

УДК 629.7.036.3

**Т.П. МИХАЙЛЕНКО, И.И. ПЕТУХОВ, ДУАИССИА ОМАР ХАДЖ АИССА,  
Д.А. НЕМЧЕНКО**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МАСЛОСИСТЕМЕ ГТД**

*Маслосистема авиадвигателя обеспечивает смазку и охлаждение подшипниковых узлов, поддерживая их работоспособность на всех эксплуатационных режимах в течение ресурсного времени. Практически в любом элементе маслосистемы движется не однофазная жидкость – масло, а смесь его с воздухом, что влияет на протекание теплогидравлических процессов в этих элементах. Статья посвящена рассмотрению вопроса моделирования теплогидравлических процессов в маслосистеме ГТД. Показана возможная структура двухфазного потока, приводятся карты режимов течения, рассматриваются особенности протекания теплогидравлических процессов в маслосистеме ГТД и направления по усовершенствованию подходов к их описанию.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, маслосистема, двухфазный поток, масло-воздушная смесь, карты режимов течения, теплогидравлические процессы.

### **Введение**

Надежная работа ГТД во многом определяется совершенством масляной системы (МС). Нарушения подачи масла к подшипникам и зубчатым зацеплениям могут привести к перегреву двигателя, разрушению подшипников, заклиниванию ротора, в итоге – к остановке или даже к разрушению двигателя.

Основными требованиями, предъявляемыми к системе смазки ГТД, являются [1, 2]:

- смазка трущихся поверхностей;
- отвод тепла, выделяющегося при трении и передающегося от соседних более нагретых деталей;
- защита трущихся поверхностей от коррозии и наклепа;
- удаление из узлов трения продуктов износа деталей и коксования масла;
- снижение шума в узлах трения и зубчатых зацеплениях.

Кроме указанных требований маслосистема должна обеспечивать эксплуатационную эффективность, легкость и простоту технического обслуживания, заданный ресурс, безопасность работы.

Повышение эффективности ГТД и развитие новых технологий в двигателестроении неизбежно ставит задачи по совершенствованию маслосистем. Перспективным направлением выступает здесь моделирование маслосистемы на этапе ее проектирования.

Преимуществом моделей является возможность определить расход и другие параметры масляно-воздушной смеси в любом месте

маслосистемы, численно исследовать влияние конструктивных доработок на эти параметры. Сложность моделирования маслосистемы связана с тем, что она состоит из разнородных с точки зрения теплогидравлических процессов частей. Постановка граничных условий для них в ряде случаев связана с описанием рабочего процесса примыкающих (сопряженных) элементов двигателя. Кроме этого, практически в любом элементе маслосистемы движется не однофазная жидкость – масло, а смесь его с воздухом, причем часть воздуха растворена в масле, что влияет на протекание теплогидравлических процессов.

### **1. Схемы маслосистем**

Маслосистема ГТД в общем случае состоит из масляного бака, масляного радиатора, внешних и внутренних трубопроводов, нагнетающих и откачивающих насосов, масляных фильтров, воздухоотделителя, суфлера, редуцирующих, обратных и предохранительных клапанов, форсунок и приборов контроля. Схема маслосистемы определяется назначением и типом ГТД [3]. Основные схемы приведены на рисунке 1.

В разомкнутой схеме масло после смазывания и охлаждения деталей выбрасывается в атмосферу. Разомкнутую маслосистему применяют в тех случаях, когда ресурс ГТД ограничен, цикл работы кратковременен. Она проще по сравнению с циркуляционной схемой, меньше по массе и габаритам.

В большинстве случаев применяют циркуляционную схему. В циркуляционных системах масло движется по замкнутому контуру

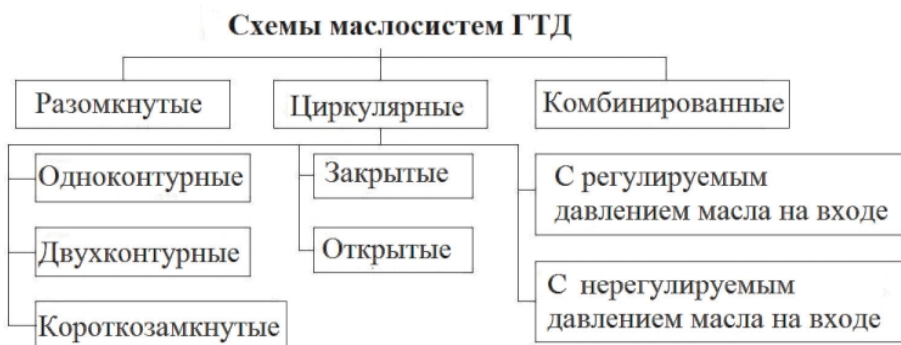


Рис. 1. Схемы маслосистем ГТД

и многократно используется для смазки и охлаждения узлов двигателя. Для обеспечения нормальной смазки и охлаждения возникает необходимость в высокой кратности циркуляции масла через двигатель. Подготовка масла к очередному циклу смазки сводится к его охлаждению, очистке от механических примесей, образовавшихся во время работы в двигателе, и отделению воздуха. Они значительно сложнее разомкнутых, но позволяют обеспечить смазку двигателя в течение многих часов работы с небольшим количеством масла [3].

Принципиальная схема циркуляционной маслосистемы представлена на рисунке 2.

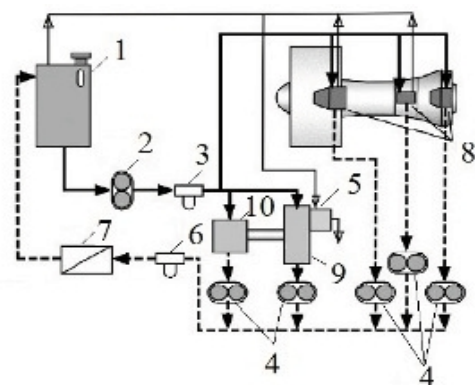


Рис. 2. Принципиальная схема циркуляционной маслосистемы ГТД:

- 1 – масляный бак; 2 – нагнетающий насос;
- 3,6 – фильтр; 4 – блок откачивающих насосов;
- 5 – суфлер; 7 – топливомасляный теплообменник;
- 8 – узлы трения двигателя; 9 – коробка приводов;
- 10 – раздаточная коробка

## 2. Режимы течения двухфазных сред

Режимы течения двухфазных сред в вертикальном восходящем потоке [4, 5] представлены на рисунке 3. Эта классификация режимов течения, будучи очень полезной, является в значительной мере качественной и часто весьма субъективной.

Пузырьковое течение (рис.3, а) – пузырьки распределены в сплошной жидкости.

Когда концентрация пузырьков при пузырьковом течении становится высокой, происходит слияние пузырьков и постепенно диаметр пузырьков приближается к диаметру трубы. Когда это происходит, устанавливается снарядный (пробковый) режим течения (рис.3, б) с характерной формой пузырей в виде снарядов (пробок), как это показано на рисунке.

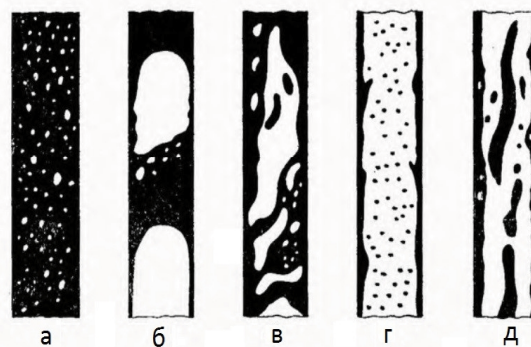


Рис. 3. Режимы течения двухфазных сред в вертикальном восходящем потоке:

- а – пузырьковое течение; б – снарядное или пробковое течение;
- в – вспененное течение; г – кольцевое течение;
- д – клочковато-кольцевое

Когда расход газа увеличивается, возрастает скорость движения пузырей в снарядном потоке, и, в конце концов, происходит их разрушение, вследствие чего возникает неустойчивый режим, так называемое вспененное течение (рис.3, в). При этом в трубах большого сечения имеет место колебательное движение жидкости вверх и вниз по трубе. В трубах малого сечения колебания могут не возникать, и может наблюдаться более плавный переход от снарядного течения к кольцевому (рис.3, г).

При кольцевом течении жидкость течет по стенке трубы в виде пленки, а газовая фаза движется в центре. Обычно некоторое количество жидкости движется в виде мелких капель в газовом ядре.

Когда расход жидкости увеличивается, возрастает концентрация капель в газовом ядре

кольцевого потока и, в конце концов, происходит слияние капель, приводящее к появлению в газовом ядре больших комков жидкости, такой режим можно охарактеризовать, как клочковато-кольцевое течение (рис.3, д). Он характеризуется высокими массовыми скоростями потоков.

Главное отличие горизонтальных и слабо наклоненных к горизонту каналов от вертикальных – в несимметрии гравитационных сил относительно оси канала. Это вызывает смещение паровой фазы к верхней образующей, а жидкой – к нижней в пузырьковом, снарядном, эмульсионном и дисперсно-кольцевом режимах, а также к появлению расслоенного и расслоенного волнового течения двухфазного потока [4, 5]. Волновой (или расслоенный волновой) наблюдается весьма часто, особенно в каналах большого сечения. Пузырьковый и снарядный режимы в горизонтальных каналах наблюдаются при меньших объемных паросодержаниях, чем в вертикальных. Эмульсионный режим в горизонтальных каналах сохраняет известные черты волнового движения, когда амплитуда волн соизмерима с диаметром канала. При этом жидкие перемычки (гребни волн) насыщены паровыми (газовыми) пузырьками, а паровые снаряды (впадины волн) содержат множество жидких капель, т.е. в целом структура потока достаточно однородная. Дисперсно-кольцевой режим течения в горизонтальных каналах даже при очень высоких скоростях газа отличается существенным различием толщин жидкой пленки на верхней и нижней образующих.

### 3. Карты режимов течения

Данные по режимам течения для определенной геометрии и определенного сочетания жидкостей могут быть представлены на графиках непосредственно через скорости, расходы и другие характеристики фаз [4]. На рисунке 4 представлена карта режимов течения для однокомпонентной жидкости в виде зависимости массовой скорости  $G$  и относительной энтальпии потока  $X$ , полученная для пароводяного потока при давлении 7,5 МПа. Несмотря на то, что такие графики полезны для обработки опытных данных, они ограничены определенным набором условий, при которых выполнялись исследования, и существует очевидная необходимость обобщать информацию о режимах течения так, чтобы ее можно было применить к любому сочетанию жидкостей, газов и жидкостей и к любой геометрии.

Для горизонтальных течений классической стала карта режимов течения Бейкера, приведенная на рисунке 5, который построил график зависимости параметра  $G \cdot x / \lambda$  от параметра

$(1-x) \cdot \lambda \cdot \phi / x$ , где  $G$  – массовая скорость,  $x$  – массовая доля газовой фазы в двухфазном потоке, и – параметры, зависящие от плотности, вязкости паровой (газообразной) и жидкой фаз, коэффициента поверхностного натяжения.

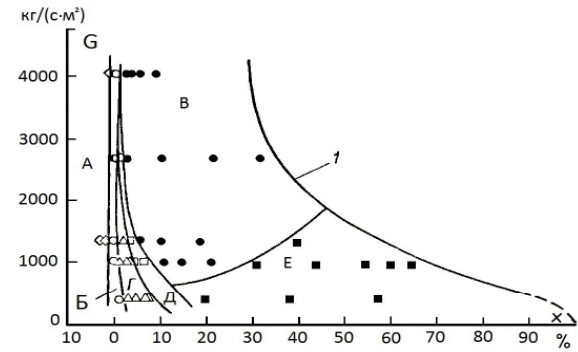


Рис. 4. Карта режимов для пароводяных смесей при давлении 7,5 МПа:  $\diamond$  – вода;  $\circ$  – пузырьковый;  $\square$  – снарядный;  $\triangle$  – вспененный;  $\times$  – клочковато-кольцевой;  $\bullet$  – кольцевой; А – вода; Б – пузырьковый; В – клочковато-кольцевой; Г – снарядный; Д – вспененный; Е – кольцевой; 1 – предел по кризису кипения для трубы длиной 3,66 м, внутренним диаметром 12,7 мм.

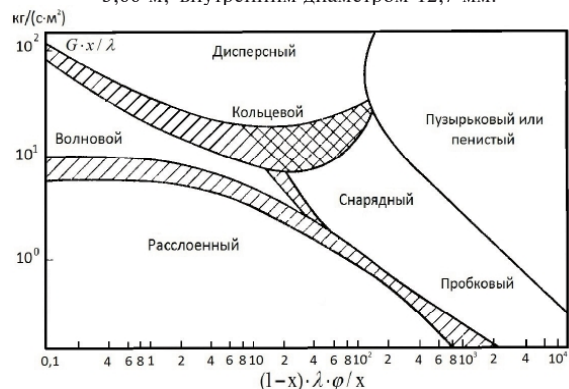


Рис. 5. Карта режимов течения Бейкера

Существуют и другие карты режимов течения, например, карта Шихта – для горизонтальных каналов или карта Хьюитта и Робертса – для вертикальных потоков.

Карты режимов течения больше носят качественный характер, так как режимы течения, действительно наблюдаемые в каналах, зависят от условий ввода фаз в канал, а также теплообмена со стенками канала.

### 4. Особенности двухфазного течения масляно-воздушной смеси с учетом взаимного влияния фаз

При проектировании маслосистемы двигателя возникает необходимость расчета точного расхода смеси и потерь давления в трубопроводах, расчета теплообмена между смесью и элементами системы смазки, расчета критических режимов течения смеси в трубопроводах и местных сопротивлений.

Практически в любом элементе маслосистемы движется не однофазная жидкость – масло, а смесь его с воздухом, причем часть воздуха растворена в масле. Состав раствора зависит от вида масла, его температуры и давления и может отличаться от равновесного при быстром изменении этих параметров. Всегда нуждаются в оценке вопросы учета концентрации паров масла в воздухе, отличия состава паровой и жидкой фаз масла. Последнее, например, может приводить к изменению состава масла в процессе эксплуатации из-за уноса воздухом легкокипящих компонентов. Менять свойства масла может также окисление его компонентов при контакте с воздухом.

Следует оценивать также влияние паров воды, содержащихся в исходном воздухе и продуктах сгорания, на свойства многокомпонентной системы. В отличие от воздуха, вода при параметрах рабочего процесса маслосистемы может претерпевать фазовый переход. Все это в совокупности с существенным изменением теплофизических свойств масла в ходе рабочего процесса также усложняет задачу моделирования маслосистем.

Структура двухфазного потока меняется по всему контуру маслосистемы. В откачиваемой магистрали с объемным газосодержанием потока от 0,7 до 0,1 возможны пенный, расслоенный, снарядный или пузырьковый режимы течения. В нагнетательном контуре – пузырьковый режим течения. В суфлирующей магистрали поток имеет, как правило, дисперсную или дисперсно-кольцевую структуру с газосодержанием, близким к единице. Эту особенность нужно учитывать при тепловом и гидравлическом расчете, поскольку на перепад давления и теплоотдачу влияют не только газосодержание и теплофизические свойства фаз, но и режим течения (структура) двухфазного потока.

В связи с этим при расчете маслосистемы вряд ли продуктивно разделение расчетов на тепловой и гидравлический. Даже при чисто жидкостном диабатном течении необходимо учитывать изменение вязкости масла с температурой. Для двухфазного потока изменение температуры и давления меняют не только теплофизические свойства фаз, но также газосодержание, плотность и скорость смеси. Это прямо влияет на гидравлические потери и условия теплообмена.

Кроме того, при определенных сочетаниях параметров может меняться структура двухфазного потока, влияние которой весьма существенно. Известные карты режимов течения [4] носят лишь качественный характер и получены, в основном, при анализе течения водовоздуш-

ных и пароводяных потоков в трубах. Поэтому вопросы идентификации структуры двухфазной масляно-воздушной смеси даже для прямолинейных участков и установившегося течения не определены. Конфигурация трубопроводов маслосистемы с поворотными участками различной ориентации относительно силы тяжести, влияние гравитации из-за относительно малой скорости потока в отдельных каналах еще больше осложняют эту задачу.

Еще одна особенность двухфазных потоков связана с низкими значениями равновесной скорости звука. Для отдельных структур это может качественно изменить характер течения уже при скоростях потока 10–20 м/с. Отдельного исследования требуют также вопросы образования двухфазного потока при смешении воздуха и масла, разделения смеси в криволинейных каналах и вращающихся элементах центробежных сепараторов фаз.

Перечисленные задачи могут решаться с использованием экспериментальных данных и расчетных методов для различных режимов течения двухфазной смеси.

Исследование процессов теплообмена масляно-воздушной смеси в системе смазки двигателя летательного аппарата является одной из актуальных технических задач. Математическое моделирование сложных процессов основывается на рассмотрении системы уравнений, содержащей фундаментальные уравнения математической физики, начальные и граничные условия. В рассматриваемых случаях все сводится к моделированию внутренних течений двухфазных потоков в каналах различной геометрии, жидкая и газообразная фаза которых обмениваются массой, теплотой и количеством движения. Разработка математической модели, программная реализация численных методов решения задач гидродинамики и теплообмена двухфазных потоков представляет самостоятельную научную задачу. На основании результатов численного исследования можно будет делать выводы относительно эффективности того или иного элемента системы и затем принимать дальнейшие решения по улучшению работы маслосистемы. Результаты математической модели могут быть использованы при проектировании и оптимизации системы смазки ГТД.

На данный момент известны методики тепловых и гидродинамических расчетов однофазного течения в маслосистеме [6], разработаны специальные программные комплексы, позволяющие анализировать распределение расхода, давления и температуры масла на различных участках системы смазки. Однако такой подход приводит к большим погрешностям в виду того,

что параметры потока в значительной степени определяются свойствами и характером поведения компонентов в смеси.

### Заключение

Проведенный обзор литературы показывает актуальность работ по модернизации маслосистем ГТД в связи с необходимостью повышения надежности и улучшения эксплуатационных характеристик двигателя.

На данный момент известны методики тепловых и гидродинамических расчетов однофазного течения в маслосистеме. Однако такой подход приводит к большим погрешностям ввиду того, что параметры потока во многом определяются газосодержанием, концентрацией паровой и жидкой фаз масла. В процессе эксплуатации двигателя происходит изменение состава масла вследствие окисления его компонентов, при уносе легкокипящих составляющих воздухом. В результате изменяется структура потока, меняются теплофизические свойства масляно-воздушной смеси. Например, при переходе от пузырькового к пробковому режиму течения вязкость смеси снижается, тем самым ухудшая смазку опор трения, увеличение газосодержания приводит к ухудшению отвода теплоты от узлов трения в масло.

Исследования по представленным направлениям требуют теоретических подходов к решению задач, применение современных программных пакетов для проведения численных экспериментов, наличие стендовой базы. В частности, разработка методики теплогидравлического моделирования маслосистемы с целью оптимизации ее работы и упрощения проектирования является одной из перспективных задач. Данная тема изучена мало, несмотря на широкий ряд существующих тепловых

моделей для однофазной жидкости и моделей отдельных элементов системы.

Вопрос идентификации режимов течения масляно-воздушного потока на различных участках системы уже решается, но единой методики расчетов пока нет. Поэтому актуальной является разработка методики расчета процессов теплообмена и потерь давления при тении масляно-воздушной смеси в трубопроводах и элементах системы смазки.

### Литература

1. Иноземцев А. А. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. Системы [Текст] / А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. - М.: Машиностроение, 2008. - Т. 5. - 200с.
2. Домотенко Н. Т. Масляные системы газотурбинных двигателей [Текст] / Н. Т. Домотенко, А. С. Кравец. - М.: Транспорт, 1972. - 96 с.
3. Бич М. М. Смазка авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / М. М. Бич, Е. В. Вейнберг, Д. Н. Сурнов; под ред. Г. С. Скубачевского. - М.: Машиностроение, 1979. - 176с.
4. Баттерворс Д. Теплопередача в двухфазном потоке [Текст] : пер. с англ. А. В. Ягова / Д. Баттерворс; под ред. Д. А. Лабунцова. - М.: Энергия, 1980. - 328с.
5. Лабунцов Д. А. Механика двухфазных систем [Текст] : учеб. пособие для вузов / Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов - М.: Изд-во МЭИ, 2000. - 374 с.
6. Yaguo Lu Numerical simulation of aero engine lubrication system [Text] / Lu Yaguo, Liu Zhenxia, Huang Shengqin // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009. - Vol. 131. - P. 34-36

Поступила в редакцию 01.06.2016

### Т.П. Михайленко, І.І. Петухов, Дуаіссіа Омар Хадж Аісса, Д.О. Немченко. Особливості моделювання теплогідравлічних процесів у маслосистемі ГТД

*Маслосистема авіадвигуна забезпечує змащення і охолодження підшипникових вузлів, підтримуючи їх працездатність на всіх експлуатаційних режимах протягом ресурсного часу. Практично в будь-якому елементі маслосистеми рухається не однофазна рідина – масло, а суміш його з повітрям, що впливає на протікання теплогідравлічних процесів в цих елементах. Стаття присвячена розгляду питання моделювання теплогідравлічних процесів в маслосистемі ГТД. Показана можлива структура двофазного потоку, наводяться карти режимів течії, розглядаються особливості протікання теплогідравлічних процесів в маслосистемі ГТД і напрямки по удосконаленню підходів до їх описання.*

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, маслосистема, двофазний потік, маслоповітряна суміш, карти режимів течії, теплогідравлічні процеси.

*T.P. Mykhailenko, I.I. Petukhov, Douaissia Omar Hadj Aissa, D.A. Nemchenko. Features of the thermalhydraulic processes simulation in the GTE oil system*

*The aircraft engine oil system provides lubrication and cooling of bearing assemblies, supporting their efficiency in all operational modes during resource time. Almost any element of the oil system is not moving a single-phase fluid (oil), but mix it with air, which influence on the thermal-hydraulic processes in these elements. The article is devoted to consideration of the simulation of the thermalhydraulic processes in the oil system of turbine engines. Shows a possible structure of two-phase flow, there are maps of the flow regimes, discusses the features of the flow thermal-hydraulic processes in the GTE oil system and approaches to improvement of thermal-hydraulic processes description.*

**Key words:** *gas turbine engine, the engine oil system, two-phase flow, oil-air mixture, flow pattern diagrams, thermal-hydraulic processes.*