

УДК 621.822.575: 621.892.9 – 032.1
DOI: 10.12737/20238

Л.А. Савин, А.В. Сытин, В.О. Тюрин

СМАЗКА ЛЕПЕСТКОВЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ МАЛОВЯЗКИМИ КРИОГЕННЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

Рассмотрена возможность применения маловязких криогенных жидкостей в качестве смазочных материалов для лепестковых газодинамических подшипников. Приведена информация о теплофизических свойствах криогенных жидкостей. Рассмотрено формирование математической модели в расчете характеристик однолепестковых газо-

динамических подшипников с гофрированными элементами. Рассмотрены вопросы аппроксимации теплофизических свойств криогенных жидкостей.

Ключевые слова: лепестковые газодинамические подшипники, маловязкие криогенные жидкости, гофрированный элемент, теплофизические свойства, математическая модель.

L.A. Savin, A.V. Sytin, V.O. Tyurin

LUBRICATION OF TULIP GAS BEARINGS BY LOW-VISCOUS CRYOGENIC LIQUIDS

The efficiency increase at minimum dimensions of movable turbo-sets is achieved at the expense of maximum admissible values of rotation frequencies (up to hundreds of thousands of rpm). At present as promising bearings with an elastic surface are tulip gas bearings. The advantages of these tulip gas bearings are the following: the capacity to self-adjustment, capacity for work under conditions of thermal deformations and at a certain gas pollution fed for lubrication. The computation of tulip gas bearings supposes a joint solution of the problems of gas dynamics, thermal physics, and theory of elasticity. The function of bending included in the equation of gap is calculated through common equations of elasticity theory for corresponding solids

and in the totality with boundary conditions gives a complete description of elastic surfaces in a friction bearing. As lubrication material in gas bearings with elastic elements air is mostly used. In addition, it is possible to use low-viscous cryogenic liquids, for instance, neon. The comparison of thermal physical properties of air and low-viscous cryogenic liquid (neon) witnesses of neon application possibilities, but only at temperature of below 150°K at which its viscosity is equal approximately to the viscosity of air under normal conditions.

Key words: tulip gas bearings, low-viscous cryogenic liquids, corrugated element, thermal and physical properties, simulator.

Введение

Высокоскоростные турбомашин в процессе проектирования предполагают расчет не только проточной части, состоящей из входных и выходных патрубков, улитки и рабочих колес, но также роторно-опорного узла. При этом рост производительности при минимальных размерах нестационарных турбоагрегатов достигается за счет максимально допустимых значений частот вращения (до сотен тысяч оборотов в минуту) [1]. С минимальными потерями на трение и нагревом данным требованиям удовлетворяют только подшипники с газовой смазкой, которые, как нестандартные узлы, в каждом конкретном случае требуют всестороннего анализа, математического моделирования и проверочных расчетов по основным показателям, таким как не-

сущая способность и потери мощности на трение. Главным условием расчета подшипников скольжения является определение полей давления в смазочном слое. Высокие частоты вращения служат источником значительных вибраций в опорах роторов, что может привести к снижению ресурса и разрушению не только роторно-опорного узла, но и рабочих колес, ремонт которых - сложный и дорогой процесс. Решением этой проблемы может быть применение подшипников с упругой поверхностью, среди которых перспективными на данный момент являются лепестковые газодинамические подшипники (ЛГДП). Разнообразие конструкций, материалов и покрытий позволяет подобрать такие подшипники в качестве опор рото-

ров высокоскоростных турбомашин в соответствии с требованиями.

Достоинства лепестковых газодинамических подшипников: способность к самоустановке, работоспособность в условиях тепловых деформаций и при некотором загрязнении газа, поступающего для смазки. Силы трения, возникающие при работе в зонах контакта между лепестками, между лепестками и корпусом, а также силы упругой деформации лепестков рассеивают энергию колебаний ротора и улучшают динамические характеристики машины, позволяют достигать высоких частот вращения. Податливость лепестка позволяет обеспечить чрезвычайно малые зазоры между цапфой и лепестком на большой площади и получить несущую способность, достаточную для многих высокооборотных турбомашин различного назначения [2].

На сегодняшний день запатентован и испытан ряд лепестковых подшипников учеными из США и других стран (пат. US № 4415280, 5634723), российскими учеными (пат. РФ № 2350794) и авторами данной статьи (пат. РФ № 2525497, 2558161, 2568005; рис. 1 [2]).

Расчет лепестковых газодинамических подшипников

Расчет лепестковых газодинамических подшипников предполагает совместное решение задач газодинамики, теплофизики и теории упругости (рис. 2). В зависимости от геометрии входящих в подшипник упругих элементов, которые можно представить в виде пластин, оболочек, пологих оболочек и т.п., функция прогиба, входящая в уравнение зазора, рассчитывается по классическим уравнениям теории упругости для соответствующих тел и в совокупности с граничными условиями дает полное описание упругих поверхностей подшипника скольжения [4].

Среди разнообразия твердых смазочных покрытий, разработанных применительно к узлам трения механизмов, в лепестковых подшипниках нашли применение два вида покрытий: с органическим и неорганическим полимерным связующим. Эти покрытия наносятся методами напыления (из пульверизатора), электроосаждения, электростатического напыления. После нанесения и термообработки покрытие в некоторых случаях полируют. В массу связующего вводят наполнители двух типов: антифрикционные (графит, сульфиды, селениды и теллуриды тяжелых металлов) и износостойкие (порошки окиси хрома, стекла, окиси алюминия) [3].

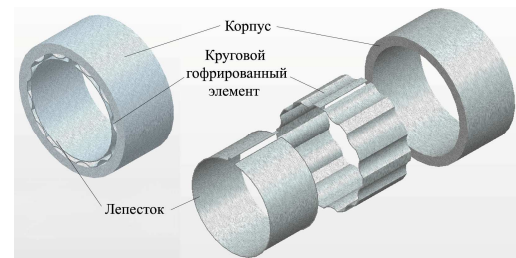


Рис. 1. Лепестковый газодинамический подшипник

Расчетная схема лепестка представляет собой тонкую незамкнутую цилиндрическую оболочку, защемленную по одной образующей и свободную по другой, нагруженную внутренним давлением (рис. 3). Торцы оболочки свободны, нагрузка не симметрична относительно оси цилиндра, следовательно, деформация сводится к прогибу. Величину прогиба в подобных случаях можно получить с достаточной точностью, совершенно пренебрегая растяжением срединной поверхности оболочки.

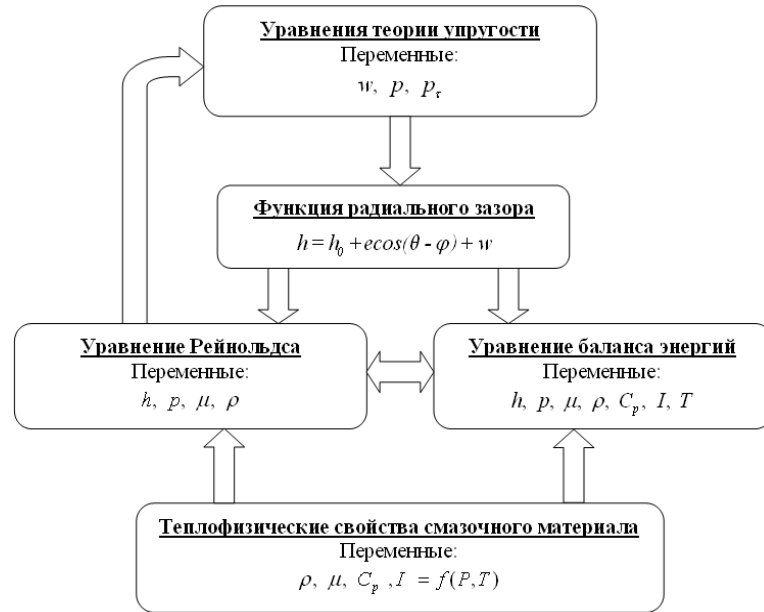


Рис. 2. Схема решения комплексной задачи: w – прогиб упругого элемента, м; p_t – касательные напряжения, Па; h_0 – начальный зазор, м; e – эксцентриситет, м; θ – угловая координата, рад; φ – расчетный угол, рад; для смазочного материала: p – давление, ат; T – температура, К; ρ – плотность, кг/м³; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); I – энтальпия, Дж/кг; μ – вязкость, Па·с

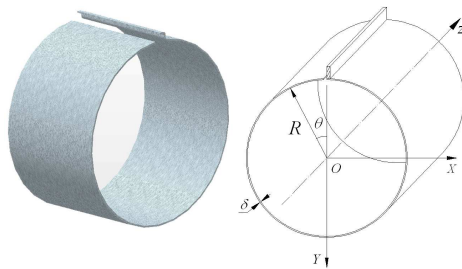


Рис. 3. Расчетная схема лепестка

Для описания напряженно-деформированного состояния оболочечного элемента используем моментную теорию расчета цилиндрических оболочек [5], что позволяет рассмотреть неосесимметричное нагружение.

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1-\nu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\nu}{2R} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z \partial \theta} + \frac{\nu}{R} \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \\ \frac{1+\nu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial z \partial \theta} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} + \frac{1-\nu}{2} \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} = -\frac{1-\nu^2}{E\delta} p_t(\theta, z); \\ \frac{\nu}{R} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} + \frac{w}{R^2} + \\ + \frac{k_1}{R} \left[R^3 \frac{\partial^4 w}{\partial z^4} + 2R \frac{\partial^4 w}{\partial z^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^4} \right] = -\frac{1-\nu^2}{E\delta} p(\theta, z), \end{cases}$$

где $p(\theta, z)$ – нормальное контактное усилие (давление); $p_t(\theta, z)$ – касательное контактное усилие; z – осевая координата, м; ϑ – перемещение в окружном направлении, м; u – перемещение в осевом направлении, м; δ – толщина оболочки, м; ν – коэффициент Пуассона; R – внутренний радиус подшипника, м; E – модуль упругости, Па; $k_1 = \delta^2 / 12R^2$.

Рассмотрение кругового гофрированного элемента (рис. 4) целесообразно начать с отдельного гофра. Каждый гофр рассматривается в виде незамкнутой цилиндрической оболочки со свободными торцами и свободным

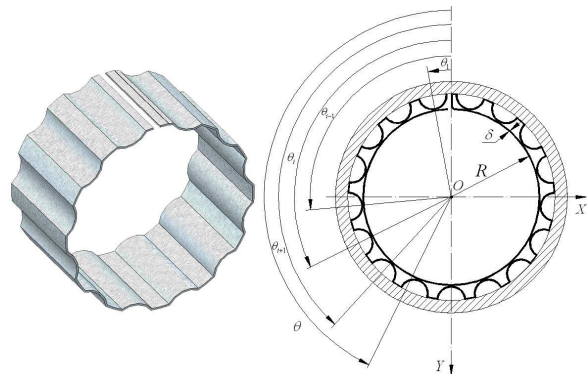


Рис. 4. Расчетная схема кругового гофрированного элемента

опиранием образующих на корпус подшипника.

Деформация упругих элементов находится с учетом совместного прогиба

лепестка и гофра под действием приложенной к ним нагрузки (рис. 5).

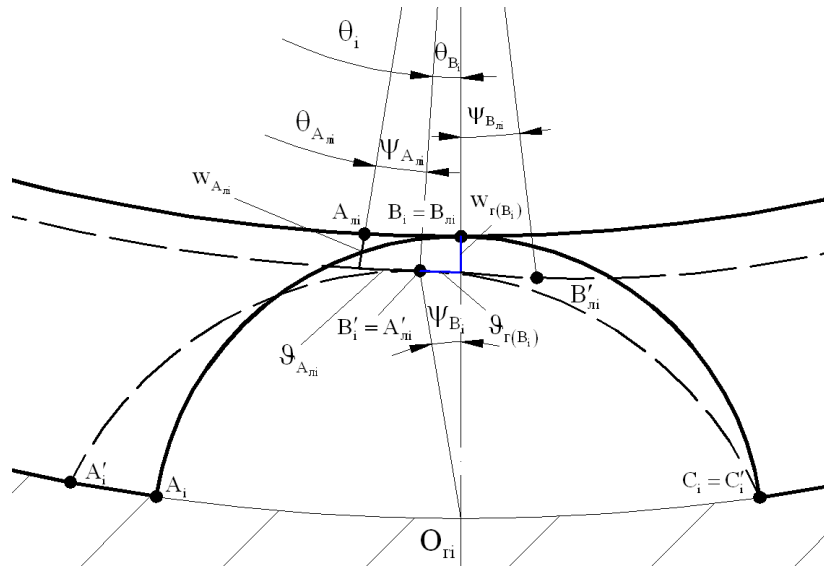


Рис. 5. Схема совместного прогиба лепестка и гофра

В данной работе считается, что лепесток и гофр, в недеформированном состоянии представляющие две цилиндрические оболочки, контактируют по общей образующей. Главными условиями совместного прогиба являются условия контакта лепестка и гофра после

деформации и взаимного непроникновения контактирующих поверхностей [2].

В общем виде процесс совместной деформации лепестка и кругового гофрированного элемента под действием газодинамического давления представлен на рис. 6.

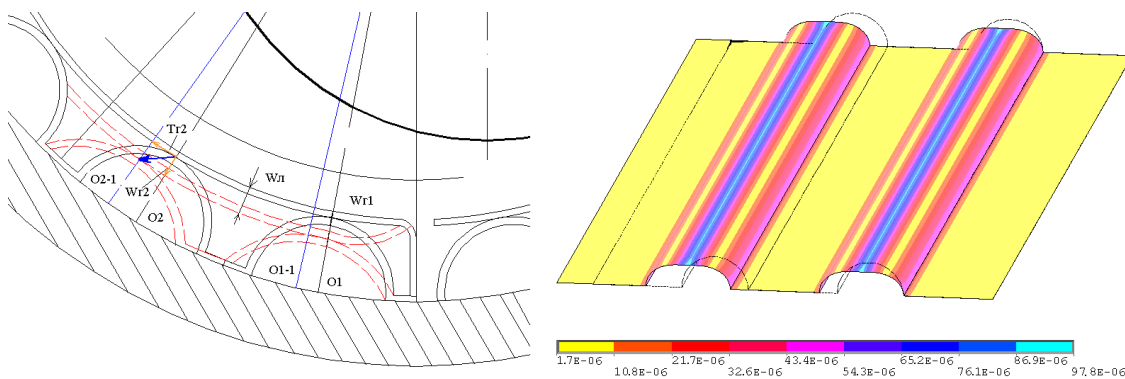


Рис. 6. Совместная деформация лепестка и кругового гофрированного элемента

Расчет системы сводится к последовательному расчету элементов с последующим перерасчетом с учетом их взаимного влияния. Этим достигается

максимальное приближение к реальным процессам, происходящим во время работы данной конструкции.

Применение маловязких криогенных жидкостей в качестве смазочного материала

Критериями выбора смазочных материалов для подшипников жидкостного трения могут быть различные факторы в зависимости от назначения машин и агрегатов. Так, для смазки опорных узлов агрегатов двигательных установок летательных аппаратов, например турбонасосных агрегатов ЖРД, используется перекачивание компонентов топлива. Смазка и охлаждение аэродинамических подшипников высокоскоростных электрошпинделей и турбокомпрессоров осуществляется воздухом, подающимся под давлением или из окружающей среды. В качестве смазочного материала в лепестковых газодинамических подшипниках наиболее часто используется воздух [6; 7].

В последние годы находят широкое применение нетрадиционные смазочные материалы. В первую очередь это низкотемпературные и криогенные жидкости (жидкий кислород, водород, неон, аммиак и т. д.), сфера применения которых связана с использованием в энергетических силовых и вспомогательных установках транспортных и технологических систем. При смазке и охлаждении подшипников этими маловязкими жидкостями возникают специфические явления в

несущих слоях, обусловленные повышенной турбулентностью, критическими течениями и фазовыми превращениями [4].

Применение криогенных рабочих тел в транспортных системах связано с решением двух глобальных проблем: разработкой надежных экономичных двигателей длительного ресурса и созданием промышленных установок для получения дешевых низкотемпературных жидкостей. Одним из важных компонентов их реализации является использование высокоскоростных агрегатов с турбинным приводом (насосы, компрессоры, детандеры), работающих на лепестковых подшипниках при смазке маловязкими криогенными жидкостями, например неоном. Для большинства параметров один из факторов - давление или температура - является определяющим, поэтому большинство параметров зависят от одного главного фактора при определенном значении другого. Результаты аппроксимации свойств неона в диапазоне $T = 28...280$ К, $P = 0,1...20$ МПа и свойств воздуха в диапазоне $T = 270...380$ К, $P = 0,1...30$ МПа представлены в виде аналитических зависимостей $f=f(P,T)$ и приведены в таблице [8; 9].

Таблица

Результаты аппроксимации

Параметр	Аналитическая зависимость
Неон	
Вязкость μ , $\times 10^{-6}$ Па·с	$6,638 + 17,172T + 10,576P - 0,035T^2 - 0,108P^2 - 0,061TP +$ $+ 4,68 \cdot 10^{-5}T^3 - 0,014P^3 + 0,0029TP^2 - 2,6 \cdot 10^{-5}T^2P$
Плотность ρ , $\times 10^3$ кг/м ³	$\frac{20,833 - 0,328T + 0,0018T^2 - 3,3210^{-6}T^3 + 4,976 \ln(P) + 1,144(\ln(P))^2}{1 + 0,008T - 7,12 \cdot 10^{-6}T^2 - 4,5 \cdot 10^{-9}T^3 - 0,381 \ln(P) - 1,64 \cdot 10^{-5}(\ln(P))^2}$
Энтальпия I, $\times 10^5$ Дж/кг	$-1044,48 + 870,65 \ln(T) - 14,319P - 224,67(\ln(T))^2 - 0,002P^2 + 5,626P \ln(T) +$ $+ 20,42(\ln(T))^3 - 7,58 \cdot 10^{-5}P^3 + 0,8 \cdot 10^{-3}P^2 \ln(T) - 0,552P(\ln(T))^2$
Теплоемкость C_p , $\times 10^3$ Дж/(кг·К)	$2,54 - 0,646 \ln(T) + 0,044P + 0,068(\ln(T))^2 - 7,76 \cdot 10^{-5}P^2 - 0,008P \ln(T)$
Воздух	
Вязкость μ , $\times 10^{-6}$ Па·с	$\frac{10,85 + 0,221P - 0,0358P^2 + 0,37 \cdot 10^{-3}P^3 - 0,02321T - 0,24 \cdot 10^{-3}T^2}{1 + 0,0184P - 0,00156P^2 + 2,2937 \cdot 10^{-5}P^3 - 0,0065T}$
Плотность ρ , $\times 10^3$ кг/м ³	$\frac{0,00718 - 0,0164P - 2,251 \cdot 10^{-5}T}{1 + 0,00191P - 0,264 \cdot 10^{-3}P^2 - 0,00977T + 6,128 \cdot 10^{-6}T^2}$
Энтальпия I, $\times 10^5$ Дж/кг	$14,282 + 0,0276P - \frac{6267,21}{T} - 0,482 \cdot 10^{-3}P^2 + \frac{1335192,7}{T^2} -$ $-\frac{12,9P}{T} + 3,531 \cdot 10^{-6}P^3 - \frac{1,06 \cdot 10^8}{T^3} - \frac{615,06P}{T^2} + \frac{0,196P^2}{T}$
Теплоемкость C_p , $\times 10^3$ Дж/(кг·К)	$\frac{1,113 - 7,1 \cdot 10^{-3}P + 0,374 \cdot 10^{-3}P^2 + 4,079 \cdot 10^{-6}P^3 - 7,44 \cdot 10^{-3}T + 1,705 \cdot 10^{-5}T^2}{1 + 0,0138P + 0,528 \cdot 10^{-3}P^2 - 6,69 \cdot 10^{-3}T + 1,58 \cdot 10^{-5}T^2}$

Графические результаты аппроксимации представлены на рис. 7.

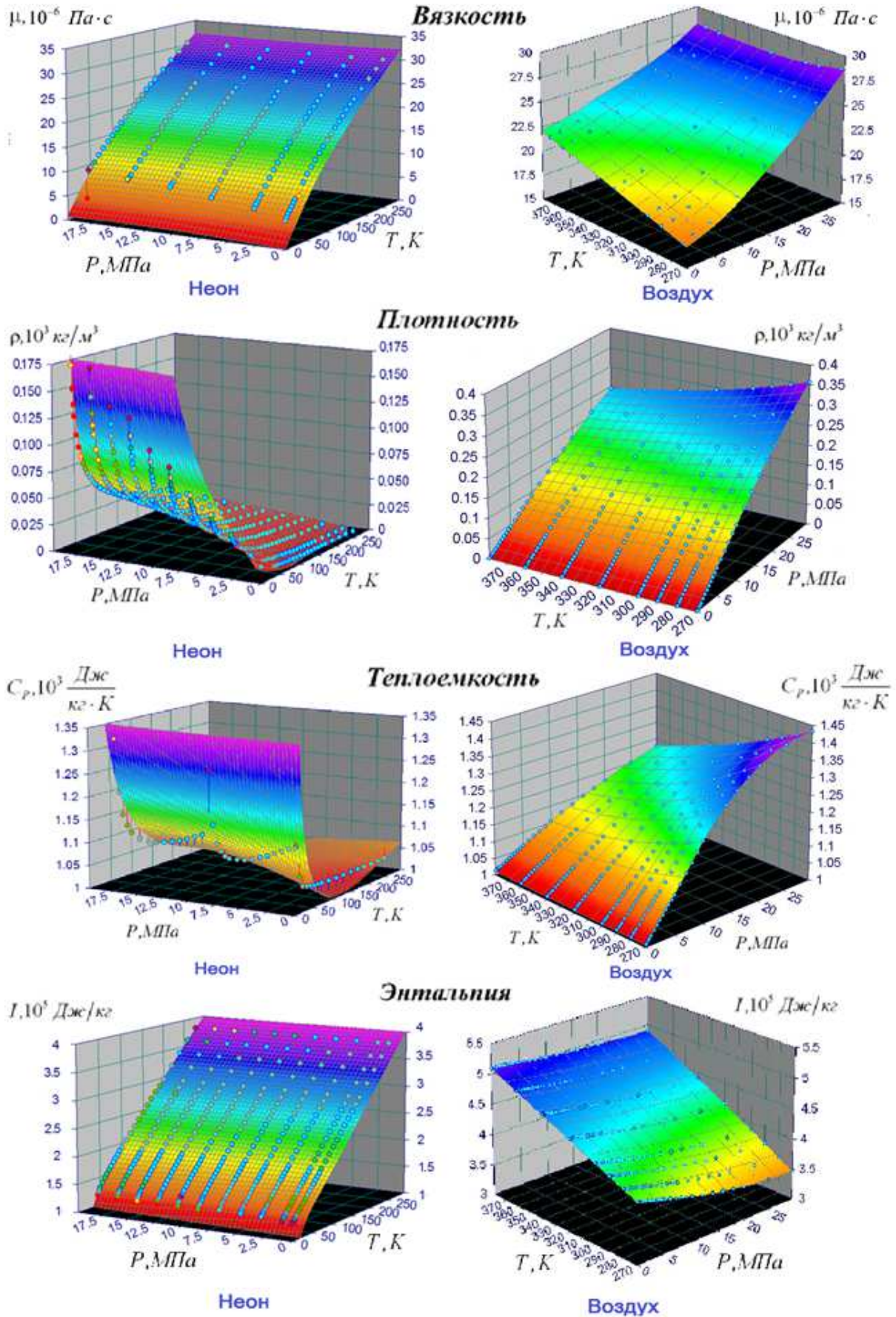


Рис. 7. Графические результаты аппроксимации теплофизических свойств воздуха и неона

Заключение

Сравнение теплофизических свойств воздуха и маловязкой криогенной жидкости (неона) свидетельствует о возможности применения неона, но только при температуре ниже 150 градусов Кельвина, при которой его вязкость приблизительно равна вязкости воздуха при нормальных условиях.

Полученные аппроксимационные зависимости неона позволяют рассчитывать лепестковые подшипники в неизоэнтальной постановке.

Аппроксимационные зависимости с данной степенью точности (погрешности расчета не превышают 1%) при подстановке в уравнение Рейнольдса для определения полей давления и уравнение баланса энергии позволяют рассчитывать подшипники скольжения в неизоэнтальной постановке, что дает более точное описание процессов в смазочном слое, приближая математическую модель к реальному объекту.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта № 9.101.2014/К проектной части государственного задания в сфере научной деятельности «Гидродинамические эффекты в напорно-сдвиговых течениях сред сложной реологии в каналах переменной геометрии» (2014 – 2016 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаевик, Д.Т. Подшипниковые опоры современных машин / Д.Т. Гаевик. – М.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
2. Сытин, А.В. Решение комплексной задачи расчета характеристик радиальных лепестковых газодинамических подшипников: дис...канд. техн. наук / А.В. Сытин. – Орел, 2008. – 200 с.
3. Леонов, В.П. Лепестковые газовые подшипники турбомашин / В.П. Леонов, Т.И. Максимович. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 60 с.
4. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Л.А. Савин, О.В. Соломин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 444 с.
5. Хешмет, Х. Анализ газового ленточного радиального подшипника / Х. Хешмет, Дж. А. Уоловит, О. Пинкус // Проблемы трения и смазки. – 1983. –Т.105. –№4. – С. 124-132.
6. Пешти, Ю.В. Газовая смазка / Ю.В. Пешти. – М.: МГТУ, 1993. – 381с.
7. Самсонов, А.И. Подшипники с газовой смазкой для турбомашин / А.И. Самсонов. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1996. – 112 с.
8. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М., 1972. – 720 с.
9. Рабинович, В.А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / В.А.Рабинович, А.А. Вассерман, В.И. Недоступ, Л.С. Векслер. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 636 с.
10. of Friction and Lubrication. –1983. –Т.105. –№4. – pp. 124-132.
11. Peshty, Yu.V. Gas Lubrication / Yu.V. Peshty. – М.: MSTU, 1993. – pp. 381.
12. Samsonov, A.I. Bearings with Gas Lubrication for Turbomachines / A.I. Samsonov. – Vladivostok: Publishing House of FESTU, 1996. – pp. 112.
13. Vargaftik, N.B. Reference Book on Thermal and Physical Properties of Gas and Liquids / N.B. Vargaftik. – М., 1972. – pp. 720.
14. Rabinovich, V.A. Thermal and Physical Properties of Neon, Argon, Krypton and Xenon / V.A. Rabinovich, A.A. Wasserman, V.I. Nedostup, L.S. Weksler. – М., Publishing House of Standards, 1976. – pp. 636.

*Статья поступила в редколлегию 5.04.2016.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского
государственного университета
Киричек А.В.*

Сведения об авторах:

Савин Леонид Алексеевич, зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг» Приокского государственного университета, e-mail: savin@ostu.ru.

Сытин Антон Валерьевич, доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг» Приокского государственного университета, e-mail: syтин@mail.ru.

Тюрин Валентин Олегович, аспирант Приокского государственного университета, e-mail: v7a71@mail.ru.

Savin Leonid Alexeyevich, Head of the Dep. “Mechatronics and International Engineering” Prioksky State University, e-mail: savin@ostu.ru.

Syтин Anton Valerievich, Assistant Prof. of the Dep. “Mechatronics and International Engineering” Prioksky State University, e-mail: syтин@mail.ru.

Tyurin Valentin Olegovich, Post graduate student Prioksky State University, e-mail: v7a71@mail.ru.