

А.И.Белоусов, В.А.Эрелов, С.В.Фалаеев

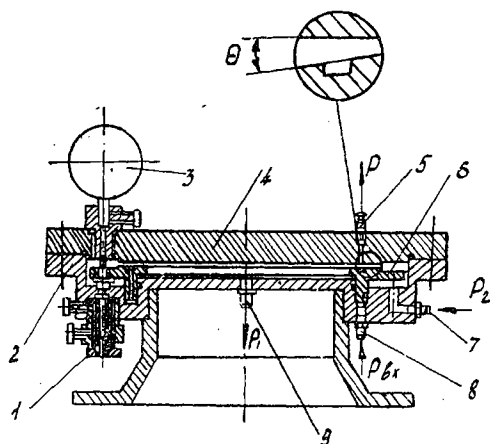
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТОРЦОВЫХ ГАЗОСТАТИЧЕСКИХ УПЛОТНЕНИЙ  
С КОНУСНЫМ ЗАЗОРОМ

В последнее время в различных отраслях техники все более широкое применение находят торцовые газостатические уплотнения (ТГСУ), характеризующиеся безыносной работой, долговечностью и незначительными утечками. Однако имеющиеся методики расчета характеристик таких уплотнений не гарантируют, как показывает практика, их качественной работы, что особенно проявляется при наличии деформаций уплотнительных колец. Поэтому необходимо создание уточненных методик расчета и проведение экспериментальных исследований, позволяющих глубже понять механизм работы ТГСУ.

Особое место среди экспериментальных исследований занимает изучение статических характеристик ТГСУ. В этом случае можно определить гидравлические характеристики уплотнительной щели и оценить точность вычисления параметров, обуславливающих динамику ТГСУ. В данной работе экспериментально исследуется уплотнение, рабочий зазор которого характеризуется конусностью. Такое отклонение уплотнительных поверхностей от плоскостности часто встречается на практике. Оно обусловлено рядом причин технологического и эксплуатационного характера (погрешностью изготовления и сборки, деформацией деталей уплотнения при монтаже, температурными и силовыми воздействиями и т.д.). Теоретическое исследование ТГСУ с рассматриваемым отклонением от плоскостности уплотнительных поверхностей было проведено в работе [1].

Для экспериментальных исследований ТГСУ была доработана установка [2], схема которой изображена на рис. 1. В корпус 2 установлено кольцо 6, моделирующее рабочий торец уплотнения. Исследуемый зазор ТГСУ, образованный крышкой 4 установки и кольцом 6, может изменяться в пределах от 0 до 1 мм четырьмя дифференциальными винтами 1. Величина зазора контролируется микронными индикаторами 3. В крышке 4 имеется девять штуцеров 5 для замера распределения давления в зазоре. Уплотняемая среда, в данном случае воздух, подается в установку через штуцер 7. Подвод в камеру осуществляется через штуцер 8. Замер величины давления производится образцовыми манометрами. Утечки собираются с помощью штуцера 9 и измеряются дроссельной шайбой с пьезомером.

Результаты эксперимента, который является многофакторным, удобнее представлять в безразмерном виде. Это позволяет сравнивать различные варианты, моделировать изменение некоторых величин за счет других (например, величину неплоскости кольца за счет изменения величины зазора), обобщать полученные результаты и существенно уменьшать количество опытов и затраты. Были использованы безразмерные параметры, характеризующие влияние неплоскости, дросселя и величины зазора;



Р и с. I. Схема экспериментальной установки

$$B = \frac{\operatorname{tg} \theta r_0}{h_0}; \quad \bar{A} = \frac{3\mu \alpha d_{др}^4 \sqrt{RT}}{\pi p_{вх} h_0^3} N_{др}$$

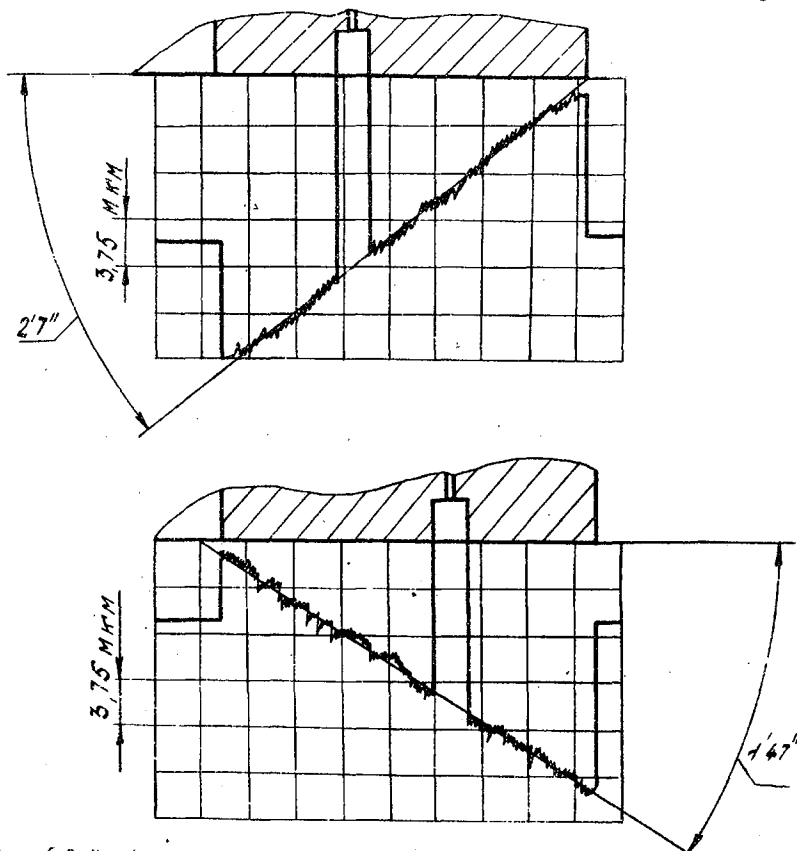
где  $h_0$  - величина зазора на радиусе уплотнения  $r_0$  ;  
 $\alpha, d_{др}, N_{др}$  - коэффициент расхода, диаметр и количество дросселей;  
 $\theta$  - величина конусности уплотнительной поверхности кольца 6;  
 $\mu, T$  - коэффициент динамической вязкости и температура газа;  
 $R$  - газовая постоянная.

В ходе исследований использовалась методика планирования эксперимента, заключающаяся в следующем. Определяли минимально возможный зазор из условия касания уплотнительных поверхностей, и для исследуемого рабочего тела (по известным значениям  $\mu, R, T$ ) находили допустимое значение  $\bar{A}$  при фиксированных  $d_{др}$  и  $p_{вх}$ . Затем по выбранным уровням изменения  $\bar{A}$  находили необходимые для фиксирования в эксперименте значения зазора  $h_0$  при измененном количестве дросселей  $N_{др}$  по уравнению

$$h_0 = \left( \frac{3\mu \alpha d_{др}^4 \sqrt{RT}}{\bar{A} \pi p_{вх}} N_{др} \right)^{1/3}$$

Параметр В определяли для каждого случая. Таким образом, при наличии минимума испытываемых колец можно, изменяя величину зазора и количество дросселей, получить обширные экспериментальные результаты по А и В.

Исследование проводилось на двух ТГСУ, имеющих внутренний радиус кольца 57 мм и наружный - 75 мм. Были использованы дроссели в виде отверстий диаметром 1 мм и длиной 10 мм. Количество дросселей в каждом уплотнении изменялось от 1 до 4. ТГСУ с конфузорным зазором имело кольцевую камеру с радиальными размерами 63,5 мм и 64,5 мм, а ТГСУ с диффузорным зазором - кольцевую камеру с радиальными размерами 67,5 мм и 68,5 мм. Профилограммы уплотнительных поверхностей колец изображены на рис. 2, из которого видно, что торцовые поверхнос-



Р и б.2. Профилограммы уплотнительных поверхностей испытываемых колец Ю

ти являются коническими. При этом величина конусности для ТГСУ с конфузорным зазором составляет  $\Theta = -2'7''$ , а для ТГСУ с диффузорным зазором  $\Theta = 1'47''$ . На рис. 3,а,в представлены результаты испытаний ТГСУ с диффузорными, а на рис. 3,б - с конфузорными зазорами. Экспериментальные точки при  $B = 0$  получены в работе [3]. Принятые обозначения:

$$\bar{p}_1 = \frac{p_1}{p_2}; \quad \bar{M} = \frac{12 \mu R T}{\pi h_c^3 p_2^2} \dot{m},$$

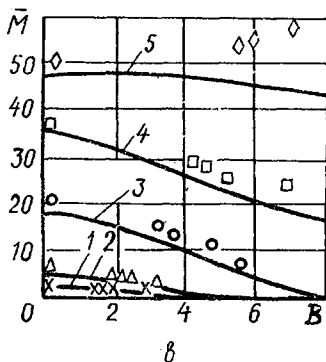
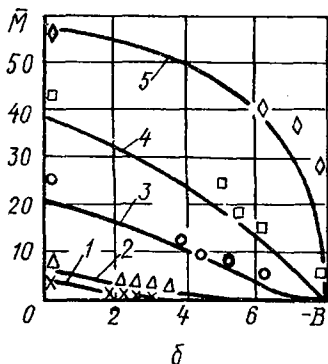
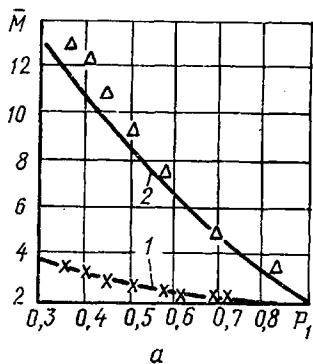
где  $\bar{p}_1$  - относительный перепад давления на уплотнении;  
 $\dot{m}$  - утечки через уплотнение;  
 $\bar{M}$  - безразмерные утечки.

В эксперименте было  $p_{6x} = p_2$ . Для расчета теоретических значений утечек через уплотнение коэффициент расхода через дросселирующее отверстие определяли по зависимости

$$\alpha = 0,85 - 0,35 \left( \frac{p_k}{p_2} \right)^{1,5},$$

являющейся аппроксимацией экспериментальных данных, полученных при продувке дросселей исследуемых ТГСУ (изменение соотношения давлений в камере и на входе в уплотнение  $p_k/p_2 = 0,55 - 1$ ). В процессе исследований выявлено, что с увеличением перепада давления на уплотнении ( $\bar{p}_1 \rightarrow 0$ , см.рис.3,а) утечки возрастают интенсивнее для больших значений параметра  $\bar{A}$ , что согласуется с теоретическими данными. Так, уменьшение  $\bar{p}_1$  с 0,67 до 0,4 вызывает возрастание утечек в 1,5 раза для  $\bar{A} = 2,2$  и в 2,4 раза для  $\bar{A} = 22$ .

Увеличение параметра  $B$  при конфузном зазоре (см.рис.3,б) вызывает уменьшение утечек при всех значениях  $\bar{A}$ , а в случае диффузорного зазора (см.рис.3,в) - уменьшение утечек при  $\bar{A} = 44$  и незначительное увеличение при  $\bar{A} = 88,5$ , что подтверждает достоверность результатов, полученных в работе [1]. Это может быть объяснено следующим образом. При конфузорном зазоре с увеличением  $|B|$  (см.рис. 3,б) наблюдается уменьшение утечек  $\bar{M}$  в связи с увеличением гидравлического сопротивления на выходе из щели, так как рабочие поверхности сближаются кромками, примыкающими к зоне низкого давления. Уменьшение утечек  $\bar{M}$  происходит интенсивнее при больших  $\bar{A}$ , когда гидравлическое сопротивление входной щели значительно меньше сопротивления дросселя. С увеличением диффузорности (см.рис.3)  $\bar{M}$  для  $\bar{A} \leq 44$  уменьшается в результате сближения кромок рабочих поверх



Р и с. 3. Сопоставление экспериментальных и расчетных результатов: а - 1,  $\bar{A}=2,2$ ; 2,  $\bar{A}=2,2$ ,  $B=3,5$ ; 3,  $\bar{A}=4,4$ ; 4,  $\bar{A}=4,4$ ,  $B=3,5$ ; 5,  $\bar{A}=88,5$ ; б - 1,  $\bar{A}=2,2$ ; 2,  $\bar{A}=4,4$ ; 3,  $\bar{A}=2,2$ ; 4,  $\bar{A}=4,4$ ; 5,  $\bar{A}=88,5$

ностей, примыкающих к зоне высокого давления. При увеличении  $\bar{A}$  доля расхода воздуха, протекающего через дроссели, в общем расходе через уплотнение возрастает, и при больших  $\bar{A}$  ( $\bar{A} = 88,5$ , кривая 5, см.рис.3,в) утечки с ростом  $B$  увеличиваются. Таким образом, при больших  $\bar{A}$  увеличение гидравлического сопротивления на входе в уплотнительную щель и его уменьшение на выходе из щели не вызывает уменьшения утечек через уплотнение. В процессе эксперимента также установлено, что смещение выполненной на рабочей поверхности ТГСУ гидростатической камеры в сторону зоны высокого давления вызывает уменьшение утечек (см.рис.3,б, в,  $B = 0$ ).

Разброс экспериментальных данных не превышал 5% для  $\bar{A} = 4,4$ , 10% для  $\bar{A} = 2,2$ , 12% для  $\bar{A} = 4,4$  и 17% для  $\bar{A} = 88,5$ . Совпадение замеренных и теоретических значений утечек было удовлетворительным для ТГСУ с параметром  $\bar{A} \leq 4,4$ , т.е. расхождение не превышало 5%. Значительное расхождение (15%) проявилось при  $\bar{A} = 88,5$  и  $|B| > 5$ . Для данной геометрии колец ТГСУ таким значениями параметров  $\bar{A}$  и  $B$  соответствует минимальный зазор между рабочими поверхностями 5-8 мкм.

Поэтому данное расхождение может быть объяснено как погрешность определения величины зазора  $h_0$ , которая для указанного диапазона зазоров составляла 6 - 10%, так и несоответствием принятых при расчете ТГСУ допущений [1] (ламинарный режим течения, неучет шероховатости рабочих поверхностей и т.д.) процессам, происходящим в щели.

Таким образом, полученные экспериментальные результаты дают основание рассматривать теоретические исследования [1] в качестве основы для создания методики проектирования торцовых газостатических уплотнений, а также их более совершенных математических моделей.

## Л и т е р а т у р а

1. Белоусов А.И., Зрелов В.А., Фалалеев С.В. Влияние конусности уплотнительных поверхностей на характеристики торцового газостатического уплотнения. - В кн.: Исследование гидростатических опор и уплотнений двигателей летательных аппаратов. Харьков, 1982, вып. I, с. 131-136.

2. Белоусов А.И., Зрелов В.А. Статические характеристики торцового гидростатического уплотнения: Лабораторная работа по УИРС. - Куйбышев: КуАИ, 1978. - 12 с.

3. Белоусов А.И., Зрелов В.А., Чегодаев Д.Е. Анализ статических характеристик торцового гидростатического уплотнения. - В кн.: Исследование и проектирование гидростатических опор и уплотнений быстроходных машин. Харьков, 1977, вып. 4, с. 101-110.

УДК 539.3:534.1

О.Ф.Борискин, О.В.Репецкий

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ С АНТИВИБРАЦИОННЫМИ ПОЛКАМИ

В связи с развитием вычислительной техники широкое применение при расчете вибрации лопаток и рабочих колес получил метод конечных элементов (МКЭ). Основное достоинство МКЭ заключается в использовании вариационных принципов механики, позволяющих заменить интегрирование системы уравнений в частных производных решением системы алгеб-