

Губенко Д.И., инженер  
(ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ НАДЕЖНОСТИ ШАХТНОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СЕТИ ОТ УТЕЧЕК СЖАТОГО ВОЗДУХА

Губенко Д.І., инженер  
(ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ НАДІЙНОСТІ ШАХТНОЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ МЕРЕЖІ ВІД ВИТОКІВ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ

Gubenko D.I., M.S (Tech.)  
(SE «Design Office «Yuzhnoye» by M.K. Yangel»)

## STUDY OF DEPENDENCE BETWEEN THE MINE PNEUMATIC SYSTEM RELIABILITY AND COMPRESSED AIR LEAKAGES

**Аннотация.** В статье исследовано влияние утечек сжатого воздуха на надёжность работы шахтной пневматической сети при нарушении её герметичности. Исследования выполнены на основании методов прикладной теории надёжности с выбором вероятности безотказной работы шахтной пневматической сети в качестве показателя надёжности. В построенной математической модели оценки показателей надёжности использован экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы. Получена зависимость вероятности безотказной работы пневматической системы шахты от её суммарной негерметичности. Показано, что вероятность безотказной работы шахтной пневматической сети в течении восьмичасового рабочего дня может быть менее 50 % в зависимости от степени негерметичности сети. Применение полученных результатов позволит повысить требования по обеспечению надёжности и эффективности работы пневматического оборудования на горнодобывающих предприятиях.

**Ключевые слова:** шахтная пневматическая сеть, надёжность, сжатый воздух, утечка, негерметичность, время безотказной работы.

Надёжность системы или элемента в общем случае является сложным механизмом, который характеризуется способностью системы или элемента выполнять заданные функции, обусловленные безотказностью, долговечностью и ремонтпригодностью. Основным и наиболее важным в обеспечении надёжности технических систем и элементов, которые могут быть невосстанавливаемыми и восстанавливаемыми, является свойство безотказности, которое оценивается по количественным показателям надёжности [1].

Наиболее часто надёжность технической системы или элемента оценивается по вероятности безотказной работы  $p(\tau)$ . Поэтому для оценки надёжности снабжения шахтных потребителей сжатым воздухом, производимым шахтным компрессорным хозяйством и транспортируемым по трубопроводным сетям, применим именно этот количественный показатель надёжности.

Основываясь на принципиальной схеме компрессорного хозяйства горнодобывающего предприятия, приведённой в работе [2], примерную структурную

схему шахтной пневматической сети можно представить, в виде, который приведён на рисунке 1.

На рис. 1 приведена примерная структурная схема шахтной пневматической сети горнодобывающего предприятия, которая содержит как последовательно, так и параллельно соединённые элементы. В методах теории вероятностей эти группы структурных элементов обычно заменяются квазиэлементами, вероятность безотказной работы которых определяется [1]:

$$\left. \begin{aligned} p_{\text{пос}}(\tau) &= \prod_{i=1}^n p_i(\tau); \\ p_{\text{пар}}(\tau) &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p_i(\tau)], \end{aligned} \right\}$$

где  $p_{\text{пос}}(\tau)$  – вероятность безотказной работы квазиэлемента, состоящего из  $i$  последовательно соединённых элементов;  $\tau$  – время работы, ч;  $n$  – количество квазиэлементов;  $p_i(\tau)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -ого элемента;  $p_{\text{пар}}(\tau)$  – вероятность безотказной работы квазиэлемента, состоящего из  $i$  параллельно соединённых элементов.

Поскольку рассматривается структурная схема абстрактной пневматической сети, в которой нет конкретного количества отдельных структурных элементов, вполне допустимо рассматривать упрощённую структурную схему, приведённую на рис. 2.

Согласно схемы, приведённой на рис. 2, вероятность  $p_{\text{сети}}(\tau)$  безотказной работы шахтной пневматической сети по воздухообеспечению потребителей будет равна:

$$p_{\text{сети}}(\tau) = p_A(\tau)p_B(\tau)p_C(\tau)p_D(\tau), \quad (1)$$

где  $p_A(\tau)$  – вероятность безотказной работы квазиэлемента А;  $p_B(\tau)$  – вероятность безотказной работы квазиэлемента Б;  $p_C(\tau)$  – вероятность безотказной работы квазиэлемента С;  $p_D(\tau)$  – вероятность безотказной работы квазиэлемента Д;

Практика эксплуатации компрессорных систем на шахтах Донбасса показала, что основными причинами, снижающими эффективность и надёжность работы этих агрегатов, являются неисправности механической системы и системы смазки компрессоров, а также неудовлетворительная работа системы



охлаждения воздуха в них. Экономичность и устойчивость работы турбокомпрессорных систем определяется в основном интенсивностью охлаждения воздуха в промежуточных воздухоохладителях.

Шахтная пневматическая сеть, включающая в себя магистральные и участковые трубопроводы, является соединительным звеном между компрессорной станцией, вырабатывающей сжатый воздух, и пневмоприводом горных машин и механизмов – потребителями сжатого воздуха. Она монтируется частично из стальных труб общего назначения, а частично – из гибких резиновых или резиноканевых шлангов. Условия эксплуатации шахтной пневматической сети характеризуются высокой влажностью окружающей среды, что вызывает усиленную коррозию труб. Поэтому надёжность этой сети зависит в первую очередь от её технического состояния и герметичности соединений.

Утечка сжатого воздуха из пневматической сети шахты приводит к падению давления во всей технологической системе, что существенно снижает вероятность её безотказной работы по воздухоснабжению потребителей. Учитывая это и приведённую выше характеристику структурных элементов схемы, приведённой на рис. 2, для вероятности безотказной работы этих элементов можно принимать

$$p_A^y(\tau) = p_B^y(\tau) = p_C^y(\tau) = p_D^y(\tau)$$

где индекс «у» соответствует утечке сжатого воздуха. С учётом этого равенство (1) будет иметь вид:

$$p_{\text{сети}}^y(\tau) = [p_C^y(\tau)]^4. \quad (2)$$

Показатели надёжности в прикладной теории надёжности в общем случае определяются по [1-3]: экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы; нормальному закону распределения времени безотказной работы с использованием функций Лапласа; закону распределения Вейбулла с использованием параметров закона распределения Вейбулла и гамма-функций; закону распределения Релея времени безотказной работы.

Наиболее часто на практике применяется экспоненциальный закон распределения вероятности безотказной работы системы [4]:

$$p_C^y(\tau) = \exp\left[-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) d\tau\right], \quad (3)$$

где  $\lambda(\tau)$  – интенсивность отказов системы.

Степень негерметичности системы или объекта  $\Delta$ , которая имеет размерность  $\text{м}^3\text{Па}/\text{с} = \text{Вт} = 7,502 \cdot 10^3 \text{ л}\cdot\text{мкм рт.ст.}/\text{с}$  принято оценивать по общепринятой в вакуумной технике формуле:

$$\Delta = (P_k - P_n) V_c / \tau,$$

где  $P_k$  и  $P_c$  – соответственно конечное и начальное давление рабочей среды, Па;  $V_C$  – объём рассматриваемой системы или объекта, м<sup>3</sup>.

С учётом этого интенсивность отказов шахтной пневмосистемы при нарушении надёжности воздухообеспечения потребителей за счёт утечек воздуха будет равна:

$$\lambda(\tau) = \frac{\Delta}{V_C (P_k - P_n)}, \quad (4)$$

С учётом равенств (3) и (4) соотношение (2) примет вид

$$P_{\text{сети}}^y(\tau) = \left\{ \exp \left[ - \frac{\Delta}{V_C (P_k - P_n)} \tau \right] \right\}^4.$$

На рис. 3 представлены расчётные зависимости вероятности безотказного воздухообеспечения потребителей шахтной пневмосистемы от её суммарной негерметичности для восьмичасового рабочего дня  $\tau = 8$  ч. Зависимости построены для шахтной пневмосети, характеристика которой приведена в таблице 1.

Как видно из рис. 3, в зависимости от степени негерметичности шахтной пневматической сети вероятность её безотказной работы по воздухообеспечению потребителей в течение восьмичасового рабочего дня может быть менее 50 %.

Таблица 1 – Примерная характеристика шахтной пневматической сети

Давление на потребителях, $P_k$ , МПа	Общая длина, км	Длина участка, м	Внутренний диаметр, м
0,5	3,9	400	0,05
		1000	0,10
		1000	0,15
		500	0,20
		500	0,25
		500	0,30

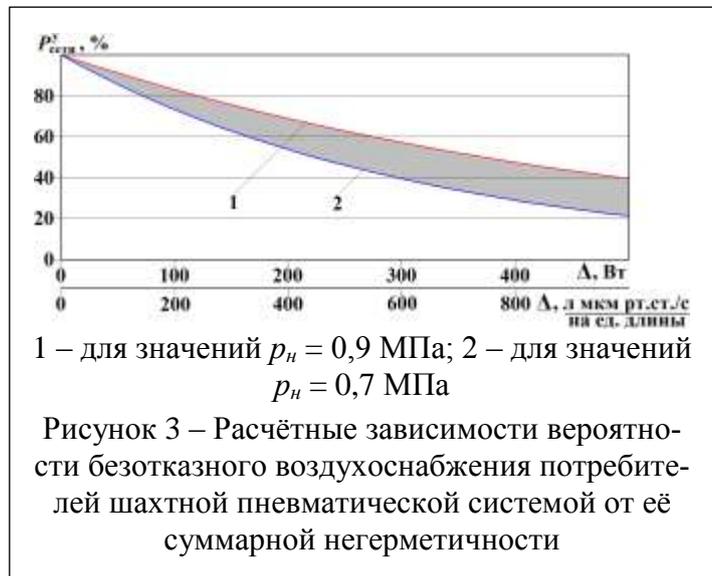
### Выводы.

В результате выполненных исследований установлено:

- негерметичность шахтной пневматической сети существенно (до 50 %) влияет на надёжность снабжения потребителей сжатым воздухом;
- для повышения эффективности работы шахтного пневматического оборудования необходимо повышать требования по контролю герметичности элементов шахтной пневматической сети.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырицын, Т.А. Надёжность гидро- и пневмопривода. – М.: Машиностроение, 1981. – 216 с.
2. Соловьев, В.С. Стационарные машины и комплексы: Учебное пособие / В.С. Соловьев, А.С. Смородин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2002. – 88 с.



3. О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / Грядущий Б.А., Кирик Г.В., Коваль А.Н. [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – №1(11). – С. 2-5.

4. Фатеева, Н.Н. Алгоритм расчета количественных показателей безотказности в системах гидрорепнемоагрегатов на этапе их синтеза / Н.Н. Фатеева // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2011. – №5. – С. 129-135.

### REFERENCES

1. Syritsyn, T.A. (1981), *Nadezhnost gidro- i pnevmoprivoda* [Reliability of hydro- and pneumatic actuator], Machine Building, Moscow, SU.

2. Solovyev, V.S. (2002), *Stazionarnye mashiny i komplekсы: Uchebnoye posobiye* [Stationary machines and complexes: Textbook], St. Petersburg State Mining Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia.

3. Gryaduschiy B.A., Kirik G.V., Koval A.N. (et al.) (2008), “On the problems pneumoenergetic complex of mines”, *Compressor and power engineering*, no. 1 (11), pp. 2-5.

4. Fateeva, N.N. (2011), “The algorithm for calculating of quantitative indicators reliability in systems gidropnevmof of aggregates at the stage of synthesis”, *Power and thermal engineering processes and equipment*, no. 5, pp. 129-135.

---

### Об авторе

*Губенко Дмитрий Иванович*, начальник СНИЛ-110, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» (ГКБ «Южное» им. М.К. Янгеля), Днепропетровск, Украина, [di\\_gubenko@i.ua](mailto:di_gubenko@i.ua)

### About the author

*Gubenko Dmitry Ivanovich*, Head of SRL-110, State Enterprise “Design Office “Yuzhnoye” by M.K. Yangel (SE “Design Office “Yuzhnoye” by M.K. Yangel), Dnepropetrovsk, Ukraine, [di\\_gubenko@i.ua](mailto:di_gubenko@i.ua)

**Анотація.** Стаття спрямована на дослідження впливу витоків стисненого повітря на надійність роботи шахтної пневматичної мережі при порушенні її герметичності. Дослідження виконані на підставі методів прикладної теорії надійності з вибором ймовірності безвідмовної роботи шахтної пневматичної мережі як показника надійності. У побудованій математичній моделі оцінки показників надійності використаний експонентний закон розподілу часу безвідмовної роботи. Отримано залежність ймовірності безвідмовної роботи пневматичної системи шахти від її сумарної негерметичності. Показано, що ймовірність безвідмовної роботи шахтної пневматичної мережі протягом восьмигодинного робочого дня може бути менше 50 % залежно від ступеню негерметичності мережі. Застосування отриманих результатів дозволить підвищити вимоги щодо забезпечення надійності та ефективності роботи пневматичного обладнання на гірничодобувних підприємствах.

**Ключові слова:** шахтна пневматична мережа, надійність, стиснене повітря, витік, негерметичність, час безвідмовної роботи.

**Abstract.** The article presents a study of compressed air leakage impacting on reliable performance of the mine pneumatic systems with damaged hermeticity. The study was based on methods of applied reliability theory with a probability of the mine pneumatic system nonfailure operation chosen as a reliability factor. A mathematic model was created for estimating the reliability factors by exponential law of nonfailure operation time distribution. Dependence between probability of the mine pneumatic system nonfailure operation and the system summary leakages was determined. It was shown that probability of the mine pneumatic system nonfailure operation during one 8-hour working day could be less than 50 % depending on the rate of the system nonhermeticity. The findings shall improve requirements for ensured reliability and efficiency of pneumatic equipment operation at the mining companies.

**Keywords:** mine pneumatic system, reliability, compressed air, leakages, nonhermeticity, nonfailure operation time.

*Стаття поступила в редакцію 02.04. 2015*

*Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук В.Г. Шевченко*

**Дирда В.І.**, д-р техн. наук, професор,  
**Калганков Є.В.**, аспірант,  
**Цаніді І.М.**, аспірант  
(ІГТМ НАН України),  
**Черній О.А.**, магістр  
**Кириленко О.І.**, інженер  
(ДДАЕУ)

### **ДО РОЗРАХУНКУ ГУМОВОЇ ФУТЕРІВКИ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ МАТЕРІАЛУ**

**Дырда В.И.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Калганков Е.В.**, аспирант,  
**Цаниди И.Н.**, аспирант  
(ИГТМ НАН Украины),  
**Черний А.А.**, магистр,  
**Кириленко А.И.**, инженер  
(ДДАЕУ)

### **К РАСЧЕТУ РЕЗИНОВОЙ ФУТЕРОВКИ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛА**

**Dyrda V.I.**, D.Sc. (Tech.), Professor,  
**Kalgankov Ye.V.**, Doctoral Student,  
**Tsanidy I.N.**, Doctoral Student  
(IGTM NAS of Ukraine),  
**Cherniy A.A.**, M.S (Tech.)  
**Kirilenko A.I.**, M.S (Tech.)  
(DSAEU)

### **ON CALCULATION OF THE RUBBER LINING WITH MATERIAL SPECIFIC BEHAVIOUR TAKEN INTO ACCOUNT**

**Анотація.** Запропоновано модель процесу локальної деформації гумової футерівки з урахуванням ударної дії кулькового завантаження млина та абразивно-втомного зносу поверхні футерівки. В основі локальної деформації розглянуто ефект об'ємного стискання гуми. Також в роботі розглянуто рудно-кулькове завантаження млина, його рух та взаємодія з гумовою футерівкою, а також його вплив на фізико-механічні властивості гуми.

Отримані експериментальні данні розподілу температури нагріву гумової футерівки по висоті для млина МШЦ 3,2×4,5: максимальна температура футерівки була в діапазоні 62-67 °С, температура рідини на виході з барабана була 45-55 °С.

Отримані експериментальні дані ударної дії кульок на футерівку вказали на локальне підвищення температури на (10...15) °С, що при певних умовах може призвести до швидкого руйнування футерівки. Розглянуто процес руйнування гуми в контексті фрактального аналізу при дії ударних навантажень на поверхню футерівки.

**Ключові слова:** об'ємний стиск, фрактал, фрактальний аналіз, кульковий млин, гумова футерівка, кластер, знос