

УДК 629.7.036.3

ДУАИССИА ОМАР ХАДЖ АИССА, Т. П. МИХАЙЛЕНКО, И. И. ПЕТУХОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАСЛЯНЫХ ПОЛОСТЯХ ОПОР РОТОРА ГТД**

*В статье рассматривается вопрос обеспечения требуемого теплового состояния опор ротора газотурбинного двигателя. Этот вопрос особенно актуален при проектировании современных авиационных двигателей с высокими значениями степени повышения давления и температуры газа на входе в турбину. Приведены основные элементы маслосистемы и их взаимосвязь. Показаны конструктивные схемы опор и определены основные источники теплоты, влияющие на их тепловое состояние. Обоснована необходимость в усовершенствовании маслосистем, методов и подходов к ее моделированию и проектированию, в том числе совершенствование методов расчета тепловых процессов в масляных полостях опор.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, маслосистема, опора ротора, уплотнение, масляная полость, тепловой поток.

**Введение**

Одной из основных систем, обеспечивающих надежную работу и ресурс современных газотурбинных двигателей (ГТД) является система смазки. Кроме собственно смазки трущихся поверхностей она обеспечивает отвод теплоты, выделяющейся при трении и передающейся от примыкающих нагретых деталей, защиту трущихся поверхностей от коррозии и наклепа, удаление из узлов трения продуктов износа деталей и коксования масла. За счет маслосистемы снижается шум в узлах трения и зубчатых зацеплениях; поддерживается на необходимом уровне давление в полостях опор роторов, приводов и редукторов ГТД. При этом маслосистема должна обеспечивать эксплуатационную эффективность, легкость и простоту технического обслуживания.

Нарушения подачи масла к подшипникам и зубчатым зацеплениям могут привести к перегреву двигателя, разрушению подшипников, заклиниванию ротора, в итоге – к остановке или к разрушению двигателя.

Развитие современных газотурбинных двигателей неразрывно связано с увеличением степени повышения давления и температуры газа на входе в турбину при одновременном снижении габаритов ГТД, что также требует увеличения окружных скоростей и, как следствие, частоты вращения ротора. Указанное выше, приводит к росту теплонапряженности элементов двигателя, повышению скоростей вращения роторов, температур, давлений и скоростей потока в газовом тракте. В этой связи особенно остро стоит вопрос об обеспечении теплового состояния опор ротора, необходимого для надежной

работы подшипников качения и других узлов трения.

С другой стороны повышение уровня основных термодинамических параметров ГТД привело к тому, что при создании двигателей нового поколения проблемным вопросом стало также конструктивное обеспечение «щадящего» режима эксплуатации масел. В настоящее время в масляных системах авиационных ГТД используют синтетические масла ИПМ -10 (ТУ 38.101299-90) и ВНИИ НП-50-1-4У (ТУ38.40158-12-91), а у ТРДД третьего поколения применяют минеральное масло МС-8п (ОСТ 38.101163-78) [1]. В табл. 1 приведены данные по величине максимально допустимой температуры при эксплуатации некоторых сортов авиационных масел [1]. При превышении указанных температур может происходить ускоренное их старение.

Таблица 1  
Допускаемые уровни температур

Допустимый уровень температуры, °С	Сорт используемого масла		
	МС – 8п	ИПМ-10	ВНИИ НП 50-1-4у
На выходе масла из двигателя	150	200	200
На выходе масла из опоры турбины	170	220	220
Стенок, омываемых маслом	240	290	290

При указанных ограничениях теплового состояния масла без осуществления эффективной тепловой защиты стенок масляных полостей опор не может быть обеспечена надёжная работа ГТД в течение заданного ресурса.

### 1. Маслосистема ГТД

В зависимости от назначения и типа ГТД могут применяться разомкнутые, циркуляционные и комбинированные схемы маслосистем. В настоящий момент в авиационных ГТД широко применяются циркуляционные схемы, которые в зависимости от сообщения масляного бака с атмосферой могут быть замкнутыми и открытыми, а в зависимости от организации схемы циркулирования – одноконтурными, двухконтурными, короткозамкнутыми.

Масляная система в общем случае состоит из масляного бака, масляного радиатора, внешних и внутренних трубопроводов, нагнетающих и откачивающих насосов, масляных фильтров, воздухоотделителей, суфлеров, редукционных, обратных и предохранительных клапанов, форсунок и приборов контроля. На рис. 1, представлена упрощенная схема масляной системы двухконтурного турбореактивного двигателя (ТРДД) [2].

Масло забирается из маслобака и поступает в нагнетающий насос, затем очищается в фильтре и подается под давлением к узлам смазки в опоре. В опоре масло насыщается надувочным воздухом, прошедшим через уплотнения, и вспенивается. Отработанное масло забирается откачивающими насосами. С целью обеспечения полной откачки масла при любом положении двигателя в полете откачка производится отдельными насосами из каждого смазываемого узла. Далее масло поступает через фильтр в топливо-масляный (или воздушно-масляный) теплообменник, где оно охлаждается, и направляется в бак. Воздушные полости бака и опор сообщаются с атмосферой системой суфлирования, основным элементом которой является суфлер. Широкое распространение получил центробежный суфлер. В нем за счет действия центробежной силы происходит сепарация воздушно-масляной смеси на газы, которые выбрасываются в атмосферу, и жидкое масло, возвращаемое обратно в двигатель.

Обеспечение приемлемого теплового состояния узлов трения является существенно более важной функцией масляных систем по сравнению с обеспечением смазки трущихся поверхностей. Так, например, для смазки теплонапряжённого радиально-упорного шарикоподшипника может оказаться достаточным не более 0,1 кг/ч масла, а для отвода выделяемого в нём тепла (10...20 кВт) требуется подавать до 540 кг/ч масла [3].

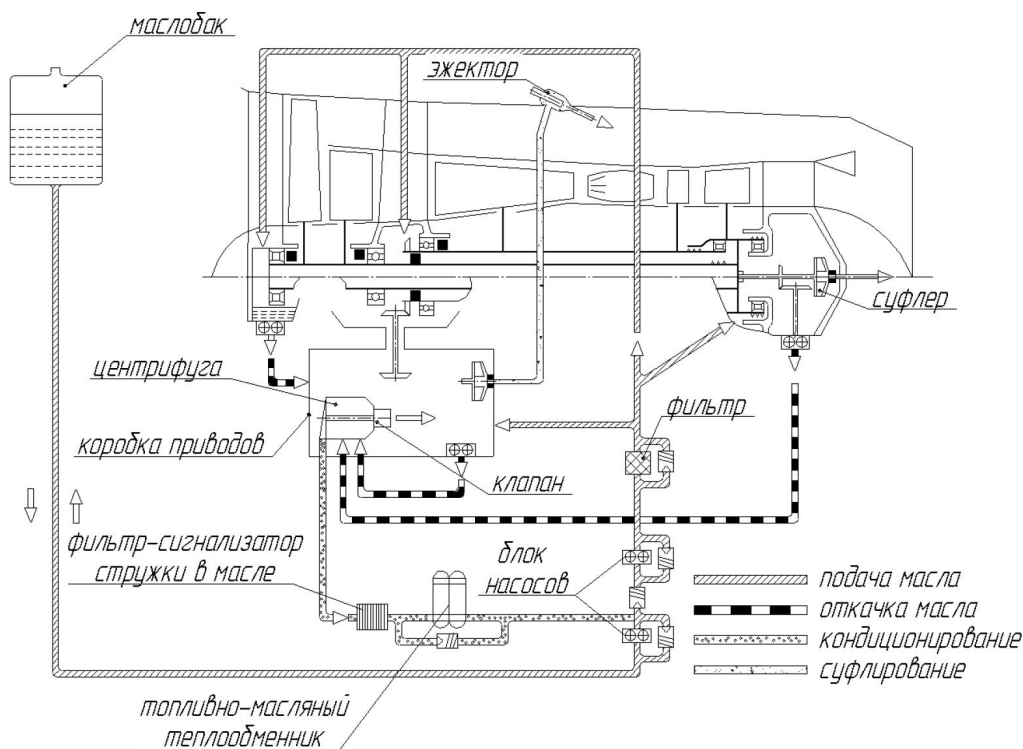


Рис. 1. Схема масляной системы ТРДД

## 2. Опоры роторов ГТД

Опоры ГТД служат для передачи усилия от вращающихся роторов к корпусам. Опоры воспринимают значительные статические и динамические усилия от валов двигателя. Они должны обеспечивать достаточную жесткость силовой схемы двигателя и необходимое центрирование валов во всем диапазоне реализуемых нагрузок.

В настоящее время получили распространение следующие типы опор [4]:

- опоры жесткого типа, воспринимающие усилия во всех направлениях;
- упруго-демпферные опоры, устанавливаемые преимущественно на радиальные подшипники;
- опоры межроторного типа.

Опоры жесткого типа (рис. 2) обладают достаточно простой конструкцией, обеспечивают возможность передачи значительных осевых и радиальных усилий, но имеют большую чувствительность к температурному градиенту, что приводит к значительному изменению посадки наружных колец подшипников.

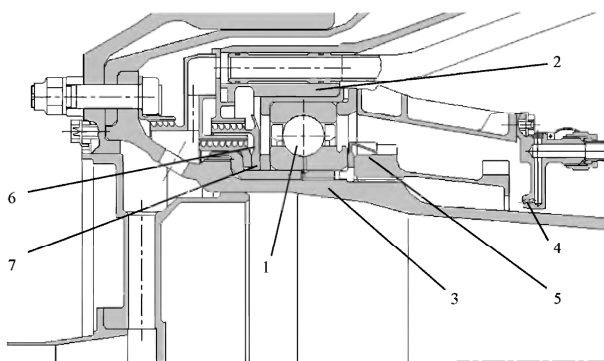


Рис. 2. Опора шарикоподшипника ротора низкого давления (НД):

- 1 - радиально-упорный подшипник; 2 - корпус;  
3 - вал ротора; 4 - форсунка; 5 - втулка;  
6 и 7 – лабиринтные уплотнения

Упруго-демпферные опоры (рис. 3) обеспечивают возможность самоустановки опоры в процессе работы, демпфирования передаваемых усилий, имеют меньшую чувствительность к температурным градиентам, но обладают относительно сложной конструкцией, и имеют ограничение по использованию из-за гибкости.

Опоры межроторного типа не нуждаются в прямой связи с корпусами двигателя. Они передают нагрузку на силовые корпуса через тот ротор, на который опираются. Опоры этого типа наиболее компактны, но имеют самую сложную систему подачи и отвода масла к подшипнику, так как детали

систем подвода и отвода масла размещаются во вращающихся валах.

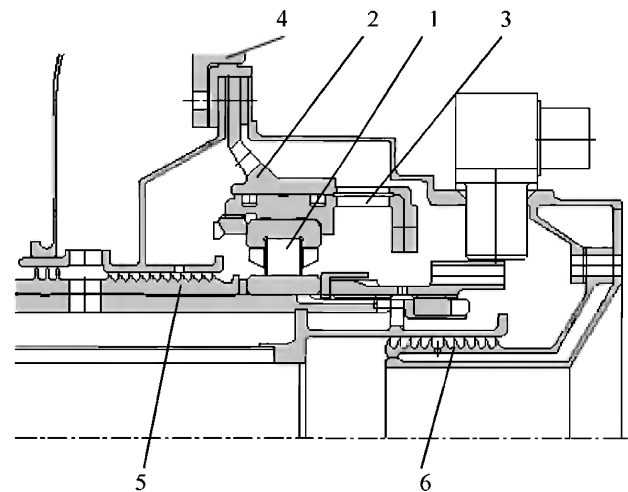


Рис. 3. Задняя опора ротора НД:

- 1 - роликоподшипник; 2 - фланец;  
3 - упруго-демпферная опора; 4 - опора задняя двигателя; 5 и 6 - лабиринтные уплотнения

Конструкции опор ГТД весьма разнообразны и учитывают индивидуальные особенности конкретного двигателя и практически не повторяются в различных разработках. В своей основе они могут иметь роликовый или шариковый радиально-упорный подшипники. Однако в конструкции опор можно выделить группы элементов имеющих единое функциональное назначение. Такие как статорная и роторная части, подшипник. Кроме этого в состав опоры могут входить отдельные элементы систем обеспечения работоспособности подшипника, а именно:

- детали уплотнений масляной полости;
- детали системы смазки подшипника;
- детали наддува уплотнений масляной полости;
- детали системы охлаждения опоры.

Деталью и узлом двигателя вокруг каждой опоры создается замкнутое пространство – масляная полость, в котором организована подача масла на подшипники и откачка масла. В некоторых случаях конструкция двигателя может предусматривать одну масляную полость для нескольких опор.

## 3. Тепловой баланс опоры ротора

В ГТД помимо основных узлов, генерирующих тепловые потоки, поступающие в опору силовой установки, имеется большое количество трущихся деталей (подшипники роторов, уплотнения, зубчатые передачи, шлицевые соединения и т.д.). В результате трения происходит износ деталей, а также

выделяется значительное количество тепла, которое наряду с тепловыми потоками от корпусных деталей поступает в опору двигателя. Вместе с тем для выполнения требований работоспособности и надёжности необходимо поддерживать заданные уровни теплового состояния узлов опоры двигателя, что обеспечивается прокачкой определенного количества масла через опору.

Существуют сложившиеся подходы к расчету потребной прокачки масла через опоры ГТД, изложенные в [5-8]. В целом, для определения потребной прокачки масла необходим расчёт теплоотдачи двигателя в смазочное масло, т.е. теплового потока от двигателя в масляную полость опоры. В общем случае, тепловой поток в опору от двигателя состоит из нескольких составляющих, изображенных на рисунке 4 [3]. К ним относятся тепловые потоки:

- $Q_1$  – из тракта;
- $Q_2$  – через стенки опоры;
- $Q_3$  – через вал;
- $Q_4$  – от трения в уплотнениях;
- $Q_5$  – от трения в подшипниках, зубчатых передачах, шлицевых соединениях и т.п.;
- $Q_6$  – от воздуха, поступающего через уплотнения.

Существуют и другие источники тепла, например, тепло, выделяющееся при вспенивании масла, но в виду сравнительно малой величины, как правило, не рассматривается.

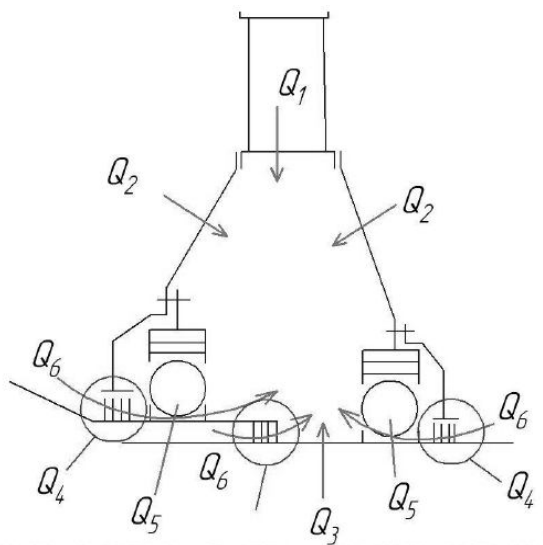


Рис. 4. Составляющие теплового потока в опоре ГТД

Поскольку точный расчёт составляющих теплового потока от двигателя в масляную полость опоры связан с большими трудностями, то часто пользуются статистическими данными, что оказывает существенное влияние на точность полученных результатов. Кроме этого на переходных режимах

работы двигателя необходимо также учитывать влияние нестационарности процесса теплообмена.

## Заключение.

В настоящее время проектирование маслосистем ГТД в значительной степени опирается на опытные данные и технологии, сложившиеся более 20 лет назад. Тенденции развития авиационных двигателей, направленные на снижение удельного расхода топлива и вредных выбросов, предполагают более высокие нагрузки и температуры в двигателе. Это ужесточает требования к маслосистемам и ведет к необходимости совершенствования их схем и элементов с использованием современных методов моделирования и проектирования, накопленных знаний о рабочих процессах. Обзор публикаций последних лет подтверждает актуальность работ в этом направлении, которые имеют целью снижение расхода масла наряду с улучшением охлаждающих характеристик, уменьшение массы системы смазки за счет упрощения конструкции ее элементов, снижение эксплуатационных затрат и повышение надежности.

Совершенствование маслосистемы, методов и подходов к ее моделированию и проектированию является достаточно длительным и сложным процессом. Но без развития работ в этом направлении нельзя добиться значительных успехов в улучшении характеристик ГТД.

## Литература

1. Трянов, А. Е. О тепловой защите масляных полостей опор создаваемых ГТД [Текст] / А. Е. Трянов, О.А. Гришианов, А.С. Виноградов // Вестник СГАУ. – Самара, 2009. – № 3, Ч. 1. – С. 318-329.
2. Новиков, Д. К. Опоры и уплотнения авиационных двигателей и энергетических установок [Текст] : учеб. пособие / Д. К. Новиков, С.В. Фалалеев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 124 с.
3. Виноградов, А. С. Исследование теплового состояния опоры авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / А. С. Виноградов, Р. Р. Бадыков, Д. Г. Федорченко // Вестник СГАУ. – Самара, 2014. – № 5 (47), Ч. 1. – С. 37-44.
4. Иноземцев, А. А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Том 1. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. [Текст] : учебник / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. – М. : Машиностроение, 2008. – 207 с.
5. Демидович, В. М. Исследование теплового режима подшипников ГТД [Текст] / В. М. Демидович

вич. – М. : Машиностроение, 1978. – 171 с.

6. Бич, М. М. Смазка авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / М. М. Бич, Е. В. Вейнберг, Д. Н. Сурнов. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.

7. Glahn, S. Two-Phase Air/Oil Flow in Aero-Engine Bearing Chambers – Assessment of an Analytical Prediction Method for the Internal Wall Heat Transfer [Text] / A. Glahn, S. Wittig // *International Journal*

*of Rotating Machinery*. – 1999. – Vol. 5, No. 3. – P. 155-165.

8. Busam, S. Internal Bearing Chamber Wall Heat Transfer as a Function of Operating Conditions and Chamber Geometry [Text] / S. Busam, A. Glahn, S. Wittig // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 2000. – Vol. 122. – P. 314-320.

Поступила в редакцию 04.02.2016, рассмотрена на редколлегии 15.02.2016

## ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В МАСЛЯНИХ ПОРОЖНИНАХ ОПОР РОТОРА ГТД

*Дуаїссія Омар Хадж Аїсса, Т. П. Михайленко, І. І. Петухов*

У статті розглядається питання забезпечення необхідного теплового стану опор ротора газотурбінного двигуна. Це питання особливо актуальне при проектуванні сучасних авіаційних двигунів з високими значеннями ступеня підвищення тиску та температури газу на вході в турбіну. Наведено основні елементи маслосистеми та їх взаємозв'язок. Показано конструктивні схеми опор та визначено основні джерела теплоти, що впливають на їх тепловий стан. Обґрунтовано необхідність в удосконаленні маслосистем, методів і підходів до її моделювання та проектування, в тому числі вдосконалення методів розрахунку теплових процесів в масляних порожнинах опор.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, маслосистема, опора ротора, ущільнення, масляна порожнина, тепловий потік.

## TO THE PROBLEM OF THERMAL PROCESSES MODELING IN BEARING CHAMBERS OF GAS TURBINE ENGINES

*Douaïssia Omar Hadj Aïssa, T. P. Mykhilenko, I. I. Petukhov*

The article deals with the issue of providing the required thermal condition of bearing chambers of gas turbine engines. This issue is particularly relevant in the design of modern aircraft engines with high pressure ratio and high gas temperature at the turbine inlet. It is shown the main parts of aero-engine lubrication system and their relationships. It is shown constructive schemes of aero-engine bearing chambers and describes the main sources of heat which has the higher influences on bearing chambers' temperature state. It is justified the necessity to improve the aero-engines lubrication system, methods, and approaches to its modeling and design, including the improvement of computation methods of thermal processes in the bearing chambers.

**Key words:** gas turbine engine, lubrication system, bearing chamber, seal, oil cavity, heat flux.

**Дуаїссія Омар Хадж Аїсса** – аспірант каф. аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: douaïssia.omar@hotmail.fr.

**Михайленко Тарас Петрович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: m\_tar@mail.ru.

**Петухов Илья Иванович** – канд. техн. наук, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» Харьков, Украина, e-mail: ilya2950@gmail.com.