

Из графиков на рис. 5 видно, что изгибающий момент практически не изменяется при значениях высоты ступеньки  $h_{ст} > 2,5$  мкм, что способствует нормальной работе уплотнения.

Таким образом, при проектировании торцового бесконтактного уплотнения со ступенчатым зазором высота ступеньки должна выбираться в интервале 2...3 мкм, что обеспечивает работоспособность уплотнения с допускаемыми утечками длительный период времени.

### Список литературы

1. Фалалеев С.В., Чегодаев Д.Е. Торцовые бесконтактные уплотнения двигателей летательных аппаратов: Основы теории и проектирования. – М.: Изд-во МАИ, 1998. 276 с.
2. Фалалеев С.В., Новиков Д.К., Балякин В.Б. и др. «Сухое» газовое уплотнение для нагнетателя 370-18-1//Газовая промышленность, 1988. № 4.С. 55-57.
3. Патент RU №2099618. Торцовое бесконтактное уплотнение/ Фалалеев С.В., Балякин В.Б., Новиков Д.К. - Опул. 1997, Бюл. № 35.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ С ГАЗОВОЙ СМАЗКОЙ

Хао Мумин, Фалалеев С.В.

Китайский нефтяной университет,

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Для того чтобы торцовые бесконтактные уплотнения с газовой смазкой (так называемые «сухие» уплотнения, dry gas seal) могли работать в оптимальном режиме, необходимо их проектирование проводить с использованием теории оптимизации. До сих пор на эту тему опубликовано мало работ. Американский учёный Sedy [1] впервые провел работу по оптимизации торцовых газодинамических уплотнений, но полученные результаты базировались только на основании многочисленных экспериментальных исследований. В работе [2-5] приведена оптимизация для отдельных конструктивных параметров торцовых уплотнений, но без учёта совместных влияний конструктивных параметров на характеристики уплотнений. В работах российских ученых [6-8] получены также отдельные оптимальные параметры для торцовых газостатических и гибридных уплотнений. Актуальность комплексной работы по оптимизации обусловлена необходимостью разработки торцовых бесконтактных уплотнений с заданными характеристиками. В настоящее время торцовые

бесконтактные уплотнения со спиральными канавками становятся стандартным типом уплотнения для турбомашин практически во всех отраслях техники.

В теории оптимизации модель оптимального проектирования включает в себе три основных фактора: целевую функцию, варьируемые конструктивные параметры и ограничения.

Важнейшим является определение целевой функции. С точки зрения обеспечения стабильности работы уплотнения выбирают жёсткость  $K$  газового слоя в торцовом зазоре как целевую функцию оптимизации. Однако известно, что утечка уплотняемой среды  $Q$  через торцовый зазор является самой важной характеристикой уплотнения. Поэтому имеет смысл принять отношение жёсткости газового слоя  $K$  к утечке уплотняемой среды  $Q$  как целевую функцию оптимизации.

Проведенный нами анализ 26 конструктивных параметров, влияющих на характеристики торцовых уплотнений, показал, что некоторые параметры нельзя оптимизировать, а большинство из оставшихся параметров нет необходимости оптимизировать с точки зрения инженерной практики. Поэтому для торцового уплотнения со спиральными канавками выбраны четыре важнейших конструктивных параметра, влияющих на создание газодинамической силы в торцовом зазоре: глубина канавок  $H$ , число канавок  $N_g$ , угол наклона канавок  $\alpha$  и отношение  $\beta$  радиальной ширины зоны канавок к радиальной ширине уплотнительного кольца.

Распределение давления газового слоя в торцовом зазоре находится дифференцированием двухмерного уравнения Рейнольдса в цилиндрической системе координат с использованием конечно-элементного метода

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} r \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) = \frac{1}{2} \omega \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho h)$$

Раскрывающее усилие в торцовом зазоре

$$F_o = N_g \iint_{\Omega} \bar{P} d\Omega = N_g \iint_{\Omega} \bar{P} r dr d\theta = N_g \sum_e \sum_r \sum_j \bar{P} R |J| H_i H_j,$$

- где  $\bar{P}$  — безразмерное давление в торцовом зазоре,  
 $R$  — радиальная координата интегрируемой точки,  
 $|J|$  — переменная координаты Иакби (Jacobi),  
 $H_i, H_j$  — функция интегрирования Гаусса (Gauss).  
 Осевая жёсткость газового слоя в торцовом зазоре

$$K = -\frac{dF_o}{dh} = -\frac{F'_{o(h+\Delta h)} - F_{o(h)}}{(h+\Delta h) - h} = -\frac{F'_o - F_o}{\Delta h},$$

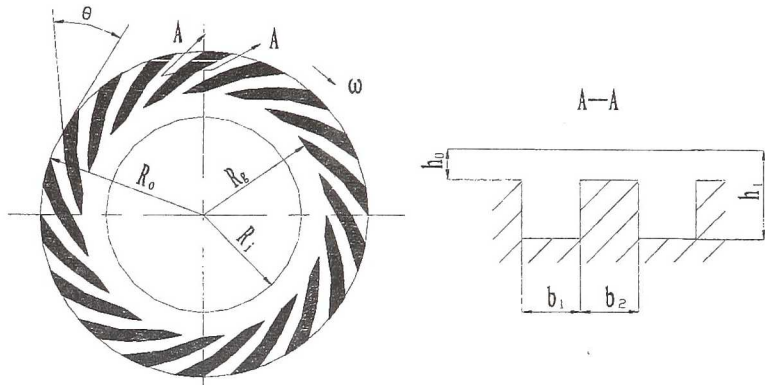


Рис. 1. Конструктивная схема торцевой поверхности уплотнения

безразмерная осевая жёсткость газового слоя в торцовом зазоре

$$\bar{K} = -\frac{d\bar{F}_o}{dH}$$

Объёмная утечка уплотняемой среды через торцовый зазор

$$Q = \int_0^{2\pi} q_r r d\theta = \int_0^{2\pi} -\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial r} r d\theta = -\frac{\pi h^3}{6\mu} \frac{\partial P}{\partial r}.$$

Безразмерная объёмная утечка уплотняемой среды через торцовый зазор

$$\bar{Q} = 6\mu Q / \pi h_0^3 p_o.$$

Целевая функция оптимизации записывается неявным уравнением

$$F_{obj} = \frac{\bar{K}}{\bar{Q}} = f(H, \alpha, \beta, N_g, \gamma, etc.).$$

Ограничительные условия оптимизируемых конструктивных параметров:

- глубина канавок на торцевой поверхности  $h_0 = 1 \dots 10$  мкм;
- число канавок  $N_g = 10 \dots 60$ ;
- отношение ширины канавок к ширине уплотнительного кольца по радиусу  $\beta = 0 \dots 1$ ;
- угол наклона канавок  $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

Проведена оптимизация с помощью четырёхмерного решетчатого метода (на рис. 2 показан двухмерный решетчатый метод) с учётом комплексного влияния четырёх конструктивных параметров на характери-

стики уплотнения при одновременном изменении всех оптимизируемых параметров.

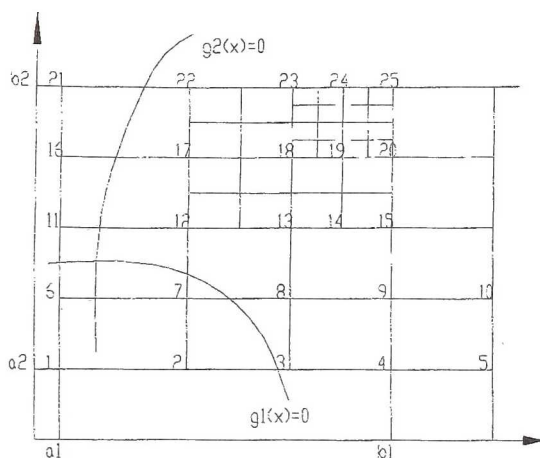


Рис. 2. Двухмерный решетчатый метод

### Результаты исследований

Рассмотрим влияние конструктивных параметров на характеристики «сухого» уплотнения.

#### Глубина спиральных канавок.

На рис. 3,а показано влияние безразмерной глубины канавок на безразмерную жёсткость газового слоя в торцовом зазоре. Из этого рисунка следует, что значение безразмерной глубины канавок  $\bar{H} = 3$  даёт максимальное значение безразмерной жёсткости газового слоя. Диапазон безразмерной глубины канавок  $\bar{H} = 2 \dots 4$  является оптимальным для высокого значения осевой жёсткости газового слоя.

На рис. 3,б приведена зависимость отношения  $\Pi$  жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды от безразмерной глубины канавок. Значение безразмерной глубины канавок  $\bar{H} = 2.5$  даёт максимальное отношение  $\Pi$ . Рекомендуемый оптимальный диапазон с точки зрения получения максимума комплексной функции оптимизации -  $\bar{H} = 1.5 \dots 4$ .

#### Число спиральных канавок.

На рис. 4, а представлена зависимость от числа канавок безразмерной жёсткости газового слоя, а на рис. 4, б - отношения жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды. Безразмерная жёсткость  $\bar{K}$  и отношение  $\Pi$  жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды повышаются с увеличением числа канавок  $N_g$ . Это означает, что стабильность и герметичность уплотнения повышаются с увеличением числа канавок



$N_g$  Анализ рис. 4 также показывает, что степень возрастания  $\bar{K}$  и  $\Pi$  постепенно снижается с увеличением числа канавок. С точки зрения трудности изготовления и экономических факторов нет смысла выбирать число канавок  $N_g$  больше 30.

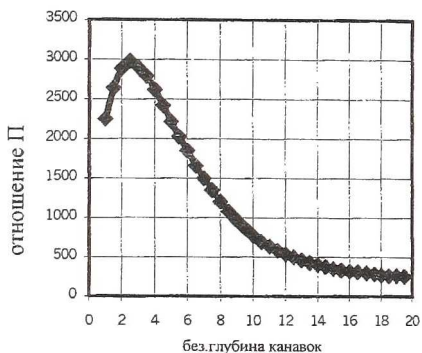
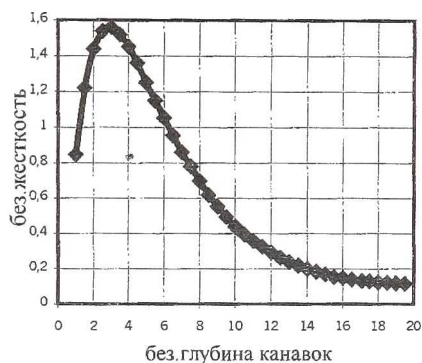


Рис. 3. Зависимость безразмерной жесткости газового слоя (а) и отношения жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды (б) от безразмерной глубины спиральных канавок

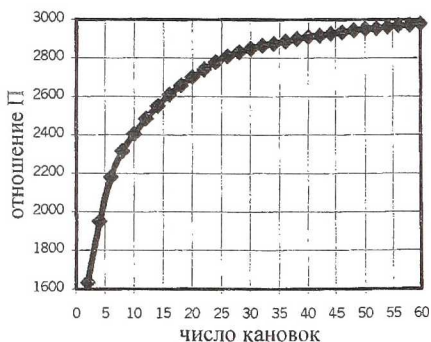
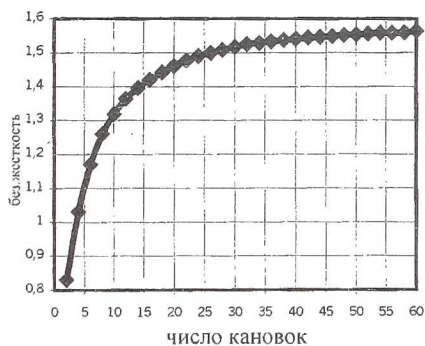
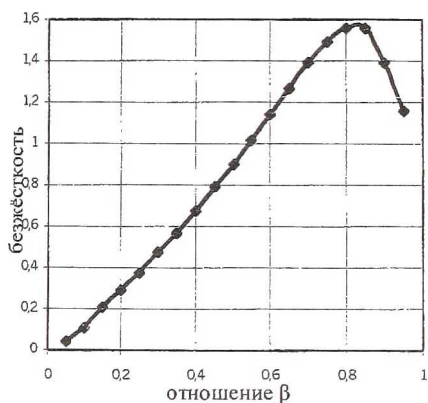


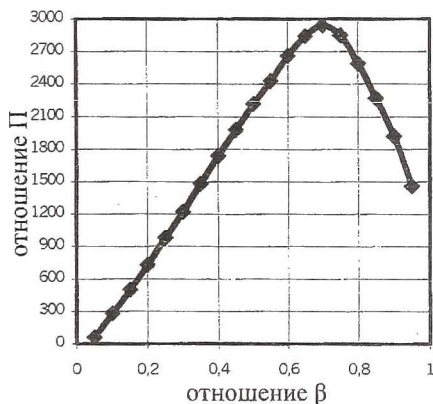
Рис. 4. Зависимость безразмерной жесткости (а) и отношения жесткости газового слоя к утечке уплотняемой среды (б) от числа спиральных канавок

### Отношение радиальной ширины зоны со спиральными канавками к радиальной ширине уплотнительного кольца

На рис. 5,а приведена зависимость безразмерной жёсткости  $\bar{K}$  от отношения  $\beta$  радиальной ширины зоны со спиральными канавками к радиальной ширине уплотнительного кольца. Вначале безразмерная жёсткость  $\bar{K}$  повышается с увеличением отношения  $\beta$ , достигает максимального значения при  $\beta = 0,84$ , затем уменьшается с увеличением отношения  $\beta$ . На рис. 5, б показана зависимость отношения  $\Pi$  жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды от отношения  $\beta$ . Аналогично, отношение  $\Pi$  повышается с увеличением отношения  $\beta$ , достигает максимального значения при  $\beta = 0,72$ , потом уменьшается с увеличением отношения  $\beta$ . Выбор значения  $\beta$  зависит от конкретного инженерного требования к уплотнению.



а

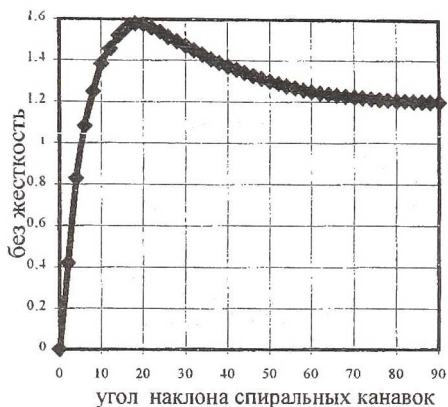


б

Рис. 5. Зависимости безразмерной жёсткости (а) и отношения  $\Pi$  (б) от отношения  $\beta$  радиальной ширины зоны спиральных канавок к радиальной ширине уплотнительного кольца

### Угол наклона канавок $\alpha$

Угол наклона спиральных канавок  $\alpha$  в значительной степени влияет на характеристики газодинамических уплотнений. Как показано на рис. 6, безразмерная жёсткость газового слоя  $\bar{K}$  и отношение  $\Pi$  жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды резко возрастают с увеличением угла  $\alpha$ , достигают максимального значения при  $\alpha = 18^\circ$  ( $\alpha = 17^\circ$ ), затем постепенно уменьшаются.



а



б

Рис. 6. Зависимости безразмерной жёсткости (а) и отношения жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды (б) от угла наклона спиральных канавок

### Оптимизация конструктивных параметров

Теоретический анализ показывает, что характеристики торцовых газодинамических уплотнений должны быть различными для разных условий их работы. При выборе конструктивных параметров уплотнения для конкретного случая применения необходимо учитывать параметр уплотнения  $\Lambda$  (число сжимаемости)

$$\Lambda = \frac{6\mu\omega R_o^2}{p_o h_l^2},$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость газа,  $\omega$  - угловая скорость уплотнения,  $R_o$  - внешний радиус торцевой поверхности уплотнительного кольца,  $p_o$  - давление газа в уплотняемой полости,  $h_l$  - толщина газового слоя в торцовом зазоре.

Очевидно, что параметр  $\Lambda$  является комплексным безразмерным параметром, включающим не только параметры работы  $\mu, \omega$  и  $p_o$ , но и конструктивные параметры  $R_o$  и  $h_l$ . Рассмотрим влияние параметра  $\Lambda$  на характеристики уплотнения и проведем оптимизацию конструктивных параметров.

#### Влияние параметра $\Lambda$ на характеристики уплотнения.

Анализ рис. 7 показывает, что безразмерная жёсткость  $\bar{K}$  газового слоя в торцовом зазоре повышается с увеличением параметра  $\Lambda$ , то есть

стабильность уплотнения усиливается. На рис. 8 получено, что отношение жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды  $\Pi$  резко увеличивается с повышением параметра  $\Lambda$  до  $\Lambda = 100$ , затем в основном становится неизменным. Однако следует иметь в виду, что при  $\Lambda > 50$  необходимо учитывать эффект скольжения [9].

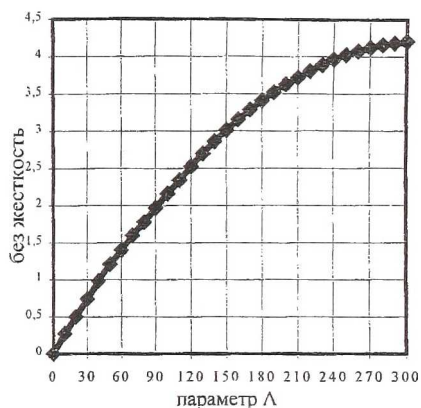


Рис. 7. Зависимость безразмерной жёсткости от параметра  $\Lambda$

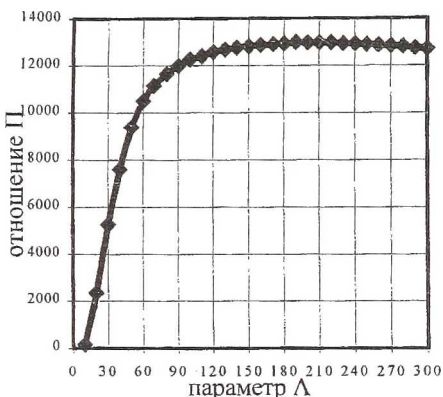


Рис. 8. Зависимость отношения жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды от параметра  $\Lambda$

#### Оптимизация конструктивных параметров.

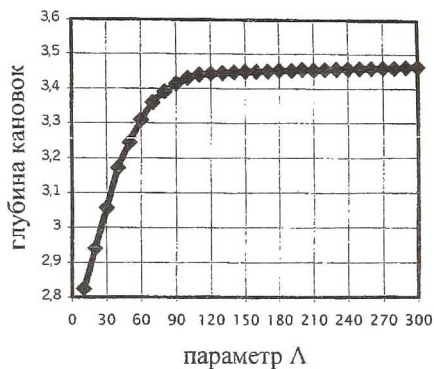
Оптимизация конструктивных параметров торцовых бесконтактных уплотнений необходима при их проектировании для конкретных условий работы и для удовлетворения инженерных требований к уплотнению. В качестве критерия оптимизации вновь выбираем максимальное значение  $\Pi$  отношения жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды.

Из рис. 9,а следует, что оптимальная глубина канавок  $\bar{H}_{opt}$  быстро увеличивается с повышением параметра  $\Lambda$  до  $\Lambda = 120$ , затем остается практически неизменной.

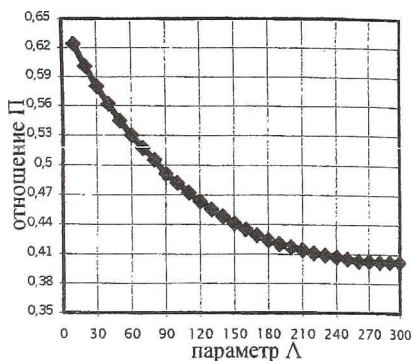
На рис. 9,б приведена тенденция изменения оптимального отношения радиальной ширины зоны со спиральными канавками к ширине уплотнительного кольца  $\beta_{opt}$  с увеличением параметра  $\Lambda$ : чем больше параметр  $\Lambda$ , тем меньше оптимальное отношение  $\beta$ .

На рис. 10 дана зависимость оптимального угла наклона спиральных канавок  $\alpha_{opt}$  от параметра  $\Lambda$ . Значение  $\alpha_{opt}$  уменьшается с увеличением параметра  $\Lambda$ , затем постепенно возрастает.





а



б

Рис. 9. Зависимости оптимальных безразмерной глубины спиральных канавок (а) и отношения радиальной ширины зоны спиральных канавок к радиальной ширине уплотнительного кольца (б) от параметра  $\Lambda$

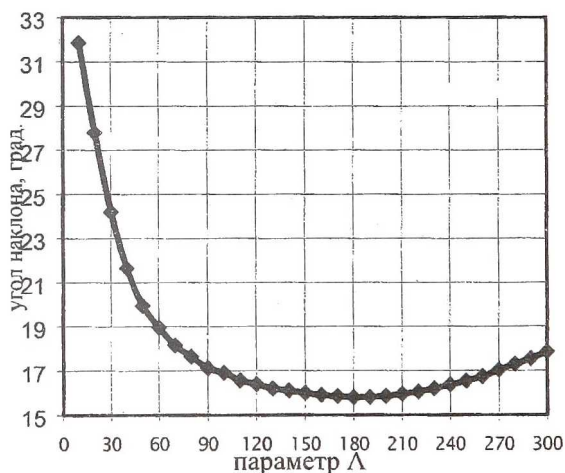


Рис. 10. Зависимость оптимального угла наклона канавок от параметра  $\Lambda$

### Выводы

Проведенное теоретическое исследование показывает, что конструктивные параметры торцевой поверхности газодинамического уплотнения (глубина  $H$  спиральных канавок и их число  $N_g$ , угол наклона канавок  $\alpha$  и отношение радиальной ширины зоны спиральных канавок к ши-

рине уплотнительного кольца  $\beta$ ) в значительной степени влияют на характеристики торцовых бесконтактных уплотнений с газовой смазкой.

Выбранный критерий оптимизации  $\Pi$ , равный отношению жёсткости газового слоя к утечке уплотняемой среды, позволяет определить оптимальные параметры торцовых бесконтактных уплотнений с газовой смазкой.

Оптимизация конструктивных параметров торцовых бесконтактных уплотнений с газовой смазкой будет весьма полезна при их инженерном проектировании. Приведенные в данном докладе результаты послужат основой для оптимизации статических и динамических характеристик уплотнений с учетом деформаций уплотнительных поверхностей.

#### Список литературы

1. Sedy J. Improved Performance of Film-Riding Gas Seals Through Enhancement of Hydrodynamic Effects// ASLE Trans. – 1980. - V. 23(1), p.35-44.
2. Person V., Tournier B., Frene J. A Numerical Study of the Stable Dynamic Behavior of Radial Face Seals with Grooved Faces// Journal of Tribology. – 1997. - V.19, July, p.507-514.
3. Pecht G., Netzel J. P. Design and Application of Non-contacting Gas Lubricated Seals for Slow Speed Services// Lubrication Engineering. 1999, July, p.20-25.
4. Wu S., Clark R. Positioning of Hydrodynamic Lift Features on Non-Contacting Mechanical Gas Seal Rings// ASLE Trans. – 2000. -V. 43(3), p.498.
5. Zou M., Green I. Clearance Control of a Mechanical Face Seal// ASLE Trans. – 1999. - V42(3), p.535-540.
6. Зрелов В.А., Фалалеев С.В., Рудман Л.М. Оптимизация виброзащитных характеристик ТГСУ / Уплотнения и уплотнительная техника: Тез. докл. IV Всесоюзн. совещ. - Сумы, 1985. - С.55-56.
7. Фалалеев С.В. Оптимизация торцовых газостатических уплотнений многорежимных энергомашин // Тез. докл. IX Всесоюзн. научно-техн. конф. по конструкционной прочности двигателей. - Куйбышев, 1983. -С.158-159.
8. Белоусов А.И., Зрелов В.А., Фалалеев С.В. Выбор параметров торцового уплотнения для авиационного ГТД // Авиаци. пром. -М., 1985. -N 9. -С.20-22.
9. Емельянов А.В., Степанчук В.И. Нелинейные эффекты в газодинамических подпятниках со спиральными канавками/ Машиноведение. – 1983, № 4. – С. 91-100.