

Available at: http://matmodelling.pbnet.ru/Statya_Saraev_Shcherbina.pdf

8. Decision-making methods. A modification of Delphi and Analytic Hierarchy Process (2007). Methodical instructions to laboratory work on the course "decision support system". Moscow: MGIEM, 20.

9. Sobchak, A. P. (2014). Fundamentals of electronic apparatus. Kharkiv: Vidavets Ivanchenko I. S., 284.

10. Sobchak, A. P. (2011). Effective use of marking equipment in Ukraine. Pakuvalna industriya (the camp is the prospect for the nutritive produktiv). Alushta, 3, 132–135.

Дата надходження рукопису 10.02.2016

Собчак Андрей Павлович, кандидат технических наук, доцент, кафедра менеджмента, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070
E-mail: Sobchak@ukr.net

Шостак Игорь Владимирович, доктор технических наук, профессор, кафедра компьютерной инженерии, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", ул. Чкалова, 17, г. Харьков, Украина, 61070
E-mail: iv.shostak@ukr.net

УДК 621.822

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.64109

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОСТАТОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДПЯТНИКА С КАРМАНАМИ РЭЛЕЯ

© Т. Н. Сорокина

Рассмотрены экспериментальные исследования гидростатодинамического подпятника с карманами Рэлея на различных режимах эксплуатации, произведен сравнительный анализ полученных результатов с теоретическими расчетами его статических характеристик по термогидродинамическим уравнениям смазки. В работе представлены особенности испытаний гидростатодинамического подпятника, методика проведения опытов на экспериментальной установке, тарировка и контроль установленных датчиков, анализ полученных результатов экспериментальных испытаний

Ключевые слова: экспериментальные исследования, гидростатодинамический подпятник с карманами Рэлея, экспериментальная установка, тарировка датчиков

The experimental researches for hybrid Reyleigh step bearing at the different regimes of exploitation are investigated. Comparative analysis and the analysis of test data with theoretical calculations of the bearing static characteristics on the basis of thermohydrodynamic lubrication equalizations were carried out. The fundamental aspects of the test, concerning to hybrid bearing, the test procedure at the experimental facility, installed sensors taring, controlling and reading are determined

Keywords: experimental researches, hybrid Reyleigh step bearing, experimental facility, sensors taring

1. Введение

В современном машиностроении, а особенно в тяжелом машиностроении, для машин и механизмов, валы которых во время эксплуатации подвержены большим осевым нагрузкам, применяют подшипниковые узлы с упорными подшипниками скольжения жидкостной смазки (УПС). Эффективность применения УПС в составе подшипникового узла на разных режимах и при различных условиях эксплуатации определяется типом УПС и выравнивающего устройства [1–3]. Проектирование конструкции такого подшипникового узла является сложной инженерной задачей. Для ее решения существуют рекомендации по расчетам и проектированию конструкции УПС в зависимости от его типа и конструкции выравнивающего устройства [1, 4–7]. Принятые конструктивные решения, работоспособность и эффективность подшипникового узла на различных режимах эксплуатации проверяют на экспериментальном стенде

[5–7]. Экспериментальные исследования УПС позволяют оценить адекватность теоретических расчетов статических характеристик подпятника, исследовать влияния конструктивных и режимных параметров на эти характеристики, выявить особенности его эксплуатации на различных режимах. Это делает актуальным проведение экспериментальных исследований гидростатодинамического УПС.

2. Постановка задачи и литературный обзор

Экспериментальные исследования различных типов УПС в сочетании с установленным выравнивающим устройством позволяют проверить эффективность данного типа УПС при различных условиях эксплуатации. Проверка работоспособности УПС при торцевом биении вала [8], исследование влияния шероховатости поверхности [9] и применения новых материалов [10], определение температуры смазочного слоя [11–13], влияние изменения подачи смазки

в смазочный слой [11], влияние конструктивных элементов, формы, профиля рабочей поверхности на статические характеристики подпятника [13] – вот тот не полный перечень вопросов которые решают во время экспериментальных исследований УПС.

Экспериментальные исследования гидростатодинамического УПС мало освещены, известны его испытания в составе комбинированного подшипникового узла [14]. Теоретические исследования гидростатодинамических УПС с использованием термогидродинамических уравнений смазки [15, 16] позволяют исследовать влияние турбулентности в смазочном слое на статические характеристики подпятника. Проведение экспериментальных испытаний такого типа УПС на различных режимах эксплуатации при турбулентном течении смазки представляется важным и необходимым.

3. Цель и задачи исследования

Экспериментальные исследования гидростатодинамического УПС на различных режимах эксплуатации, проверка адекватности теоретических расчетов с экспериментом в условиях турбулентного течения смазки.

Для достижения цели был спроектирован опытный образец подпятника, произведена модернизация экспериментальной установки, выполнены теоретические исследования подпятника на различных режимах эксплуатации.

4. Материалы и методы исследований

4.1. Экспериментальная установка и опытный образец подпятника

Гидростатодинамический УПС относится к подпятникам, использующим в процессе эксплуатации два вида смазки: гидростатическая смазка обеспечивается за счет давления подачи смазки в закрытый карман и гидродинамическая – за счет динамического эффекта от вращения пяты. Одной из особенностей данного типа УПС является бесконтактный режим старта и остановки. Этот режим существенно влияет на длительность эксплуатации, использования тех или иных материалов, покрытий, а так же на напряженное состояние вала при этом режиме эксплуатации.

Для экспериментальных исследований был спроектирован опытный образец подпятника [17], глубина кармана которого позволяет исследовать влияние турбулентного течения смазки на статические характеристики подпятника. Опытный образец (рис. 1) состоял из гидростатодинамического УПС с закрепленными датчиками, системой подвода смазки и выравнивающего устройства. Выравнивающее устройство карданного типа на роликах обеспечило работу УПС при торцевом биении вала.

Модернизированная экспериментальная установка [17] позволила провести экспериментальные исследования на различных режимах эксплуатации, включая режим старта и остановки, произвести непрерывные измерения при помощи автоматизированного комплекса параметров температуры и толщины смазочного слоя с сохранением истинных значений электрических сигналов, плавно изменять до-

полнительную нагрузку на подпятник и давление подачи смазки в масляную систему.



Рис. 1. Фотография опытного образца гидростатодинамического подпятника с карманами Рэля в сборе после установки датчиков: 1 – шлейф токовихревого датчика; 2 – выводы концов термпар; 3 – опытный образец в сборе; 4 – термопары; 5 – токовихревой датчик

4.2. Методика проведения опытов

При проведении экспериментальных исследований гидростатодинамического УПС была использована следующая методика проведения опытов:

1. Проводятся опыты по тарировке токовихревого датчика рабочего зазора.

2. Проверка показаний термпар перед каждым опытом.

3. Определяется грузоподъемность подпятника при различной дополнительной нагрузке на вал и разном давлении подачи смазки в масляную систему для исследования гидростатической смазки.

4. Определяется грузоподъемность подпятника при различной дополнительной нагрузке на вал и разном давлении подачи смазки в масляную систему для исследования одновременного влияния гидростатической и гидродинамической смазки.

Во время опытов по определению грузоподъемности гидростатодинамического УПС измерялись:

- частота вращения ротора;
- температура смазки в канале в области подвода к питателю;
- температура масла на поверхности кармана и на рабочей поверхности подпятника;
- толщина смазочного слоя между подпятником и пятой;
- давление масла после масляного насоса;
- величина дополнительной нагрузки от нагруженного устройства.

По результатам исследований строятся кривые зависимости грузоподъемности подпятника от величины рабочего зазора смазочного слоя на различных частотах вращения ротора вала.

4.3. Тарировка и контроль установленных датчиков

Расположение датчиков на опытном образце гидростатодинамического подпятника с карманами

Рэлея (рис. 1) выполнено в соответствии с требованиями по их установке. Расположение и крепление датчиков не мешают работе выравнивающего устройства и подачи масла в опытный образец подпятника.

Термопары перед началом каждого опыта по своим показаниям проверялись при помощи цифрового мультиметра и автоматизированного комплекса регистрации параметров. Перед установкой в опытный образец подпятника контрольная проверка термо-ЭДС термопар проводилась Николаевским Государственным центром стандартизации, метрологии и сертификации.

Тарировка токовихревого датчика осуществлялась на пяте вала до окончательной установки в экспериментальную головку. Для тарировки использовались три мерных пластины (щупа) по ГОСТ 882-75, установленные под углом 120° (минимальная толщина мерного щупа 50 мкм). Показания датчика при разных зазорах фиксировались на компьютере и цифровом мультиметре. После окончательной установки опытного образца в экспериментальной головке были произведены контрольные замеры показаний токовихревого датчика до и после подачи смазки для определения необходимости поправок к тарировочной кривой. По полученным значениям была построена тарировочная кривая (рис. 2). Она использовалась нами для определения толщины смазочного слоя между рабочими поверхностями пяты вала и подпятником.

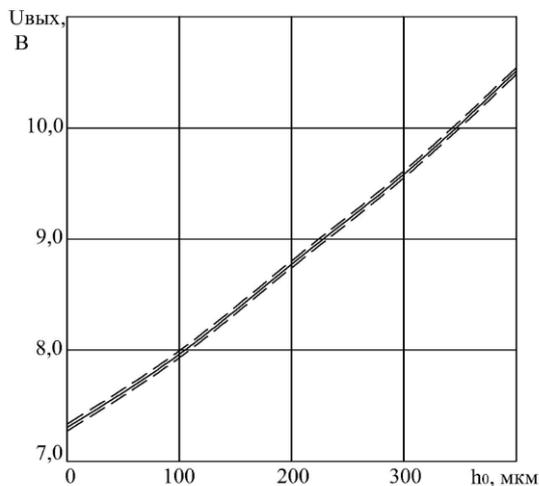


Рис. 2. Тарировочная кривая зависимости выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ токовихревого датчика от толщины масляной пленки h_0 между поверхностями ротора вала и подпятника: тарировочная кривая (сплошная линия); кривые погрешности измерений (штриховая линия)

Использованные для проведения эксперимента и установленные на экспериментальном стенде индикатор часового типа ИЧ-10, тахометр ИО-10, манометр МТП-1М [17] прошли контрольную проверку в Николаевском Государственном центре стандартизации, метрологии и сертификации.

5. Результаты исследований

Экспериментальные исследования проводились на установившихся режимах работы опытного образца подпятника со следующими характеристиками:

- количество секторов 4;
- длина рабочей поверхности сектора $85,3^\circ$;
- радиус внешний сектора 62,5 мм;
- радиус внутренний сектора 28,0 мм;
- длина кармана $45,0^\circ$;
- глубина кармана 1,3 мм;
- радиус внешний кармана 57,0 мм;
- радиус внутренний кармана 35,0 мм;
- диаметр питателя 2,9 мм;

Результаты экспериментальных и теоретических расчетов грузоподъемности на различных зазорах и частотах вращения ротора вала показаны на графике (рис. 3).

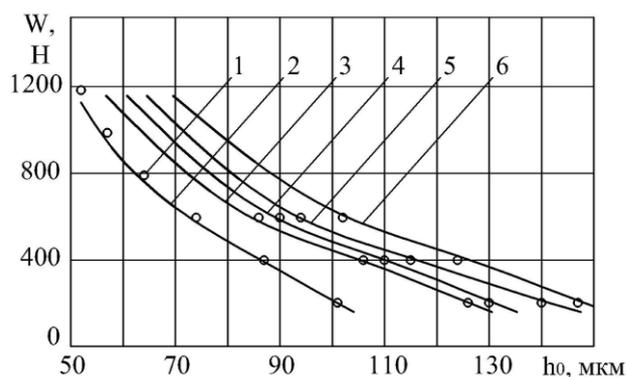


Рис. 3. Зависимости грузоподъемности от величины зазора: 1 – экспериментальные данные; 2 – скорость вращения 0 об/мин; 3 – скорость вращения 800 об/мин; 4 – скорость вращения 1190 об/мин; 5 – скорость вращения 1660 об/мин; 6 – скорость вращения 2480 об/мин

Во время проведения экспериментальных исследований основные параметры находились в пределах:

- толщина смазочного слоя между рабочими поверхностями пяты и подпятника 52–147 мкм;
- скорость вращения пяты вала 800–2480 об/мин;
- число Рейнольдса в кармане подпятника до 3200;
- диапазон изменения давления подачи смазки в питатель 0,17–0,32 МПа;
- в качестве смазки использовалось масло СГТ по ГОСТ 10289-79 с температурой на входе $30\text{--}48^\circ\text{C}$.

Повышение температуры смазки на различных режимах работы во время экспериментальных исследований не превышало $1\text{--}2^\circ\text{C}$.

6. Обсуждение результатов исследования

Кривые зависимостей грузоподъемности подпятника от величины рабочего зазора смазочного слоя на различных частотах вращения ротора вала наглядно демонстрирует увеличение грузоподъемности за счет динамической смазки при увеличении частоты вращения вала.

При проведении эксперимента в режиме старта и остановки отсутствовал контакт между рабочими поверхностями пяты и подпятника. При гидростатической смазке обеспечивалась минимальная толщина смазочного слоя, что позволяло свободно вращать вал пяты.

В результате проведенных экспериментальных исследований получено хорошее совпадение с чис-

ленными расчетами при турбулентном режиме смазки. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями грузоподъемности не превышает 5 % и находится в пределах погрешности измерений.

Повышение температуры смазки было незначительным и не влияло на статические характеристики подпятника.

7. Выводы

Модернизированная экспериментальная установка и опытный образец гидростатодинамического УПС позволили испытать данный тип подпятника на разных режимах и при разной нагрузке с учетом особенностей его эксплуатации. При этом были исследованы режим старта и остановки, влияние турбулентности в кармане подпятника, изменения дополнительной нагрузки на вал и величины давления подвода смазки в масляную систему. Полученные во время эксперимента основные параметры УПС показывают эффективность его работы и перспективу использования в составе подшипникового узла.

Экспериментальные исследования показали адекватность теоретических расчетов по термогидродинамическим уравнениям смазки. Расхождение между теоретическими и экспериментальными значениями грузоподъемности находится в пределах погрешности измерений.

Литература

1. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2 [Текст] / под ред. П. Н. Учаева, П. И. Орлова. – 3-е изд., исправл. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.
2. Stachowiak, G. W. Engineering tribology [Text] / G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor. – 4-rd ed. – Elsevier Butterworth – Heinemann, 2013. – 896 p.
3. Szeri, A. Z. Fluid Film Lubrication [Text] / A. Z. Szeri. – 2-nd ed. – Cambridge University Press, 2011. – 564 p.
4. Воскресенский, В. А. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка) [Текст]: справочник / В. А. Воскресенский, В. И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.
5. Токарь, И. Я. Проектирование и расчет опор трения [Текст] / И. Я. Токарь. – М.: Машиностроение, 1971. – 168 с.
6. Fluid – film lubrication – Osborne Reynolds centenary [Text] / D. Dowson, C. M. Taylor, M. Godet, D. Berthe (Eds.). – Elsevier Science Publishers B. V., 1987. – 696 p.
7. Rowe, W. B. Hydrostatic and hybrid bearing design [Text] / W. B. Rowe. – Butterworths & Co. Ltd, 1983. – 254 p.
8. Хлопенко, Н. Я. Экспериментальные исследования опытного образца подшипника Кингсбери при торцовых биениях гребня [Текст] / Н. Я. Хлопенко, Д. Л. Кошкин // Проблемы трибологии. – 2003. – № 1. – С. 57–61.
9. Etsion, I. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings [Text] / I. Etsion, G. Halperin, V. Brizmer, Y. Kligerman // Tribology Letters. – 2004. – Vol. 17, Issue 2. – P. 295–300. doi: 10.1023/b:tril.0000032467.88800.59
10. Zhou, J. Experimental Performance Study of a High Speed Oil Lubricated Polymer Thrust Bearing [Text] / J. Zhou, B. Blair, J. Argires, D. Pitsch // Lubricants. – 2015. – Vol. 3, Issue 1. – P. 3–13. doi: 10.3390/lubricants3010003
11. Mikula, A. M. Further Test Results of the Leading-Edge-Groove (LEG) Tilting Pad Thrust Bearing [Text] /

A. M. Mikula // Journal of Tribology. – 1988. – Vol. 110, Issue 1. – P. 174. doi: 10.1115/1.3261559

12. Wasilczuk, M. Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings [Text] / M. Wasilczuk // Lubricants. – 2015. – Vol. 3, Issue 2. – P. 164–180. doi: 10.3390/lubricants3020164

13. Patil, A. Experimental studies of pressure distribution in tilting pad thrust bearing with single continuous surface profiled sector shaped pads [Text] / A. Patil, P. B. Shinde, S. P. Chavan // International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME). – 2012. – Vol. 2, Issue 2. – P. 112–116.

14. Уилкок, У. Повышение долговечности установок с подшипниками качения благодаря использованию комбинированного подшипника [Текст] / У. Уилкок // Проблемы трения и смазки: Тр. Американо-ва инж.-мех. – М.: Мир, 1970. – № 3. – С. 34–42.

15. Хлопенко, Н. Я. Турбулентная неизотермическая смазка ступенчатого подпятника Рэля [Текст] / Н. Я. Хлопенко, Т. Н. Сорокина // Проблемы трибологии. – 2013. – № 4. – С. 40–45.

16. Хлопенко, Н. Я. Разностные схемы и точность решения термогидродинамических уравнений смазки подпятника Рэля [Текст] / Н. Я. Хлопенко, Т. Н. Сорокина // Проблемы трибологии. – 2015. – № 2. – С. 101–106.

17. Сорокина, Т. Н. Описание экспериментальной установки для исследования гидростатодинамического подпятника с карманами Рэля [Текст] / Т. Н. Сорокина // Вісник НТУ "ХП". Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 36 (1145). – С. 88–91

References

1. Uchaev, P. N., Orlov, P. I. (Eds.) (1988). Osnovy konstruirovaniya. Spravochno-metodicheskoe posobie. V 2-kn. Kn. 2. Moscow: Mashinostroenie, 544.
2. Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W. (2013). Engineering tribology. Elsevier Butterworth – Heinemann, 896.
3. Szeri, A. Z. (2011). Fluid Film Lubrication. Cambridge University Press, 564.
4. Voskresenskij, V. A., D'jakov, V. I. (1980). Raschet i proektirovanie opor skol'zhenija (zhidkostnaja smazka). Moscow: Mashinostroenie, 224.
5. Tokar', I. Ja. (1971). Proektirovanie i raschet opor trenija. Moscow: Mashinostroenie, 168.
6. Dowson, D., Taylor, C. M., Godet, M., Berthe, D. (Eds.) (1987). Fluid – film lubrication – Osborne Reynolds centenary. Elsevier Science Publishers B. V., 696.
7. Rowe, W. B. (1983). Hydrostatic and hybrid bearing design. Butterworths & Co. Ltd, 254.
8. Hlopenko, N. Ja., Koshkin, D. L. (2003). Jeksperimental'nye issledovanija opytnogo obrazca podshpivnika Kingsberi pri torcovyh bienijah grebnja. Problemi tribologii, 1, 57–61.
9. Etsion, I., Halperin, G., Brizmer, V., Kligerman, Y. (2004). Experimental Investigation of Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearings. Tribology Letters, 17 (2), 295–300. doi: 10.1023/b:tril.0000032467.88800.59
10. Zhou, J., Blair, B., Argires, J., Pitsch, D. (2015). Experimental Performance Study of a High Speed Oil Lubricated Polymer Thrust Bearing. Lubricants, 3 (1), 3–13. doi: 10.3390/lubricants3010003
11. Mikula, A. M. (1988). Further Test Results of the Leading-Edge-Groove (LEG) Tilting Pad Thrust Bearing. Journal of Tribology, 110 (1), 174. doi: 10.1115/1.3261559
12. Wasilczuk, M. (2015). Friction and Lubrication of Large Tilting-Pad Thrust Bearings. Lubricants, 3 (2), 164–180. doi: 10.3390/lubricants3020164
13. Patil, A., Shinde, P. B., Chavan, S. P. (2012). Experimental studies of pressure distribution in tilting pad thrust bearing with single continuous surface profiled sector shaped

pads. International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering (IJARME), 2 (2), 112–116.

14. Uilkok, U. (1970). Povyshenie dolgovechnosti ustanovok s podshipnikami kachenija blagodarja ispol'zovaniju kombinirovannogo podshipnika. Problemy trenija i smazki: Tr. Amer. o-va inzh.-meh. Moscow: Mir, 3, 34–42.

15. Hlopenko, N. Ja., Sorokina, T. N. (2013). Turbulentnaja neizotermicheskaja smazka stupenchatogo podpjatnika Rjeleja. Problemi tribologii, 4, 40–45.

16. Hlopenko, N. Ja., Sorokina, T. N. (2015). Raznostnye shemy i tochnost' reshenija termogidrodinamicheskikh uravnenij smazki podpjatnika Rjeleja. Problemi tribologii, 2, 101–106.

17. Sorokina, T. N. (2015). Opisanie jeksperimental'noj ustanovki dlja issledovanija gidrostatodinamicheskogo podpjatnika s karmanami Rjeleja. Visnik NTU "HPI". Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi, 36 (1145), 88–91.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Тимошевський Б. Г.
Дата надходження рукопису 11.02.2016*

Сорокина Татьяна Николаевна, аспирант, Национальный университет кораблестроения, пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, Украина, 54025
E-mail: tan-sorokina@yandex.ru

УДК 629.7.036.001

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.63913

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА В ОБЛАСТИ АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ, РАЗРАБОТАННЫЕ «ЕДИНОЙ ТЕОРИЕЙ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПОТОКАХ»

© Б. Ш. Мамедов, П. К. Штанько

Рассматриваются основные направления технического прогресса в области авиадвигателестроения, разработанные «Единой теорией двигателей на непрерывных потоках». Данные направления связаны с: обеспечением безопасности полетов путем повышения газодинамической устойчивости работы воздушно-реактивных двигателей (ВРД); повышением тяги турбореактивных одноконтурных и двухконтурных двигателей (ТРД, ТРДД); снижением радиальных размеров и децибельной характеристики на входе и выходе из ВРД; увеличением высоты лопаток последних рабочих колес компрессора высокого давления; введением закона регулирования ВРД по максимальной тяге с целью повышения полетного (тягового) КПД

Ключевые слова: газодинамическая устойчивость работы, тяга, закон регулирования

The main technical progress directions in air-jet engine design branch, which are worked out by the “Single theory of continuous flow propulsions” are highlighted. They are connected with providing the fly security by air-jet engines gas-dynamic work steady increasing with full elimination zone of rigid (spring) stroke in the cross section B-B of the air-jet engines, with bypass turbojet engine’s thrust increasing with simultaneously fuel consumption lowering, with inlet and outlet decibel characteristic and radial dementias lowering, with high pressure compressor’s last working wheels blades increasing, with regulating law air-jet engine’s introduction to provide maximum thrust with the purpose of flying (thrust) efficiency increasing

Keywords: gas-dynamic work steady, thrust, regulation law

1. Введение

Технический прогресс в области авиадвигателестроения полностью зависит от правильной теории ВРД. Кризис современной теории ВРД [1] основывается на том, что все, без исключения, фундаментальные основы этой теории ошибочны. К ошибочным фундаментальным основам современной теории ВРД относятся:

1. Термодинамический цикл турбореактивных двигателей в координатах P-V, T-S, [2].

2. Формула тяги и полетного (тягового) КПД ТРД, [2].

3. Теорема о подъемной силе продуваемого профиля, [2].

4. Неправильное понимание и применение уравнения Эйлера, [2].

Все это привело к:

– ошибочному описанию принципа работы, физических процессов сжатия газового потока в КНД, КСД, КВД;

– непониманию теоретических и физических основ процесса заглохания ТРД при взлете, полете, посадке [3];

– ошибочному проектированию ТРД, особенно ТРДД [4];

– отсутствию правильных направлений технического прогресса в области авиадвигателестроения при $T_z^* = const$, где T_z^* – температура заторможено-