

УДК 62.620.162

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ГТУ С КОНВЕРТИРОВАННЫМИ АВИАЦИОННЫМИ ГТД

Воскобойников Д.В.*ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,
Казань, e-mail: gtu.am@yandex.ru*

В статье показаны результаты исследования от разработки математической модели до создания опытного образца имитатора маслосистемы свободной турбины и разработана документация на комплект испытательного оборудования имитационного стенда для проведения приемо-сдаточных испытаний газогенераторов конвертированных авиационных ГТД при их ремонте. В работе приведены результаты экспериментальных работ по увеличению срока службы моторного масла при его комплексной гидродинамической обработке в условиях эксплуатации в устройстве роторно-пульсационного типа. Представлено описание технологического стенда и экспериментального образца газогенератора для проведения испытаний на «лётном» стенде. Проведено сравнение физико-химических показателей моторных масел после длительного 280-часового гидродинамического воздействия на него и после 271-часовой наработки масла в коробке моторных агрегатов двигателя НК-86 с общей наработкой 8760 часов.

Ключевые слова: моторное масло, газотурбинный двигатель (ГТД), газотурбинная установка (ГТУ), имитационное моделирование

SIMULATION MODELING OF PHYSICAL PROCESSES OF MAJOR GTU WITH CONVERTED GAS TURBINE ENGINES

Voskoboynikov D.V.*FGBOY VPO «Kazan State Power Engineering University», Kazan, e-mail: gtu.am@yandex.ru*

The article shows the results of a study to develop a mathematical model to prototype simulator free turbine oil system and developed a set of documentation for test equipment simulation stand for acceptance testing of gas generators converted GTE at their repair. The results of experimental studies to increase the service life of the engine oil when it is integrated in the processing of hydrodynamic conditions in the device rotary-type pulsation. The description of the process of the stand and the experimental sample of the gas generator for testing «the flying» stand. A comparison of physical and chemical parameters of engine oils after a long 280 hours hydrodynamic influence on him and after 271 hours of operation of motor oil in the box units of the engine NK-86 with a total operating time of 8760 hours.

Keywords: motor oil, gas turbine engine (GTE), a gas turbine unit (GTU), simulation modeling

Главная задача, которая стоит перед конструкторами при проектировании современных как авиационных, так и наземных двигателей, – это обеспечение высокого КПД и максимальной мощности двигателя при его минимальных габаритах и массе. При обеспечении большой мощности и КПД повышаются теплонапряжённость и динамические нагрузки в узлах трения, что отрицательно сказывается на работе трибологической системы двигателя.

Эксплуатационная эффективность смазочных масел определяется совокупностью их физико-химических показателей в течение всего срока службы масла и свойствами смазываемых поверхностей узлов трения в течение срока службы ГТД [13]. Определяющим критерием состояния масла является интенсивность износа двигателя.

Тяжелые условия работы смазываемых поверхностей ГТД обусловлены изменением физико-химических свойств моторных масел

в течение срока службы из-за попадания в масло механических примесей, многократно увеличивающих износ трущихся поверхностей, нарушении смазывающей пленки, вспениваемости, забивки маслоканалов, повышения вязкости, уменьшения температуры вспышки, нарушения термостабильности, появления воды, разрушения уплотнительных устройств, перегревом, ростом кислотности. Все эти процессы, происходящие в масле в зависимости от наработки, влияют на надёжность двигателя в период всего жизненного цикла.

Поэтому увеличение срока службы моторных масел, поддержание их физико-химических свойств в допустимых технических условиях на масло пределах является актуальной задачей.

Развитие вычислительной техники, создание так называемых «суперкомпьютеров» привело к расширению областей применения методов моделирования, позволяющих исследовать достаточно сложные модели.

Но в разрабатываемые математические модели всё равно вносятся те или иные допущения и упрощения. Эти модели описывают процесс приблизительно, как правило частично, допуская, что процесс, происходящий по всей системе, аналогичен процессу в исследуемой части. Математическое моделирование способствует поиску оптимальных решений, которые должны быть заложены в имитационную модель.

Имитационное стендовое моделирование физических процессов, опираясь на теорию подобия, базируется на получении интересующих нас зависимостей путем измерения определённых величин непосредственно на испытуемом образце. Сущность любого моделирования заключается в начале: в аналитическом исследовании и математическом описании. В дальнейшем переходит от непосредственного изучения процесса или технической системы к подтверждению заложенного в математической модели подобия в имитационную модель.

Главной целью такого перехода является искусственное воспроизведение исследуемых явлений для облегчения исследования интересующих нас величин в модели.

Основное требование к моделированию физических процессов – это подобие исследуемой модели и натурального образца, пропорциональные должны быть не только формы, но и значения физических величин.

Смоделированные физические процессы должны быть подтверждены экспериментально на натуральных образцах. Для проведения испытаний натуральных образцов необходимы специальные устройства, представляющие собой совокупность рабочего станка (станины) для закрепления испытуемого объекта, системы нагружения и контрольно-измерительные средства, предназначенные для снятия показателей реакции образца на нагрузку. К такому виду устройств относятся испытательные и имитационные стенды.

Имитационное моделирование отдельных узлов и систем позволяет оптимизировать испытания отдельных узлов, не переходя к полноразмерным испытаниям.

Метод комплексной оптимизации на основе имитационного моделирования включает в себя имитацию систем ГТД, не входящих в испытуемый узел, но являющихся частью двигателя, и имитацию воздействия этих систем на испытуемый узел, что позволяет повысить эффективность испытаний в сравнении с существующими методами испытаний.

При сокращении количеств ремонтируемых авиационных двигателей на ремонтных предприятиях увеличивается время простоя дорогостоящих испытательных стендов, которые необходимо поддерживать в рабочем

состоянии независимо от количества испытуемых двигателей. Ещё одна задача, которая решалась в рамках данного исследования, это унификация стендового оборудования для «лётных» ГТД и конвертированных для работы в наземных условиях.

Для проведения испытаний наземного двигателя необходимо его соединить с нагрузочным устройством, которое будет имитировать нагрузку, характерную для работы двигателя в эксплуатации. Таким нагрузочным устройством может быть пневмотормоз, гидротормоз или для конвертированного ГТД – реактивное сопло.

При испытаниях «наземного» двигателя его мощность напрямую не измеряется [7, 11], а вычисляется по оборотам двигателя, температурам и давлению газа, влажностному содержанию и расходу воздуха, которые приводятся к стандартным атмосферным условиям [6]. Так что при установке наземного ГТД на динамометрическую платформу не нарушаются требования к проведению испытаний двигателя.

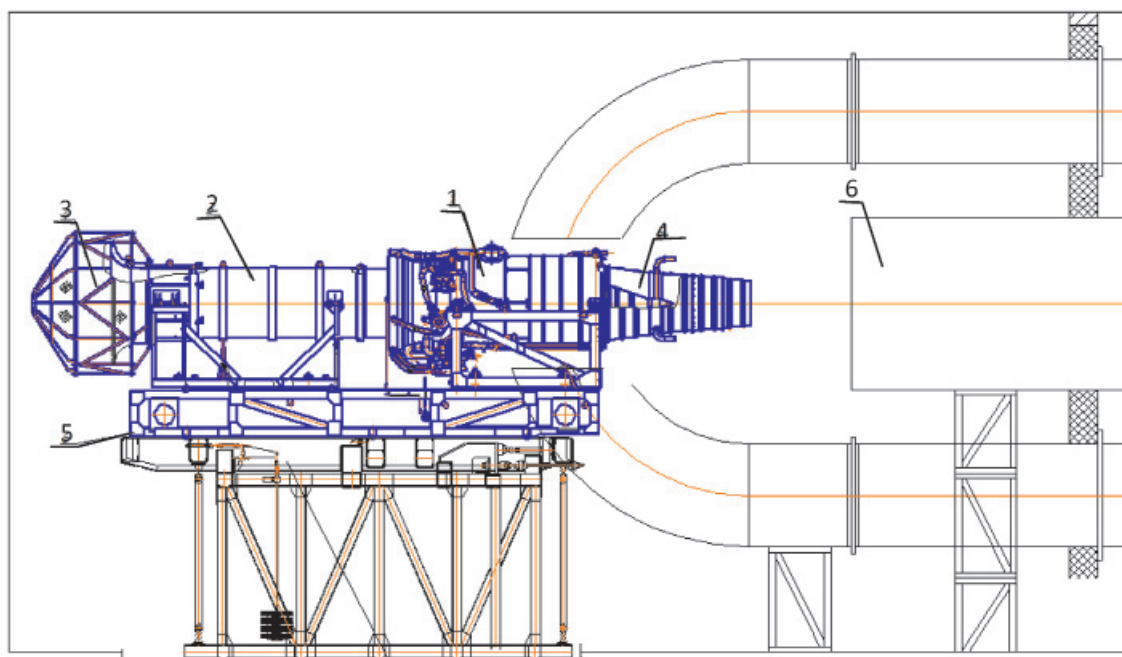
Испытательный стенд для испытания «летных двигателей» оснащен всем необходимым оборудованием для снятия дроссельной характеристики двигателя во время испытаний. Изменение дроссельной характеристики является обязательной процедурой как при испытании лётных, так и наземных двигателей. Для установки «наземного» двигателя на «лётный» стенд необходимо его оснастить специальным устройством, предназначенным для реализации тяги и отвода горячих газов в выхлопную систему стенда.

Для соединения специального нагрузочного устройства с наземным двигателем необходимо от него отстыковать свободную турбину (СТ) и сымитировать динамически адаптивную нагрузку работы масла в опоре СТ, так как газогенератор (ГГ) и СТ двигателя имеют общую маслосистему, а наиболее напряженные условия работы масла в СТ.

Рисунок наземного двигателя, установленного на испытательный стенд для испытания ТРД, показан на рисунке.

Для подтверждения параметров имитации маслосистемы СТ была разработана экспериментальная установка «Ли́ра-М», представляющая собой роторно-пульсационный аппарат и имеющая в своей конструкции совмещенную комбинированную опору с подшипниковым узлом ГТД [4].

Были проведены длительные, 280-часовые испытания экспериментальной установки Ли́ра-М с отбором проб масла каждые 40 часов работы. По окончании испытаний пробы масла отправлены в лабораторию для определения физико-химических показателей моторного масла при длительной комбинированной гидродинамической нагрузке на него [8].



Газогенератор двигателя НК-16СТ, установленный на испытательном стенде:
1 – ГТ НК-16СТ; 2 – воздуховод с лемнискатой; 3 – защитная сетка; 4 – нагрузочное устройство;
5 – силоизмерительная (динамометрическая) платформа; 6 – выхлопная система стенда

Установка Лира-М показала эффективность применения роторно-пульсационных технологий в процессе испытаний ГТД за счет широкого спектра факторов воздействия [5]:

- механического воздействия на частицы гетерогенной среды, заключающегося в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями РПА, что приводит к разрушению твердых частиц, находящихся в рабочей жидкости;
- гидродинамического воздействия, выраженного в больших сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности пульсациях давления и скорости

потока жидкости, возникающие при механическом перемешивании рабочей жидкости специальными элементами;

- гидроакустического воздействия на жидкость, осуществляемого за счет мелко-масштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и вторичных нелинейных акустических эффектов в результате многократно повторяющихся гидравлических ударов.

После испытаний был произведен осмотр подшипников, установленных в совмещенной комбинированной опоре установки Лира-М, техническое состояние подшипников признано хорошим.

Физико-химические показатели моторного масла МС-8П при длительной наработке в СКО установки Лира-М

Показатели	Номера отбора проб масла							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Время работы на режиме, ч	0	40	80	120	160	200	240	280
Кинематическая вязкость 50°C, сСт	8,09	8,11	8,29	8,34	8,38	8,43	8,47	8,50
Кислотное число	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Содержание золы, %	0,008	0,008	0,008	0,011	0,012	0,012	0,013	0,014
Содержание механических примесей	отсутствует							
Наличие воды	отсутствует							

Примечания:

- Кинематическая вязкость согласно ГОСТ 33-82 должна быть не менее 8,00 сСт.
- Кислотное число согласно ГОСТ 26191-84 должно быть не более 0,03 мг КОН на 1 г масла.
- Содержание золы по ОСТ 38.01163-78 должно быть не более 0,008% для свежего масла и не более 0,015% для отработанного.

Результаты физико-химических показателей моторного масла МС-8П при длительной наработке в совмещенной комбинированной опоре (СКО) представлены в таблице.

В дополнение ко всем выполненным анализам была взята проба масла с коробки моторных агрегатов двигателя НК-86 с общей наработкой 8760 часов и с наработкой после очередной замены масла 271 часов [5] и проанализирована в соответствии с вышеприведенным перечнем физико-химических показателей.

Проведенные испытания СКО с гидродинамической обработкой авиационного масла МС-8П на экспериментальной установке в непрерывном циркуляционном режиме показали, что основные физико-химические показатели масла, выявленные стандартными методами, находятся в пределах нормы, при этом отсутствуют механические примеси в масле и вода.

Спектральный анализ показал отсутствие деструктивных изменений по химическому составу моторного масла в сравнении образцов до проведения и после проведения длительных испытаний.

Сравнение результатов физико-химического анализа пробы масла в результате гидродинамических воздействий в процессе длительной наработки в составе комбинированной совмещенной опоры и пробы масла, взятой из эксплуатации, свидетельствует о том, что параметры масла без гидродинамической обработки, но с тремя степенями фильтрации сопоставимы с параметрами масла с гидродинамической обработкой.

По результатам экспериментов можно сделать заключение, что в результате гидродинамической обработки увеличивается срок службы моторного масла. Применение установки Лира-М для имитации гидродинамической нагрузки моторного масла аналогично процессам, происходящим в опоре СТ, считать целесообразным как точки зрения самой имитации, так и с точки зрения продления ресурса работы масла не только при проведении стендовых испытаний, но и повышении эффективности работы ГТД [9].

Список литературы

1. Воскобойников Д.В., Кесель Б.А. Применение роторно-пульсационных аппаратов в трибологических системах газотурбинных двигателей. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13. – № 4(42) (3). – С. 60–63.
2. Воскобойников Д.В., Кесель Б.А., Кулеш А.В., Лунев Н.А. Средства и методы поддержания параметров газотурбинных установок с конвертированными авиационными двигателями при капитальном ремонте и рекон-

струкции // Современные технологии, материалы оборудование и ускоренное восстановление квалифицированного кадрового потенциала – ключевые звенья в возрождении отечественного авиа- и ракетостроения: сборник докл. междунар. науч. практич. конф. (Казань 14–15 августа 2012). – С. 439–446, 2012.

3. Воскобойников Д.В., Кесель Б.А. Метод восстановления характеристик масла в системе смазки ГТУ с помощью роторно-пульсационной обработки. Материалы международной научно-практической конференции // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: сборник докл. междунар. науч. практич. конф. (Казань 5–8 августа 2014). – Т. 1. – С. 186–189.

4. Воскобойников Д.В., Кесель Б.А., Понькин В.Н., Паерелий Д.А. Пульсационный аппарат роторного типа. Патент РФ № 2257948, 10.08.2005.

5. Горюнов Л.В., Кесель Б.А., Понькин В.Н., Такмовцев В.В. Повышение эффективности трибологических систем авиационных двигателей. Препринт 05П1. – Казань: Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2005. – 80 с.

6. ГОСТ 23851-79 Двигатели газотурбинные авиационные. Термины и определения.

7. Инструкция 16.000.000ДИЗ0. Обработка и оформление результатов испытаний, Газотурбинный двигатель НК-16СТ.

8. Отчет по результатам длительных испытаний установки для диспергирования масла в составе аппарата «Лира-М». – Казань, ОАО КПП «Авиамотор», 2005. – С. 15.

9. Понькин В.Н., Жильцов Е.И., Кесель Б.А., Корноухов А.А. Комплекс технических решений по повышению эффективности ГПА // Газотурбинные технологии. – Февраль-Март 2009. – № 2 (73). – С. 12–17.

10. Технический проект 001.5217. Газотурбинный двигатель НК-16СТ. Т. 5. Опоры, привода и маслосистема двигателя. – Куйбышев, Куйбышевский моторный завод, 1979. – 67 с.

11. Технические условия 218.000.000-2ТУ6. Двигатель газотурбинный НК-16-18СТ, НК-16-18СТД. – Казань, ОАО КПП «Авиамотор», 1998. – 75 с.

12. Технические условия 118.820.000 ТУ. Газогенератор НК-16СТ установленный на испытательном стенде для испытания двигателя НК-8-2У. – Казань, 2004. – 12 с.

13. Инженерные основы авиационной химмотологии. – Казань: Изд-во Казанск. унив., 2005. – 714 с.

References

1. Voskoboynikov D.V., Kesel B.A. Primenenie rotornopulsatsionnyh apparatov v tribologicheskikh sistemah gazoturbinyh dvigatelej. // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011, Tom 13, no 4(42) (3) pp. 60–63.
2. Voskoboynikov D.V., Kesel B.A., Kulesh A.V., Lunev N.A. Sredstva i metody podderzhanija parametrov gazoturbinyh ustanovok s konvertirovannymi aviacionnymi dvigateljami pri kapitalnom remonte i rekonstrukcii // Sovremennye tehnologii, materialy oborudovanie i uskorennoe vosstanovlenie kvalificirovannogo kadrovogo potenciala – kljuचेve звеня в vozrozhdenii otechestvennogo avia- i raketostroenija: sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoy konferencii (Kazan 14-15 avgusta 2012). pp. 439–446.
3. Voskoboynikov D.V., Kesel B.A. Metod vosstanovlenija harakteristik masla v sisteme smazki GTU s pomoshhju rotornopulsacionnoj obrabotki. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii // Poisk jeffektivnyh reshenij v processe sozdanija i realizacii razrabotok v rossijskoj aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy promyshlennosti: sbornik dokladov mezhdunarodnoj nauchno prakticheskoy konferencii (Kazan 5-8 avgusta 2014). T. 1, pp. 186–189.
4. Voskoboynikov D.V., Kesel B.A., Ponkin V.N., Paerelij D.A. Pulsacionnyj apparat rotornogo tipa. Patent RF no. 2257948, 10.08.2005.

5. Gorjunov L.V., Kesel B.A., Ponkin V.N., Takmovcev V.V. Povyshenie jeffektivnosti tribologicheskikh sistem aviacionnyh dvigatelej. Preprint 05P1. Kazan: izdatelstvo KGTU im. A.N. Tupoleva, 80 p., 2005.

6. GOST 23851-79 Dvigateli gazoturbinye aviacionnye. Terminy i opredelenija.

7. Instrukcija 16.000.000DI30. Obrabotka i oformlenie rezultatov ispytanij, Gazoturbinyj dvigatel NK-16ST.

8. Otchet po rezultatam dlitelnyh ispytanij ustanovki dlja dispergirovanija masla v sostave apparata «Lira-M». Kazan, OAO KPP «Aviamotor», 2005. 15 p.

9. Ponkin V.N., Zhilcov E.I., Kesel B.A., Kornouhov A.A. Kompleks tehniceskikh reshenij po povysheniju jeffektivnosti GPA. Gazoturbinye tehnologii. 2009. no 2. pp. 18–22.

10. Tehniceskij proekt 001.5217. Gazoturbinyj dvigatel NK-16ST. Tom 5. Opory, privoda i maslosistema dvigatelja. Kujbyshev, Kujbyshevskij motornyj zavod, 1979. 67 p.

11. Tehniceskije uslovija 218.000.000-2TU6. Dvigatel gazoturbinyj NK-16-18ST, NK-16-18STD, Kazan, OAO KPP «Aviamotor», 1998. 75 p.

12. Tehniceskije uslovija 118.820.000 TU. Gazogenerator NK-16ST ustanovlennyj na ispytatelnom stende dlja ispytanija dvigatelja NK-8-2U, Kazan, 2004. 12 p.

13. Inzhenernye osnovy aviacionnoj himmotologii. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo universiteta 2005. 714 p.

Рецензенты:

Гуреев В.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплотехники и энергетического машиностроения, института авиации, наземного транспорта и энергетикеи, Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева, г. Казань;

Мингазов Б.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой реактивных двигателей и энергетических установок, института авиации, наземного транспорта и энергетикеи, Казанский национальный исследовательский университет им. А.Н. Туполева, г. Казань.