

Подшипники скольжения мультипликаторных центробежных компрессоров

Н.В. Соколов, И.В. Ферафонов, Ф.Г. Гильмутдинов

(АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС),

М.Б. Хадиев (Казанский национальный исследовательский технологический университет)

В статье описываются подшипники скольжения, применяемые в корпусах сжатия центробежных компрессоров мультипликаторного типа отечественных и зарубежных производителей. Представлены особенности конструкции подшипников в зависимости от условий эксплуатации, окружных скоростей и воспринимаемых нагрузок.

Ключевые слова: мультипликатор, центробежный компрессор, зубчатое зацепление, ротор, подшипник скольжения, подушка, осевая и радиальная нагрузка, скорость скольжения.

Sliding bearings of the integrally geared centrifugal compressors

Sokolov N.V., Ferafontov I.V., Gilmudtinov F.G. JSC «NII turbokompressor n.a.V.B.Shnepp», M.B. Khadiev (Kazan national research technological university)

HMS Group, Khadiev M.V. Kazan National Research Technological University.

The article describes sliding bearings used in compression casings of integrally geared centrifugal compressors of domestic and foreign manufacturers. Features of the bearings' design are presented depending on operating conditions, circumferential speeds and perceived loads.

Key words: increasing gear, centrifugal compressor, gearing, rotor, sliding bearing, pad, axial and radial load, sliding speed.

В настоящее время в качестве опор вращающихся роторов центробежных компрессоров (ЦК) для различных отраслей промышленности преимущественно используются подшипники скольжения. Они обладают рядом преимуществ перед другими типами подшипников: надежность и долговечность работы под нагрузкой, жесткость смазочного слоя, виброустойчивость. Подшипники скольжения могут находиться в работе при больших окружных скоростях (до 120 м/с) и высоких удельных давлениях (до 100 кгс/см²). Опыт эксплуатации ЦК показывает, что качественная работа подшипников в существенной мере определяет эксплуатационную надежность компрессора в целом. Следовательно, одной из основных задач при проектировании ЦК является обоснованный выбор конструкции подшипников, которые могли бы надежно и экономично работать при заданных условиях эксплуатации компрессора.

В статье рассматриваются подшипники скольжения мультипликаторных центробежных компрессоров (МЦК) отечественных и зарубежных производителей, условия их эксплуатации в качестве опор тихоходного и быстроходных роторов и особенности конструкции.

Отличительной особенностью МЦК по сравнению с одновальными двухопорными ЦК является расположение корпусов сжатия 1 (рис. 1) на привалочных (сопрягаемых) поверхностях повышающего мультипликатора 2, которые совместно составляют единую конструкцию. В этом случае вокруг ведущего тихоходного зубчатого колеса 3 по окружности расположены ведомые быстроходные роторы 4 с консольно расположенными рабочими колесами 5, основой ко-

торых являются вал-шестерни. Исходя из конструкции, опорные подшипники 6 быстроходных роторов 4, помимо нагрузки от сил тяжести ротора, несут нагрузку от косозубого зацепления зубчатой пары. В конструкциях МЦК, спроектированных в АО «НИИ турбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (далее АО НТК), максимальное количество быстроходных роторов может быть до 3-х с давлением подачи до 50 кгс/см², т.е. шестиступенчатый компрессор [1].

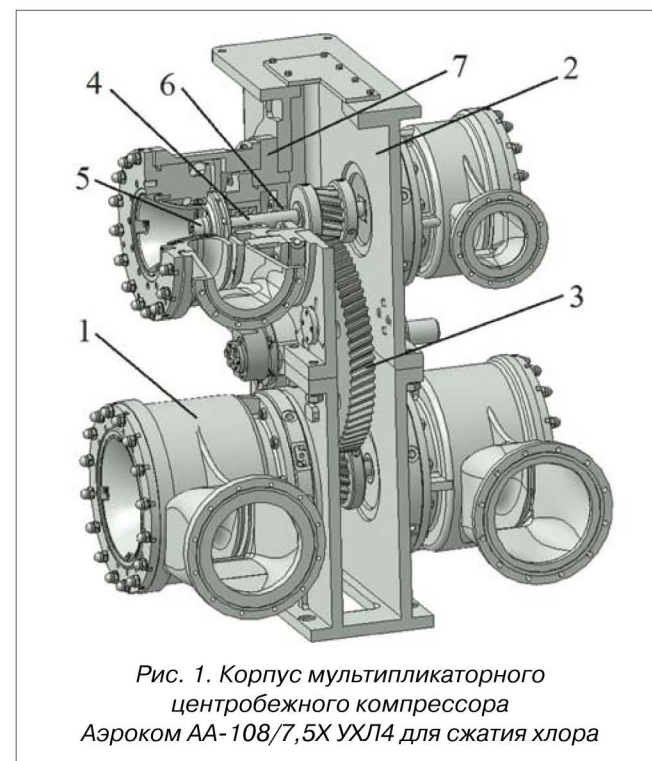


Рис. 1. Корпус мультипликаторного центробежного компрессора
Аэроком АА-108/7,5Х УХЛ4 для сжатия хлора

Опорные подшипники скольжения

В качестве привода МЦК, в основном, используются электродвигатели переменного тока. В некоторых случаях приводом может выступить турбина. Например, при разработке проекта ГЦМ5-2100/4,7УХЛ4 для сжатия воздуха приводом установки является паровая турбина мощностью 9000 кВт при наличии электродвигателя в качестве резерва. Частота вращения привода составляет 1500 об/мин при больших и 3000 об/мин при малых затрачиваемых мощностях компрессорного агрегата. Привод МЦК через дисковую муфту приводит в движение тихоходный ротор, который через зубчатое колесо передает крутящий момент на быстроходные роторы. Внешний габаритный размер тихоходного ротора типоразмерного ряда мультипликаторов, разработанного в АО НТК, определяется двумя окружными скоростями:

1) рабочих колес быстроходных роторов. При посадке полуоткрытых колес на конус ротора скорость ограничена величиной 400 м/с;

2) зубчатого колеса. Максимальное значение скорости в зависимости от частоты вращения и передаваемой мощности ограничено значениями 126 и 176 м/с.

На основании этого номенклатура унифицированных МЦК, разрабатываемых в АО НТК, построена на базе мультипликаторов с диаметрами делительной окружности зубчатых колес 692, 728, 1054, 1456 и 2000 мм. Масса тихоходного ротора в сборе из-за больших радиальных габаритов достигает значительной величины. Например, для компрессоров общего назначения 32ВЦ-100/9УХЛ4 и 43ВЦ-160/9 УХЛ4 масса ротора с зубчатым колесом 692 мм составляет 160 кг. Окружная скорость на поверхности шейки ротора диаметром 65 мм при расстоянии между опорами 310 мм равна 10,2 м/с. Соотношение динамической составляющей нагрузки к статической $\Delta P P_{дин} / c_m$ [2] для тихоходного ротора является незначительным. Поэтому при низких окружных скоростях и массогабаритных характеристиках в качестве опор тихоходного ротора преимущественно применяются цилиндрические подшипники скольжения 1 (рис. 2а). Подшипники изготавливаются с двумя горизонтальными карманами 2, имеющими отверстие 3 для подачи смазки. Они выполняются неразъемными, совмещены с упорной частью и изготавливаются в виде опорно-упорной втулки-вкладыша 4 для удобства замены в процессе пуска и эксплуатации. Слив смазки происходит через отверстия 6 в нижней части корпуса 5. Для исключения возникновения избыточного давления в полости 7 и возможности слива из нее смазки выполнены отверстия 8. Однако эти подшипники могут являться источниками вибрации при нулевом эксцентриситете ($e=0$) и удвоенной первой

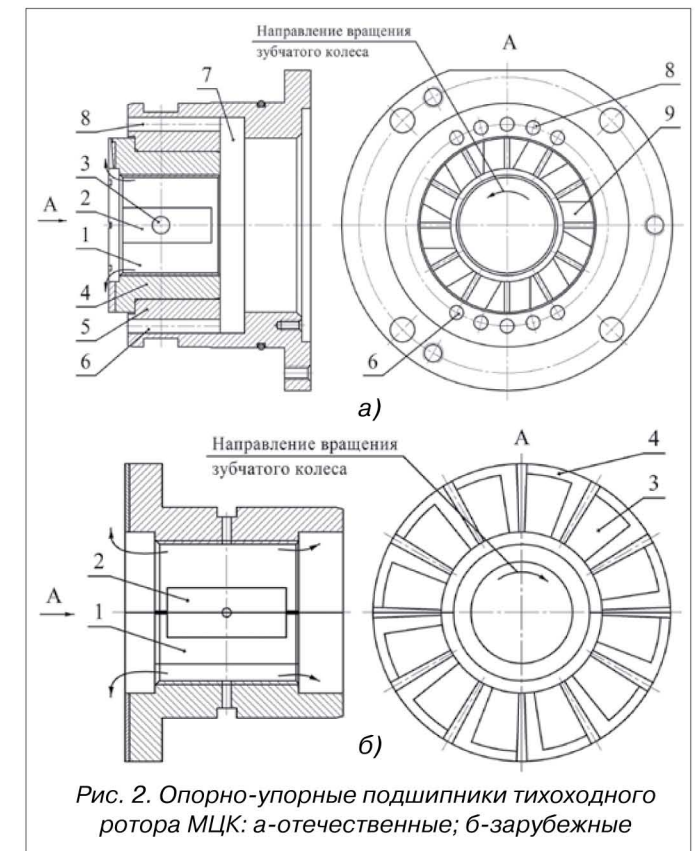


Рис. 2. Опорно-упорные подшипники тихоходного ротора МЦК: а-отечественные; б-зарубежные

критической частоте вращения $2n_{кр1}$ [3]. Первый недостаток устраняется вследствие большой массы и малой частоты вращения, а второй – вследствие малого расстояния между подшипниками, так как тихоходные роторы изготавливаются жесткими.

Для увеличения несущей способности и снижения максимальной температуры смазочного слоя в некоторых случаях зарубежные производители могут применить разъемные опорные 4-х сегментные подшипники с неподвижными подушками 1 (рис. 2б) с расположением кармана 2 в нижней точке или 5-ти сегментные с самоустанавливающимися подушками (3 подушки сверху, 2 - снизу). Разъем подшипников осуществляется по горизонтали.

Быстроходные роторы МЦК являются наиболее нагруженными и ответственными рабочими элементами конструкции компрессора. Частота вращения роторов может достигать 38000 об/мин. Выбор конструкции опоры роторов зависит от исполнения разъема мультипликатора.

В отечественных МЦК, разработанных в АО НТК, горизонтальный разъем мультипликатора 2 (рис. 1) предназначен только для установки тихоходного ротора с зубчатым колесом 3 во внутренней полости. Опорные подшипники 6 быстроходных роторов 4 являются неразъемными и установлены по переходной посадке в расточку проставка 7. Оси быстроходных



роторов не совмещены с горизонтальным разъемом и расположены в массиве самой конструкции мультипликатора. Подшипники 6 также изготавливаются в виде сменных втулок-вкладышей 1 (рис. 3а) для удобства обслуживания и монтажа. Они выполнены с 4-мя неподвижными подушками 2, имеющими клиновые скосы. Выбор количества подушек продиктован соотношением длин подушки и межподушечного канала для подачи смазки: при малых диаметрах 40, 50 ÷ 90 мм наиболее оптимальным является число подушек четыре. Подача смазки происходит через три отверстия 3. Величина клина на входе в подушку равна 0,05 ÷ 0,07 мм. Подушки относительно шейки вала-шестерни повернуты таким образом, чтобы радиальная нагрузка от зубчатого зацепления попадала на межподушечный канал подшипника. Угол нагрузки от зацепления относительно горизонтальной плоскости равен 20°53'. В этом случае нагрузку несут поровну две близлежащие подушки, что уменьшает расход и максимальную температуру смазки и увеличивает несущую способность подшипника [2].

Применяемый в АО НТК мультипликатор требует точности изготовления подшипников и посадочной расточки для обеспечения параллельности тихоходного и быстроходного роторов с погрешностью не более 0,1 мм на 1000 мм длины. Это условие ограничивает ширину зубчатого венца величиной 80 мм для обеспечения пятна прилегания контакта зубьев эвольвентного зацепления [4, с. 123].

Зарубежные МЦК таких производителей, как Siemens, Samsung Turbomaster, Ingersoll-Rand, Atlas Copco и др., имеют преимущественно мультипликаторы с горизонтальный разъемом, в который по

расточке укладываются как опорные подшипники быстроходных роторов, так и опорно-упорные подшипники тихоходного ротора. Такая конструкция имеет следующие преимущества:

1) облегчается обслуживание подшипников и уплотнений компрессора без разборки проточной части путем снятия крышки мультипликатора;

2) облегчается укладка роторов на подшипники мультипликатора, в т.ч. с помощью ложных валов. Увеличивается ширина зубчатых венцов, за счет чего значительно возрастает передаваемая мощность компрессора. При ширине зубчатых венцов более 80 мм положение роторов выставляется с помощью эксцентричной втулки между постелью мультипликатора и корпусом подшипника быстроходного ротора. Втулка позволяет перемещаться подшипнику в плоскости, расположенной поперек оси ротора, обеспечивая точность укладки;

3) возможность передачи больших мощностей за счет увеличения ширины зубчатого венца.

Корпуса подшипников выполнены разъемными и состоят из двух половин. Точное взаимное прилегание половин подшипников обеспечивается с помощью двух призонных болтов или двух штифтов и болтов. Опорные подшипники быстроходных роторов преимущественно выполнены 5-ти сегментными с самоустанавливающимися подушками 1 (рис. 3б). Для обеспечения направления нагрузки на межподушечный канал корпус 2 подшипника повернут относительно шейки вала-шестерни, и разъем корпуса подшипника с горизонтальной расточкой составляет некоторый угол α . После выставления и укладки корпуса подшипника в постель мультипликатора поло-

жение подшипника фиксируется штифтом 3. Подача смазки к самоустанавливающимся подушкам в области межподушечного канала обеспечивается с помощью дюз 4. Этим обеспечивается индивидуальный подвод смазки, снижая дисковые потери мощности подшипника на перемешивание.

В процессе механической отладки четырехступенчатого компрессора ВЦ1-100/9УХЛ4 в АО НТК (бывшее СКБ по компрессоростроению) были использованы для экспериментов первые две ступени нижнего модуля. Были проведены сравнительные испытания нескольких вариантов 4-х клиновых подшипников с неподвижными подушками, отличающихся друг от друга величиной диаметального зазора δ , а также 5-ти сегментного самоустанавливающегося подшипника с зазором $\delta=0,08 \div 0,085$ мм. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

По результатам испытаний сделан вывод, что испытанные варианты 4-х клиновых подшипников работоспособны и по уровню вибрации и максимальной температуре не уступают 5-ти сегментному, испытанному в сопоставимых условиях. При этом 4-х клиновые подшипники имеют ряд преимуществ перед сегментными:

- 1) проще в изготовлении;
- 2) отсутствие селективной сборки;

3) имеют больший ресурс работы (отсутствует характерный недостаток самоустанавливающихся подшипников – смятие спинки подушки);

4) потери на трение меньше в 1,5 раза, поскольку в самоустанавливающихся подшипниках, вследствие вихреобразования в полостях между подушками, суммарное выделение тепла больше, чем в подшипниках с плавными переходами между несущими поверхностями.

На основании проведенной работы в качестве опор быстроходных роторов рекомендовались 4-х клиновые подшипники с зазором $\delta=0,07 \div 0,09$ мм с увеличением в процессе эксплуатации зазора до 0,12 ÷ 0,13 мм.

Упорные подшипники скольжения

Остаточные осевые нагрузки, которые возникают от газовых сил оппозитно расположенных рабочих колес МЦК, через упорные гребни быстроходных роторов передаются на зубчатое колесо тихоходного ротора. Далее нагрузку воспринимает упорная часть опорно-упорных подшипников скольжения, которые расположены с обеих сторон относительно зубчатого колеса. Подшипники, как правило, симметричные и могут нести нагрузку в обоих направлениях, что обеспечивает надежную работу МЦК на нестационарных режимах.

Таблица 1.

Частота вращения быстроходного ротора $n=25010$ об/мин. Температура масла на входе в компрессор $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Избыточное давление масла в напорном коллекторе $1,52$ кгс/см²

Варианты исполнения подшипников	Нагрузка на подшипник, кгс	Вибрация, мкм		Температура, °C		Расход масла (общий на компрессор), л/мин
		I ст.	II ст.	I ст.	II ст.	
4-х клиновые, $\delta_1=\delta_2=0,08$ мм	45	12,5	15	72	74	20
	125	6	13	83	85	
	153	6	12,5	84	87	
	175	6,5	13	84	88	
4-х клиновые, $\delta_1=\delta_2=0,10$ мм	45	4	15	74	70	20
	105	3	16	92	86	
	157	2	13	100	92	
	170	2	12,5	101,5	94	
4-х клиновые, $\delta_1=\delta_2=0,12$ мм	41	10	12,5	58	58	18
	120	11	11	77	72	
	159	12	11	80	76	
	176	10	12	81	78	
5-ти сегментные самоустанавливающиеся, $\delta_1=\delta_2=0,085$ мм	50	4	8	94	92	32
	93	6	15	92	93	
	133	5	14	94	94	
	179	5	13	96	94	

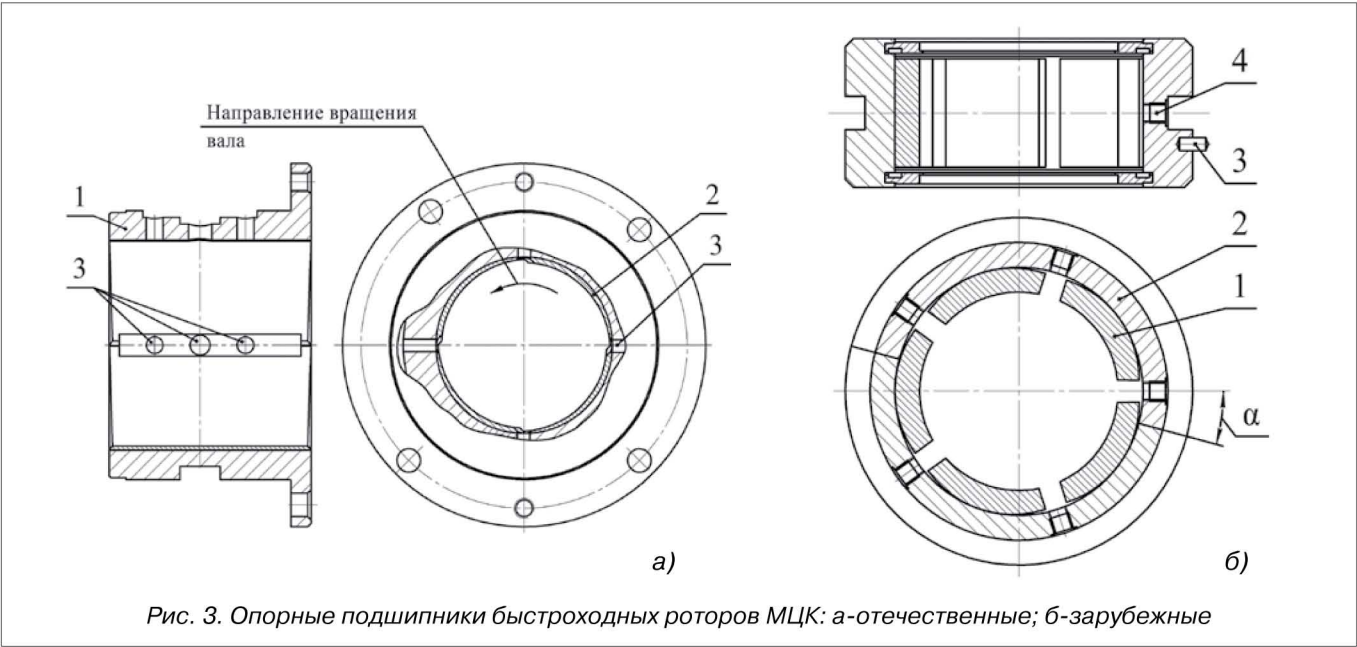


Рис. 3. Опорные подшипники быстроходных роторов МЦК: а-отечественные; б-зарубежные



Отечественные МЦК, разработанные в АО НТК, используют профиль неподвижных подушек упорной части с параллельным межподушечному каналу скосом 9 (рис. 2а) [6]. Количество подушек равно 9 или 12. Величина клина на входе в подушку равна $0,04 \div 0,06$ мм. Профиль прост в изготовлении, для которого необходима торцевая фреза координатно-расточного станка. Зарубежные МЦК в своих конструкциях используют профилирование неподвижных подушек упорной части по винтовой поверхности 3 (рис. 2б) [7]. Данный профиль технологически более сложен для изготовления [8]. Однако имеет более равномерное поле скоростей по направлению движения упорного диска. По внешнему диаметру подушки упорного подшипника может быть выполнена плоская перемычка 4 для снижения расхода смазки и увеличения несущей способности. Количество подушек подшипников зарубежных МЦК из-за разьема четное и составляет 8 или 12. Разъем происходит по центральной линии межподушечного канала. Подача смазки в подшипники осуществляется через подводящие каналы опорного подшипника путем растекания смазки при вращении зубчатого колеса.

Материалы для изготовления подшипников отечественных МЦК составляют сталь 20 для основания подшипника, залитого баббитом Б83. В АО НТК также освоена технология плазменного напыления баббитового слоя практически на любую несущую поверхность подшипника. В этом случае для лучшего сцепления баббитового слоя с основанием предварительно напыляется композиционный порошок ПГ-Ю5-Н, и далее наносится порошок баббита Пр-Б83.

В случае применения самоустанавливающихся опорных подшипников быстроходных роторов необходимо применение более твердого материала для изготовления подушек. При длительной работе подушек с основанием из стали 20 наблюдалось смятие основания тыльной стороны с увеличением радиального зазора и возрастанием вибрации ротора компрессора. Зарубежные компрессоростроительные фирмы применяют сплав стали с высоким содержанием углерода и присадками хрома и молибдена, аналогом которых являются стали 40ХФА или 38ХМ. В основном эти стали применяют для изготовления тяжело нагруженных деталей (валы, штоки, траверсы и др.), работающих при температуре до 400°C.

Дальнейшее развитие отечественных мультипликаторных центробежных компрессоров таких производителей, как АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» и ОАО «Казанькомпрессормаш» (Группа ГМС), заключается в разработке базового мультипликатора МЦК с горизонтальным разъемом. Такая конструкция повысит конкурентоспособность от-

ечественных МЦК по сравнению с зарубежными аналогами: облегчит технологию сборки корпуса компрессора с обеспечением необходимых допусков параллельности роторов, сократит время на ревизию подшипников и уплотнений компрессора на объекте у заказчика и увеличит передаваемую мощность зубчатой пары мультипликатора. Центробежная ступень базового корпуса должна соответствовать типоразмерному ряду корпусов сжатия, разработанных в АО НТК. Выбор типа опорных подшипников быстроходных роторов МЦК зависит от условий эксплуатации компрессора и затрачиваемых мощностей на сжатие компримируемого газа.

Список литературы

1. Хисамеев И.Г., Максимов В.А., Баткис Г.С., Гузельбаев Я.З. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров. Казань: Изд-во «ФЭН», 2010. - 671 с.
2. Хамидуллин, И.В. Исследование и расчет опорных подшипников скольжения с самоустанавливающимися подушками центробежных компрессоров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.06 / Хамидуллин Ильдар Вагизович. – Ленинград, 1983. - 18 с.
3. Подольский М.Е. Физическая природа и дискуссионные вопросы теории масляных вибраций // Теория механизмов и машин. 2009. №1 (13). Том 7. - С. 42-59.
4. Туруновский В.М., Ферафонов И.В., Максимов В.А. Высокоскоростные мультипликаторы компрессорных установок. Казань: Изд-во «Слово», 2008. - 255 с.
5. Петросян Г.Г., Гильмутдинов Ф.Г., Сафиуллин А.Г. Отчет по изготовлению и испытанию многоклиновых подшипников скольжения для ЦКОН №2104-84. Казань: СКБ по компрессоростроению, 1984. - 15 с.
6. Соколов Н.В., Хадиев М.Б., Максимов Т.В., Фуртин В.А. Испытания упорного подшипника скольжения с параллельным межподушечному каналу скосом в центробежном компрессоре // Компрессорная техника и пневматика. 2014. №7. - С. 30–36.
7. Максимов В.А., Хадиев М.Б., Федотов Е.М. Определение гидродинамических и тепловых характеристик упорных подшипников математическим моделированием // Вестник машиностроения. 2004. №6. - С. 39–45.
8. Хадиев М.Б., Максимов В.А. Изготовление подпятников с плоскоклиновой рабочей поверхностью. Информационный листок № 375-74. Казань : Татарский ЦНТИ, 1974. - 4 с.

