = 0$ , если  $S_i$  находится в состоянии  $A_i^o$ . Разобьем  $\Omega_n$  на две части:  $\Omega_1$  и  $\Omega_0$ . Пусть  $\Omega_1$  представляет собой множество работоспособных состояний, а  $\Omega_0$  – множество отказов. Тогда ОЗ работоспособен (надежен), если  $\omega \in \Omega_1$  и неработоспособен при  $\omega \in \Omega_0$ . Пусть состояния  $\omega_i$  во времени представляют собой последовательность независимых испытаний с вероятностью исходов  $p_i = P(p_i = 1)$ ;  $p_i' = 1 - p_i = P(p_i = 0)$ ;  $i = (\overline{1, n})$  каждого  $i$ -го испытания. Тогда, в общем случае, вероятность надежного или ненадежного  $P'$  состояний СТС в момент времени  $t$  будет иметь вид [8]:

$$P = P(\omega \in \Omega_1) = \sum_{\omega \in \Omega_1} \prod_{i=1}^n P_i^{P_i} \cdot P_i'^{(1-P_i)}. \quad (24)$$

Так как ОЗ является СТС с последовательным соединением элементов (подсистем), то, анализируя соотношение (24) и опираясь на результаты работы [6], можно сказать следующее. Для оценки надежности СТС  $m$ -го порядка нет необходимости анализировать структуру взаимодействия ее подсистем и определять их изменения в течение

всего периода эксплуатации ОЗ. Достаточно проанализировать поведение соотношения (24) при условии  $n \rightarrow \infty$ , воспользовавшись результатами работы [10]:

$$\begin{cases} P > 1 - \exp(-\bar{k}n) \text{ при } k_p > \bar{p}, \\ P < 1 - \exp[-\bar{k}n + 0 \cdot (\ln n)] \text{ при } k_p > \underline{p}, \\ P < \exp(-\bar{k}n) \text{ при } k_p < \bar{p}, \end{cases} \quad (25)$$

где  $k_p$  – коэффициент работоспособности;  $k_p = m/n$ ;  $m$  – число работоспособных подсистем (элементов);  $n$  – общее число подсистем СТС;  $\bar{p}$  – средняя вероятность надежного функционирования подсистем (элементов); выражение « $0 \cdot (\ln n)$ » означает величину высшего порядка малости по отношению к другим членам уравнения;

$\underline{p} = p / \left(1 + p - \hat{p}\right)$  – граничная вероятность безотказной работы подсистем;

$\bar{k} = k(k_p / \bar{p})$  – функции, определяемые соотношением:

$$k = k_p \ln(k_p / p) + (1 - k_p) \cdot \ln(1 - k_p) \cdot (1 - p) \geq 0. \quad (26)$$

Очевидно, что функционирование СТС будет надежным, если значение коэффициента работоспособности  $k_p$  превышает некоторую среднюю вероятность работоспособного состояния ее подсистем ( $k_p \geq \bar{p}$ ). Если  $k_p < \bar{p}$  и ситуация в ОЗ изменяется независимо от человека, то надежность и эффективность функционирования СТС стремится к нулю и наоборот. Возвращаясь к соотношению (4) применительно к предложенному синергетическому подходу, можно записать следующее уравнение, характеризующее зависимость эффективности управления  $A$  надежности функционирования ОЗ [6]:

$$A = \frac{b \cdot t_{л.о.}}{a \cdot t_{р.о.}}, \quad (27)$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно скорости развития и ликвидации опасности. В соответствии с последним соотношением предложенный синергетический подход схематически может быть проиллюстрирован при помощи качественного графика (рис.2), характеризующего цикл работы СТС.

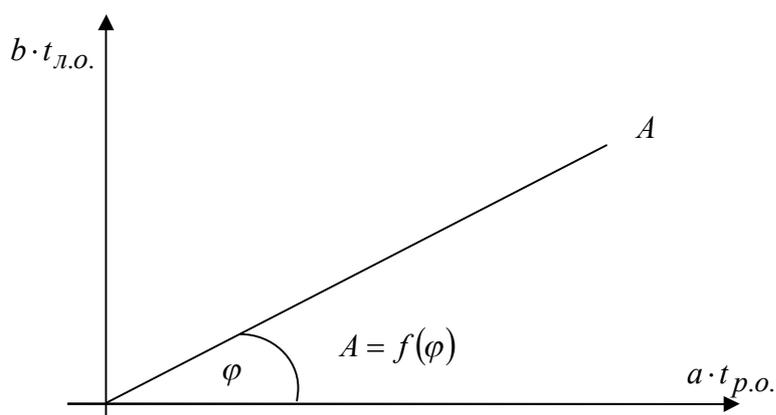


Рисунок 2 – Качественный график, характеризующий соотношение между интенсивностью роста и подавления опасности ведения работ в ОЗ и эффективностью управления надежностью его функционирования

**Выводы.** Таким образом, используя общие положения, изложенные в работах [1, 3, 6, 8, 9], и результаты, полученные в настоящей работе, сформулируем основные постановочные принципы синергетического подхода к моделированию надежности функционирования ОЗ.

1. ОЗ в современном представлении является СТС, функционирование которой происходит при непосред-

ственном и активном участии горнорабочих. Вследствие этого ОЗ – это психоинформационная система, обладающая положительными и отрицательными обратными связями, а также стохастичностью и непредсказуемостью.

2. ОЗ рассматривается как нелинейная диссипативная СТС, состоящая из подсистем и элементов, которые формируют их структурные кластеры.

3. Отказы элементов производственной системы ОЗ, являясь случайными, в совокупности образуют последовательность зависимых и независимых событий. Это происходит в том случае, когда отказ элемента (подсистемы) вызывает неуправляемое движение материальных потоков: потеря устойчивости боковых пород, взрывы газа и пыли и т.п. Это неуправляемое движение, вызванное отказом первого элемента, оказывает воздействие на другие элементы в качестве внешней нагрузки (возмущения). Если ее величина превышает предельно допустимый уровень для следующего элемента, то происходит его отказ. Так проявляется зависимость надежности одного элемента от надежности другого. При этом отказы приобретают лавинообразный характер, вовлекая все новые элементы.

4. Полученные основные результаты могут быть применены к СТС другого назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хакен Г. Синергетика: Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах / Хакен Г. – М.: Мир, 1985. – 419с.
2. Червоный А.А. Надежность сложных систем / Червоный А.А., Лукьященко В.И. – [2-е изд, перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1976. – 288с.
3. Залога В.А. Синергетический подход к организации процессов жизненного цикла изделий машиностроения / В.А.Залога, К.А.Дядюра, С.Н.Соболев // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки». – 2008. – №1. – С.89–94.
4. Мясников А.А. Повышение эффективности и безопасности горных работ / Мясников А.А., Павлов А.Ф., Бонецкий В.А. – М.: Недра, 1979. – 216с.
5. Нечипоренко В.И. Структурный анализ систем / Нечипоренко В.И. – М.: Сов. Радио, 1977. – 216с.
6. Мещанинов С.К. Научные основы обеспечения надежности функционирования очистных забоев шахт Украины: монография / Мещанинов С.К. – Д.: Национальный горный университет, 2005. – 230с.
7. Рогачев Е.И. Математические модели адаптации процессов и подсистем угольной шахты /Е.И.Рогачев, Г.И.Грицко, В.Н.Вылегжанин. – Алма-Ата: Наука, 1979. – 240с.
8. Флейшман Б.С. Основы системологии / Флейшман Б.С. – М.: Радио и связь, 1982. – 368с.
9. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Смирнов Н.В., Дунин-Барковский М.В. – М.: Наука, 1969. – 511с.

*Поступила в редколлегию 19.06.2013.*