

БЕСКОНТАКТНЫЕ ОПОРЫ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ ДВС

А.В. Смирнов, к.т.н., доцент

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Развитие систем турбонаддува происходит в том числе за счет совершенствования узлов трения турбокомпрессоров (ТК). Определенные интерес и перспективу представляют бесконтактные опоры с малыми потерями на трение — газовые, магнитные и их комбинации. Для оценки уровня развития бесконтактных опор ТК и перспектив их развития выполнен обзор патентной и научно-технической информации. Несмотря на многочисленные описания конструкции ТК с бесконтактными опорами, исследований, связанных с их применением в условиях эксплуатации, представлено крайне мало. Наименьшее количество информации приходится на газомангнитные подшипники, несмотря на их очевидное преимущество.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) на современном этапе развития, как правило, оборудованы системами наддува. Несмотря на то что способов наддува двигателей существует несколько, наиболее распространен турбонаддув. В настоящее время системы турбонаддува развиваются по следующим основным направлениям: совершенствование проточных частей, применение систем регулирования, использование новых материалов для изготовления валов, колес и др. В целом все эти усовершенствования направлены на улучшение динамических характеристик турбокомпрессора (ТК), снижения его инерционности, улучшения надежности и продления ресурса. Одним из направлений развития конструкции ТК, позволяющим одновременно улучшить все перечисленные характеристики, является совершенствование подшипниковых узлов. В ТК как отечественного, так и зарубежного производства применяются в основном подшипники качения и скольжения. Однако в технике известны так называемые бесконтактные опоры с минимальными потерями на трение — газовые и магнитные подшипники. Применение бесконтактных опор позволяет не только исключить масляную систему смазки, которая оказывает существенное влияние на надежность работы ТК, но и повысить механический КПД и динамические характеристики ТК. Система наддува с ТК на бесконтактных опорах потенциально способна по-

высить его надежность и продлить ресурс, а также улучшить приемистость двигателя.

Для оценки состояния и перспективы применения бесконтактных опор в конструкциях ТК выполнен обзор патентных источников и научно-технической информации.

В результате анализа источников информации необходимо отметить следующее. Количество рефератов публикаций в разделе «Форсирование ДВС. Наддув» реферативного журнала (РЖ) «Двигатели внутреннего сгорания» в 1980-е годы составляло в среднем 184 за год, в 1990-е годы — 88 за год, в 2000-е годы — 33 за год, начало 2010-х годов — 69 за год. Из представленной статистики видно заметное снижение публикаций в 1990-е и особенно в 2000-е годы, что можно объяснить прекращением или существенным сокращением финансирования научной деятельности в целом, в том числе организаций типа ВИНТИ и ВЦП, занимающихся сбором, переводом и обработкой отечественной и зарубежной научно-технической информации. В результате это сказалось на количественном и качественном уровне реферативной информации, хотя за рубежом исследования продолжались как минимум в тех же объемах, что и до 1990-х годов. Исходя из этого можно предположить, что количество работ, выполненных в области исследования ТК с бесконтактными подшипниками за рубежом, несколько больше, чем представлено в реферативных журналах. В то же время приведенная ниже статистика и описание работ основаны только на найденных источниках информации.

Количественные и качественные характеристики найденного объема информации характеризуются следующим образом. В статистику вошли публикации, в которых рассматриваются конструкции бесконтактных опор ТК, различные вопросы их исследования, а также перспективы использования газовых и/или магнитных подшипников в ТК систем наддува ДВС. На рис. 1 показано распределение публикаций по странам и по видам источников информации. Соотношение патентов и других видов публикаций — 58 и 42 % соответственно.

На рис. 2 показано распределение публикаций по годам. Подчеркнем, что в статистику были включены работы, касающиеся только ТК преимущественно для систем наддува ДВС, хотя по-

путно было найдено еще 27 публикаций, касающихся применения бесконтактных опор в газотурбинных двигателях, турбодетандерах, паровых и газовых турбинах, компрессорах.

Учитывая содержание публикаций, можно констатировать, что примерно 70 % посвящено газовым опорам, 7 % — магнитным, 2 % — газомангнитным и 21 % — перспективам использования газовых и магнитных подшипников в ТК.

Рассмотрим содержание наиболее интересных публикаций с учетом перспектив использования бесконтактных опор в целом. В 1986 г. в обзорной информации НИИНАВТОПРОМ по развитию зарубежных автомобильных компрессоров указывалось о перспективах улучшения характеристик ТК путем применения воздушной смазки подшипников [1]. Работы в этом направлении в то время вели фирмы «Garrett», INI и «Mitsubishi». Однако было отмечено, что переход на воздушную смазку требует существенного изменения конструкции подшипников и решения ряда проблем в части материалов, технологии, обеспечения необходимой несущей способности и устойчивости воздушного слоя.

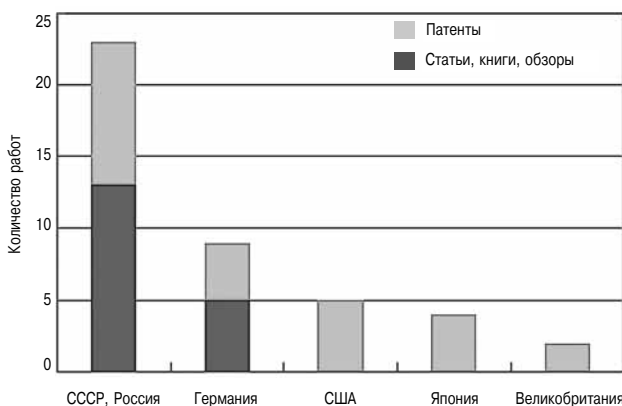


Рис. 1. Распределение публикаций по странам и по видам источников информации

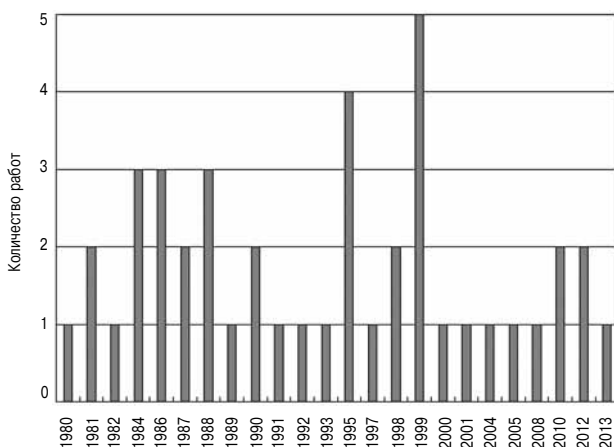


Рис. 2. Распределение публикаций по годам (по оси абсцисс указаны только те года, в которых были публикации)

В 1988 г. в обзорной информации ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, посвященной тенденциям развития ТК для нефтяной и газовой промышленности, в качестве перспективных были указаны активные магнитные подшипники [2]. Приведены примеры проведения испытаний компрессоров с магнитными подшипниками, выполненными фирмами «Nova» и «Framatone». Также указывается, что наряду с магнитными подшипниками особый интерес вызывает возможность использования для компрессоров мотор-подшипников с использованием газомангнитных опор.

В 1989 г. в СССР была опубликована статья о перспективных направлениях повышения технического уровня автомобильных ТК, в которой одним из направлений было указано применение подшипников с газовой смазкой [3].

Во второй половине 1990-х годов в немецких изданиях был опубликован ряд работ, в которых рассматривались направления дальнейшего развития систем турбонаддува ДВС. Одним из таких направлений указано применение газовых (воздушных) и магнитных подшипников в ТК систем турбонаддува ДВС. Например, по данным источника [4] «... в далеком будущем об оптимальном полном коэффициенте полезного действия должны позаботиться совершенно другие концепции подшипников: исследования проводятся на магнитных и воздушных подшипниках... Преимуществами этих двух типов подшипников являются лучшие шумовые характеристики и малые потери на трение». В то время реализацией этих направлений занимались фирма ККК и французский филиал фирмы «Allied Signal Turbocharged System».

В 2013 г. опубликована работа сотрудников Казанского научно-исследовательского технологического университета о перспективах применения подшипников с газовой смазкой в ТК [5]. В статье рассматривается история развития исследований по газовым опорам, приводятся конструкции турбомашин с газовыми опорами и говорится о том, что применение газовых подшипников в ТК по-прежнему является перспективным.

Рассмотрим особенности применения бесконтактных опор в конструкции ТК.

Классификацию типов и конструкции газовых опор, применяемых в ТК, то можно представить следующим образом:

- по принципу действия — газодинамические, газостатические, гибридные;
- по конструкции — цилиндрические, сферические, с самоустанавливающимися вкладышами, в виде диска (подпятника);
- по восприятию усилий — осевые и радиальные;

➤ по способу подачи газовой смазки в рабочий зазор — с питателями, пористые, с подачей воздуха в осевом направлении с торцов втулки подшипника.

В описаниях конструкций газодинамических опор наиболее широко представлены лепестковые подшипники. Исследованиями лепестковых газодинамических подшипников ТК уже много лет занимаются специалисты ДВГТУ (сейчас ДВФУ, г. Владивосток). Ими было разработано и испытано несколько ТК с лепестковыми подшипниками для систем наддува ДВС [6]. Одна из конструкций ТК, разработанная на базе ТКР 11, представлена на рис. 3.

Испытания ТК проводились на вибрационном стенде и безмоторной установке на различных режимах. Частота вращения достигала 68 000 об/мин при температуре газов перед турбиной 760 °С. Температура радиальных подшипников при этом составляла 80 °С, осевых — 143 °С, виброскорость в горизонтальной плоскости — 0,7 мм/с, в вертикальной плоскости — 0,78 мм/с, виброускорение — 0,3 g. Проведенные испытания показали, что работа ТК с лепестковыми подшипниками устойчива на всех режимах работы двигателя. Приводится описание газодинамического подшипника, которому во время пуска обеспечивается газостатический режим с помощью дополнительного ТК.

Большая часть публикаций по газовым опорам посвящена газостатическим подшипникам.

В работе [7] предлагается ТК с центральным подшипниковым узлом, выполненным в виде воздушных подшипников скольжения сферической формы, образованных выпуклой формой ступиц колес ТК и вогнутыми наружными поверхностями разделительной перегородки U-образной

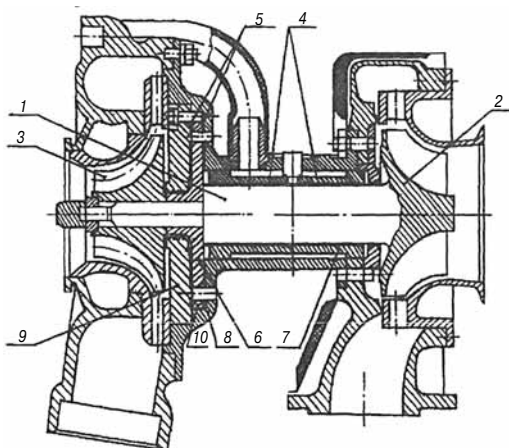


Рис. 3. Турбокомпрессор с лепестковыми газодинамическими подшипниками:

1 — вал; 2 — колесо турбины; 3 — колесо компрессора; 4 — радиальные лепестковые газодинамические подшипники; 5 — осевые подшипники; 6 — упорный диск; 7 — втулка; 8 — промежуточный корпус; 9 — кольцо; 10 — проставочное кольцо

формы. Подвод воздуха к подшипникам может производиться по осевому и радиальным сверлениям в работе ТК и всасывающей полости компрессора или через сверления из улитки компрессора во внутреннюю полость разделительной перегородки, а из нее — в подшипники. Конструкция позволяет получить малую длину, массу и момент инерции ротора ТК, а также малые габаритные размеры и массу всего агрегата и возможность вертикального расположения оси ротора.

В НАМИ была разработана конструкция ТК с газовым подшипником, выполненным в виде плавающей моновтулки с питающими отверстиями (рис. 4) [8]. Конструкция плавающей моновтулки обеспечивает компенсацию радиальных и осевых перемещений, а также эффективное демпфирование колебаний ротора. Подвод воздуха в зазоры осуществляется через два ряда радиальных и один ряд торцевых отверстий.

В других работах, касающихся этой конструкции турбокомпрессора описываются результаты испытаний. Некоторые параметры макетного образца ТК: масса ротора — 0,93 кг; длина вала — 71 мм; диаметр вала — 30 мм; диаметр подпятников — 74 мм; длина опорной поверхности втулки — 67,5 мм; масса втулки — 0,87 кг; диаметр питающих отверстий — 0,4 мм. Целью испытаний было определение эффективного КПД турбины и механического КПД, хотя попутно было получено и много других результатов. Испытания проводились как на воздухе, так и на горячем газе. Максимальная частота вращения ротора составляла 72 000 об/мин, абсолютное давление газа в подшипниках — 280–310 кПа. Расход воздуха составил менее 1,2 % расхода воздуха через двигатель. Эффективный КПД турбины благодаря повышению механического КПД при использовании газостатического подшипника увеличился на 6–9 %.

В патенте [9] описывается другая конструкция ТК с газостатическими подшипниками (рис. 5).

Турбокомпрессор включает осевую турбину и два центробежных компрессора, рабочие колеса которых установлены по обе стороны турбины на одном валу, расположенном в газостатических опорах. Опоры вала установлены по обе стороны от турбины. Диск турбины выполнен в виде пяти двустороннего кольцевого газостатического подпятника. На концах вала установлены подшипники качения с упругодемпферными обоймами.

Интересна конструкция ТК, представленная в патенте [10]. Особенность ТК в том, что газостатические опоры располагаются между рабочим колесом компрессора или турбины и соответствующим участком корпуса компрессора или турбины (рис. 6). Предполагается, что такая

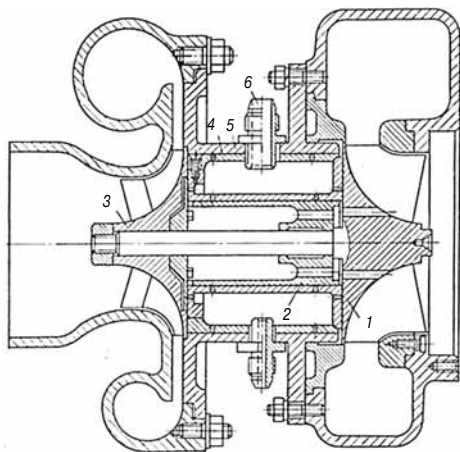


Рис. 4. Конструкция ТК с газостатическим подшипником, разработанная в НАМИ:

1 — колесо турбины плавающее; 2 — вал ротора; 3 — колесо компрессора; 4 — моноштулка; 5 — корпус подшипников; 6 — штуцер подвода воздуха

конструкция повысит надежность работы ТК и расширит область его применения.

В качестве магнитных опор в ТК применяются подшипники с постоянными магнитами и с электромагнитами, как радиальные, так и осевые. Работ, описывающих конкретные конструкции, крайне мало, а работ, описывающих результаты исследований ТК с магнитными опорами, в статистике не обнаружено.

Предлагаемый бесконтактный узел ТК [11] представляет собой совокупность постоянных магнитов, взаимодействие полей которых обеспечивает полное восприятие радиальных и осевых усилий. Первые из них воспринимаются двумя концентричными кольцевыми магнитами, один из которых запрессован в корпус ТК, а второй закреплен на его валу. Осевая фиксация вала обес-

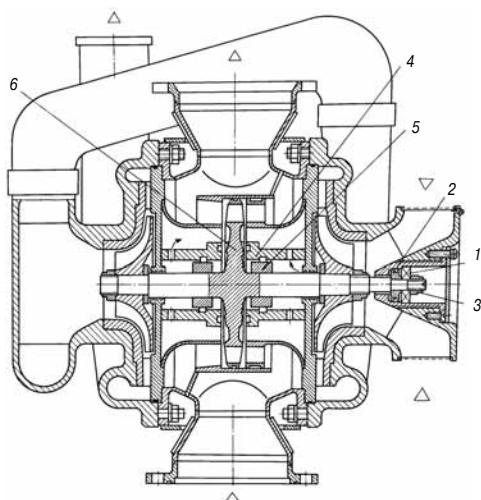


Рис. 5. Турбокомпрессор с осевой турбиной и двумя компрессорами:

1 — подшипники качения; 2 — уплотнение; 3 — гайка крепления; 4 — втулка газостатического подшипника; 5 — цапфа вала; 6 — пята двустороннего кольцевого газостатического подпятника

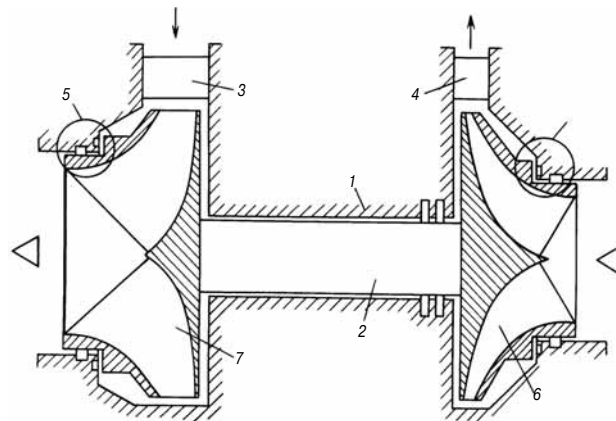


Рис. 6. Турбокомпрессор с газостатическими подшипниками в корпусах турбины и компрессора:

1 — корпус; 2 — вал; 3 — турбина; 4 — центробежный компрессор; 5 — газостатическая опора; 6 — центробежное рабочее колесо компрессора; 7 — рабочее колесо турбины

печивается тремя соосными дисковыми магнитами. Средний магнит закреплен на валу, а крайние магниты, отделенные от него небольшими зазорами, размещены в корпусе ТК. На торцах среднего диска выполнены спиральные канавки, обеспечивающие выполнение им функций крыльчатки воздушного насоса, подающего воздух из рабочей камеры компрессора в пространство, разделяющее средний и крайние диски. Подача воздуха приводит к образованию воздушной подушки, увеличивающей допустимую осевую нагрузку узла.

В конструкции турбомашин [12] для поддержания ротора используются радиальные и осевые активные магнитные подшипники (рис. 7).

Конструкция турбомашин включает в себя корпус с электрической частью, ротор с двумя радиальными крыльчатками и подшипниковые узлы, компенсирующие радиальные и осевые перемещения с помощью активных магнитов. Для страховки магнитных подшипников в конструкции предусмотрены вспомогательные подшипники качения.

Турбокомпрессоры с газовыми и магнитными подшипниками имеют ряд недостатков: относительно невысокую несущую способность и склонность к потере устойчивости при возникновении вибрации, что неизбежно на работающем двигателе. Магнитные подшипники часто страхуются подшипниками качения или скольжения на случай их отказа, что приводит к усложнению конструкции. Также в магнитном поле взвешенное тело находится в неустойчивом положении.

Тем не менее, применение в ТК бесконтактных опор с малыми потерями на трение имеет перспективу. Решением, позволяющим улучшить характеристики бесконтактных опор и частично устранить их недостатки, является применение

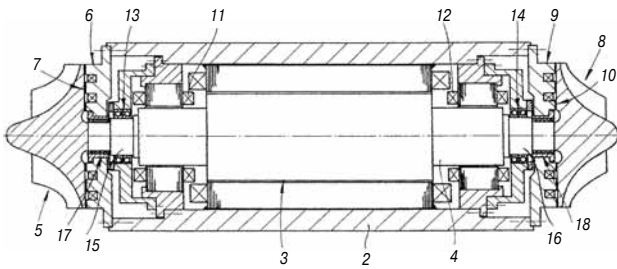


Рис. 7. Турбомашина с активными магнитными подшипниками:

2 — корпус; 3 — электрическая часть турбомашины; 4 — вал; 5, 8 — радиальная крыльчатка; 6, 9 — вкладыш осевого магнитного подшипника; 7, 10 — торцевая часть крыльчатки; 5, 11, 12 — радиальные магнитные подшипники; 13, 14 — вспомогательные (страховочные) подшипники; 15, 16 — уступы для установки вспомогательных подшипников

комбинированных опор — газомангнитных подшипников. Такие подшипники имеют большую несущую способность, лучше демпфируют колебания и стабилизируют вращение ротора. При этом можно отказаться от страховочных подшипников, так как страховкой магнитному подшипнику будет газовая смазка, и наоборот.

Конструкция ТК с газомангнитной опорой, предложенная в патенте [13], представлена на рис. 8. Для привода компрессора используется электропривод. Ротор ТК состоит из рабочего колеса компрессора, конической опоры, обращенной меньшим диаметром в сторону компрессора, двух колес для нагнетания газовой смазки в рабочий зазор и отвода ее из зазора. Газомангнитный подвес ротора обеспечивается совместным действием подъемных сил слоя газовой смазки и электромагнитных сил притяжения ротора к статору. Здесь реализуется идея так называемого мотор-подшипника, когда приводом ротора выступает электродвигатель, а поддержание ротора обеспечивается создаваемыми при этом магнитными полями и нагнетанием воздуха в зазор между ротором и статором.

Особенностью предложенного ТК является то, что в конструкции отсутствует турбинное колесо, использующее энергию отработавших газов ДВС, а вал в середине имеет конический участок. Конический подшипник обеспечивает компенсацию осевых усилий только в одном направлении, в то время как в ТК, использующих энергию отработавших газов ДВС, возможно появление осевых усилий в двух направлениях в связи с пульсацией газового потока.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие основные выводы:

1. Применение бесконтактных опор с малыми потерями на трение в ТК систем наддува ДВС по-прежнему актуально.
2. Несмотря на представленные конструкции ТК с бесконтактными опорами, публикаций по

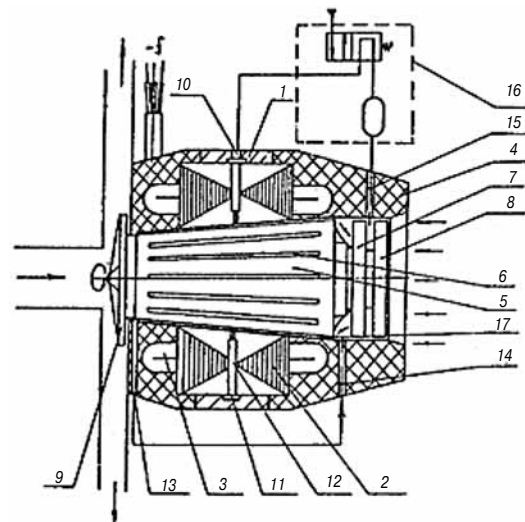


Рис. 8. Турбокомпрессор с газомангнитным коническим подшипником:

1 — корпус; 2 — статор; 3 — обмотка; 4 — нагнетающий аппарат; 5 — конический ротор; 6 — лыски; 7 — колесо для отвода газовой смазки; 8 — колесо для подачи газовой смазки; 9 — рабочее колесо компрессора; 10 — входное отверстие; 11 — кольцевая проточка; 12 — радиальные каналы; 13, 14 — отверстия для отвода газовой смазки; 15 — отверстие для нагнетания газовой смазки; 16 — пневмопереключатель; 17 — антифрикционный слой

результатам исследований таких ТК, особенно в условиях эксплуатации, крайне мало. Существующие работы описывают результаты испытаний ТК с газодинамическими и газостатическими опорами.

3. Среди бесконтактных опор определенный интерес представляют газомангнитные подшипники, позволяющие улучшить эксплуатационные характеристики подшипниковых узлов. Такими характеристиками, в первую очередь, являются несущая способность и демпфирование колебаний. Несмотря на определенные перспективы газомангнитных опор, работ, выполненных в области их применения в ТК систем наддува ДВС, не найдено.

В настоящее время в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете проводятся теоретические и экспериментальные исследования ТК с газомангнитными опорами для систем наддува ДВС. Разработана конструкция подшипникового узла ТК, позволяющая воспринимать радиальные и осевые усилия. Описание конструкции и результаты исследований будут приведены в последующих публикациях.

Литература

1. Аболтин Э.В. Развитие зарубежных автомобильных турбокомпрессоров: обзорная информация / Э.В. Аболтин, В.Е. Виняр, Л.К. Петров. — М. : НИИНАВТОПРОМ, 1986. — 41 с.
2. Апанасенко А.И. Тенденции развития турбокомпрессоров для нефтяной и газовой промышленности:

Обзорная информация / А.И. Апанасенко, Г.Н. Зиневич, Л.В. Черепов, В.С. Марциновский, В.А. Хорев. — М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1988. — 73 с.

3. *Аболтин Э.В.* Перспективные направления повышения технического уровня автомобильных турбокомпрессоров // Исслед., конструирование и расчет теплов. двигателей внутр. сгорания. — М., 1989. — С. 95–104.

4. *Ханк Г.* Турбодвигатели и компрессоры: справочное пособие / Г. Ханк, Лангкабель. — М. : Астрель, 2007. — 351 с. (первое издание в 1999 г.).

5. *Максимов Т.В.* Перспективы применения в турбокомпрессорах подшипников с газовой смазкой // Вестник Казанского технологического университета. — 2013. — Т. 16, № 5. — С. 171–175.

6. *Самсонов А.И.* Научные основы проектирования подшипников с газовой смазкой для судовых турбомашин: автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.И. Самсонов. — Владивосток, 1997. — 31 с.

7. Турбокомпрессор на воздушных подшипниках: пат. 2948398 ФРГ: МПК F02C7/06 / Marx Anton; заявитель и патентообладатель SKF Kugellagerfabriken GmbH; заявл. 01.12.79; опубл. 04.06.81.

8. Автомобильные двигатели с турбонаддувом / Н.С. Ханин, Э.В. Аболтин, Б.Ф. Лямцев и др. — М. : Машиностроение, 1991. — 336 с.

9. Турбокомпрессор: пат. 2117772 Российская Федерация: МПК F01D25/24, F02C7/06 / Иванов В.А., Попов Л.А., Сухов А.И., Тепляшин В.А., Яковлев А.Я., Майбуров В.И.; за-

явитель и патентообладатель Государственное предприятие Конструкторское бюро химавтоматики, Предприятие по добыче, переработке и транспортировке газа «Севергазпром» (Российское акционерное общество «Газпром»). — № 96124557/06; заявл. 27.12.1996; опубл. 20.08.1998.

10. Турбокомпрессор с газостатической опорой: пат. 2118716 Российская Федерация МПК F04D29/04 / Иванов В.А., Попов Л.А., Сухов А.И., Тепляшин В.А., Яковлев А.Я., Майбуров В.И.; заявитель и патентообладатель Государственное предприятие Конструкторское бюро химавтоматики, Предприятие по добыче, переработке и транспортировке газа «Севергазпром» (Российское акционерное общество «Газпром»). — 97101708/06; заявл. 05.02.1997; опубл. 10.09.1998.

11. Подшипниковый узел турбокомпрессора: пат. 57-182644 Япония МКИ F16C32/04, F16C32/00 / Тамура Кан, Ниии Фуминао; заявитель и патентообладатель Айсин сэйки к.к. — 59-73624, заявл. 18.10.82, опубл. 25.04.84.

12. Турбомашин: пат. 2386048 Российская Федерация МПК F02C7/06 / Бозен Вернер (DE); заявитель и патентообладатель Атлас Копко Энергаз ГМБХ (DE). — 2008128375/06; заявл. 11.07.2008; опубл. 10.04.2010.

13. Турбокомпрессор: а. с. 1746069 СССР МПК F04D25/06 / Шнайдер А.Г., Пастернак В.Е., Фигман М.М., Кисель И.Г., Коченда Л.М.; заявитель и патентообладатель Научно-производственное объединение «Химтекстильмаш». — 4784019/06; заявл. 11.12.89; опубл. 07.07.92, бюл. № 25.