

А. И. БЕЛОУСОВ, Г. Ф. НЕСОЛЕНОВ, А. Б. МАКУШИН, Д. Е. ЧЕГОДАЕВ

## СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМОСТАТИЧЕСКИХ АМОРТИЗАТОРОВ ДВУСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ

### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$D$  — диаметр выходной щели;

$\delta_0$  — радиальный зазор;

$l$  — длина выходной щели амортизатора одностороннего действия;

$L$  — глубина камеры;

$\chi = \frac{l}{L}$  — относительный ход амортизатора одностороннего действия;

$\chi_{кр}$  — относительный ход амортизатора одностороннего действия при критическом режиме течения газа в жиклере;

$l_0$  — длина выходной щели амортизатора двустороннего действия при одинаковом перекрытии обеих камер;

$\varepsilon_0 = \frac{l_0}{L}$  — относительное положение амортизатора двустороннего действия при  $\varepsilon = 0$ ;

$\varepsilon = \frac{e}{L}$  — относительный ход амортизатора двустороннего действия;

$e$  — перемещение амортизатора двустороннего действия от положения, при котором обе камеры имеют перекрытие  $l_0$ ;

$$A = \frac{24\alpha F \mu L \sqrt{gRT}}{\pi D \delta_0^3 P_{вх}} \sqrt{\frac{2n}{n-1}} \text{ — параметр амортизатора;}$$

$a$  — расстояние от начала камеры амортизатора двустороннего действия до положения, при котором обе камеры имеют перекрытие  $l_0$ ;

$$F = \frac{\pi d_{ж}^2}{4} \text{ — площадь жиклера;}$$

$d_{ж}$  — диаметр жиклера;

$\alpha$  — коэффициент расхода;

$\mu$  — коэффициент динамической вязкости;

$g$  — ускорение свободного падения;

$R$  — газовая постоянная;

$n$  — показатель адиабаты (для воздуха  $n = 1,4$ );

$P$  и  $T$  — абсолютные давление и температура газа;

$M$  — массовый расход газа;

$W$  — несущая способность амортизатора двустороннего действия;

$\bar{P}_k = \frac{P_k}{P_{вх}}$  — относительное давление в камере;

$\bar{P}_a = \frac{P_a}{P_{вх}}$  — относительное давление окружающей среды;

$\bar{W} = \frac{4W}{\pi P_{вх} D^2}$  — коэффициент несущей способности;

$\bar{M} = \frac{M}{M_{кр}}$  — относительный расход газа через амортизатор.

### ИНДЕКСЫ

вх — относится к входным параметрам в амортизатор (к жиклеру);

вых — относится к выходной щели;

к — относится к параметрам в камере;

а — относится к окружающей среде;

кр — относится к параметрам при критическом течении газа;

н — относится к нижней половине амортизатора;

в — относится к верхней половине амортизатора.

В последнее время ведутся интенсивные работы по созданию надежных средств защиты от вибрации как отдельных узлов, механизмов, так и агрегатов в целом.

В работах [1], [2] отмечалась возможность создания пневмостатических амортизаторов, в которых используется гидростатический принцип смазки.

Гашение колебаний происходит за счет процесса дросселирования газа на входе в камеру и на выходе из нее, а также за счет сжимаемости воздуха.

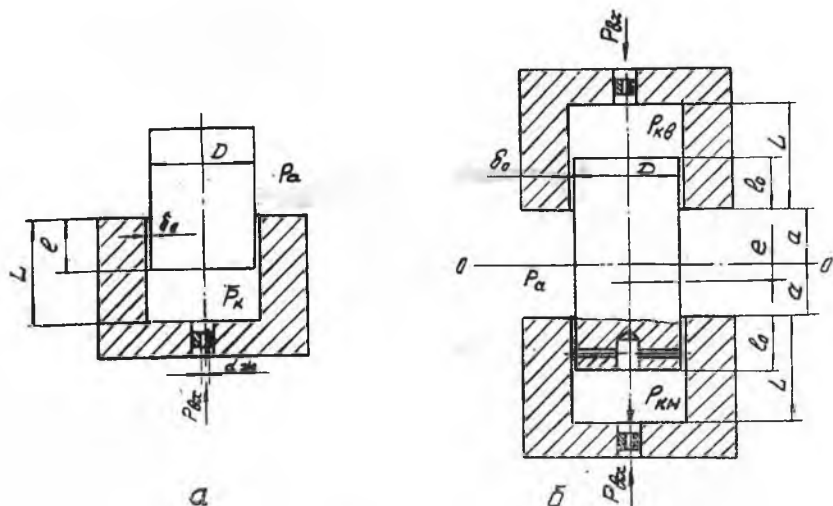


Рис. 1. Схема пневмостатического (гидростатического) амортизатора: а) одностороннего действия; б) двустороннего действия

В настоящей работе рассматриваются несущая способность, статическая жесткость и относительный расход пневмостатического амортизатора двустороннего действия, который может допускать большие перемещения (т. е. позволяет работать в области низких частот). Кроме того, пневмостатические амортизаторы являются активными амортизаторами, позволяющими изменять параметры (жесткость) в процессе работы изменением давления на входе и диаметра жиклера.

Схема простейшего пневмостатического амортизатора одностороннего действия представлена на рис. 1.

В камеры, выполненные в верхнем и нижнем подпятнике, подается смазка (сжимаемая или несжимаемая) под давлением  $P_{вх}$  через жиклер диаметром  $d_{жк}$ . На выходе из камеры дросселирование жидкости осуществляется в кольцевой щели с диаметральным зазором  $2\delta_0$ , длину которой можно изменять размером  $a$ .

В зависимости от конструкции, нагрузки и давления в дросселирующем элементе могут устанавливаться сжимаемый докритический или критический режимы течения газа, а в выходной щели — ламинарный несжимаемый, сжимаемый докритический или критический. Сочетание указанных режимов течения газа дает шесть расчетных схем. В статье рассматриваются две из них (сжимаемый докритический и критический режимы в дросселе и ламинарный несжимаемый — в выходной щели).

Работу двустороннего амортизатора можно рассматривать как работу двух амортизаторов одностороннего действия, параллельно соединенных между собой.

При рассмотрении первой расчетной схемы используем уравнения массового расхода:

$$M_{вх} = \alpha F p_{вх} \frac{\sqrt{\frac{2n}{n-1}}}{\sqrt{gRT_{вх}}} \left(\frac{P_k}{P_{вх}}\right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_k}{P_{вх}}\right)^{\frac{n-1}{n}}}, \quad (1)$$

$$M_{вых} = \frac{\pi D_0^3 (P_k^2 - P_a^2)}{24\mu l g R T_{вых}} \quad (2)$$

и уравнение неразрывности

$$M_{вх} = M_{вых}. \quad (3)$$

Считая процесс течения газа изотермическим ( $T_{вх} = T_{вых} = \text{const}$ ), согласно (3) имеем

$$\lambda \gamma = \frac{\bar{P}_k^2 - \bar{P}_a^2}{\frac{1}{P_k} \sqrt{1 - \bar{P}_k^{\frac{n-1}{n}}}}. \quad (4)$$

Для пневмостатического амортизатора двустороннего действия зависимость между относительным ходом нижнего  $\chi_n$  и верхнего  $\chi_v$  амортизатора выразится так:

$$\chi_n = \varepsilon_0 + \varepsilon \quad (5)$$

откуда относительный ход двустороннего амортизатора действия

$$\chi_{в} = \varepsilon_0 - \varepsilon, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\chi_{н} - \chi_{в}}{2}. \quad (7)$$

Тогда связь давления в нижней  $\bar{P}_{кн}$  и верхней  $\bar{P}_{кв}$  камерах амортизатора двустороннего действия с относительным ходом  $\varepsilon$  и параметром амортизатора  $A$  выразится уравнением

$$A\varepsilon_0 = \frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{P}_{кн}^2 - \bar{P}_a^2}{\bar{P}_{кн}^n \sqrt{1 - \bar{P}_{кн}^{\frac{n-1}{n}}}} - \frac{\bar{P}_{кв}^2 - \bar{P}_a^2}{\bar{P}_{кв}^n \sqrt{1 - \bar{P}_{кв}^{\frac{n-1}{n}}}} \right] \quad (8)$$

при  $\varepsilon = 0$ ,  $\bar{P}_{кн} = \bar{P}_{кв}$  и  $A\varepsilon_0 = \frac{\bar{P}_k^2 - \bar{P}_a^2}{\bar{P}_k^n \sqrt{1 - \bar{P}_k^{\frac{n-1}{n}}}}. \quad (9)$

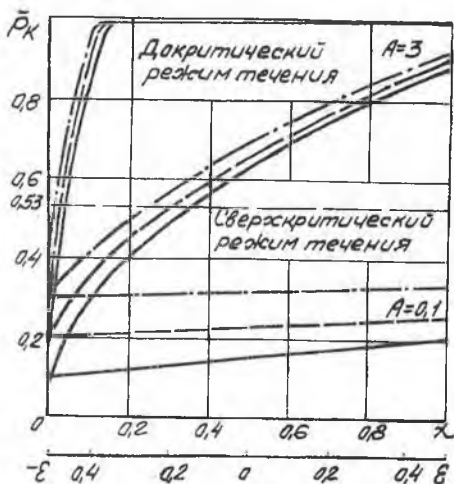


Рис. 2. Зависимость относительного давления в камере от хода амортизатора

- $\bar{P}_a = 0,1$ ;
- - -  $\bar{P}_a = 0,2$ ;
- · -  $\bar{P}_a = 0,3$

Некоторые результаты расчетов для воздуха по зависимости (8) представлены на рис. 2 участками кривых при  $0,53 \leq \bar{P}_k < 1$ , так как при  $\bar{P}_k < 0,53$  режим течения газа в дросселирующем элементе становится сверхкритическим.

По относительному давлению в верхней  $\bar{P}_{кв}$  и нижней  $\bar{P}_{кн}$  камерах можно найти несущую способность амортизатора двустороннего действия

$$W = P_{вх} (\bar{P}_{кн} F_{кн} - \bar{P}_{кв} F_{кв}) \quad (10)$$

или, при  $F_{кн} = F_{кв} = F_k$ ,  $W = P_{вх} F_k (\bar{P}_{кн} - \bar{P}_{кв}). \quad (11)$

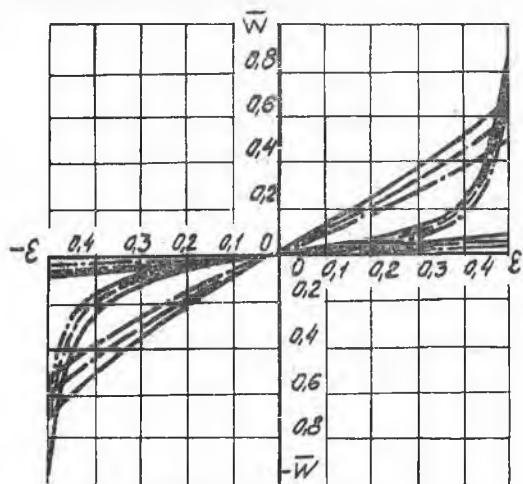


Рис. 3. Зависимость относительной несущей способности от хода амортизатора для  $A=0,1$ ;  $3,28$  при  $\epsilon_0=0,5$

- $P_a=0,1$
- .-.-  $P_a=0,2$
- $P_a=0,3$

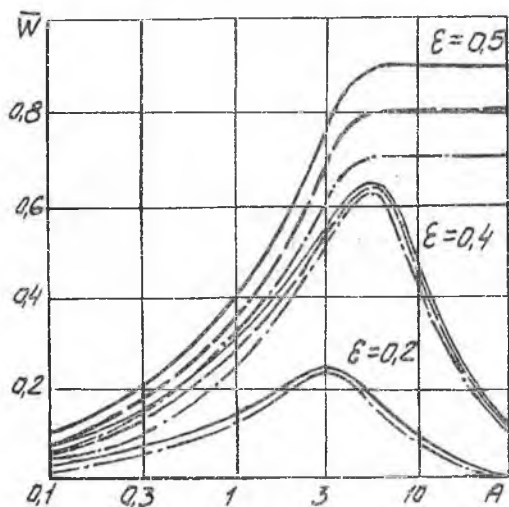


Рис. 4. Зависимость относительной несущей способности от параметра амортизатора при начальном перекрытии  $\epsilon_0=0,5$

- $P_a=0,1$
- .-.-  $P_a=0,2$
- $P_a=0,3$

Коэффициент несущей способности амортизатора двустороннего действия

$$\bar{W} = \frac{w}{P_{вх} F_k} = \bar{P}_{кн} - \bar{P}_{кв}. \quad (12)$$

Некоторые результаты расчетов для воздуха по зависимости (12) приведены на рис. 3, 4, 5.

Под статической жесткостью пневмостатического амортизатора понимаем производную несущей способности амортизатора по перемещению

$$\begin{aligned} C &= \frac{dW}{de} = \frac{d [P_{вх} F_k (\bar{P}_{кн} - \bar{P}_{кв})]}{d \left( \frac{e}{L} L \right)} = \\ &= \frac{\bar{P}_{вх} F_k}{L} \left( \frac{d\bar{P}_{кн}}{d\chi_{н}} + \frac{d\bar{P}_{кв}}{d\chi_{в}} \right) = \frac{P_{вх} F_k}{L} (\bar{C}_{н} + \bar{C}_{в}). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь  $\bar{C}_{н} = \frac{d\bar{P}_{кн}}{d\chi_{н}}$  — коэффициент статической жесткости нижней камеры амортизатора;

$\bar{C}_{в} = \frac{d\bar{P}_{кв}}{d\chi_{в}}$  — коэффициент статической жесткости верхней камеры амортизатора.

Коэффициент статической жесткости амортизатора двустороннего действия равен

$$\bar{c} = \frac{CL}{P_{вх} F_k} = \bar{C}_{н} + \bar{C}_{в}. \quad (14)$$

Выражения для коэффициента статической жесткости нижней и верхней камер амортизатора отыскиваются дифференцированием выражений (15) и (16) соответственно по  $\chi_{н}$  и  $\chi_{в}$ :

$$A\chi_{н} = \frac{\bar{P}_{кн}^2 - \bar{P}_a^2}{\bar{P}_{кн}^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \bar{P}_{кн}^{\frac{n-1}{n}}}}, \quad (15) \quad A\chi_{в} = \frac{\bar{P}_{кв}^2 - \bar{P}_a^2}{\bar{P}_{кв}^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \bar{P}_{кв}^{\frac{n-1}{n}}}}. \quad (16)$$

После дифференцирования получаем:

$$\bar{C}_{н} = \frac{\frac{2}{A\bar{P}_{кн}^{\frac{n}{n}}} \sqrt{1 - \bar{P}_{кн}^{\frac{n-1}{n}}}}{2\bar{P}_{кн}^{\frac{n+1}{n}} - (\bar{P}_{кн}^2 - \bar{P}_a^2) \frac{2\bar{P}_{кн}^{\frac{n}{n}} - 1 - n}{2n \left( 1 - \bar{P}_{кн}^{\frac{n-1}{n}} \right)}}, \quad (17)$$

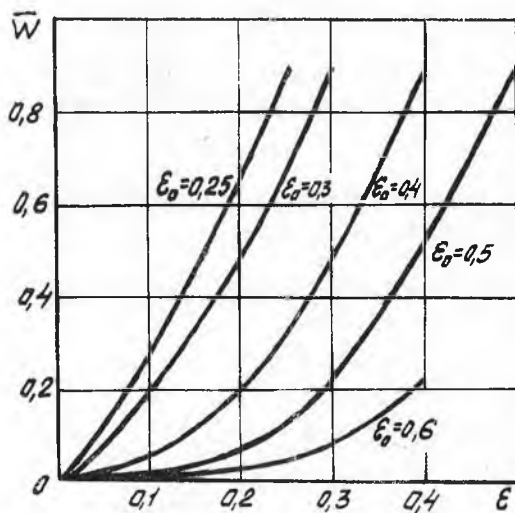


Рис. 5. Зависимость относительной несущей способности от хода амортизатора при параметре амортизатора  $A=11$

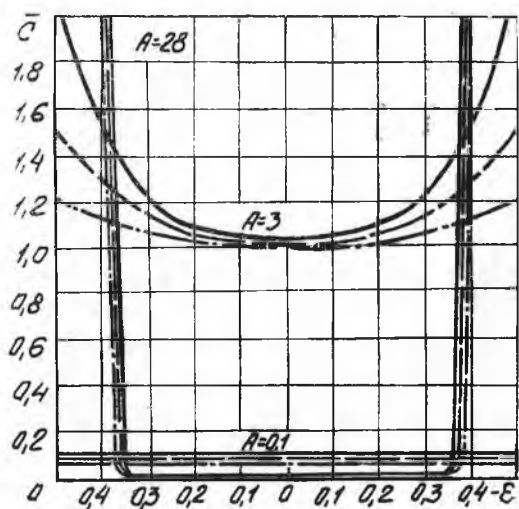


Рис. 6. Зависимость коэффициента жесткости от хода амортизатора при  $\epsilon_0=0,5$

$$\bar{C}_B = \frac{A \bar{P}_{KB}^{\frac{2}{n}} \sqrt{1 - \bar{P}_{KB}^{\frac{n-1}{n}}}}{2 \bar{P}_{KB}^{\frac{n+1}{n}} - (\bar{P}_{KB}^2 - \bar{P}_a^2) \frac{1-n}{2 \bar{P}_{KB}^{\frac{n}{n}} - 1 - n}}; \quad (18)$$

$$2n \left(1 - \bar{P}_{KB}^{\frac{n-1}{n}}\right)$$

Некоторые результаты расчетов для воздуха по зависимости (14) приведены на рис. 6.

Если в жиклере течение газа сверхкритическое, то в уравнении (1)

$$\frac{P_k}{P_{вх}} \text{ заменяется на } \bar{P}_{кр} = \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}}.$$

Тогда для второй расчетной схемы

$$(A\chi)_{кр} = \frac{\bar{P}_k^2 - \bar{P}_a^2}{\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}}; \quad (19)$$

Перепишем уравнение (19) для нижней и верхней камер амортизатора двустороннего действия:

$$(A\chi_n)_{кр} = \frac{\bar{P}_{кн}^2 - \bar{P}_a^2}{\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}}, \quad (20)$$

$$(A\chi_v)_{кр} = \frac{\bar{P}_{кв}^2 - \bar{P}_a^2}{\left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{n}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}}. \quad (21)$$

Некоторые результаты расчетов для воздуха по зависимостям (20) и (21) приведены на рис. 2 участками кривых при  $0 \leq \bar{P}_k \leq 0,53$ , так как при  $\bar{P}_k > 0,53$  режим течения газа в дросселирующем элементе становится докритическим.

Коэффициент несущей способности амортизатора двустороннего действия определяется уравнением (12) (см. рис. 3).

С учетом выражения (19) получаем коэффициент статической жесткости для нижней и верхней камер амортизатора двустороннего действия при сверхкритическом течении газа:

$$\bar{C}_{крн} = \frac{A}{2 \bar{P}_{кн}} \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}, \quad (22)$$



$$\bar{C}_{крв} = \frac{A}{2\bar{P}_{кв}} \left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}. \quad (23)$$

Коэффициент статической жесткости амортизатора двустороннего действия

$$\bar{C}_{кр} = \bar{C}_{крн} + \bar{C}_{крв}. \quad (24)$$

Для воздуха уравнение (24) имеет вид

$$\bar{C}_{кр} = 0,130A \left( \frac{1}{\bar{P}_{кн}} + \frac{1}{\bar{P}_{кв}} \right). \quad (25)$$

Некоторые результаты расчетов по зависимости (25) приведены на рис. 6.

Относительный расход газа через амортизатор является также одной из основных характеристик пневмостатического амортизатора.

Запишем относительный расход газа через амортизатор одностороннего действия

$$M = \frac{M}{M_{кр}} = \frac{\bar{P}_k^{\frac{1}{n}} \sqrt{1 - \bar{P}_{кн}^{\frac{n-1}{n}}}}{\left( \frac{2}{n+1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}}, \quad (26)$$

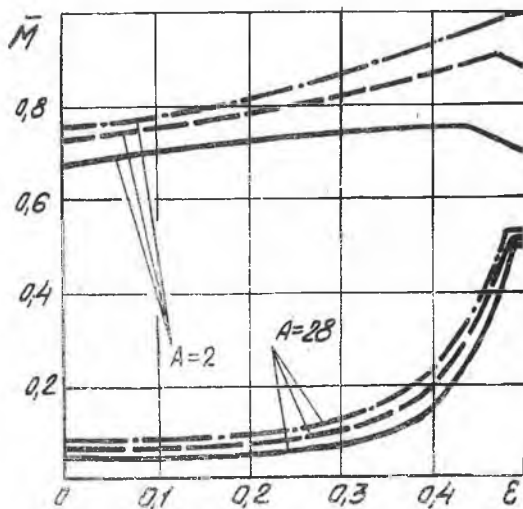


Рис. 7. Зависимость относительного расхода от хода двустороннего амортизатора при  $\epsilon_0 = 0,5$

- $\bar{P}_a = 0,1$
- - -  $\bar{P}_a = 0,2$
- · -  $\bar{P}_a = 0,3$

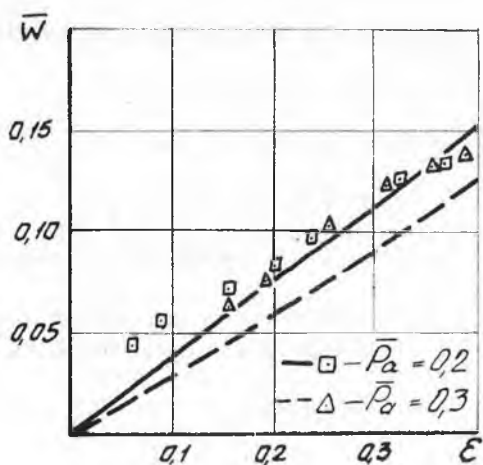


Рис. 8. Зависимость относительной несущей способности от хода амортизатора при  $A=0,5$ ;  $\epsilon_0=0,6$

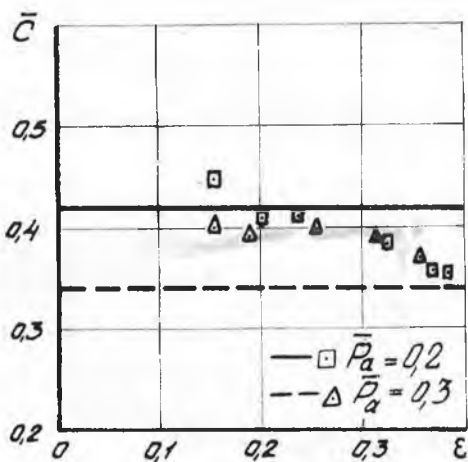


Рис. 9. Зависимость коэффициента жесткости от хода амортизатора при  $A=0,5$ ;  $\epsilon_0=0,6$

На основании уравнений (4) и (19).

$$\bar{M} = \frac{\bar{P}_k - \bar{P}_a}{A\chi \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{1}{n-1}} \sqrt{\frac{n-1}{n+1}}} \quad (27)$$

Для воздуха, используя зависимость (19), имеем

$$\bar{M} = \frac{3,86 (\bar{P}_k^2 - \bar{P}_a^2)}{A\chi} \quad (28)$$

Относительный расход газа через амортизатор двустороннего действия равен

$$\bar{M} = \frac{M}{2M_{кр}} = \frac{M_n + M_b}{2M_{кр}} = \frac{1}{2} (\bar{M}_n + \bar{M}_b) \quad (29)$$

Для воздуха, 
$$\bar{M} = \frac{1,93}{A} \left[ \frac{\bar{P}_{кн}^2 - \bar{P}_a^2}{\chi_n} + \frac{\bar{P}_{кв}^2 - \bar{P}_a^2}{\chi_n} \right] \quad (30)$$

Результаты расчетов по зависимости (30) приведены на рис. 7.

Экспериментальное исследование проводилось на установке, состоящей из плунжера диаметром 30 мм, вставленного в камеру, выполненные в верхнем и нижнем подпятнике с радиальным зазором 0,06 мм. Для предохранения амортизатора от заклинивания по концам плунжера предусмотрено четыре радиальных отверстия, выполняющих роль дросселирующих элементов опорного гидростатического подшипника. Дросселирующие элементы питаются воздухом через центральные отверстия.

В камеры длиной  $L = 30$  мм подавался воздух под давлением  $P_{вх} = 2-6$  кг/см<sup>2</sup> через жиклер диаметром 1 мм. Эксперименты проводились при начальном перекрытии  $\varepsilon_0 = 0,6$ . Давление в камерах замерялось образцовым манометром. Плунжер нагружался грузом от 1 кг до 6 кг.

На рис. 8, 9 приведены теоретические зависимости несущей способности и жесткости пневмостатического амортизатора и поставлены экспериментальные точки. Видно удовлетворительное согласование результатов теории и эксперимента.

## ВЫВОДЫ

В настоящей работе получены теоретические зависимости для определения относительного давления в камере, коэффициента несущей способности, коэффициента статической жесткости, относительного расхода от хода двустороннего амортизатора при различных параметрах амортизатора  $A$  и противодавлении.

Проведенные экспериментальные исследования статических характеристик пневмостатических амортизаторов подтвердили качественный характер теоретических зависимостей. Получено удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Белоусов, В. Т. Анискин. Исследование статических характеристик гидростатических амортизаторов. Сб. «Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов». Труды КуАИ, вып. XXXVI, Куйбышев, 1969.

2. А. И. Белоусов, Г. Ф. Несоленов, А. Б. Макушин, Д. Е. Чегодаев. Исследование возможности создания пневмостатических амортизаторов. Материалы научно-технической конференции. КуАИ, Куйбышев, 1970.