

ПРОГНОЗИРАНЕ НА РАБОТОСПОСОБНОСТТА НА ПОЛИАМИДНИ ВЪЗДУХОВОДИ В ПНЕВМАТИЧНИ СИСТЕМИ

Николай Стефанов
Технически Университет-Габрово

FORECASTING WORKING CAPACITY OF POLYAMID AIR PIPE IN PNEUMATIC SYSTEMS

Nikolay Stefanov
Technical University of Gabrovo, 5300 Gabrovo, Bulgaria

Abstract

This paper presents the results of predicting the working efficiency of polyamide air ducts in pneumatic systems.

The problem of improving strength and durability of polyamid air pipes is the thermoflucation approach of fracture. Based on the results of the experiment we can predict the performance of polyamid air pipes taking into account external load force.

The calculation results are in accordance with the experimental data obtained by other authors who have investigated the fracture of pipes.

In this paper it is also developed methodology which investigates the reliability of pneumatic drive systems. A mathematical model is presented to calculate the reliability characteristics.

Keywords: pneumatic systems; durability; activation energy; thermo-fluctuation theory.

ВЪВЕДЕНИЕ

Пневматичните системи намират широко приложение в различните производства на дървообработващата, металообработващата, хранителната и химическа промишленост, както и на редица други места изискващи механизация и автоматизация на различните дейности.

Различните задачи по автоматизирането на производствените процеси могат да се решат със стандартни пневматични управляващи и спомагателни устройства и елементи. Към спомагателните елементи изграждащи пневматичните системи се отнасят и пневматичните линии за връзка между елементите (Schlauch). Обикновено материалът от който те се произвеждат е полиамид тип PA-11 или PA-12 с търговско наименование Rilsan.

Надеждността е основно свойство на пневматичните системи, изразяващо се в способността за запазване на експлоатационните показатели на системата при зададе-

ни функционални изисквания за определен интервал от време.

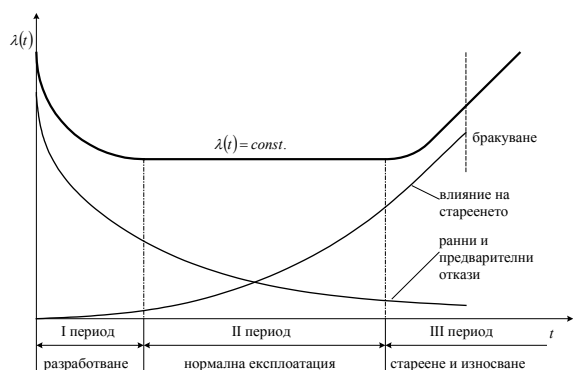
В този смисъл, за използваните полиамидни калибровани тръби за въздух в пневматичните системи, явяващи се невъзстановими изделия, е необходимо определянето на тяхната дълговечност, т.е. съхраняване на работоспособността им до настъпване на пределно състояние, изразяващо се в техническо обслужване или ремонт.

Един от основните показатели на надеждността за невъзстановими изделия е интензивността на отказите $\lambda(t)$.

При разпределението на интензивността на отказите се наблюдават три периода (фиг. 1): I-разработка; II-нормална експлоатация ($\lambda \approx const.$); III-процеси на ускорено износване и стареене.

В третия период се проявяват предимно постепенните откази, получени в резултат на процесите на стареене, износване и умора в материалите.

Целта на разработката е да се приложат съществуващите методики за оценка на основните показатели на надеждността на полиамидна калибрована тръба за въздух, подложена на естествено стареене в продължение на 35 години при средногодишна температура на обкръжаващата среда $T = 23^\circ C$ и се направи оценка на надеждността при нейното използване в пневматична система.



Фиг. 1. Интензивност на отказите

ИЗЛОЖЕНИЕ

За прогнозирането на дълговечността на полиамидните тръби за въздух е целесъобразно да се подходи от позиция на термофлукуационната концепция на деформация и разрушаване на твърдо тяло. Процесите могат да бъдат описани със зависимост, с помощта на която е възможно да се прогнозира дълговечността и времето за експлоатация на материала в широк диапазон на натоварване и изменение на температурата. Тази зависимост се записва във вида:

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (1)$$

където:

τ_m - минимална дълговечност (период на колебание на кинетичните единици), s;

U_0 - максимална енергия на активация на разрушаване при отсъствие на напрежение, J/mol или J ;

γ - константа, $J/mol MPa, m^3/mol$ или m^3 ;

T_m - пределна температура на съществуване на твърдото тяло, K ;

R - универсална газова константа, $R = 8.314 J/mol K$;

σ - напрежение, MPa ;

T - температура, K . За работна среда - съгъстен въздух в съответствие с ISO 8573-1-2010 се приема $T = 293 K$.

Стойностите на параметрите от зависимост (1) могат да се вземат от различните literатури [1,2,5], като най-често за тях се приема:

$$\tau_m = 10^{-13} \div 10^{-12} s,$$

$$\gamma = 0.12 \div 0.76 m^3 / k mol = 20 \div 128 \times 10^{-23} cm^3$$

или в общия случай $\gamma = 10^{-28} \div 10^{-27} m^3$.

Зависимост (1) може да се представи и във вид чрез използване на връзката

$$\frac{R}{N_A} = k,$$

където $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ е константа на Болцман, а $N_A = 6.022 \times 10^{23} 1/mol$ е константа на Авогадро и изразява броя на молекулите в един мол.

Разрушаването на твърдите тела под действието на натоварващи сили се разглежда като времеви процес на постепенна деструкция на структурните връзки. Механичната сила приложена върху телата не предизвиква разпада на всички междуатомни връзки, а ги деформира и увеличава амплитудната флукуация. В този смисъл енергията на активация за различните материали се явява физична константа и не зависи от състоянието на материала.

Зависимост (1) при $T \ll T_m$ и $U = U_0 - \gamma \sigma$ може да бъде структурирана във вида:

$$\tau = \tau_m e^{\frac{U}{RT}}, \quad (2)$$

или

$$\tau(N) = C e^{b \times \varepsilon_\alpha}, \quad (3)$$

където:

b, C - константи, характеризиращи процеса на разрушаване;

ε_α - натрупване на остатъчна деформация;

N - брой цикли до разрушаване.

За оценка на основните показатели на надеждността на полиамидна калибрована тръба за въздух, подложена на естествено

старее, е извършено изпитване чрез Т-образно огъване (ISO 17132:2007). За целта е реализиран изпитвателен стенд с пневматични елементи от фирма Festo [12]. Циклите на натоварване чрез огъване се осъществяват с пневматичен цилиндър с осцилиращо действие тип X-35-200В. Цилиндърът е куплиран с блок регулираща апаратура тип А-5-1/4, и има възможност за регулиране дължината на хода на буталото, както и възможност за промяна скоростта на движение на буталото в права и обратна посока. За управление на цилиндъра се използва лентов програматор тип PNS-10В. Дължината на лентата се определя от броя на включените щанги и гърбици. В зависимост от реализираната програма, времето за един пълен оборот на лентата е от 9s до 24h. Към пистите на програматора са включени и пневматични броячи тип PZA-E-B за отчитане на броя реализирани цикли и обороти на лентата. Проведените експериментални наблюдения са направени при настройки отговарящи на 32s за един пълен оборот на лентата, за което време се реализират 16 цикъла на натоварване. Захранването на системата е 0.8 MPa .

Обект на изпитване са полиамидни тръби (Schlauch) с геометрични размери $\varnothing 6 \times 1 \text{ mm}$ и дължина 150 mm, при които има естествено старее в продължение на 35 години. Радиусът на огъване на тръбите е 14 mm, като тази стойност е съобразена с изискванията поставени в [9] за минимален радиус на огъване.

При огъването на тръбите се наблюдава участък където кръглото им напречно сечение преминава в овално.

Овалността на тръбите се определя по зависимост:

$$\alpha = 2(a - b)/(a + b), \quad (4)$$

където a и b са размерите на голямата и малка ос на овалното сечение, измерени чрез електронен микрометър по външната повърхнина.

Експерименталните наблюдения се свеждат до определяне на зависимостта между броят цикли до разрушаване и натрупването на остатъчна деформация $N = f(\varepsilon_\alpha)$. За ε_α се използва зависимост:

$$\varepsilon_\alpha = \frac{\alpha_0 - \alpha_2}{\alpha_0 - \alpha_1}, \quad (5)$$

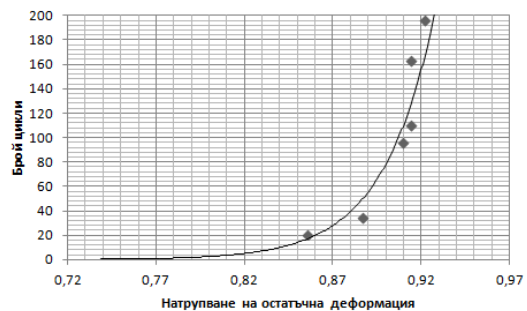
където:

α_0 - овалност преди деформацията;

α_1 - овалност, определена в края на процеса на разрушаване;

α_2 - овалност, определена в края на процеса на разрушаване след задържане в границите на 3 min .

Обобщените експериментални резултати са представени на фиг. 2.



Фиг. 2. Зависимост $N = f(\varepsilon_\alpha)$

След като се отчете честотата на реализираните цикли, времето τ може да се изрази по зависимост (3) с корелационен коефициент $r_{\varepsilon_\alpha, \tau} = 0.96$, отчитащ взаимно свързаността между параметрите, или:

$$\tau = 6 \times 10^{-12} e^{34.286 \varepsilon_\alpha}. \quad (6)$$

При логаритмуването на зависимост (3), се построяват графични зависимости от вида $\ln \tau = f(b)$ при $\varepsilon_\alpha = const$. Графичните зависимости представляват прави линии с различни наклони. Всички прави се пресичат в точка лежаща на ординатната ос (полюс) при $b = 0$. Тогава $\ln \tau = \ln \tau_m$, или $\ln \tau = \ln C$. За линията $\ln \tau = f(b)$ при $b = 34.286$, $\tau_m = 6 \times 10^{-12} \text{ s}$ и $\varepsilon_\alpha = 1$ се получава ъгъл φ , отстоящ между ординатата и правата линия. По тангенса от този ъгъл се определя дълговечността на тръбата при старее, максималната стойност на коефициента b и енергията на активация $U = b_{\max} \varepsilon_\alpha RT$.

От анализа, за b се получава: $b_{\max} = 34.286 \text{ tg } \varphi = 45.46$. При $\varepsilon_\alpha = 1$

(отсъствие на деформация) и температура $T = 293 K$, максималната стойност на енергията на активация при отсъствие на действащи напрежения е:

$$U = U_0 = 110.74 kJ/mol \left(1.84 \times 10^{-19} J \right).$$

Дълговечността τ е 10.68 години. Тази стойност е близка до посочената в [9] стойност от 10 години минимум експлоатационен живот.

Като обобщаваща зависимост за определяне на дълговечността, може да се използва зависимост (1), отчитаща влиянието на напрежението от действащото налягане на въздуха в тръбата. Напрежението σ се определя по зависимост 9, дадена в [7] за тръба с единична дължина, след въвеждането на редица допускания, или:

$$\sigma = p \left[\frac{(2 + \alpha)d}{4\delta} - 1 \right], \quad (7)$$

където:

p -налягане, Pa ;

d -външен диаметър;

δ -дебелина на стената.

Така например, при повишаване на температурата с $5^\circ C$, $\alpha = 0.003$ и налягане $p = 0.8 MPa$ и параметри: $\tau_m = 6 \times 10^{-12} s$, $U_0 = 1.84 \times 10^{-19} J$, $\gamma = 10^{-27} m^3$, $T_m \gg T$, за дълговечността се получава $\tau = 3.52$ години.

При изследване на дълготрайността и безотказността на еднократно употребявани (невъзстановяеми) изделия най-често се използва законът на разпределение на Weibull. За двупараметричното разпределение на Weibull, плътността на разпределение има вида:

$$f(\tau) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\tau}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{\tau}{\eta} \right)^\beta}, \quad (8)$$

където:

η -параметър на мащаба;

β -параметър на формата;

Ако се положи $\lambda = 1/\eta^\beta$, се получава следната зависимост:

$$f(\tau) = \lambda \beta \tau^{\beta-1} e^{-\lambda \tau^\beta}, \quad (9)$$

където λ е интензивността на потока събития;

За функцията на разпределение се записва:

$$F(\tau) = 1 - e^{-\lambda \tau^\beta}. \quad (10)$$

Точковите оценки на показателите на надеждност се записват със зависимостите:

-вероятност за безотказна работа до първи отказ

$$P(\tau) = e^{-\lambda \tau^\beta}; \quad (11)$$

-интензивност на отказите;

$$\lambda(\tau) = \lambda \beta \tau^{\beta-1}; \quad (12)$$

-средна отработка до отказ;

$$T_0 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{\lambda^{\frac{1}{\beta}}}. \quad (13)$$

Параметърът на формата се определя по метода на последователните приближения с използването на зависимост [4]:

$$\beta = 0.111186 + 0.835597 \frac{\bar{\tau}}{s} + 0.0759898 \left(\frac{\bar{\tau}}{s} \right)^2, \quad (14)$$

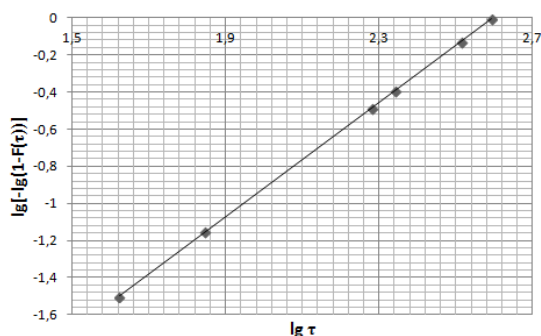
а параметърът на мащаба по зависимост:

$$\eta = \frac{\bar{\tau}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}, \quad (15)$$

където $\bar{\tau}$ е математичното очакване, а s е средноквадратичното отклонение.

От експерименталните наблюдения при $\bar{\tau} = 207 s$ и $s = 138 s$, за параметрите на разпределението се получават стойностите: $\beta = 1.54$ и $\eta = 230 s$.

Проверката на хипотезата, че емпиричното разпределение се съгласува с разпределението на Weibull, се извършва с критерия на съгласуваност- χ^2 , или по графичен начин. Графичният начин се изразява в линейност между величините $\lg \tau_i$ и $\lg[-\lg(1 - F(\tau_i))]$, при което се твърди, че е налице съгласуваност между емпиричното и теоретично разпределение. На фиг. 3. е представена линейната зависимост изразяваща съгласуваност между величините.



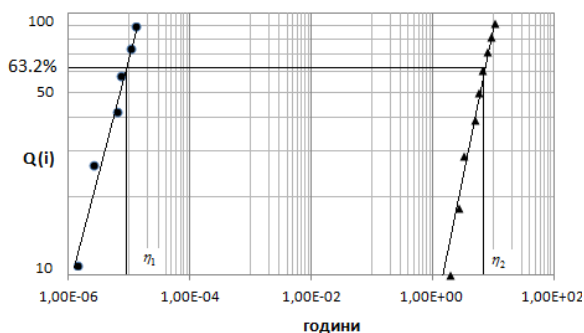
Фиг. 3. Зависимост $\lg[-\lg(1-F(\tau))] = f(\lg \tau)$

Параметърът β се приема за константа при различни нива на натоварващите въздействия, а параметърът η за характеристика на дълготрайността.

На фиг. 4 е показана вероятностната мрежа на Weibull, където са дадени резултатите от експеримента и теоретичните резултати получени по зависимост (2) при различни стойности на температурата на работната среда, изменяща се в границите на 5°C .

На абсцисната ос са поместени стойностите на τ , а на ординатната ос – вероятността за отказ $Q(i)$.

За $Q(i)$ се използва зависимостта за апроксимиране по рангове медиани, т. е. $Q(i) = (i - 0.3)/(n + 0.4)$, където i е ранг на всеки отказ, а n е обемът на извадката. Получени са две успоредни прави, което се явява гаранция за еднакви стойности на параметъра β .



Фиг. 4. Вероятностна мрежа на Weibull

При използването на Arrhenius-Weibull модел се приема, че $\eta = \tau(T)$ [10]. Тогава

$$\lambda = \left(\tau_m e^{\frac{U}{RT}} \right)^{-\beta}, \text{ или за интензивността на}$$

отказите се получава:

$$\lambda(\tau, T) = \left(\tau_m e^{\frac{U}{RT}} \right)^{-\beta} \beta \tau^{\beta-1}. \quad (16)$$

След като са определени стойностите на τ_m, U, β , окончателно за зависимост (16), може да се запише:

$$\lambda(\tau, T = 293 \text{ K}) = 3.5 \times 10^{-8} \tau^{0.54}, h^{-1}. \quad (17)$$

В [6] за средна стойност на интензивността на отказите, без да са посочени минимални и максимални стойности, е дадено $\lambda = 3.66 \times 10^{-6}, h^{-1}$

При експоненциално разпределение $\beta = 1 (\eta = T_0)$, или $\lambda(\tau, T) = \lambda$.

В случая може да се приеме, че $\beta = 1$. Тогава, за $T_0 = 1/\lambda$, се получава 31.6 години живот, която стойност е значителна по отношение стареенето на материала, т. е. три пъти по-дълъг живот. От същия порядък, но като максимална стойност се получава стойността $\lambda = 10.8 \times 10^{-6}, h^{-1}$ при $\beta = 1$ по зависимост (16). Тази стойност може да се приеме като начална за III период от фиг.1.

За анализа на изменението на надеждностните показатели на обект, представляващ техническа система от отделни елементи и възли, се използва т. нар. метод на структурните схеми. Същността на този метод се състои в преобразуването на реалния физически обект в еквивалентна структурна схема на надеждност, която представлява логически модел на функциониране на изследвания модел. Пневматичните задвижващи системи могат да се представят като система от последователно съединени елементи. Физическият смисъл на последователното съединение изразява необходимостта от безотказна работа на всички елементи, за да е възможно функционирането на системата.

Вероятността за безотказна работа на системата за изследвания период от време τ е:

$$P_C(\tau) = P_1(\tau)P_2(\tau)\dots P_i(\tau)\dots P_n(\tau) = \prod_{i=1}^n P_i(\tau), \quad (18)$$

където:

n -брой на последователно съединените елементи;

$P_i(\tau)$ -вероятността за безотказна работа на i -тия елемент.

В таблица 1. са дадени точковите оценки на показателите на надеждност на примерна пневматична задвижваща система.

Таблица 1. Оценки на показателите на надеждност

Елементи от пневматична система	Вероятност за безотказна работа $P_i(\tau)$
Въздухо-подготвителна група	$P_1(\tau) = e^{-7.8 \times 10^{-6} \times \tau}$
Пневматичен разпределител	$P_2(\tau) = e^{-4.64 \times 10^{-6} \times \tau}$
ДРОКП	$P_3(\tau) = e^{-0.5 \times 10^{-6} \times \tau}$
Пневматичен цилиндър	$P_4(\tau) = e^{-0.004 \times 10^{-6} \times \tau}$
Schlauch	$P_5(\tau)$ Зависимост 11

За вероятността за безотказна работа, по данните от таблица 1, за време $\tau = 43,2 \times 10^3 h$ се получава: $P_{1-4} = 57.51\%$, $P_5 = 73.25\%$ и $P_C = 41.75\%$.

За време $\tau = 86.4 \times 10^3 h$ се получава: $P_{1-4} = 32.57\%$, $P_5 = 40.45\%$ и т. н.

От литературата е известно, че вероятността за безотказна работа на системата намалява с увеличаване на броя на последователно съединените елементи и също така вероятността за безотказна работа на системата е винаги по-малка от тази на елемента с най-ниско ниво на надеждност. Тези твърдения се потвърждават от представените по-горе пресмятания.

С най-ниско ниво на надеждност се явяват тръбите за въздух и въздухоподготвителната група. Вероятността за безотказна работа рязко намалява с увеличаване на

времето за експлоатация вследствие влияние на стареенето на материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представена е теоретична методика за определяне дълговечността на тръби за въздух в пневматични системи.

2. Определени са част от параметрите при използването на модели на Arrhenius и Weibull.

3. Направена е оценка на надеждността на примерна пневматична система.

REFERENCE

- [1] Asheichik A. A., V. I. Polonsky. Definition of energy of activation of elastomers by the experimentally-theoretical method. St. Petersburg State Polytechnical University. University publishing house-St. Petersburg, 2015.
- [2] Azadov M. A. The analysis of the influence of parameters of distribution laws for dependability of technical system elements. Tashkent State Technical University. University publishing house-Tashkent, 2014.
- [3] Dimitrov K., D. Danchev. Reliability of construction machines and systems. Technique. Sofia, 1994.
- [4] Georgiev I. A. Application of Mathematical Statistics in Mechanical Engineering. Technique Sofia, 1982.
- [5] Goriyanov G. I., D.D. Karov. Breaking durability parameters estimation for elastomers. St. Petersburg State Polytechnical University. University publishing house-St. Petersburg, Vol.1 (165), 2013.
- [6] GOST 12.1004-91 /standard/.
- [7] Stefanov N. S., I. Angelov. Methodology evaluating the reliability of oval section tubes in the presence of a flat elliptical defect. International Scientific Conference UNITECH 09, Technical University of Gabrovo, Vol. II, Gabrovo, 2009.
- [8] Yartsev V.P., M. A. Zagorodnikova. Prediction of durability of asbestos pipes. Tambov State Technical University. University publishing house-Tambov, Vol. 2 (51), 2014.
- [9] www.festo.com/catalogue/ Plastic tubing, standard O. D.
- [10] www.weibull.com/hotwire/issue17/hottopics17.htm
- [11] www.polympart.com
- [12] 14/4a Lieferprogramm Pneumatic Festo /catalog/