

## Влияние на конструктивните и хидравлични параметри върху характеристиките на плоски кръгли аеростатични опори (ПКАСО)

Петко Цанков, Иванка Желева

**Abstract:** Numerical and experimental results obtained of the load characteristics of circular aerostatic bearing are presented in this article. The influence of the input pressure, the diaphragm diameter and the bearing radius upon the bearing load-carrying capacity is studied. The experimental data and the theoretical model are also considered.

**Key words:** aerostatic bearings, load-carrying capacity, gap, pressure distribution.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Аеростатичните опори (АСО) (или още газови, въздушни опори) са известни в инженерната практика със своите предимства спрямо другите видове лагерувания – намалено (почти нулево) триене, плавност на движението, възможност за прецизно позициониране. Това е наложило тяхното използване в координатно-измервателни машини, направляващи на ненатоварени или слабонатоварени обработващи, транспортиращи, монтажньо-сортиращи машини и автомати. В последните години има тенденция за изграждане на АСО като модули (възли), предназначени за вграждане в различни системи.

Носещата способност на АСО се създава от тънък газов филм в хлабината между две повърхнини. При изтичането на газа през тази хлабина се създава „подемна“ сила, уравновесяваща натоварването на опората.

АСО според вида на повърхнините, ограничаващи хлабината биват плоски, цилиндрични, конични и сферични.

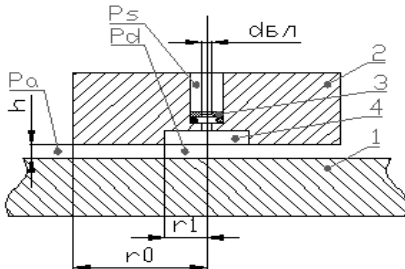
В зависимост от това как газът захранва хлабината между повърхнините се различават опори с различни видове дросели.

Обект на настоящата работа е числено и експериментално изследване на плоски кръгли аеростатични опори (ПКАСО) с централна камера.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

#### 1. Конструкция на АСО и теоретични зависимости

Конструкцията на ПКАСО с централна камера и нейните основни геометрични характеристики е показана на фиг. 1:



**Фиг.1 Конструкция на ПКАСО с централна камера**

1-основа; 2-опора; 3- дросел (бленда); 4-централна камера;  $r_0$  - радиус на опората;  $r_1$  - радиус на централната камера;  $h$ - хлабина на опората;  $p_s$  –захранващо (входно) налягане;  $p_d$  - налягане в централната камера;  $p_a$  -външно налягане (атмосферно)

Основните теоретични зависимости, описващи течението на въздуха в АСО, са

получени при определени ограничения, които са приложими за практиката с достатъчна точност.

1. Приемайки, че:

- отсъстват загуби на налягане при движението на въздуха до входа на опората;
  - течението през блендата е изоентропно;
  - налягането след блендата е статичното налягане в камерата ,
- за масовия дебит през блендата се получава [1,2] :

$$M = \alpha \cdot A \cdot \rho_s \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot R \cdot T}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_d}{p_s} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

където  $A$  - площта на сечението на блендата,  $\rho_s$  -плътност на захранващия въздух,  $\alpha$  - коефициент на дебита на блендата,  $k$  - показател на адиабатата,  $R$  - газова константа на въздуха,  $T$  – абсолютна температура на въздуха.

2. Разпределението на налягането в плоската хлабина и дебитът през плоската хлабина се получават при предположение, че:

- характерът на течението в хлабината е ламинарен;
- вискозните сили във въздушния слой се отчитат;
- инерционните сили във въздушния слой се пренебрегват;
- налягането по височината на хлабината е постоянно;
- няма приплъзване на границата между въздуха и ограничаващите го повърхнини (на основата и опората).

При тези условия за налягането и дебитът се получава съответно[1],[2],[3]:

$$p = p_d \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{p_a^2}{p_d^2}\right) \cdot \frac{\ln \frac{r}{r_1}}{\ln \frac{r_0}{r_1}}} \quad (2)$$

$$M = \frac{\pi \cdot h^3 \cdot (p_d^2 - p_a^2)}{12 \cdot \mu \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{r_0}{r_1}} \quad (3)$$

където  $p_d$  - статичното налягане в центъра на плоската хлабина ( в централната камера );  $\mu$  - динамичен коефициент на вискозитета на въздуха.

Най-важната функционална характеристика на АСО е тяхната товароносимост (натоварваща способност), определяна още като допустимо или пълно натоварване, поддържано от носещите повърхнини. Товароносимостта може да бъде получена, чрез интегриране на налягането на въздушния слой по цялата носеща повърхност [2]:

$$W = \int_{r_1}^{r_0} p \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr + p_d \cdot \pi \cdot r_1^2 - p_a \cdot \pi \cdot r_0^2 \quad (4)$$

За практиката се препоръчват някои зависимости за определяне на товароносимостта [2], например :

$$W = \zeta \cdot p_a \cdot \pi \cdot r_0^2 \quad (5)$$

където  $\zeta$  - коефициент на натоварване и в приближение може да се изчисли като

$$\zeta = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{p_d}{p_a} - 1 \right) \cdot \left( 1 + \frac{r_1}{r_0} + \frac{r_1^2}{r_0^2} \right) \quad (6)$$

В [3] Khatait, Lin предлагат друга зависимост:

$$W = (p_d - p_a) \cdot \frac{\pi \cdot (r_0^2 - r_1^2)}{2 \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r_1}\right)} \quad (7)$$

Новите възможности за числени решения и на сложни интегрални зависимости изключват вече необходимостта от приблизителни и условни, ограничени решения като (5) и (7).

## 2. Числен експеримент

Решението на задачата за получаване на аналитичната зависимост на товарната характеристика на опората ( $W-h$ ) е затруднено от неявния вид на тази зависимост. Поради това, отчитайки равенството на дебитите през бледата и плоската хлабина, въз основа на (1) и (3) е получена зависимостта ( $p_d - h$ ). От интегралната зависимост за товарносимостта на опората (4), след отчитане разпределението на налягането в хлабината (2) получаваме зависимостта ( $W - p_d$ ). Така, при различни стойности на налягането в камерата  $p_d$ , числено определяме товарната характеристика на ПКАСО - ( $W-h$ ). Този числен експеримент е направен за различни стойности на основните конструктивни и хидравлични параметри на АСО – диаметър на бледата, радиус на опората, захранващо налягане и отношение  $r_0/r_1$ . По този начин се определя влиянието на изброените параметри върху товарната характеристика на опората.

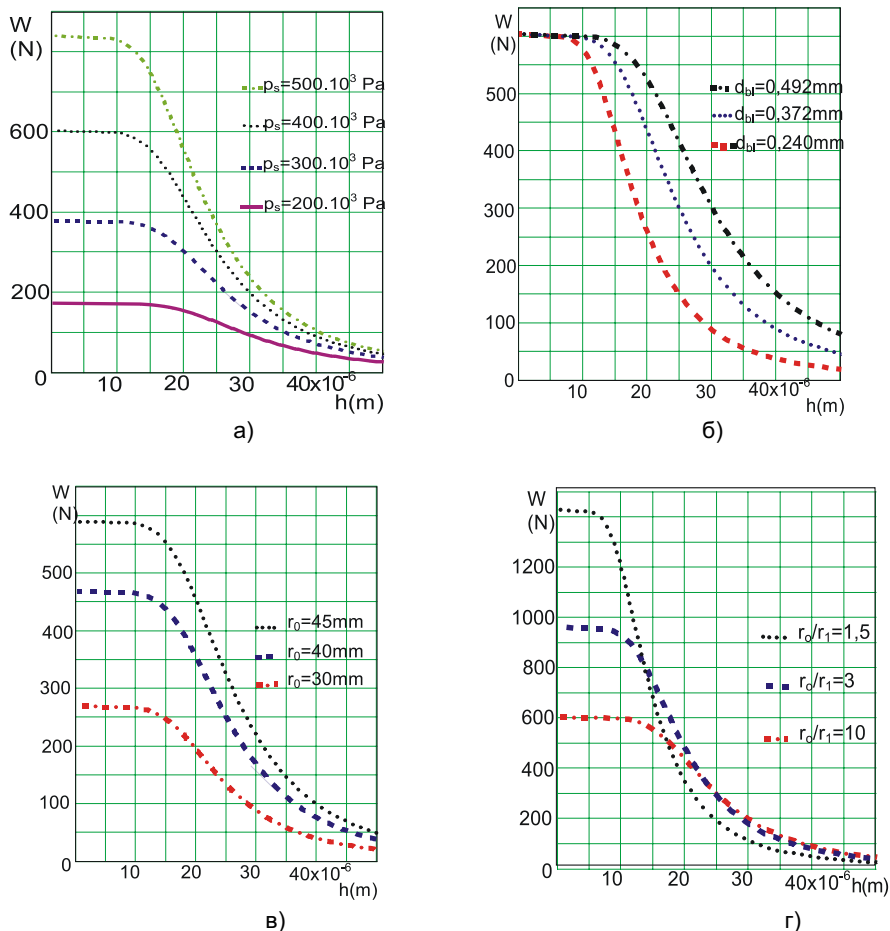
Резултатите от числения експеримент са позани на фиг.2. Анализът на тези резултати потвърждава, че повишаването на входното налягане  $p_s$  и радиуса на опората  $r_0$  водят до повишаване на максималната товарносимост на опората  $W_{max}$  – фиг.2 а,в. При хлабина  $h=20 \mu m$ , промяната на входното налягане  $p_s$  от 200 до 500 kPa, води до увеличаване на товарносимостта  $W$  от 160 до 560 N. При същата хлабина  $h$ , с увеличаване радиуса на опората нараства и товарносимостта съответно от 200 на 450 N. Намаляването на отношението  $r_0/r_1$  (или увеличаването на радиуса на централната камера на опората  $r_1$ ) повишава максималната товарносимост на опората – фиг.2 г.

Изменението на четвъртия параметър – диаметъра на бледата  $d_{bl}$  не оказва влияние върху максималната товарносимост (фиг.2 б) - влияе върху други характеристики на опората. При еднаква товарносимост, установената хлабина на опората  $h$  намалява с намаляването на  $d_{bl}$ . Например при  $W = 300$  N хлабините са 30,25 и 18  $\mu m$  при намаляване на  $d_{bl}$  съответно 0,492; 0,372 и 0,240 mm. Този анализ налага препоръката - при проектиране да се използват бленди с възможно по-малки диаметри.

## 3. Изпитване, опитни резултати и анализ

За изследване на основните характеристики на АСО (товарносимост, твърдост на опората, дебитна характеристика на опората) е създаден експериментален стенд. Схемата на стенда е показана на фиг. 3:

Дебитът на въздуха през опората се измерва с ротаметър 6, а налягането на входа на опората и разпределението му в опората – съответно с манометри 7 и 8. Повдигането на опората (хлабината  $h$ ) се отчита с микроиндикатор 12. Стендът предвижда и възможност за промяна на натоварването на опората –  $W$ , чрез промяна на товар 11.



**Фиг.2 Товарни характеристики на ПКАСО при:**

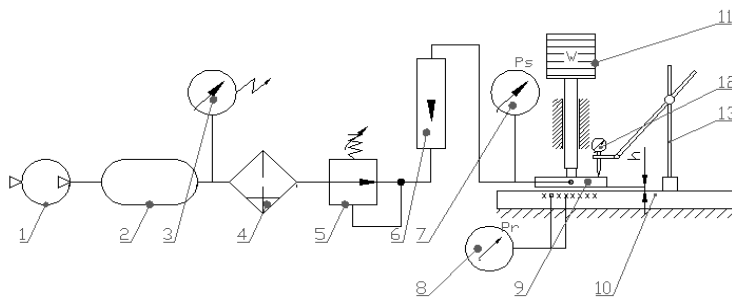
а-входно налягане  $p_s$ ; б - диаметър на блендата  $d_{bl}$ ;

в - радиус на опората  $r_o$ ; г - отношение на радиусите  $r_o/r_1$ .

Другите константни параметри на изследваната опора са:  $d_{bl}=0,372 \cdot 10^{-3}$  m;  $r_o=45$  mm;  $r_1=4,5$  mm;  $p_s=400$  kPa

На изградения стенд (фиг. 3) са изпитани няколко ПКАСО ( с радиуси  $r_o$  - 45, 40 и 30 mm ). При изследванията се променя  $d_{bl}$  ( дадени са резултати за бленди 0,240; 0,372 и 0,492 mm ). Освен това се променя и захранващото налягане  $p_s$  - 294; 392 и 490 kPa. Всеки експеримент се провежда за дадена опора ( $r_o$ ) при установени  $d_{bl}$  и  $p_s$ . Натоварването на опората  $W$  - товар 11 се намаля постепенно ( с определена стъпка  $\Delta W=25$  N ) при което се отчита повдигането на опората – хлабината  $h$ . Така са получени съответните товарни характеристики на изследваните опори.

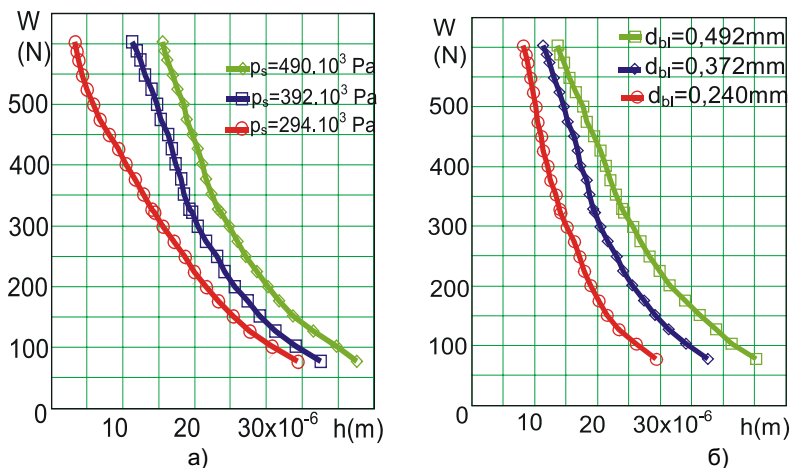
Част от резултатите от тези изследвания са приведени и коментирани по-долу.



**Фиг.3** Схема на стенд за изпитване на ПКАСО

1-компресор; 2-ресивер; 3-контактен манометър; 4-филтър-влажоотделител;  
5-редукционен клапан; 6-ротаметър; 7,8 -манометър; 9-опора; 10-основа;  
11-товар; 12-микроиндикатор; 13-магнитна стойка .

1. Опитните криви на товарните характеристики на опорите  $W-h$  следват тенденцията на теоретичните, получени аналитично. Тези резултати за различни входни налягания и диаметри на блендата са показани съответно на фиг.4а и фиг.4б. От характеристиките се вижда, че една и съща товароносимост на опорите може да бъде постигната при различни входни налягания и диаметри на блендата. Изборът на конкретните параметри (конструктивни и хидравлични) трябва да бъде направен след отчитане и на други характеристики и критерии за оптимална работа на опорите – твърдост, дебитна характеристика и др.

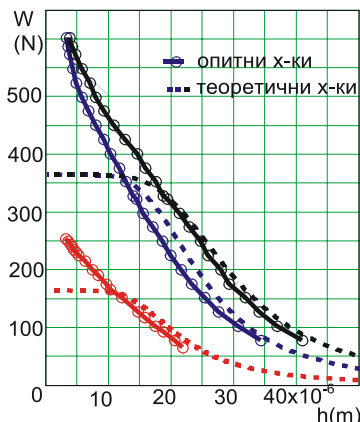


**Фиг.4** Опитни товарни характеристики на ПКАСО ( $r_o = 45 \text{ mm}$  ;  $r_1 = 4,5 \text{ mm}$ ) при  
а - входно налягане  $p_s$  ( $d_{bl} = 0,372 \text{ mm}$ ) ; б - диаметър на блендата  $d_{bl}$  ( $p_s = 392 \text{ kPa}$ ) .

2. Опитните резултати много добре потвърждават теоретичните за работа на опорите с хлабини  $h > 10 \dots 15 \mu\text{m}$  (за различни опори и параметри). Съвпадението доказва адекватността на модела, на теоретичната постановка на задачата. Опитната товарна характеристика следва теоретичната и при малки натоварвания  $W = 60 \dots 70 \text{ N}$  и хлабини на опората  $h = 45 \dots 50 \mu\text{m}$ , до които са провеждани експериментите. Това се вижда добре на фиг.5. Дадени са резултати от

изследването на опора с  $r_0 = 45 \text{ mm}$ ;  $r_1 = 4,5 \text{ mm}$ , диаметри  $d_{b1} = 0,240; 0,372; 0,492 \text{ mm}$  и съответно налягане  $p_s = 196; 294; 294 \text{ kPa}$ .

При малки хлабини създаденият модел и разработките на [1],[3] се нуждаят от допълнително уточнение. Тогава течението на въздуха в халабината на АСО е на границата “непрекъсната-дискретна” газова среда и вероятно трябва да се отчита “приплъзването” на контактните слоеве в ограничаващите ги повърхнини, т.е. критерия на Кнудсен ( $Kn$ ).



Фиг.5 Товарни характеристики  $W(h)$  - теоретични и опитни

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Създадени са числен модел на ПКАСО и стенд за изпитване на АСО. Изследвано е влиянието на конструктивни и хидравлични параметри - диаметър на бледата, радиус на опората, захранващо налягане и отношение на радиусите на опората и камерата, върху товарните характеристики на опорите.

Получените опитни резултати за хлабини над  $10\text{-}15 \text{ }\mu\text{m}$  съответстват напълно на числените, с което се потвърждава теоретичния модел и се уточняват границите на неговата приложимост. Във връзка с повишаване товарносимостта на АСО и за подобряване на техните характеристики при малки хлабини, под  $10 \text{ }\mu\text{m}$  е необходимо уточняване на създадения модел.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Anton van Beek, Advanced Engineering design, TU - Delft , 2006 (pp.411-436)
- [2] Константинеску, В. Н., Газовая смазка, Машиностроение, М., 1968, 718
- [3] Khatait, J. P., W.Lin, W. J. Lin. Design and development of orifice-type aerostatic thrust bearing. SIM Tech technical reports, 2005, vol. 6, Number 1, 7-12.

## За контакти:

Гл.ас. Петко Цанков, Катедра “Механика, машиностроене, топлотехника”, Технически университет –София, ИПФ-Сливен; е-mail: [ptsankov@abv.bg](mailto:ptsankov@abv.bg)

Доц. д-р Иванка Желева, Катедра “Топлотехника, хидро-и пневмо техника”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, тел.: 082-888 766, е-mail: [vzh@abv.bg](mailto:vzh@abv.bg)

**Докладът е рецензиран.**