

Лисицин Александр Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
МАСЛЯНЫХ ПОЛОСТЕЙ ОПОР ГТД  
НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ**

Специальность:

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Научный руководитель:

Богданов Василий Иванович, доктор технических наук, эксперт НПО «Сатурн»

Официальные оппоненты:

Белоусов Анатолий Иванович, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева (Национальный исследовательский университет), профессор кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов».

Нестеренко Валерий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), доцент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» факультета «Двигатели летательных аппаратов».

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Защита состоится 29 декабря 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53, ауд. 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева», [www.rsatu.ru](http://www.rsatu.ru)

Автореферат разослан 28 октября 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Надеждин Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

При разработке современных авиационных двигателей наряду с формированием конструктивного облика проточной части, необходимо обращать особое внимание на проектирование опор роторов, отвечающих всем требованиям для перспективных авиационных газотурбинных двигателей.

Непрерывное совершенствование двигателей летательных аппаратов диктует тенденцию увеличения ресурса, снижения массы и габаритов авиационного двигателя. Ресурс двигателя в значительной степени зависит от ресурса подшипников, а также маслосистемы в целом. В свою очередь, ресурс подшипников напрямую зависит от качества смазывания и степени охлаждения элементов подшипника. Поэтому для обеспечения благоприятных условий работы подшипника необходимо подавать достаточное количество масла для смазки и охлаждения. С другой стороны ужесточающиеся требования к массогабаритным и эксплуатационным характеристикам двигателя требуют уменьшения размеров маслосистемы и количества масла, используемого для смазки и охлаждения подшипников при увеличении их ресурса.

В идеальной опоре подаваемое масло выполняет функцию смазки и охлаждения, после чего сразу попадает в зону откачки и откачивается из полости маслокартера. Количество масла, находящегося в идеальной опоре должно быть минимальным. В реальной конструкции не весь объём жидкости, подающийся в полость маслокартера, немедленно удаляется из полости. Причиной этому может стать несколько факторов: недостаточная производительность откачивающих систем, нерациональный выбор геометрии маслокартера или неправильно подобранный объём полости.

В настоящее время проектирование масляных полостей опор ГТД осуществляется на базе опыта предшествующих разработок, а работоспособность конструкции отрабатывается в процессе длительных доводочных испытаний. В России основные требования по проектированию масляных полостей опор ГТД изложены в ОСТ 1 00969-80 «Системы масляные авиационных ГТД». Однако в стандарте не описаны пути и методы устранения недостатков проектирования, что, в некоторых случаях, приводит к дефектам, которые возможно устранить только путем длительных доводочных испытаний. Данный подход приводит к серьёзным временным и финансовым затратам. При этом ситуацию осложняет отсутствие современных инструментов анализа распределения масла в полости опоры.

Для устранения наиболее часто встречающихся дефектов, а также уменьшения массы и сокращения сроков доводки изделия необходима разработка способа предупреждения дефектов с использованием верифицированного инст-

румента, позволяющего спроектировать маслосистему с оптимальными массогабаритными характеристиками на основе численного моделирования.

**Цель работы:** оценка возможности повышения эффективности проектирования и последующей доводки масляных полостей опор ГТД путем использования метода численного моделирования двухфазного течения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- выполнить анализ существующих методов численного моделирования и экспериментальных исследований двухфазного течения применительно к опоре ГТД;
- на основе упрощенной геометрии маслокартера разработать способ предупреждения дефектов в масляных полостях опор ГТД путем использования численного моделирования двухфазного течения;
- с помощью разработанного способа исследовать распределение объема жидкости в имитаторе опоры ГТД, а также экспериментально установить зависимости изменения стационарного объема масла от режимов работы двигателя и параметров маслосистемы;
- провести гидродинамический анализ двухфазного течения в различных вариантах маслокартера авиационного ГТД с целью повышения надежности маслосистемы путем определения возможных дефектов.

#### **Научная новизна**

- Доказана возможность сокращения сроков и объемов доводки масляных полостей опор ГТД за счет использования численного моделирования двухфазного течения.
- Получено критериальное уравнение, позволяющее оценить объем масла, постоянно присутствующий в опоре во время работы двигателя.
- Разработан способ предупреждения дефектов в масляных полостях опор ГТД путем использования численного моделирования двухфазного течения.

#### **На защиту выносятся:**

- способ предупреждения дефектов в масляных полостях опор ГТД путем использования численного моделирования двухфазного течения.
- критериальное уравнение оценки объема масла, постоянно присутствующего в опоре во время работы ГТД;
- экспериментально определенные зависимости изменения стационарного объема масла в опоре от параметров маслосистемы и режимов работы двигателя.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

- на основе способа предупреждения дефектов в масляных полостях опор ГТД разработана методика численного моделирования двухфазного течения в полости опоры, которая может быть применена на начальном этапе проектирования опор ГТД с целью предупреждения дефектов и сокращения длительных доводочных испытаний;
- результаты численного моделирования двухфазного течения показывают распределение масла и масловоздушной смеси в объеме маслокартера опоры ГТД, что позволяет корректировать конструкцию опоры, начиная с ранних этапов проектирования.

**Достоверность полученных результатов** определяется экспериментальными исследованиями с применением сертифицированного измерительного оборудования, корректным использованием методов и средств численного моделирования, соответствием результатов расчетов экспериментальным данным.

**Апробация работы.** Основные результаты исследования были представлены на международной конференции «Авиация и Космонавтика-2012» (МАИ, г. Москва, 2012 г.), на 11-й международной научно-технической конференции «Климовские чтения-2013» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.), на 12-й международной конференции «Авиация и Космонавтика-2013» (МАИ, г. Москва, 2013 г.), на всероссийской пользовательской конференции «ANSYS 2014» (г. Москва, 2014 г.).

#### **Личный вклад автора**

Автором разработан и верифицирован способ предупреждения дефектов в масляных полостях опор ГТД путем использования численного моделирования двухфазного течения, проведены все расчетные и экспериментальные исследования ряда маслокартеров, выполнено обобщение результатов и сформулированы выводы по работе.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 работ, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК и 4 тезисов докладов.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 128 страниц, которые содержат 77 рисунка, 82 наименования литературы, три приложения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проанализированы проблемы проектирования маслокартеров и маслосистем опор ГТД. Были рассмотрены основные характеристики и

основные этапы проектирования опор ГТД, проанализированы существующие схемы опор, а также был проведен анализ численных и экспериментальных методов моделирования многофазных течений. Анализ литературных источников выполнен на основе работ Зрелова В. А., Балякина В. Б., Равиковича Ю. А., Chandra B. W., Simmons K., Pickering S. и др. Рассмотрены основные методы, используемые для моделирования двухфазных течений в различных конструкциях, а также основные методы экспериментальных исследований маслокартеров опор ГТД. Показано, что большое количество задач, связанных с численным моделированием двухфазных сред, являются узконаправленными и отсутствуют сведения о моделировании комплексного взаимодействия масла с элементами опоры. Также определено, что основными экспериментальными исследованиями, проводимыми за рубежом, являются исследования по определению характера течения масловоздушной среды в полостях опор ГТД. В России основные требования по проектированию масляных полостей опор ГТД изложены в ОСТ 1 00969-80 – системы масляные авиационных ГТД, в котором наиболее важными требованиями являются:

- 1) застойные зоны в масляных полостях опор, как во время работы двигателя, так и при стоянке самолета должны быть исключены (п. 2.3.5.);
- 2) система откачки масла должна обеспечивать отвод всего подаваемого в него масла при работе двигателя на всех режимах (п. 3.4.1.);
- 3) при недостаточном хладоресурсе в высокотемпературных двигателях должны применяться средства, исключаящие барботаж масла в полостях опор (п. 2.4.6.).

Однако в требованиях по проектированию не указаны пути и методы устранения недостатков проектирования, поэтому возникающие проблемы исключаются путем длительных доводочных испытаний. Анализ выполненных работ по проблеме исследования выявил то, что существующие на сегодняшний день методы проектирования, авиационных ГТД не учитывают распределение масла в полости опоры и в некоторых случаях приводят к дефектам, решаемым только на этапе доводки двигателя. Для решения поставленных проблем необходима разработка способа предупреждения дефектов с использованием численного моделирования на этапе проектирования ГТД. Это станет возможным, благодаря проведению комплекса экспериментальных и расчетных исследований по созданию способа предупреждения дефектов. На основании проведенного анализа работ были получены экспериментальные данные, которые использовались на этапе верификации, а также рекомендации по численному моделированию узкого круга задач.

**Во второй главе** представлено описание разработанного способа предупреждения дефектов. Для создания способа было проведено численное моделирование двухфазного течения жидкость/газ с использованием результатов экс-

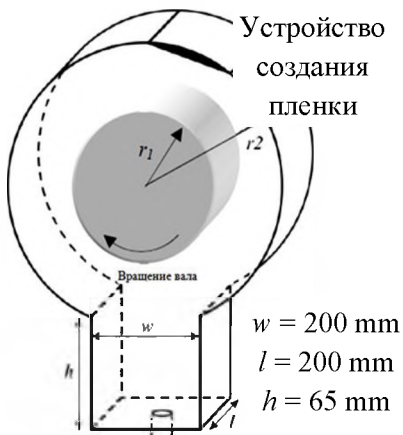


Рисунок 1 – Упрощенная геометрия маслокартера

периментальных исследований, проведенных в Ноттингемском университетском технологическом центре «Системы трансмиссий и приводов газотурбинных двигателей». Типичными физическими процессами, протекающими в опорах ГТД, являются: ламинарное/турбулентное течение пленки жидкости; разрыв плёнки жидкости на капли; взаимодействие газовой и жидкой фазы на границе свободной поверхности; взаимодействие масла с вращающимися поверхностями ротора. Для изучения подобного рода явлений была использована упрощенная геометрия маслокартера, представленная на рисунке 1. Выбор данной задачи исследования обусловлен следующим: возможностью моделирования основных физических процессов в маслокартере; относительно простой геометрией модели; наличием экспериментальных данных. Результатом измерений в эксперименте служил объем воды  $V_R$ , постоянно присутствующий в полости во время работы установки. Для верификации способа предупреждения дефектов путем использования численного моделирования необходимо выбрать модель многофазного течения (рисунок 2).

Упрощенная геометрия маслокартера, представленная на рисунке 1. Выбор данной задачи исследования обусловлен следующим: возможностью моделирования основных физических процессов в маслокартере; относительно простой геометрией модели; наличием экспериментальных данных. Результатом измерений в эксперименте служил объем воды  $V_R$ , постоянно присутствующий в полости во время работы установки. Для верификации способа предупреждения дефектов путем использования численного моделирования необходимо выбрать модель многофазного течения (рисунок 2).

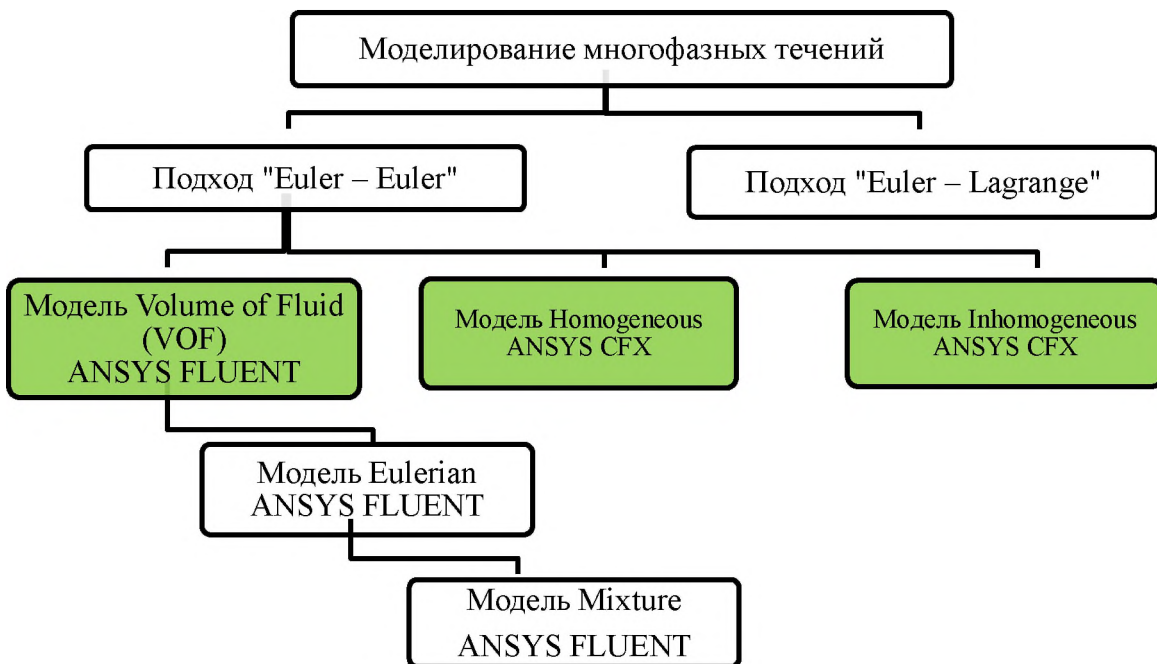


Рисунок 2 – Обоснование выбора модели многофазного течения

Существуют два подхода к численному моделированию многофазных течений «Euler – Euler» и «Euler – Lagrange». Для первого подхода свойственно моделирование двухфазного течения как единого потока с границей раздела фаз. Для второго подхода характерно разделение на сплошной поток и дискрет-

ные частицы. Согласно анализу физических процессов в опорах ГТД, в полости маслокартера присутствует взаимодействие жидкости и газа на границе раздела фаз, поэтому для моделирования процесса рационально использовать подход «Euler – Euler». Наиболее пригодными для моделирования процессов, протекающих в масляных полостях, являются модель VOF, реализованная в программном пакете ANSYS FLUENT, а также модели Homogeneous и Inhomogeneous, реализованные в программном пакете ANSYS CFX, так как для моделей Mixture и Eulerian необходимо иметь подробное представление о структуре многофазной среды (величина диаметра фракций). На примере экспериментальной геометрии маслокартера проведена серия расчетов на различных моделях многофазного течения. Наиболее близкие к эксперименту результаты показали расчеты с использованием модели многофазного течения VOF, реализованной в программном пакете ANSYS FLUENT (разница между расчетом и экспериментом составила 9% при погрешности для других моделей в 19 и 30%). Далее была проведена серия расчетов упрощенной геометрии маслокартера на различных режимах работы. Результаты расчетов, представленные на рисунке 3, согласуются с экспериментальными данными.

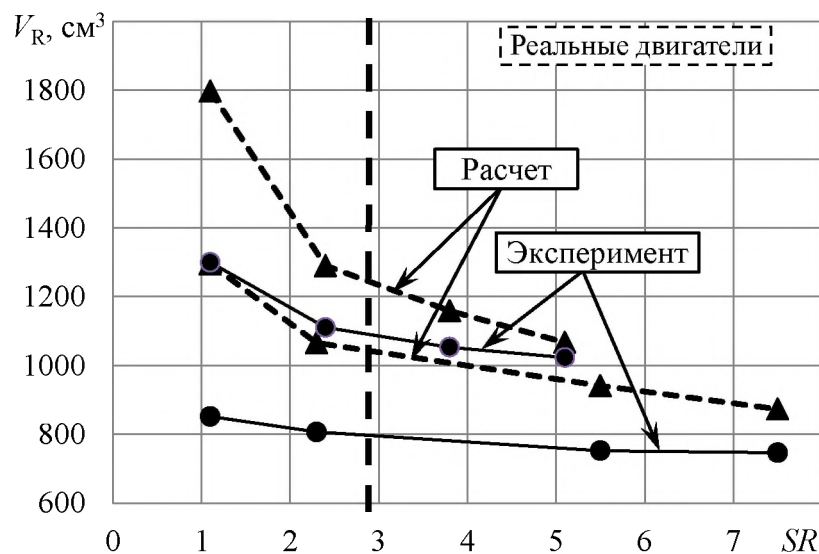


Рисунок 3 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

На рисунке 3  $SR$  – коэффициент откачки, равный отношению общего объемного расхода на выходе из картера (воздух + вода) к объемному расходу жидкости на входе в картер. Вследствие того, что в полость маслокартера, помимо масла, попадает большое количество воздуха, необходимого для наддува уплотнений, а также думисных полостей в реально работающих двигателях коэффициент откачки  $SR > 3$ . На рисунке 3 для реальных двигателей ( $SR > 3$ ) наблюдается удовлетворительная сходимость с экспериментальными данными, что свидетельствует о том, что предложенная методика численного моделирования имеет удовлетворительную для практического применения степень точ-



ности полученных результатов. В качестве рабочей жидкости была выбрана вода по причине того, что физические свойства воды при комнатной температуре сходны со свойствами масла Mobil Jet Oil II при температуре 150°C. Плотность воды при 20°C составляет порядка 1000 кг/м<sup>3</sup>, а плотность масла при 150°C составляет порядка 970 кг/м<sup>3</sup>. Вязкость воды при 20°C и масла при 150°C также схожи.

На основании проведенного анализа предлагается проведение численного моделирования по следующему регламенту (рисунок 4):

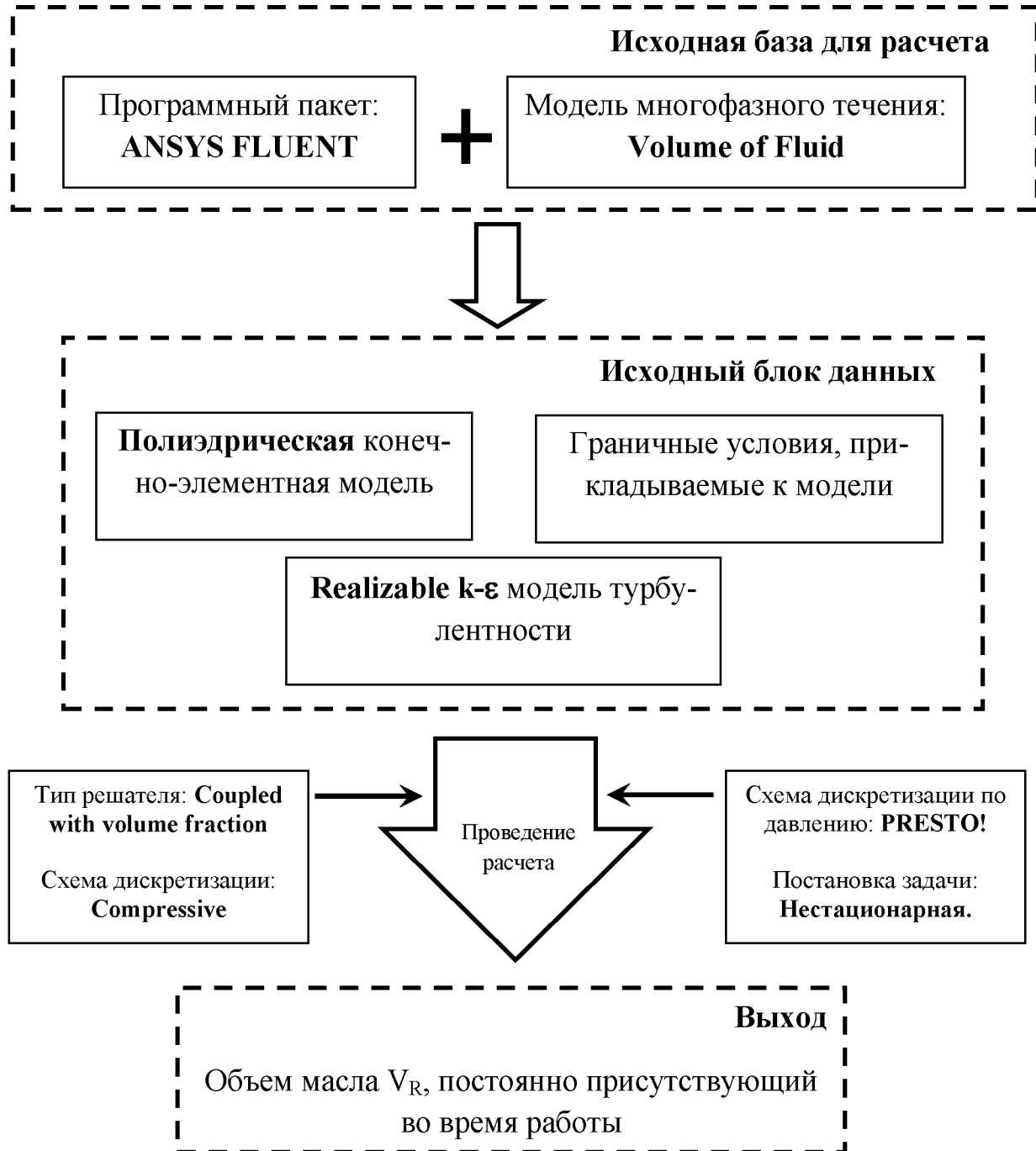


Рисунок 4 – Блок-схема разработанного способа численного моделирования

В третьей главе приведены результаты численных и экспериментальных исследований двухфазного течения на установке – имитаторе опоры ГТД, созданной на ОАО «НПО «Сатурн», на различных режимах работы. Результатом исследований служила зависимость объема масла, стационарно присутствующего во время работы установки, от режимных параметров – расхода масла на входе в опору, а также частоты оборотов ротора. Зависимости представлены на рисунке 5.

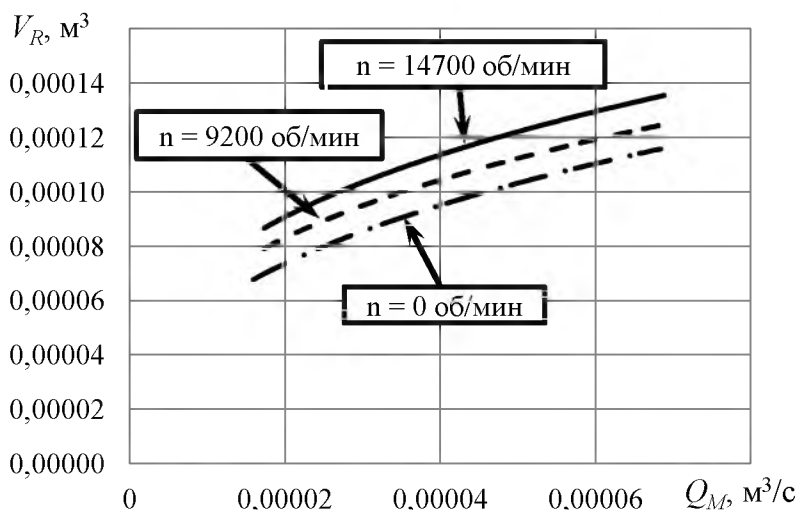


Рисунок 5 – Зависимость  $V_R$  от расхода масла на входе при различных частотах оборотов ротора

Объем масла увеличивается при увеличении частоты оборотов ротора, а также увеличении расхода масла, подаваемого на вход.

Для установления экспериментальной зависимости объема масла  $V_R$  от геометрических и режимных параметров системы была построена зависимость относительного свободного объема маслокартера  $\bar{V}_{СВ}$  от относительного времени пребывания масла в опоре  $\theta$  (рисунок 6).

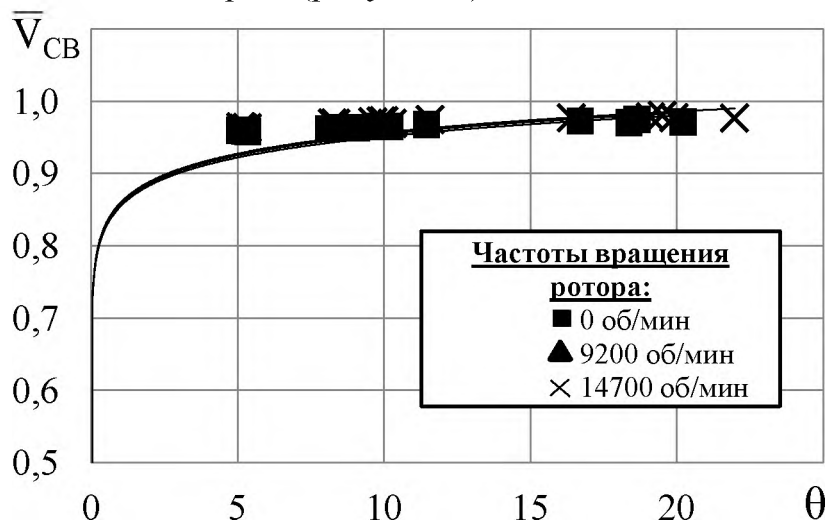


Рисунок 6 – Зависимость относительного свободного объема от относительного времени пребывания

$$\bar{V}_{CB} = \frac{V - V_R}{V},$$

где  $V$  – объем маслокартера,  $V_R$  – объем масла, стационарно присутствующий во время работы.

$$\theta = \frac{\tau}{t},$$

где  $\tau$  – среднее время пребывания масла в опоре,  $t$  – время разрушения масляной пены.

$$\tau = \frac{V}{Q_M},$$

где  $V$  – объем маслокартера,  $Q_M$  – объемная прокачка масла.

Затем были определены значения данных параметров для различных геометрий маслокартера: упрощенной геометрии маслокартера с различными глубинами маслоборника и аналогичной геометрии установки – имитатора опоры ГТД, созданной на НПО «Сатурн». Анализ получившихся зависимостей показал совпадение характера кривых в зависимости от частоты оборотов ротора (отклонение максимальных значений параметров меньше 1 %). Следовательно, можно сделать вывод о том, что вышеуказанные параметры не зависят от частоты вращения ротора. Зависимость стационарного объема масла от геометрических и режимных параметров будет выглядеть следующим образом:

$$V_R = V(0,16 - 0,043 \cdot \ln \theta).$$

На основе геометрии модуля-имитатора опоры ГТД была построена конечно-элементная модель и проведена серия расчетов на различных режимах работы установки. Результаты расчетов, представленные на рисунке 7, согласуются с экспериментальными данными.

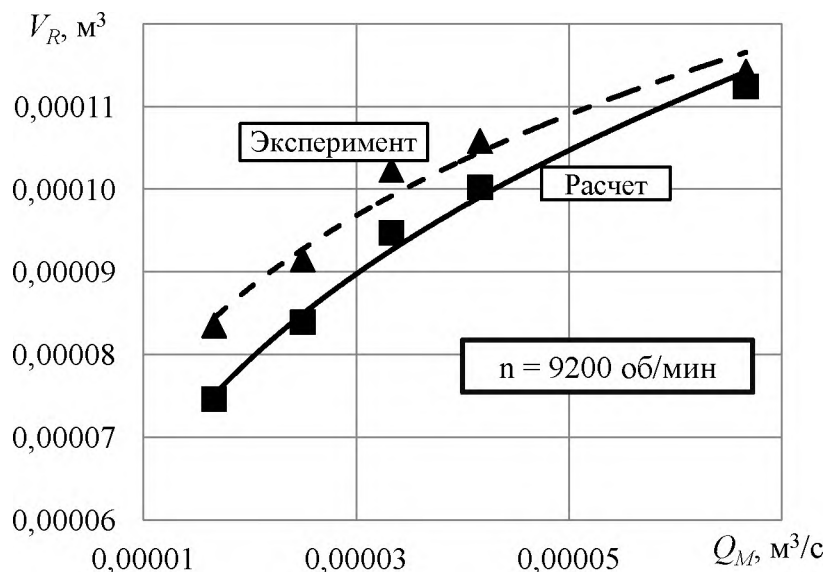


Рисунок 7 – Сравнение расчетных и экспериментальных данных

В четвертой главе выполнен гидродинамический анализ двух вариантов маслокартера задней опоры авиационного ГТД: в первом варианте (рисунок 8) оценивалась подача масла на подшипники; во втором варианте (рисунок 11) проведен анализ распределения масловоздушной смеси и эффективность отвода масла из полости маслокартера. Анализ проводился с целью повышения надежности маслосистемы путем определения возможных дефектов в имеющейся конструкции с помощью численного моделирования двухфазного течения.

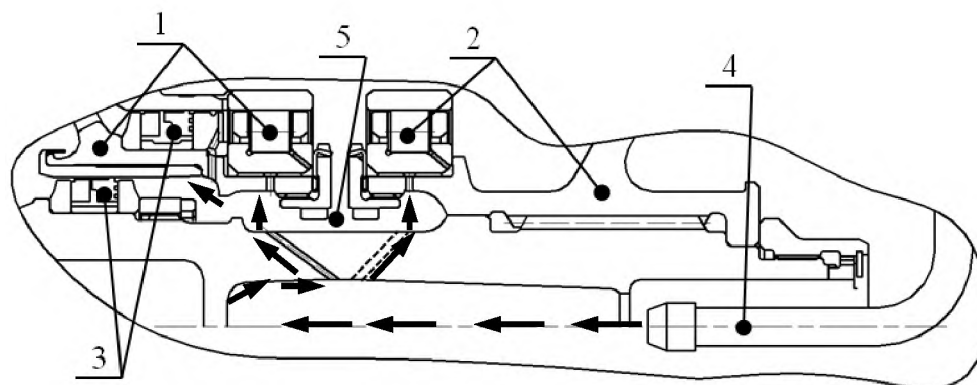


Рисунок 8 – Первый вариант конструкции маслокартера

(1 - вал каскада высокого давления с роликовым подшипником, 2 - вал каскада низкого давления с роликовым подшипником, 3 - торцевые уплотнения, 4 - форсунка подачи масла в полость вала, 5 - полость маслокартера)

Для первого варианта конструкции маслокартера результатом расчетов является сопоставление значения прокачки масла через подшипник со значениями, имеющимися на двигателе, а также характер распределения масла в маслокартере. Недостатком данной конструкции является наличие скопления масла в полости перед контактным уплотнением, что может на некоторых режимах привести к нарушению герметичности уплотнения и попаданию масла в соседнюю полость. Для устранения

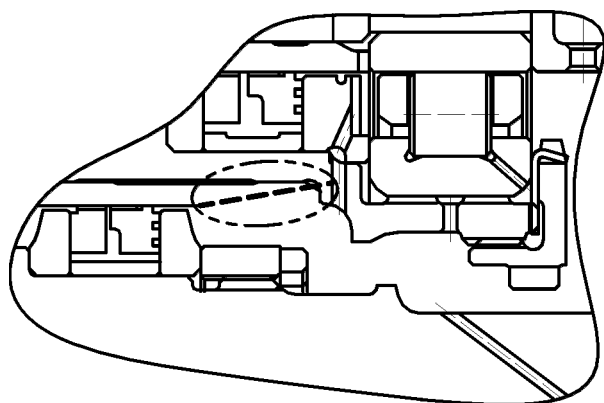


Рисунок 9 – Мероприятия по оптимизации геометрии

данного недостатка рекомендовано выполнение контактной втулки под углом  $5^\circ$  и выполнения скоса в отверстиях, выполненных в цапфе (рисунок 9). Далее был проведен расчет гидродинамики двухфазного течения в маслокартере с внедренными мероприятиями, показанными на рисунке 9. По результатам расчетов можно сделать вывод об отсутствии масла с полости перед контактным уплотнением. Распределение масла в полости опоры с учетом внедрения мероприятий и без учета представлены на рисунке 10.

Далее был проведен расчет гидродинамики двухфазного течения в маслокартере с внедренными мероприятиями, показанными на рисунке 9. По результатам расчетов можно сделать вывод об отсутствии масла с полости перед контактным уплотнением. Распределение масла в полости опоры с учетом внедрения мероприятий и без учета представлены на рисунке 10.

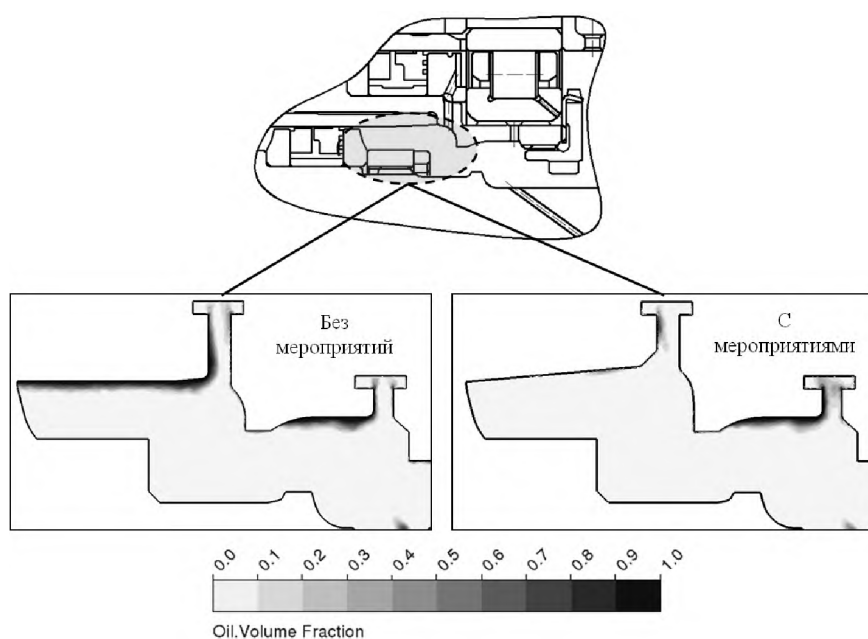


Рисунок 10 – Распределение масла в полости маслокартера

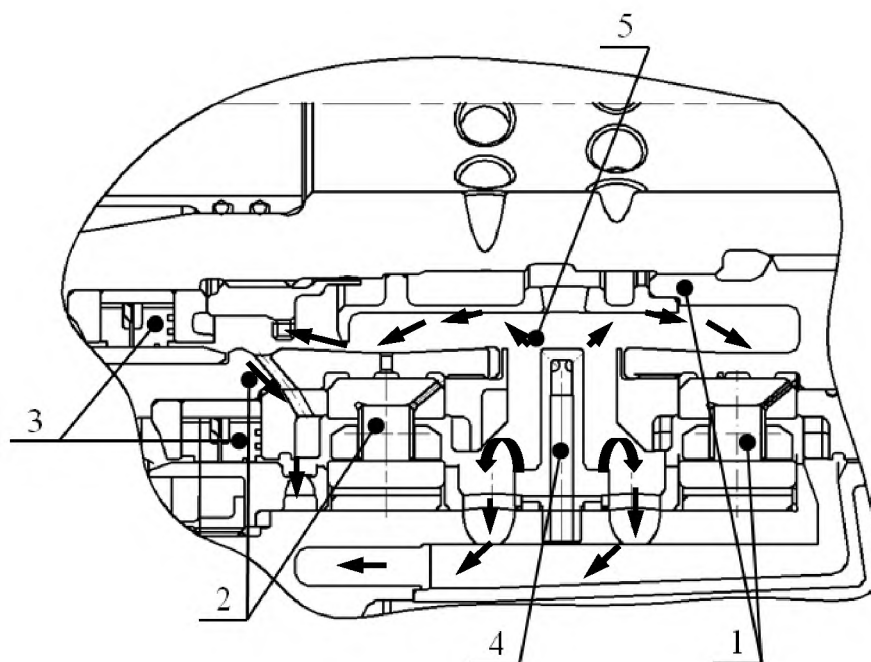


Рисунок 11 – Второй вариант конструкции маслокартера

(1 - вал каскада высокого давления с роликовым подшипником, 2 - вал каскада низкого давления с роликовым подшипником, 3 - торцевые уплотнения, 4 - форсунка подачи масла в полость картера, 5 - полость маслокартера)

Для второго варианта конструкции маслокартера результатом расчетов является определение стационарного объема масла  $V_R$ . На начальном этапе для предварительной оценки объема масла  $V_R$  рекомендуется использование зависимости, полученной в главе 3. Проведя расчеты с помощью вышеуказанной зависимости, стационарный объем масла составил  $V_R = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ . Относительный свободный объем маслокартера составил  $\bar{V}_{\text{св}} = 0,75$ . Это свидетельствует о том, что 25% объема маслокартера занято маслом, и существует большая веро-

ятность образования дефектов, связанных с течью масла через уплотнения, а также ухудшением теплового состояния маслокартера. Для более точного определения стационарного объема масла, а также определения проблемных мест в имеющейся конструкции необходимо дополнительно провести серию 3D гидрогазодинамических расчетов. Согласно получившимся результатам расчетов, стационарный объем масла составил  $V_R = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , что на 20% больше предсказанного по полученному в главе 3 уравнению. Относительный свободный объем маслокартера составил  $\bar{V}_{\text{св}} = 0,7$ . Благодаря проведению 3D расчета удалось определить проблемные места в конструкции. На рисунке 13 видно, что в полости слива масла значительное количество масла. Переполнение картера может вызывать разбрызгивание масла и его перемешивание, что приведет к его насыщению воздухом. Насыщение масла воздухом повышает противодавление в картере. Также при сильном переполнении картера большое количество масла может попадать в систему суфлирования. Для устранения данного недостатка рекомендуется выполнение внутренней поверхности маслокартера с уклоном, что должно увеличить эффективность удаления масла из вышеуказанной полости (рисунок 12). Далее был проведен расчет гидродинамики двухфазного течения в маслокартере с внедренными мероприятиями, показанными на рисунке 12. По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что объем масла  $V_R$ , благодаря введенным мероприятиям, уменьшился на 7%, тем самым улучшился отвод масла из полости маслокартера. Распределение масла в полости опоры с учетом внедрения мероприятий и без учета представлены на рисунке 13.

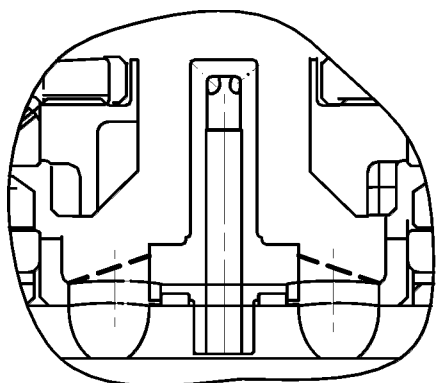


Рисунок 12 – Мероприятия по оптимизации геометрии

татка рекомендуется выполнение внутренней поверхности маслокартера с уклоном, что должно увеличить эффективность удаления масла из вышеуказанной полости (рисунок 12). Далее был проведен расчет гидродинамики двухфазного течения в маслокартере с внедренными мероприятиями, показанными на рисунке 12. По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что объем масла  $V_R$ , благодаря введенным мероприятиям, уменьшился на 7%, тем самым улучшился отвод

масла из полости маслокартера. Распределение масла в полости опоры с учетом внедрения мероприятий и без учета представлены на рисунке 13.

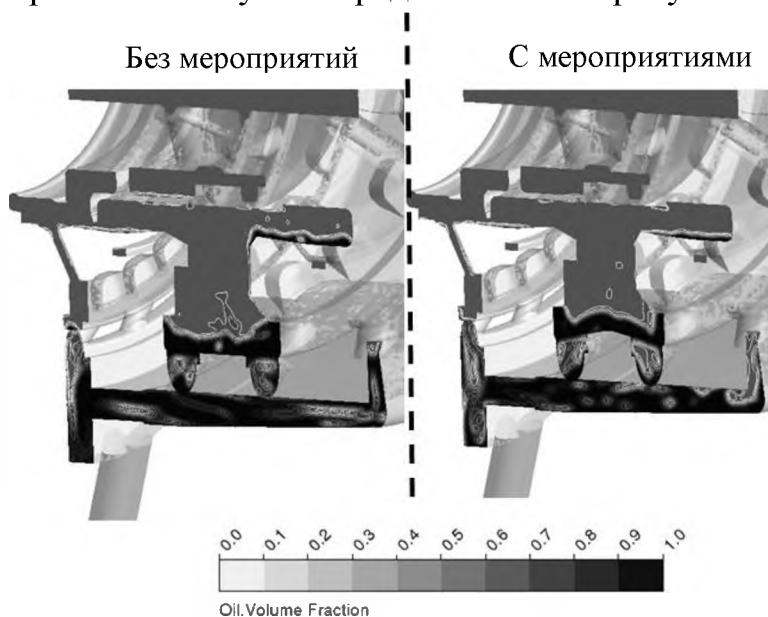


Рисунок 13 – Распределение масла в полости опоры

Внедрение численного моделирования на этапе проектирования и доводки узла позволит сократить временные затраты на создание узла путем предупреждения дефектов, до настоящего времени, устраняемых только с помощью длительных доводочных испытаний (течи масла из полости маслокартера, застойные зоны), а также сократить стоимость доводки изделия.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1) Анализ методов и средств проектирования масляных полостей опор ГТД показал, что на этапе проектирования и доводки опоры отсутствуют расчетные исследования о распределении масла в полости опоры, что приводит к последующей длительной доводке узла.

2) Разработан способ предупреждения дефектов в масляных полостях опор ГТД на основе использования численного моделирования двухфазного течения, позволяющий на начальном этапе проектирования предотвратить дефекты в маслосистеме опоры.

3) Экспериментальные исследования модуля-имитатора опоры ГТД позволили установить зависимости изменения стационарного объема масла от параметров маслосистемы и режимов работы двигателя, а также получить критериальное уравнение, обеспечивающее оценку объема масла, постоянно присутствующего в опоре во время работы двигателя.

4) Разработана методика численного моделирования двухфазного течения в масляных полостях опор ГТД, имеющая удовлетворительную для практического применения точность полученных результатов. Использование этой методики позволяет повысить эффективность проектирования масляных полостей опор ГТД за счет сокращения их доводки.

5) В результате применения разработанной методики при проектировании опоры авиационного ГТД удалось устранить область скопления масла перед контактным уплотнением в опоре разрабатываемого авиационного ГТД, а также уменьшить стационарный объем масла на 7%, что должно снизить теплонапряженность маслокартера.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1) **Лисицин, А. Н.** Результаты численного моделирования двухфазного течения жидкость/газ на основе упрощенной модели масляного картера [Текст] / А. Н. Лисицин, А. В. Бадерников, Е. В. Печеник // Вестник СГАУ имени С.П. Королева, 2014. – №5. (47) – С. 135 – 141.

2) **Лисицин, А. Н.** Экспериментальные исследования двухфазного течения в маслокартерах опор ГТД [Текст] / А. Н. Лисицин, А. В. Бадерников,

М. В. Лебедев. // Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2015. – № 1. (32) – С. 52 – 56.

**В других изданиях:**

**3) Лисицин, А. Н.** Тенденции развития опор двигателей летательных аппаратов, методы и обоснование перспективных конструкций [Текст] / В. И. Богданов, Н. А. Коробкин, А. Н. Лисицин. // Сборник трудов Международного научно-технического форума. Самара. СГАУ им. С. П. Королева, 2012. – Том 1. – С. 193 – 194.

**4) Лисицин, А. Н.** Тенденции развития опор ДЛА, обоснование перспективных конструкций [Текст] / В. И. Богданов, Н. А. Коробкин, А. Н. Лисицин. // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012» 13-15 ноября 2012. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. – С. 198 – 200.

**5) Лисицин, А. Н.** Обеспечение работоспособности высоконагруженных высокоскоростных подшипников качения при воздушном охлаждении и смазке масляным туманом [Текст] / Н. А. Коробкин, А. Н. Лисицин. // 12-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2013» 12-15 ноября 2013. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2013. – С. 331 – 333.

**6) Лисицин, А. Н.** Результаты исследования двухфазного течения жидкость/газ в полости с вращающимся валом [Текст] / А. В. Бадерников, Е. В. Печеник, А. Н. Лисицин. // Сборник трудов XV Международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование». Саров, 2014. – С. 24.