

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАСЛОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ СИСТЕМ СМАЗКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Гулиенко А.И.* , Щуровский Ю.М.**

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
ЦИАМ, Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия*

**e-mail: goulienko-contrl@ciam.ru*

***e-mail: shehurovsky@ciam.ru*

Объектом исследований является система смазки газотурбинного двигателя (ГТД). Изложены особенности рабочего процесса в агрегатах такой системы. Экспериментально показано, что протекающая в трубопроводах откачки маслотовоздушная смесь может рассматриваться как сплошная упругая среда. Составлена карта течения смеси в трубопроводе с шестеренным насосом.

Ключевые слова: система смазки, маслотовоздушная смесь, карта режимов течения.

Введение

Система смазки опор роторов ГТД во многом определяет надежность его работы. При проектировании и доводке систем доминируют в основном эмпирические и экспериментальные методы, а расчетные имеют ограниченное применение из-за недостаточно изученных тепловых, пневмо- и гидродинамических процессов в агрегатах при тении двухфазной среды.

Накопленный многими фирмами опыт разработки систем смазки авиационных ГТД в литературе практически не освещен. В известных книгах обычно приводятся состав и функции систем, а также характеристики их агрегатов — суфлеров, теплообменников, насосов [1—8]. При этом, как правило, не рассматривается влияние двухфазности рабочей среды, протекающей в агрегатах системы, на гидравлические потери давления в трубопроводах, потребляемую мощность насосов и, в итоге, на качество смазки [9].

Характеристики агрегатов систем смазки обычно определяются при работе на «чистом» масле и поэтому не учитывают наличие воздуха в масле.

В статье проводится анализ свойств двухфазных смесей, прокачиваемых в агрегатах систем смазки авиационных ГТД, на основе экспериментальных данных, полученных на стенде полунатурного моделирования в ЦИАМ [10—12].

Особенности систем смазки ГТД

Система смазки ГТД должна обеспечить во всех условиях эксплуатации надежную подачу жидкого масла из маслобака в подшипниковые узлы опор роторов и к трущимся элементам в коробке приводов агрегатов, утилизацию в масло тепла от теплонапряженных узлов двигателя, возврат обратно в бак подогретой маслотовоздушной смеси с высоким объемным газосодержанием, а также утилизацию в атмосферу воздуха, поступающего в опоры роторов.

Система содержит подсистемы откачки, нагнетания и суфлирования, которые объединены сетью трубопроводов с насосами, фильтрами и клапанами различного типа (регулирующие, предохранительные, обратные и др.). В линии нагнетания обычно устанавливаются теплообменные аппараты для повышения эффективности охлаждения масла, в отличие от их постановки в линии откачки, когда в масле присутствует воздух и теплообмен ухудшается. Суфлер центробежного типа обеспечивает разделение воздушно-масляной смеси и утилизацию воздуха в атмосферу, а остатков масла — в бак. Высокая температура масла в баке приводит к уменьшению его вязкости и повышению скорости воздухоотделения.

Основные особенности систем смазки авиационных ГТД следующие:

— используется, как правило, замкнутая циркуляционная схема с шестеренными насосами подачи масла и откачки смеси, а также с центробежным суфлером, прокачка рабочей среды сопровождается

ся изменением плотности, вязкости и объемного газосодержания по тракту течения;

- привод насосов производится от источника с неограниченной мощностью (коробки приводов агрегатов ГТД), частота вращения насосов зависит от частоты вращения роторов ГТД и не регулируется;

- во всех агрегатах (маслобаке, опорах) есть избыточное давление и, следовательно, нет свободного течения потоков смеси;

- в трубопроводах подсистем реализуется вынужденное напорное течение, формируемое подачей/откачкой насосов;

- используемые масла характеризуются значительными силами поверхностного натяжения на границе раздела «масло-воздух» (более 0.03 Н/м) из-за наличия в них поверхностно-активных веществ;

- плотность жидкой фазы смесей выше плотности газовой на порядок и более;

- имеет место сильное влияние вязкости масла на характеристики системы, особенно при минусовых температурах.

Эти особенности авиационных систем принципиально отличают течение в них от свободного течения воздушно-водяных потоков в энергетических установках с коалесценцией (слиянием) пузырьков воздуха [13—15] и воздушно-масляной смеси из опоры, не имеющей подсистемы суфлирования [16].

Краткое описание рабочего процесса

Приводимое ниже описание рабочего процесса в типовой системе смазки сделано по материалам работ [1—12]. Из маслобака «чистое» масло (без воздуха или с его минимальным количеством) поступает на вход нагнетающего насоса, который обеспечивает подачу масла к форсункам и далее в зазор между внутренним кольцом подшипника и се-

паратором. Масло омывает рабочую поверхность тел качения подшипника и, проходя через пространство между ними, дробится на капли и поступает в масляные полости (МП) опор роторов.

С выходов МП на вход откачивающего насоса и на вход системы суфлирования поступает двухфазная среда с различным объемным газосодержанием (рис. 1).

Удержание в МП образовавшейся смеси и предотвращение ее выброса в газоздушный тракт ГТД обеспечивается путем установки уплотнений (лабиринтных, щеточных и др.) и наддува опор воздухом из тракта двигателя. При этом обеспечивается положительный перепад давлений на уплотнениях (давление воздуха на входе в уплотнение выше давления смеси в опоре).

В результате интенсивного смешения капель масла с воздухом в МП образуется многофазная среда с образованием [12]:

- неустойчивой двухфазной среды в верхней части масляной полости, часть которой в виде воздушно-масляной смеси поступает в систему суфлирования;

- устойчивой масловоздушной смеси, сливающейся самотеком в маслосорбник, расположенный в нижней части масляной полости, из которой смесь поступает на вход насоса откачки и далее в воздухоотделитель и маслобак под общий уровень масла.

Физический процесс формирования масловоздушной смеси определяется механизмом диспергирования напорного течения воздуха и масла, поступающего из подшипников. В результате процесса диспергирования одной фазы (воздуха) в другую (масло) на диспергированных частицах дисперсной фазы (пузырьках воздуха) образуется адсорбционная стабилизирующая пленка (из масла), препятствующая коалесценции пузырьков и расслоению масловоздушной смеси.

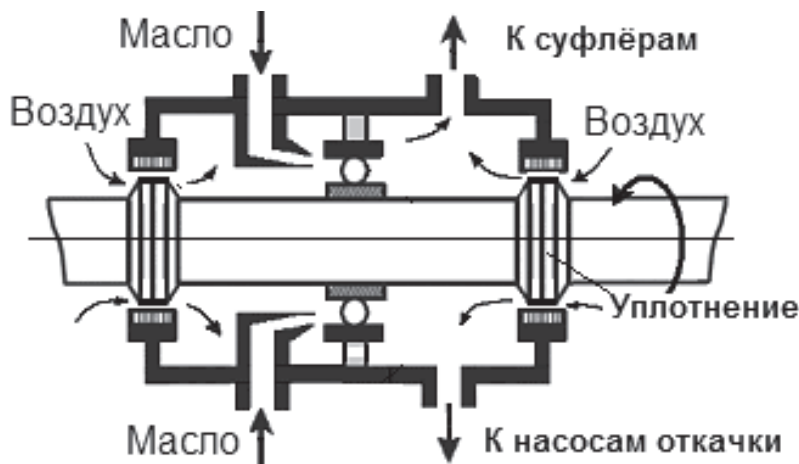


Рис. 1. Схема потоков масла и воздуха в масляной полости

Этот процесс схож с процессами воздухообмена в маслобаках. Так, в работе [1] дано условие поступления пузырей в надмасляное пространство бака, согласно которому скорость их всплытия должна быть больше скорости вытекания масла из бака. Неуспевшие всплыть пузырьки воздуха вытекают из бака вместе с маслом.

Система суфлирования во многом формирует уровень давления в полостях опор, картере и маслобаке, что оказывает прямое влияние на распределение масла в тракте нагнетания, а также на надежность и эффективность системы смазки.

Наличие путевых потерь давления в тракте подвода двухфазной смеси к шестеренному насосу, местных потерь на входных кромках шестерен и на увеличение скорости потока от скорости во входном патрубке до окружной скорости головок зубьев шестерен приводит к уменьшению давления на входе в межзубовые впадины шестерен и их заполнению под действием разности давлений в зоне всасывания и у корня шестерен [17]. Заполнение продолжается в течение времени пребывания межзубовых впадин в зоне всасывания. Это время ограничено и зависит от скорости вращения шестерен, их размеров и др. Заполнению препятствуют центробежные силы, возникающие при вращении шестерен.

В шестеренных насосах имеет место защемление объема в межзубовом пространстве шестеренной пары из-за того, что в момент зацепления новой пары зубьев предыдущая пара еще не выходит из зацепления и между точками зацепления образуется замкнутый объем. При этом эмульсия, занимающая защемленный объем, сжимается в полости выхода, а затем, попав в полость входа, расширяется от давления нагнетания до давления на входе и занимает часть рабочего объема впадины, что еще больше ухудшает ее заполнение. Наличие этого объема приводит к дополнительному эмульсированию (насыщению воздухом) двухфазной смеси.

Особенностью заполнения двухфазной средой межзубовых объемов является и то, что газовая фаза смеси расширяется до полного заполнения объема впадин. В результате уменьшаются плотность смеси и массовая производительность насоса. После выхода зубьев из зоны всасывания двухфазная смесь со значением плотности в междузубовом объеме перемещается в зону нагнетания, откуда она поступает на выход насоса и частично возвращается по зазорам на его вход.

Из-за трения в подшипниковых узлах происходит износ их деталей, сопровождающийся выделением тепла и нагревом опор. Дополнительный их нагрев происходит от поступающего из уплотнений

воздуха и вследствие теплоотдачи через вал и стенки опоры. Температура опор, подшипников и рабочей среды оказывает значительное влияние на образование в МП двухфазной смеси, так как изменяются парциальные значения плотности и вязкости масла и воздуха, а также силы поверхностного натяжения масла на границе раздела с воздухом. Вязкость масла может изменяться от 1 до 100 сСт и выше в зависимости от температуры и от наработки системы.

Описанные процессы в агрегатах систем смазки подтверждены косвенно (без прямого измерения размера пузырьков) при исследованиях демонстрационной системы смазки с электроприводными насосами на стенде ЦИАМ с имитатором масляной полости ГТД. В имитаторе воздух поступает в МП через лабиринтные уплотнения на роторе, а масло распыляется форсунками на сепаратор шарикоподшипника [10–12].

При испытаниях использовалось авиационное минеральное масло МС-8П. Величина избыточного давления в МП составляет 0.01...0.03 МПа, за нагнетающим насосом (НН) — 0.3...0.5 МПа, прокачка через НН — 10...20 л/мин, в тракте откачки — меньше 60 л/мин; температура смеси изменялась в пределах 20...70 °С; объемное газосодержание составляло 0.2...0.5; частота вращения ротора подшипников в масляной полости изменялась в диапазоне 4000...12000 об/мин.

Из проведенного анализа видно, что в узлах и агрегатах систем смазки протекают сложные тепловые и гидравлические процессы, влияющие на параметры образующейся двухфазной среды.

Свойства двухфазных потоков

Из маслобака на вход нагнетающего насоса и далее в МП поступает «чистое» масло. Его теплофизические свойства задаются, как правило, в виде зависимости плотности $\rho_{ж}$, кинематической вязкости $\nu_{ж}$, теплоемкости $C_{p,ж}$, теплопроводности $\lambda_{ж}$ и скорости звука $a_{зв}$ от усредненной по объему температуры масла.

В магистрали суфлирования из полостей опор поступает двухфазный поток в виде воздушно-масляной эмульсии, в которой в воздухе во взвешенном состоянии находятся капли масла [2, 4].

Состав капель на входе в тракт суфлирования будет определяться, главным образом, процессом их дробления в МП и разрывом масляной пленки на пузырьках, поднимающихся из МП. При разрыве из пузырей освобождается воздух, а пленка распадается на капли разного размера, одна часть которых образует жидкое масло, а другая — остается в воздухе [4].

В откачку поступает масловоздушная смесь, в которой воздух, а не масло, находится во взвешенном состоянии в виде пузырьков диаметром менее 0.1...0.2 мм, покрытых масляной пленкой [1]. В литературе по маслосистемам ГТД откачиваемая смесь характеризуется как:

- масляная эмульсия [1],
- воздушно-масляная эмульсия [2],
- масловоздушная эмульсия [3],
- масловоздушная смесь [4],
- масловоздушная смесь (типа эмульсии) [5].

Часто в литературе используется словосочетание *растворенный воздух в жидкости* — т.е. нахождение воздуха в масле в виде мельчайших пузырьков, не взаимодействующих друг с другом [2]. В таком состоянии пузырьки остаются в масле из-за наличия на границе раздела масло-воздух сил поверхностного натяжения, которые препятствуют архимедовой силе всплытия. Величина этих сил понижается с уменьшением вязкости масла и использования присадок, усиливающих коагуляцию мелких пузырьков воздуха и облегчающих их выход на поверхность.

В неподвижном минеральном масле при стандартных атмосферных условиях за счет насыщения содержится по объему до 7—10% дисперсного («растворенного») воздуха [2].

Силы поверхностного натяжения на границе раздела «масло-воздух» являются основным механизмом формирования мелкодисперсной масловоздушной смеси (эмульсии), вытекающей из масляных полостей опор в тракт откачки.

Эмульсия, по определению, представляет собой так называемую *гомогенную* дисперсионную систему, которая состоит из двух *несмешивающихся* компонентов.

Ниже приводятся экспериментальные данные, показывающие применимость этих положений для масловоздушной смеси систем смазки.

На рис. 2 приведены кадры видеосъемки течения мелкодисперсной смеси на входе в откачивающий насос (нижняя часть кадров) и на выходе из него (верхняя часть) при выходе системы на режим.

В исходном состоянии (время 0 с) масло находится в трубопроводе на входе в откачивающий насос (кадр 0 на рис. 2). Кадр 10 (время 10 с) показывает, что после включения насосов темный цвет масловоздушной смеси и на входе, и на выходе откачивающего насоса практически один и тот же, а через 20 с масловоздушная смесь в трубе на входе начинает светлеть (нижняя часть на кадре 20), и ее можно характеризовать как мелкодисперсную. После включения электропривода подшипников процесс осветления ускоряется (кадр 30). На уста-

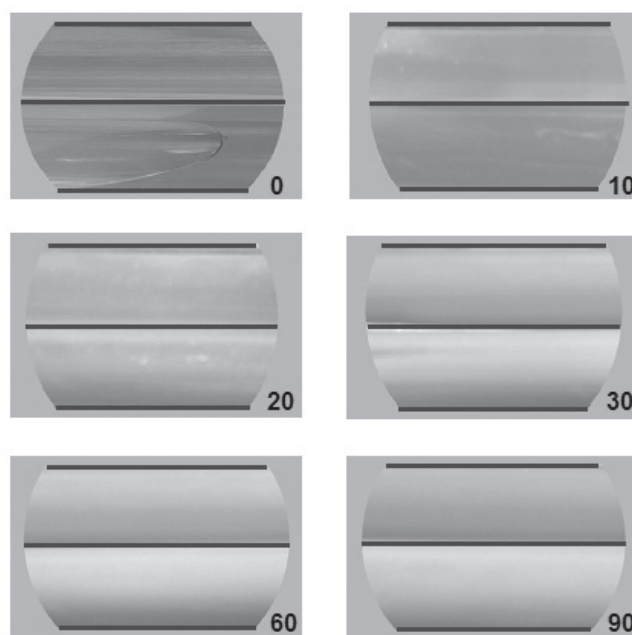


Рис. 2. Изменение цвета масловоздушной смеси при выходе на режим

новившемся режиме работы масловоздушная смесь на входе и выходе насоса приобретает молочный цвет по всему диаметру трубопроводов (кадр 60), но при этом на выходе она немного темнее. Повышение давления за насосом на 0.02 МПа приводит к потемнению масловоздушной смеси в трубопроводе на выходе откачивающего насоса (кадр 90).

Видно, что через 15—20 с насос уже прокачивает непрозрачную смесь молочного цвета, в то время как «чистое» масло это жидкость темно-желтого цвета, а воздух — бесцветный. Цвет смеси более темный на выходе насоса из-за большего давления за ним и, как следствие, меньших размеров пузырьков воздуха и большего влияния темного цвета масла.

При увеличении/уменьшении давления в системе изменение цвета смеси обратимо — она становилась темнее/светлее из-за уменьшения/увеличения размера пузырьков без их коалесценции. Этот факт характеризует масловоздушную смесь как текучую сплошную упругую среду.

Характеристику масловоздушной смеси как сплошной упругой среды подтверждает также низкое значение скорости звука в ней, которая определена путем анализа частоты колебаний давления в однониточном трубопроводе на входе в насос. На рис. 3 приведен переходный процесс при отключении электропривода насоса, когда из-за гидравлического удара в трубопроводе наблюдаются затухающие колебания на частоте 2.4 Гц. Длина трубопровода от маслобака до входа в насос составляет 2.5 м. Это «открыто-закрытая» акустическая система, для

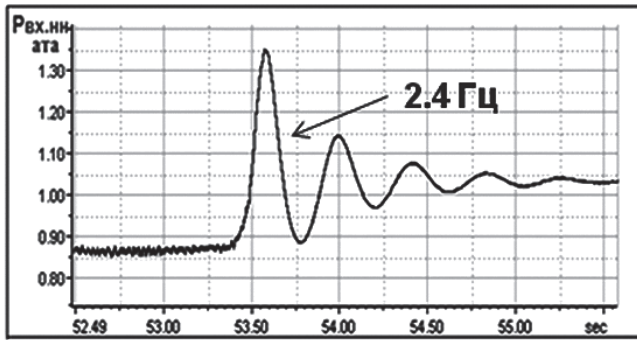


Рис. 3. Переходный процесс при гидравлическом ударе в трубопроводе с масловоздушной смесью

которой собственная частота колебаний в Гц равна скорости звука в смеси, разделенной на четыре длины трубы [18].

Для частоты 2.4 Гц скорость звука в смеси должна быть равной $2.4 \times 4 \times 2.5 = 24$ м/с и может реализоваться в гомогенной мелкодисперсной смеси [14]. Эта скорость часто называется *гомогенной скоростью звука*. Вывод о гомогенности мелкодисперсной среды делается в [19] и др.

При экспериментах в трубопроводах в смеси не наблюдалось слияния пузырьков воздуха. При появлении в тракте воздушных пузырей, которые всегда были в «своей» масляной пленке (рис. 4), они не взаимодействовали с основным потоком.

При наличии в трубопроводе пузырей с воздухом реализуется течение смеси в виде *двухкомпонентного* потока из масловоздушной смеси и воздушно-масляных пузырей. При его движении в трубопроводе формируются импульсы (пробки), пере-

дний фронт которых состоит из однокомпонентной масловоздушной смеси, а задний — из двухкомпонентной масловоздушной смеси в нижней части трубы и воздушно-масляных образований — в верхней. Пузыри всплывают в верхнюю часть трубы и занимают часть ее сечения, не разрывая поток по диаметру [11].

Пузыри однонаправленно продвигаются по потоку, вытесняя впереди себя масловоздушную смесь, не взаимодействуя с ней на границах раздела. Перемещение пузырей происходит с небольшой положительной скоростью относительно смеси под действием выталкивающей архимедовой силы и массовых сил от приложенного перепада давлений [11].

Приведенные экспериментальные данные по свойствам масловоздушной смеси получены при исследованиях демонстрационной системы смазки. Они подтверждены также на установке формирования мелкодисперсной масловоздушной смеси, в которой смесь образуется в результате реализации эффекта воздуховлечения (рис. 5).

Для этого прокачка рабочей среды производится по замкнутой схеме — из маслобака 1 она поступает на вход насоса 7, с выхода которого возвращается обратно в маслобак.



Рис. 4. Видеокادر потока с воздушным пузырем

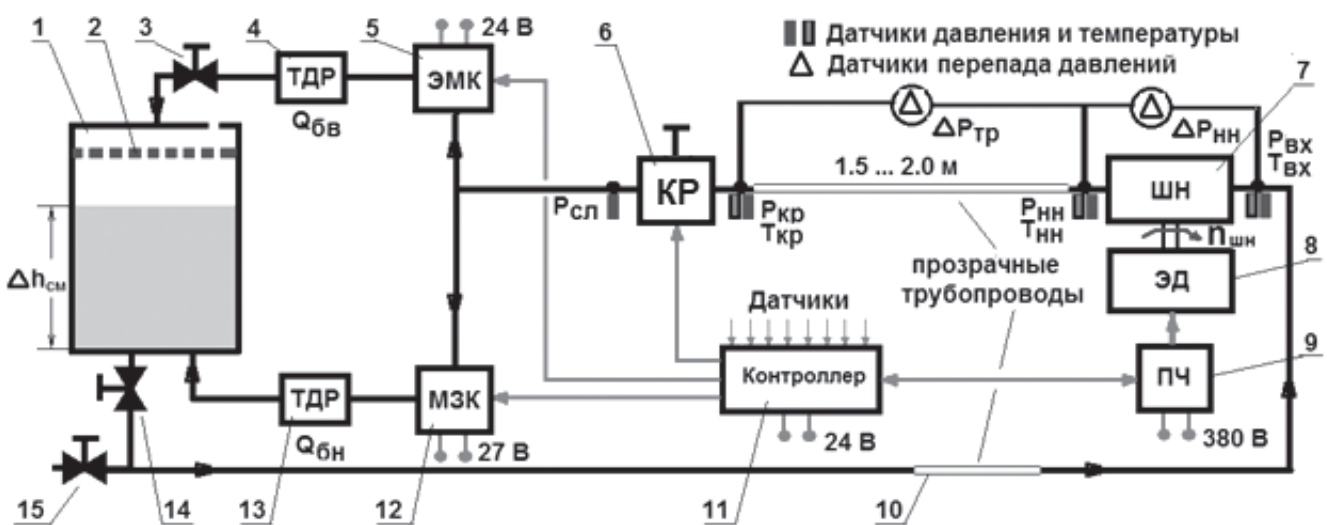


Рис. 5. Принципиальная схема испытаний ДЭСС: 1 — маслобак; 2 — рассекаватель потока; 3, 14, 15 — технологические краны; 4, 13 — датчики расхода; 5 — электромагнитный клапан; 6 — кран регулировочный; 7 — шестеренный насос; 8 — электродвигатель; 9 — преобразователь частоты; 10 — прозрачные участки; 11 — контроллер; 12 — механизм закрытия кранов

Работа систем стенда происходит на двух режимах:

режим 1 — формирование в баке масловоздушной смеси с требуемым значением объемного газосодержания $\alpha_{см}$;

режим 2 — определение характеристик агрегатов на полученной смеси.

На *режиме 1* подаваемая насосом 7 в бак 1 рабочая среда поступает сначала на рассекатель 2, расположенный в верхней его части, и в виде отдельных струй падает на основную массу рабочей среды в баке (ее зеркало). При их соударении с поверхностью масла в баке на месте падения образуется вогнутость. Далее реализуется процесс вовлечения воздуха в жидкость, причем преобладает явление защемления воздушных пузырьков между струей (каплей) и стенками вогнутости, а при разрушении стенок — вовлечение происходит вследствие образования воздушных полостей и защемления воздуха около каждой отдельной капли падающей жидкости. В результате реализуется эффект воздухововлечения и образуется мелкодисперсная масловоздушная смесь.

Через определенное время смесь опускается в нижнюю часть бака 1 и далее на вход насоса 7, который возвращает ее в объем верхней части бака 1, где смесь снова разбивается на струи и дополнительно насыщается воздухом. При этом процесс подготовки масловоздушной смеси сопровождается перемещением воздуха из воздушного объема в верхней части бака в объем смеси в нижней части бака, постепенно увеличивая его объем.

После получения в объеме смеси в нижней части бака 1 с требуемым значением объемного газосодержания производится переход на режим проведения испытания (*режим 2*). Для этого по команде контроллера 11 исполнительный орган 12 переводится в положение «открыто», а орган 5 — в «закрыто». В результате образуется замкнутый контур циркуляции: «объем смеси в нижней части бака 1 — трубопровод 10 — насос 7 — открытый орган 12 — нижняя часть бака 1». Контроллером 11 задается требуемая частота вращения электропривода 8, и насос 7 выводится на заданный режим прокачки смеси с испытуемыми агрегатами. Закрытием / открытием крана 6 обеспечивается требуемое давление на выходе из насоса 7. Для прекращения испытаний отключается электропривод 8 насоса 7.

Для визуализации течения использована видеокамера Sony HDV-FX7. Съемка проводилась с частотой 25 кадров/с (обычная) и 100 кадров/с (замедленная) при выдержке 1/6000 с. Использовались датчики давления с частотой пропускания 1000 Гц,

информация с которых регистрировалась в цифровом анализаторе процессов МС-300М фирмы «Мера».

При исследованиях на стенде рис. 2 величина избыточного давления в МП составляла 0.01...0.03 МПа, за НН — 0.3...0.5 МПа; диапазон изменения других параметров: прокачка смеси — 10...20 л/мин, температура — 20...50 °С, объемное газосодержание — 0.2...0.5.

В общем случае двухфазная смесь моделируется как гетерогенная среда с математическим описанием, как, например, в работе [20]. Как было показано выше, рабочая среда в системе смазки ГТД в области рабочих режимов обладает свойствами упругой сплошной среды, т.е. ее можно рассматривать как гомогенную среду и для моделирования использовать математический аппарат описания гидравлических систем с жидкостью [21]. При этом теплофизические свойства смеси (плотность $\rho_{см}$, вязкость $\nu_{см}$, теплоемкость $Cp_{см}$, теплопроводность $\lambda_{см}$, показатель изэнтропии $k_{э}$, скорость звука $a_{зв.см}$) определяются по правилу аддитивности:

$$\rho_{см} = (1 - \alpha)\rho_{ж} + \alpha\rho_{г}; \quad (1)$$

$$\nu_{см} = (1 - \alpha)\nu_{ж} + \alpha\nu_{г}; \quad (2)$$

$$Cp_{см} = (1 - \chi)Cp_{ж} + \chi Cp_{г}; \quad (3)$$

$$\lambda_{см} = (1 - \chi)\lambda_{ж} + \chi\lambda_{г}; \quad (4)$$

$$\frac{1}{k_{э}} = \frac{(1 - \alpha)}{k_{ж}} + \frac{\alpha}{k_{г}}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{a_{зв.см}^2} = \rho_{см} \cdot \left[\frac{1 - \alpha}{\rho_{ж} a_{зв.ж}^2} + \frac{\alpha}{\rho_{г} a_{зв.г}^2} \right]. \quad (6)$$

В приведенных соотношениях свойства жидкой фазы задаются в виде зависимостей параметра от усредненной по объему температуры смеси, которую для обеих фаз можно считать одинаковой, а свойства газовой фазы (воздуха) — от давления $p_{см}$ и температуры $T_{см}$ смеси:

$$\rho_{ж}, \nu_{ж}, Cp_{ж}, \lambda_{ж}, k_{ж}, a_{зв.ж} = f(T_{см}); \quad (7)$$

$$\rho_{г}, \nu_{г}, Cp_{г}, \lambda_{г}, k_{г}, a_{зв.г} = f(p_{см}, T_{см}). \quad (8)$$

Карта течения масловоздушной смеси

Структура течения масловоздушной смеси в трубопроводах зависит от пропускной способности насоса откачки. Отклонение величины газосодержания в смеси от расчетного значения приводит к изменению структуры (карты) течения масловоздушной смеси в трубопроводах откачки из-за изменения величины прокачки смеси шестеренным насосом.

Величина прокачки смеси $Q_{см}$ формируется расходной характеристикой насоса, которая отражает зависимость его объемного расхода Q_H от частоты вращения n_H вала, выбираемой из условия обеспечения требуемой прокачки смеси при расчетном значении коэффициента объемного газосодержания $\alpha_{см}$ на заданной частоте вращения. В зависимости от величины $\alpha_{см}$ на входе в насос при прокачке смеси на режиме с постоянной частотой вращения возможны следующие режимы работы:

I. Истинное объемное газосодержание масловоздушной смеси на входе в насос $\alpha_{см}$ равно расчетному значению $\alpha_{расч}$, и насос прокачивает смесь с объемным расходом Q_H , соответствующим текущей пропускной способности насоса.

II. Истинное объемное газосодержание выше расчетного значения — $\alpha_{см} > \alpha_{расч}$. При этом пропускная способность насоса ниже, чем поступающий на вход объемный расход, и возникает эффект динамического запираания насоса. Происходит пульсирующее течение смеси с образованием волн плотности и колебаниями параметров, в несколько раз увеличивается гидравлическая мощность насоса [9]. При этом возникали регулярные колебания давления с частотой 3...8 Гц, затухающие колебания с частотой 60...110 Гц, нерегулярные колебания параметров в системе с частотой 0.2...0.5 Гц.

III. Истинное объемное газосодержание смеси ниже расчетного значения — $\alpha_{см} < \alpha_{расч}$. В этом случае на вход насоса поступает масловоздушная смесь с большей плотностью, а так как пропускная способность насоса выше, то возникает эффект опорожнения входного патрубков насоса.

При этом давление на входе в насос снижается и, следовательно, увеличивается объем пузырьков с газом. Процесс продолжается до установления равновесного состояния, или же произойдет расслоение потока по диаметру горизонтальной трубы с дисперсной смесью в нижней его части и с воздухом в верхней, а в вертикальном — разрыв потока.

Характерным примером течения смеси с разрывами потока являются процессы в трубопроводе откачки с горизонтальными и вертикальными участками при избыточной производительности насоса откачки [16]. При этом, как показала съёмка, смесь в трубопроводе мелкодисперсная.

На рис. 6 представлена карта режимов течения при прокачке масловоздушной смеси в гидравлическом тракте откачки с шестеренным насосом при частоте вращения 100%. Расходная характеристика насоса приведена в координатах «частота вращения — объемный расход».

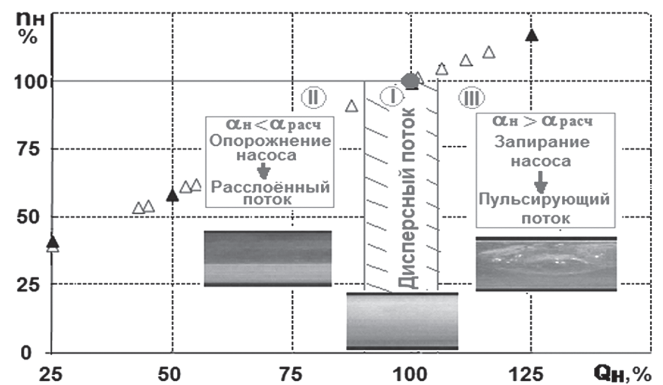


Рис. 6. Карта режимов течения масловоздушной смеси в тракте с шестеренным насосом

Течение масловоздушной смеси на режимах I, II, III может реализоваться на любой частоте вращения насоса в пределах его расходной характеристики.

Диагностическими признаками работы насоса в режиме динамического запираания могут быть пульсации давления за насосом с частотой до 100...200 Гц и увеличение тока в силовых обмотках электропривода насоса из-за его работы на двухкомпонентной рабочей среде (масловоздушная смесь и воздушные пузыри).

Выводы

1. В области рабочих режимов систем смазки ГТД масловоздушную смесь в заполненных трубопроводах системы откачки можно рассматривать как однокомпонентную гомогенную среду с соответствующим математическим аппаратом описания теплофизических свойств. Этот подход показал хорошую сходимость расчетов с экспериментом на статических и переходных режимах работы системы смазки.

2. Движущаяся в гидравлическом тракте откачки мелкодисперсная масловоздушная смесь (эмульсия) обладает свойствами упругой сплошной среды с гомогенной скоростью звука. Смесь формиру-

ется в масляной полости в результате процесса диспергирования одной фазы (воздуха) в другую (масло), при этом на диспергированных частицах дисперсной фазы (пузырьках воздуха) образуется адсорбционная стабилизирующая пленка (из масла), препятствующая коалесценции пузырьков и расслоению масловоздушной смеси.

3. Карта режимов течения масловоздушной смеси формируется пропускной способностью шестеренного насоса откачки, при этом на режимах опорожнения его входного патрубка может реализоваться расслоенное течение, а на режимах динамического запираания — пульсационное течение с образованием волн плотности и возбуждением в системе полигармонических колебаний.

4. Полученные результаты могут быть использованы для гидравлических расчетов трубопроводной сети систем смазки и ее агрегатов при проектировании, а также при анализе результатов исследований.

Библиографический список

1. *Поликовский В.И.* Самолетные силовые установки. — М.: Оборонгиз, 1952. — 600 с.
2. *Домотенко Н.Т., Кравец А.С.* Масляные системы газотурбинных двигателей. — М.: Транспорт, 1972. — 96 с.
3. *Бич М.М., Вейнберг Е.В., Сурнов Д.Н.* Смазка авиационных газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1979. — 176 с.
4. *Трянов А.Е., Гришанов О.А., Бутылкин С.В.* Проектирование систем суфлирования масляных полостей авиационных двигателей: Учебное пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2006. — 82 с.
5. *Трянов А.Е.* Конструкция масляных систем авиационных двигателей: Учебное пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2007. — 81 с.
6. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Машиностроение, 2008. Т.5. — 200 с.
7. *Лисицин А.Н.* Повышение эффективности проектирования масляных полостей опор ГТД на основе метода численного моделирования двухфазного течения: Дисс. ... канд. техн. наук. — Рыбинск: Рыбинский государственный авиационно-технологический университет им. П.А. Соловьева, 2015. — 128 с.
8. *Хаустов А.И.* Теоретическое исследование и испытание насосов нагнетательных систем летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2008. Т. 15. № 1. С. 70-76.
9. *Gurevich O., Gulienko A., Schurovskiy U.* Demonstration Systems of the «Electric» Gas Turbine Engine // 29th Congress ICAS, St. Petersburg, Russia, September 7-12, 2014. Paper no. ICAS2014_0218. 6 p.
10. *Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М.* Исследование гидродинамических процессов в системе смазки газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т.14. № 3-1. С. 250-261.
11. *Гулиенко А.И., Яновский Л.С., Щуровский Ю.М., Молоканов А.А.* Исследование течения масловоздушной смеси в электроприводной системе смазки перспективных ГТД // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 35-42.
12. *Гулиенко А.И., Яновский Л.С., Щуровский Ю.М., Молоканов А.А.* Особенности рабочего процесса в масляной полости опор ротора газотурбинного двигателя // VI Международная НТК «Проблемы химотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня»: Сборник избранных докладов. — М.: Граница, 2016. С. 38-46.
13. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения /Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. — 436 с.
14. *Чизхолм Д.* Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках / Пер. с англ. Б.Л. Кривошеина. — М.: Недра, 1986. — 204 с.
15. *Делайе Д., Гуо М., Ритмюллер М.* Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 424 с.
16. *Kanarachos S. and Flouros M.* The impact of flow inlet conditions on the two phase flow pattern and the heat transfer in a scavenge pipe of an Aero Engine bearing chamber sealed with brush seals // 5th International Gas Turbine Conference. 27-28 October 2010, Brussels, Belgium.
17. *Белов Г.О., Стадник Д.М.* Разработка методик расчета шестеренных насосов, обеспечивающих снижение их динамической нагруженности // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 7-14.
18. *Гликман Б.Ф.* Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. — М.: Машиностроение, 1979. — 253 с.
19. *Бошнятов Б.В.* Гидродинамика микропузырьковых газожидкостных сред // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 6. С. 156-160.
20. *Иванов И.Э.* Численное моделирование многофазных течений с большим содержанием дисперсной фазы // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 2. С. 62-70.
21. *Щуровский Ю.М.* Особенности математического моделирования системы смазки газотурбинных двигателей // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76776>

EXPERIMENTAL STUDY OF GTE LUBRICATING SYSTEM OIL-AIR MIXTURE PROPERTIES

Gulienko A.I.* , Shchurovskii Yu.M.**

Central Institute of Aviation Motors,
CIAM, 2, Aviamotornaya str., Moscow, 111116, Russia

* e-mail: goulienko-contrl@ciam.ru

** e-mail: shchurovsky@ciam.ru

Abstract

Lubricating system of the gas turbine engine rotor supports in many ways determines its operation reliability. The experience in developing aircraft GTEs lubricating systems accumulated by many manufacturers is associated with predominant employing of empirical and experimental techniques, and is not practically covered in literature. As a rule, the lubrication systems characteristics are being determined while operating with pure oil, and their recalculation onto the two-phase mixture may lead to overpower of the driving pumps motors and, as consequence, to their weight increase.

The article presents the analysis of the properties of two-phase mixtures pumped through the unit of the aircraft GTE lubrication system based on experimental data. This data was obtained at CIAM with the test bench for semi-natural simulation of lubrication system with oil chamber imitation, and installation for fine-dispersed oil-air mixture forming, where the mixture is formed by the air entrainment effect.

Using the results of oil-air mixture flow visualization, the article shows that in the area of the GTE lubrication systems operating modes the mixture may be considered as one-component homogenous media, possessing the properties of elastic continuum with homogenous sound velocity.

While air entering the exhausting duct the two-component flow of oil-air mixture and air-oil bubbles, clogging the pipe cross section and move relative to the oil-air mixture at low speed is formed.

Characteristics of a discharge gear pump, pumping the oil-air mixture, are affected not only by air and oil properties, but also by the structure formed by the pump throughput capacity.

It has been shown that in GTE lubrication systems a mode of emptying the exhaust gear pump inlet branch may occur with the possible realization of the stratified flow structure, as well as a dynamic locking mode in which a pulsating flow is formed with density waves forming and a polyharmonic fluctuations excitation in the system. Based on the experimental data, the air-oil mixture flow modes map was compiled.

The paper presents the relationships by which give possibility to calculate the thermo-physical properties of the two-phase mixture pumped in the tracts of the GTE lubrication systems. This approach showed good agreement of calculations with experiments in the lubrication system static and transient operation modes.

Keywords: lubrication system, oil-air mixture, flow modes map.

References

1. Polikovskii V.I. *Samoletnye silovye ustanovki* (Aircraft power plants), Moscow, Oborongiz, 1952, 600 p.
2. Domotenko N.T., Kravets A.S. *Maslyanye sistemy gazoturbinnnykh dvigatelei* (Oil systems of gas turbine engines). Moscow, Transport, 1972, 96 p.
3. Bich M.M., Veinberg E.V., Surnov D.N. *Smazka aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Lubrication of aircraft gas turbine engines), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 176 p.
4. Tryanov A.E., Grishanov O.A., Butylkin S.V. *Proektirovanie sistem suflirovaniya maslyanykh polostei aviatsionnykh dvigatelei* (Aircraft engines oil chambers breathing systems design), Samara, SGAU, 2006, 83 p.
5. Tryanov A.E. *Konstruktsiya maslyanykh sistem aviatsionnykh dvigatelei* (Aircraft engines oil systems structures), Samara, SGAU, 2007, 81 p.
6. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. *Avtomatika i regulirovanie aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok* (Automation and control of aircraft engines and power plants), Moscow, Mashinostroenie, 2008, vol. 5, 200 p.
7. Lisitsin A.N. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya maslyanykh polostei opor GTD na osnove metoda chislennogo modelirovaniya dvukhfaznogo techeniya* (Design efficiency increase of GTE oil chambers based on two-phase flow numerical simulation method), Doctor's thesis, Rybinsk, RSATU, 2015, 128 p.
8. Khaustov A.I. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2008, vol. 15, no. 1, pp. 70-76.
9. Gurevich O., Gulienko A., Schurovskiy U. Demonstration Systems of the "Electric" Gas Turbine Engine. *29th Congress ICAS, St. Petersburg, Russia, September 7-12, 2014*. Paper no. ICAS2014_0218, 6 p.
10. Gulienko A.I., Shchurovskii Yu.M. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2015, vol. 14, no. 3-1, pp. 250-261.

11. Gulienko A.I., Yanovskii L.S., Shchurovskii Yu.M., Molokanov A.A. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*, 2015, no. 10, pp. 35-42.
12. Gulienko A.I., Yanovskii L.S., Shchurovskii Yu.M., Molokanov A.A. *VI Mezhdunarodnaya NTK "Problemy khimotologii: ot eksperimenta k matematicheskim modelyam vysokogo urovnya". Sbornik izbrannykh dokladov*. Moscow, Granitsa, 2016, pp. 38-46.
13. Wallis G.B. *One Dimensional Two-Phase Flow*. McGraw-Hill; First Edition edition, 1969, 408 p.
14. Chisholm D. *Two-phase flow in pipelines and heat exchangers*. London, New York, Longman Higher Education, 1983, 304 p.
15. Delhaye J.M., Giot M., Rietmuller M.L. *Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering*. Washington, Hemisphere Pub. Corp., New York, McGraw-Hill, 1981, 525 p.
16. Kanarachos S. and Flouros M. The impact of flow inlet conditions on the two phase flow pattern and the heat transfer in a scavenge pipe of an Aero Engine bearing chamber sealed with brush seals. *5th International Gas Turbine Conference. 27-28 October 2010, Brussels, Belgium*.
17. Belov G.O., Stadnik D.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 7-14.
18. Glikman B.F. *Nestatsionarnye techeniya v pnevmogidravlicheskiykh tsepyakh* (Nonstationary flow in pneumo-hydraulic circuits), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 253 p.
19. Boshenyatov B.V. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 308, no. 6, pp. 156–160.
20. Ivanov I.E. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 62-70.
21. Shchurovskii Yu.M. *Trudy MAI*, 2017, no. 92, available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=76776>