

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.45.00.030

doi: 10.18698/0536-1044-2023-7-113-123

Экспериментальная установка для исследования влияния электростатических полей на теплообмен и процесс осадкообразования в моторном авиационном масле при его вынужденной конвекции

В.А. Алтунин¹, М.В. Львов¹, А.А. Щиголев¹,
А.А. Юсупов¹, М.Л. Яновская²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

² Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова

Experimental installation for the study of the influence of electrostatic fields on heat exchange and the process of sedimentation in motor aviation oil with its forced convection

V.A. Altunin¹, M.V. Lvov¹, A.A. Shchigolev¹,
A.A. Yusupov¹, M.L. Yanovskaya²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

² Baranov Central Institute of Aviation Motors

Проанализирована необходимость разработки и создания экспериментальной установки для исследования тепловых процессов в моторных авиационных маслах при их вынужденной конвекции и различных термодинамических условиях, приближенных к реальным, в разных двигателях летательных аппаратов. Приведена конструктивная схема экспериментальной установки для исследования теплообмена и осадкообразования в моторных авиационных маслах при их вынужденной конвекции без воздействия и с воздействием электростатических полей. Показаны схемы рабочих участков с одной и тремя парами соосных рабочих игл. Разработана методика проведения всесторонних экспериментов. Впервые выполнено исследование влияния поперечных электростатических полей на теплоотдачу и осадкообразование в моторных авиационных маслах при их вынужденной конвекции. Предлагаемая установка позволяет проводить эксперименты не только с моторными авиационными маслами, но и с жидкими углеводородными горючими и их смесями. Результаты исследования будут способствовать созданию новой отечественной техники различного назначения и базированию повышенных характеристик по ресурсу, надежности и эффективности.

Ключевые слова: моторное авиационное масло, экспериментальная установка, рабочий участок, вынужденная конвекция, теплообмен и процесс осадкообразования, электростатическое поле

The paper analyzes the need to design, develop and create an experimental installation to study thermal processes in the aviation engine oils at their forced convection and in various thermodynamic conditions close to the real ones in different aircraft engines. It presents the experimental installation design scheme to study heat transfer and sedimentation in the aviation engine oils at their forced convection without and with the electrostatic fields influence. Working sections schemes with one and three pairs of coaxial working needles are shown. Technique for conducting comprehensive experiments was developed. For the first time, influence of the transverse electrostatic fields on the heat transfer and sedimentation in the engine oils during their forced convection was studied. The proposed installation allows experiments not only with the aviation engine oils, but also with the liquid hydrocarbon fuels and their mixtures. Study results would contribute to creating new domestic equipment for various purposes and ensuring the improved characteristics in terms of lifetime, reliability and efficiency.

Keywords: aviation engine oil, experimental installation, working section, forced convection, heat transfer and sedimentation process, electrostatic field

Тенденция к увеличению удельных мощностей авиационных двигателей (АД) и энергетических установок (ЭУ) приводит к повышению теплонагруженности узлов АД, вследствие чего возрастают требования к масляным системам. В АД функция отвода тепла масляной системой является даже более значимой, чем функция снижения трения. Так, для смазки теплонапряженного шарикоподшипника в газотурбинном двигателе требуется подавать более чем в 1000 раз меньше моторного авиационного масла (МAM), чем для съема выделяемого им тепла [1].

Через масляную систему проходит большой тепловой поток. Например, в турбореактивном двигателе теплоотдача в МAM составляет 3...6 кВт на 10 кН стендовой тяги, в турбовинтовом — 15...25 кВт на 1000 кВт эквивалентной стендовой мощности, в двухконтурных средних и крупных турбореактивных двигателях — 35...55 кВт [1]. Это требует поиска новых решений в области интенсификации теплообмена.

Другой проблемой масляных систем АД является осадкообразование, возникающее при контакте МAM с нагретыми поверхностями. Этот негативный процесс представляет опасность для нормальной работы АД и может привести к аварийной ситуации. Осадок, образующийся на нагретых поверхностях, значительно снижает теплопередачу, что может вызвать перегрев узлов и, как следствие, снижение их прочности.

Закоксовывание масляных форсунок способно стать причиной выхода из строя всего АД. Известно, что масляные форсунки различных воздушно-реактивных двигателей могут полностью закоксовываться через 800 ч (цик-

лов) работы [1–13]. Поэтому важно контролировать состояние масляной системы АД, включая протекающий в ней процесс осадкообразования [1–7].

Выпадение углеродистых осадков связано главным образом с окислением МAM. В результате реакции кислорода и молекул МAM образуются смолы, асфальтены, карбены и т. д. [1–6].

По температурному признаку отложения подразделяют на три основные группы: высоко-, средне- и низкотемпературные [4–6]. В высокотемпературной зоне двигателя МAM разогревается до температуры 350...400 °С, вследствие чего часть его теряет летучие вещества, обугливается и образует нагар.

В среднетемпературной зоне АД масло разогревается до температуры 200...300 °С, при этом одна его часть испаряется, а другая разлагается и окисляется, образуя твердый осадок (лак). Процесс лакообразования идет непрерывно и тем интенсивнее, чем выше температура [2–5]. В лаках собираются частицы нагара, пыли и износа, увеличивающие износ поверхностей трения.

На образование лака в поршневых двигателях значительно влияет топливо с большим содержанием серы, при этом лак прочно связывается с металлом [5]. Значительное влияние на интенсивность возникновения лака оказывает степень дисперсности в МAM механических примесей органического происхождения [6].

Появление низкотемпературных отложений обусловлено наличием продуктов, загрязняющих МAM: сажи, воды, соединений свинца и топлива.

Немаловажным фактором, влияющим на осадкообразование, является материал стенок масляных каналов. Одни металлы оказывают каталитическое действие, проявляющееся в ускорении распада гидропероксидов с образованием свободных радикалов, другие (ингибиторы) — тормозящее [4–9]. Важную роль в процессе осадкообразования играет концентрация ароматических углеводородов: чем она выше, тем больше вероятность появления осадка, состоящего преимущественно из углеводорода [4–9].

Перспективным методом интенсификации теплообмена и борьбы с осадкообразованием является применение электростатических полей (ЭСП). В работах [6–16] приведены результаты исследования влияния ЭСП на процесс интенсификации теплоотдачи и осадкообразования в МАМ при их естественной конвекции, различных значениях температуры и давления МАМ. Установлено [6–10], что коэффициент теплоотдачи к МАМ при наличии воздействия ЭСП может увеличиться более чем в 4 раза, а в зоне прохождения силовых линий ЭСП углеродистые отложения не образуются.

В настоящее время требуются подобные исследования этих процессов при вынужденной конвекции МАМ, для чего необходимо создать экспериментальную установку и сменные рабочие участки (РУ).

Цель работы — показать проблемы, возникающие при исследовании тепловых процессов, происходящих в МАМ при его вынужденной конвекции, и предложить их решить путем создания новой экспериментальной установки и РУ без воздействия и с воздействием ЭСП.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- выполнить обзор и анализ тепловых проблем в масляных системах АД и ЭУ летательных аппаратов (ЛА);
- показать проблемы систем смазки АД и ЭУ ЛА, связанные с необходимостью исследования теплоотдачи к МАМ и осадкообразования на нагреваемых деталях, а также с потребностью создания новой экспериментальной установки по вынужденной конвекции МАМ при отсутствии и наличии ЭСП;
- раскрыть особенности новой конструктивной схемы экспериментальной установки и РУ, обеспечивающих термодинамическое состояние МАМ в АД и ЭУ ЛА;

- разработать алгоритмы подготовки и проведения экспериментальных исследований без применения и с применением ЭСП.

Описание экспериментальной установки. Для исследования процессов теплообмена и осадкообразования в масляных системах АД и ЭУ в приближенных к реальным условиям разработана и создана экспериментальная установка (рис. 1, а и б).

Экспериментальная установка позволяет имитировать термогидродинамические условия движения МАМ в масляных каналах АД и ЭУ, а также исследовать влияние воздействия ЭСП на тепловые процессы при использовании сменных РУ. Она включает в себя систему подачи МАМ, систему контроля параметров эксперимента, трансформатор для нагрева РУ посредством джоулева тепла, трансформатор для генерации высоконапряженного ЭСП и сменные РУ с различными геометрическими параметрами.

Система подачи предназначена для прокачки МАМ через РУ 1 (см. рис. 1, а) с требуемыми скоростью и давлением, а также для поддержания заданной температуры МАМ.

Для предотвращения смешивания МАМ с уже подвергшимся термическому воздействию установка оборудована двумя баками: подающим (масляным) 8, оснащенным нагревательным элементом, который поддерживает требуемую температуру, и сливным 18. Движение (вынужденную конвекцию) МАМ обеспечивает шестеренный насос 7, приводимый в действие асинхронным электродвигателем 6.

Регулирование частоты вращения привода шестеренного насоса, а следовательно, и скорости течения МАМ в РУ, осуществляется с помощью частотного преобразователя 5. Для повышения давления МАМ предназначен регулируемый дроссель 17, представляющий собой игольчатый кран, изменение проходного сечения которого создает гидравлическое сопротивление, равное давлению в системе.

Для транспортирования МАМ вместо жестких металлических трубопроводов применены гибкие рукава высокого давления, что делает экспериментальную установку более эффективной и эргономичной. Нагрев сменной металлической рабочей трубки (РТ) на РУ, имитирующей нагретые поверхности в масляной системе, происходит за счет джоулева тепла, создаваемого регулируемым трансформатором

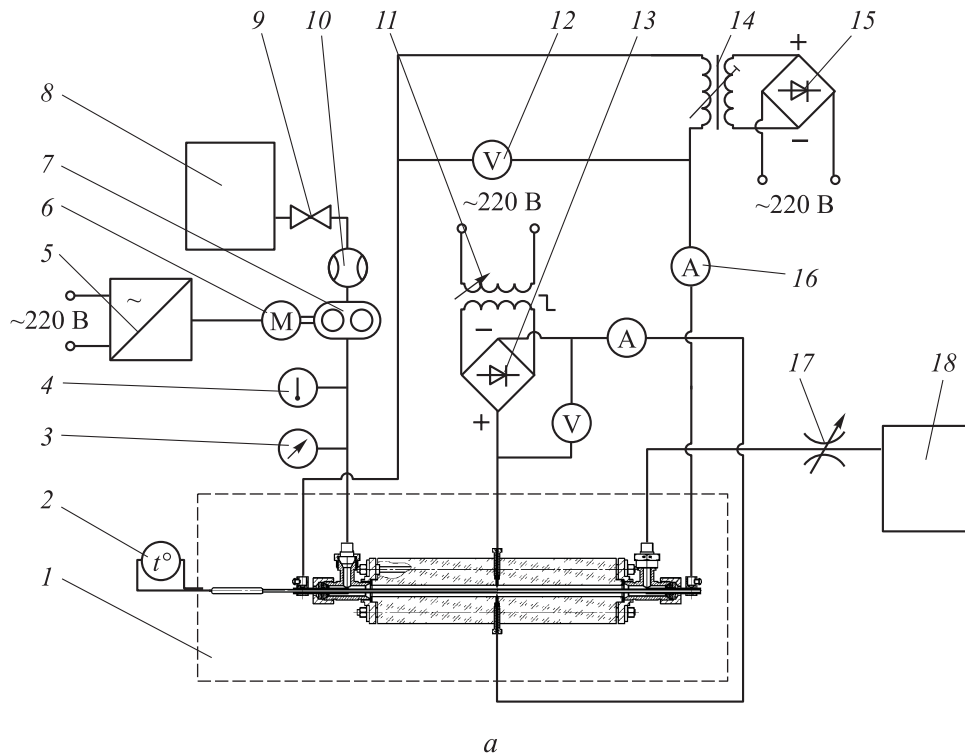


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки:

1 — РУ; 2 — цифровой термоэлектрический термометр; 3 — манометр; 4 — термометр; 5 — частотный преобразователь; 6 — асинхронный электродвигатель; 7 — шестеренный насос; 8 и 18 — масляный и сливной баки; 9 — запорный кран; 10 — турбинный расходомер; 11 — ступенчатый повышающий трансформатор АФ-3; 12 — вольтметр; 13, 15 — выпрямители тока; 14 — регулируемый трансформатор тока; 16 — амперметр; 17 — регулируемый дроссель

тока 14. На выходе из него сила тока достигает 200 А.

Для создания высоковольтных ЭСП использован ступенчатый повышающий трансформатор 11 (см. рис. 1, а) марки АФ-3, показанный на рис. 2. Диапазон высоковольтных электростатических напряжений, которые он создает, составляет 0...50 кВ с шагом 5 кВ.

Экспериментальная установка позволяет проводить опыты в широком диапазоне скорости прокатки и давления МАМ (см. таблицу).

Система контроля параметров эксперимента включает в себя цифровой термоэлектрический термометр 2 (см. рис. 1, а) для измерения температуры на РУ с помощью подвижной термо-



Рис. 2. Внешний вид высоковольтного ступенчатого повышающего трансформатора АФ-3

**Предельные параметры
экспериментальной установки**

Параметр	Значение	
	мини- мальное	макси- мальное
Давление МАМ в установке, МПа	0,1	3,0
Скорость МАМ на РУ, м/с	1,0	6,5
Массовый расход МАМ, кг/с	0,01	0,86
Мощность, потребляемая электродвигателем, Вт	500	3000
Электростатическое напряжение, кВ	0	50

пары, манометр 3 для измерения давления МАМ в системе, термометр 4 для измерения температуры МАМ, турбинный расходомер 10 для измерения расхода МАМ и вычисления скорости его потока, вольтметры 12 и амперметры 16 для снятия параметров токов, поступающих от трансформаторов 11 и 14.

Рабочие участки. Для исследования влияния ЭСП на процессы теплообмена и осадкообразования при вынужденной конвекции МАМ разработаны и созданы специальные РУ (рис. 3, а и б).

РУ (см. рис. 3, а) представляет собой масляный канал с внутренней теплоотдающей металлической РТ 18 и поперечно размещенными электродами (соосными рабочими иглами), создающими поперечные (по отношению к сменной РТ потоку МАМ в кольцевом канале) ЭСП с различными геометрическими размерами силовых линий.

Канал 4 обжат с торцов металлическими фланцами 13 с помощью шпилек 3. Во фланцы ввинчены тройники 8, которые также обжимают канал через уплотнительные кольца 14.

Такой способ фиксации позволяет использовать сменные каналы с отверстиями разного диаметра, не изменяя другие элементы конструкции. В качестве материала канала выбрано органическое стекло вследствие его диэлектрических свойств и возможности визуального контроля за внутренним течением МАМ и воздействием электрического ветра (эффекта влияния ЭСП в жидкостях и газах при игольчатых электродах). Создано несколько образцов таких каналов с разными внутренними диаметрами.

Диаметр металлической РТ, расположенной внутри канала, — 4 мм, толщина стенки РТ — 0,5 мм. Такая толщина обусловлена необходимостью создания достаточного электрического сопротивления для нагрева трубки джоулевым теплом, чтобы не происходило неожиданных прогаров РТ с дальнейшими аварийными ситуациями, в том числе связанными с возникновением пожара.

Наружный диаметр металлической РТ выбран из условия, что минимальное электростатическое напряжение (5 кВ), подаваемое на токопроводящую иглу для положительного заряда (отдающую соосную рабочую иглу) 16 создает силовые линии, которые полностью охватывают внешнюю поверхность РТ в зоне воздействия соосных рабочих игл, т. е. расстояние между внешними силовыми линиями ЭСП должно быть больше или равно наружному диаметру РТ. Это обусловлено тем, что, как установлено ранее [6–16], осадок не образуется на тех участках нагреваемой РТ, где проходят силовые линии.

Для исследования влияния материала нагреваемой поверхности на процесс осадкообразования использовали РТ из меди, алюминия и стали 1Х18Н9Т. Металлическую РТ (см. рис. 3, а) фиксировали на РУ с помощью прижимных гаек 9 конических уплотнителей 10 и шайб 11, которые ее обжимали, обеспечивая необходимую герметичность.

Для нагрева металлической РТ к ней подвели электрический ток через клеммы 2 и медные втулки 15, у которых стенки толще, чем у РТ, а следовательно, и значительно ниже электрическое сопротивление. Такая втулка позволяет контролировать область нагрева РТ, поскольку основной нагрев происходит в месте наибольшего сопротивления. Чтобы электрический ток проходил только через металлическую РТ, шпильки 3 изолировали с помощью диэлектрических втулок 6.

Одной из отличительных особенностей экспериментальной установки является подвижная хромель-алюмелевая термопара, расположенная внутри нагреваемой металлической РТ. Подвижность термопары позволяет определять температуру по всей длине РТ.

Подвижная термопара состоит (см. рис. 3, а) из ручки 1, отогнутого королька 19 и керамического корпуса 20, выполненного в виде стержня диаметром 3 мм с двумя продольными отверстиями, через которые проходит термопара.

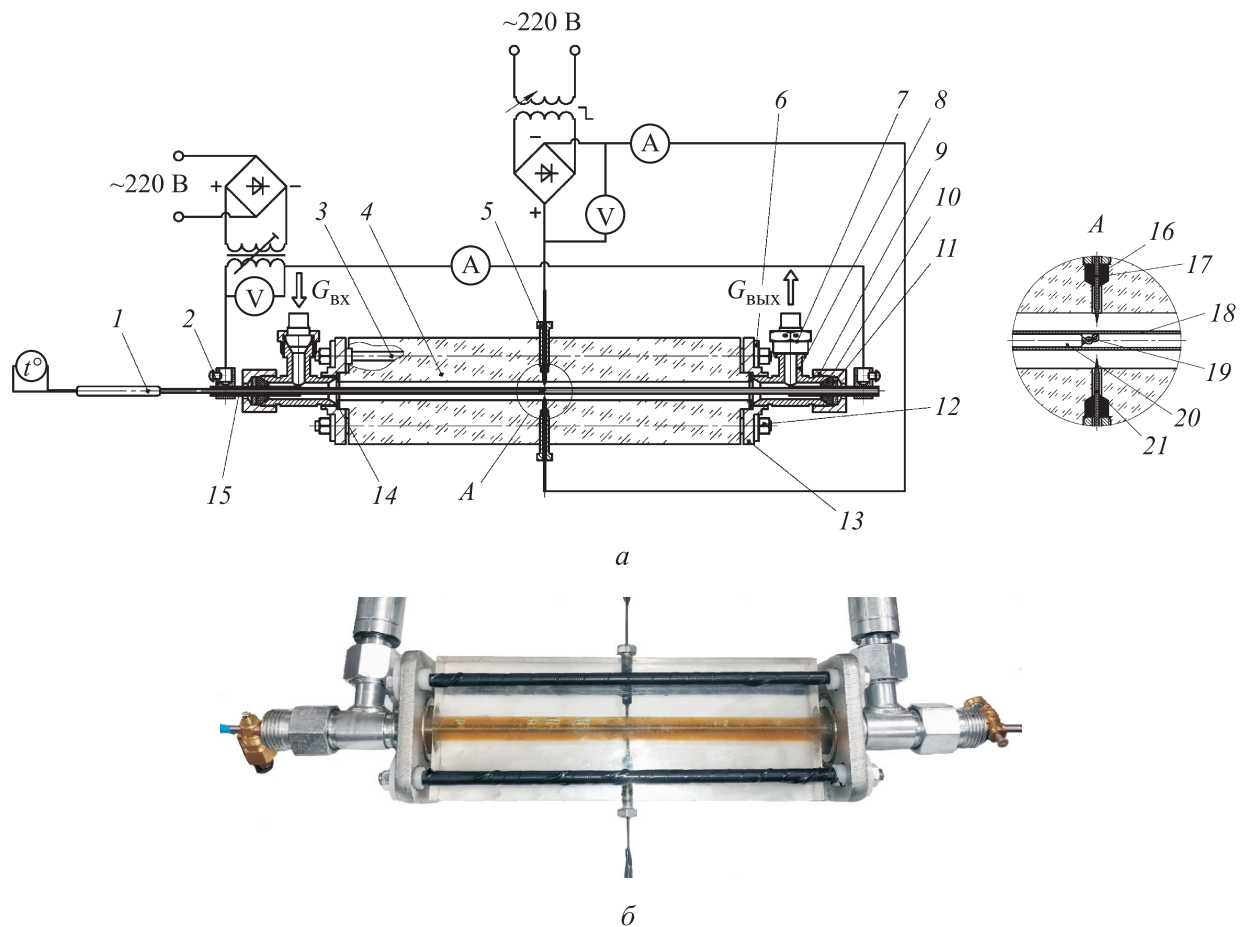


Рис. 3. Схема (а) и внешний вид (б) рабочего участка экспериментальной установки с одной парой электродов:

- 1 — ручка подвижной термодпары; 2 — клемма; 3 — шпилька; 4 — канал; 5 — прижимной винт;
 6 — диэлектрическая втулка; 7 — арматура трубопровода; 8 — тройник; 9 — прижимная гайка;
 10 — конический уплотнитель; 11 — шайба; 12 — гайка; 13 — металлический фланец;
 14 — уплотнительное кольцо; 15 — медная втулка; 16 и 17 — токопроводящая игла для положительного заряда (отдающая соосная рабочая игла) и ее резиновый гидроэлектроизолятор уплотнительного типа для ввода в рабочий участок; 18 — металлическая трубка; 19 — отогнутый королек термодпары; 20 — корпус подвижной термодпары; 21 — токопроводящая игла для отрицательного заряда (принимающая соосная рабочая игла)

Корпус предназначен для изоляции проводов термодпары от термического и электрического воздействий внутри металлической РТ. Отогнутый королек, как правило, зафиксирован по центру длины РТ, т. е. на линии прохождения соосных рабочих игл.

Для формирования ЭСП на РУ использованы токопроводящие рабочие соосные иглы 16 и 21, изготовленные из стальной проволоки толщиной 1 мм с острием, угол которого равен 30° . Иглы зафиксированы в корпусе прижимными винтами 5 и резиновыми уплотнителями — гидроэлектроизоляторами 17. Такая конструкция позволяет регулировать расстояние между иглами, а следовательно, и параметры ЭСП.

Для исследования влияния ЭСП с различными параметрами (напряжением, configura-

цией силовых линий) на тепловые процессы в условиях вынужденной конвекции МАМ разработаны РУ с несколькими парами соосных рабочих игл (рис. 4).

Различное расстояние между парами соосных рабочих игл позволяет увеличивать площадь РТ без осадка, более точно определять расширенные границы воздействия ЭСП на предотвращение углеродистого осадка на поверхности металлической РТ (т. е. определять увеличенные площади РТ без осадка), а также оценивать интенсификацию теплоотдачи к МАМ.

Порядок проведения экспериментов. Перед экспериментальными исследованиями выполняются планирование и рандомизацию всех возможных и необходимых этапов и количества

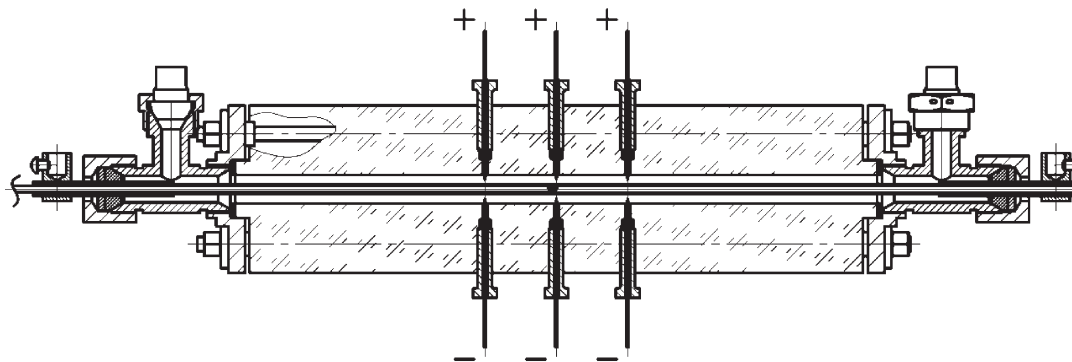


Рис. 4. Конструктивная схема РУ экспериментальной установки с тремя парами электродов

опытов, составляют таблицу-график (далее график), устанавливают время каждого эксперимента, осуществляют сборку РУ с определением геометрических характеристик кольцевого масляного канала, расстояния между соосными рабочими иглами. Все данные заносят в рабочий журнал (РЖ).

Первую часть экспериментального исследования проводят без воздействия ЭСП, вторую — с воздействием ЭСП.

Алгоритм первой части экспериментального исследования при отсутствии воздействия ЭСП включает в себя следующие шаги:

1) измерение температур внешней среды и МАМ в масляном баке; внесение этих параметров в РЖ;

2) включение масляного насоса, настройка скорости прокачки и давления МАМ; добавление этих данных в РЖ;

3) включение трансформатора для нагрева РТ; настройка амперметра (или вольтметра) согласно графику проведения экспериментов; внесение данных в РЖ;

4) определение температуры стенки нагретой РТ при установившихся термодинамических условиях движения МАМ; внесение данных в РЖ;

5) выключение установки по окончании первого эксперимента; разборка РТ и деталей РУ после их охлаждения до нормальной температуры; визуальный осмотр поверхности РТ на предмет наличия углеродистого осадка; исследование осадка с применением микроскопа; замер его толщины кварцевым толщинометром; внесение полученных данных в РЖ;

6) проведение экспериментов при тех же значениях скорости прокачки и давления МАМ, но при более высоких температурах нагрева РТ согласно графику; внесение полученных данных в РЖ;

7) выполнение экспериментов при фиксированных значениях температуры РТ и скорости прокачки МАМ и более высоких давлениях МАМ согласно графику; внесение полученных данных в РЖ;

8) проведение экспериментов при фиксированных значениях температуры РТ и давления МАМ и более высоких скоростях прокачки МАМ согласно графику; внесение полученных данных в РЖ;

9) выключение установки по окончании эксперимента; разборка РТ и деталей РУ после их охлаждения до нормальной температуры; слив отработанного МАМ и заправка масляного бака новой порцией МАМ; сборка РУ с установкой новой неиспользованной РТ;

10) визуальный осмотр отработанной сменной РТ на предмет наличия углеродистого осадка; исследование осадка с помощью микроскопа; измерение толщины осадка кварцевым толщинометром; внесение полученных данных в РЖ.

Алгоритм второй части экспериментального исследования при наличии воздействия ЭСП включает в себя следующие шаги:

1) измерение температур внешней среды и МАМ в масляном баке; внесение этих параметров в РЖ;

2) включение масляного насоса, настройка скорости прокачки и давления МАМ; внесение данных в РЖ;

3) одновременное включение трансформатора для нагрева РТ и трансформатора АФ-3 для подачи первого электростатического напряжения $U_1 = 5$ кВ на отдающую иглу; настройка амперметра (или вольтметра) согласно графику проведения экспериментов; внесение данных в РЖ;

4) определение температуры стенки нагретой РТ при установившихся термодинамических

ских условиях движения МАМ и воздействии электрического ветра; внесение данных в РЖ;

5) выключение установки по окончании первого эксперимента; отключение трансформатора АФ-3 после охлаждения РТ и деталей РУ до температуры 373 К;

6) разборка РУ после полного охлаждения; визуальный осмотр поверхности РТ на предмет наличия на ее поверхности углеродистого осадка и его отсутствия в зонах, где проходят силовые линии ЭСП; точное определение границ поверхности РТ без осадка с помощью микроскопа; измерение толщины осадка кварцевым толщиномером; слив отработанного МАМ; заправка масляного бака новой порцией МАМ; сборка РУ с установкой новой неиспользованной РТ; контроль расстояния между остриями рабочих соосных игл согласно графику; внесение полученных данных в РЖ;

7) проведение экспериментов при тех же термодинамических условиях и расстоянии между соосными рабочими иглами с подачей на отдающую иглу второго электростатического напряжения $U_2 = 10$ кВ; повторение экспериментов при подаче электростатических напряжений $U_3 = 15$ кВ, $U_4 = 20$ кВ, $U_5 = 25$ кВ и т. д.; внесение полученных данных в РЖ;

8) выполнение экспериментов при тех же термодинамических условиях и расстоянии между соосными рабочими иглами, но при более высоких значениях температуры РТ, давления или скорости прокачки МАМ, при включении трансформатора АФ-3 и подаче фиксированного электростатического напряжения согласно графику; внесение полученных данных в РЖ;

9) проведение экспериментов по той же программе, но при увеличенном расстоянии между рабочими соосными иглами и т. д.

В целях более полного исследования влияния термодинамических условий на теплоотдачу и осадкообразование в МАМ при отсутствии и наличии воздействия ЭСП все эксперименты следует проводить сначала для РТ из меди, затем для РТ из алюминия и нержавеющей стали.

После завершения экспериментальной части исследования проводят первичную обработку полученных данных без учета и с учетом влияния ЭСП; создают таблицы полученных данных, по которым строят экспериментальные зависимости температуры стенки РТ от скорости прокачки МАМ, давления МАМ в масляной

системе, подаваемого электростатического напряжения, расстояния между соосными рабочими иглами и др.

Затем выполняют вторичную обработку экспериментальных данных, при которой определяют значения коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта без воздействия и с воздействием ЭСП при различных термодинамических условиях.

После всех расчетов формируют полную экспериментальную базу данных без учета и с учетом влияния ЭСП.

Предлагаемая экспериментальная установка позволяет проводить исследования практически с любыми МАМ и другими маслами. Кроме того, на ней можно проводить подобные исследования и с различными жидкими углеводородными горючими, смесями масел и горючих в различных пропорциях.

Конструкция экспериментальной установки дает возможность одновременно исследовать теплоотдачу и осадкообразование, что сокращает материальные и временные затраты на исследования.

Выводы

1. Предложена экспериментальная установка, позволяющая исследовать тепловые процессы, происходящие в МАМ, жидких углеводородных горючих, различных смесях масел и жидких углеводородных горючих при их вынужденной конвекции в сложных термодинамических условиях, приближенных к реальным для АД и ЭУ одно- и многофазового использования, различного базирования и назначения.

2. В дальнейшем запланированы исследования влияния ЭСП на тепловые процессы в МАМ (и в смесях масел с жидкими углеводородными горючими) при их вынужденной конвекции. На основе полученных результатов предполагается разработать: полную экспериментальную базу данных; новые формулы и методики расчета коэффициента теплоотдачи и осадкообразования; новый способ предотвращения углеродистого осадка в системах смазки и охлаждения АД и ЭУ; алгоритм включения, работы и отключения АД и ЭУ при использовании ЭСП; новые патенты на изобретения РФ.

3. Экспериментальная установка и результаты исследований, проведенных на ней, будут

способствовать созданию новой отечественной наземной, воздушной, аэрокосмической, гиперзвуковой и космической техники одно- и многогоразового использования двойного назначе-

ния с повышенными характеристиками по ресурсу, надежности, эффективности, выживаемости, неуязвимости, экономичности и экологичности.

Литература

- [1] Трянов А.Е. *Конструкция масляных систем авиационных двигателей*. Самара, Изд-во СГАУ, 2007. 81 с.
- [2] Коняев Е.А., Немчиков М.Л. *Химмотология авиационных масел и гидравлических жидкостей*. Москва, МГТУГА, 2008. 79 с.
- [3] Джорджи Карл В., Крейн С.Э., ред. *Моторные масла и смазка двигателей*. Москва, Гостоптехиздат, 1959. 529 с.
- [4] Яновский Л.С., Харин А.А., Бабкин В.И. *Основы химмотологии*. Москва-Берлин, Директ-Медиа, 2016. 482 с.
- [5] Венцель С.В. *Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания*. Москва, Химия, 1979. 240 с.
- [6] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н. и др. Разработка способов увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей внутреннего сгорания наземного транспорта. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 10, с. 48–58, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-10-47-57>
- [7] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С. и др. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Циолковский и прогресс науки и техники в 21 веке. Мат. док. 56-ых науч. чтений*. Ч. 1. Калуга, Эйдос, 2021, с. 220–224.
- [8] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С. и др. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Современные проблемы ракетной и космической техники. Сб. науч. ст. 56 науч. чтений*. Казань, Школа, 2022, с. 99–113.
- [9] Алтунин В.А., Львов М.В., Шигапов Р.Р. и др. Фундаментальные проблемы систем смазки двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. *Тр. 11-ой Всерос. конф. Необратимые процессы в природе и технике*. Ч. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, с. 116–119.
- [10] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Гортышов Ю.А. и др. Влияние магнитных и электростатических полей на тепловые процессы в авиационных моторных маслах двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2016, № 1, с. 60–66.
- [11] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Львов М.В. и др. Проблемы систем смазки авиационных двигателей. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 8, с. 357–384, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-8-357-384>
- [12] Алтунин В.А., Львов М.В. Некоторые проблемы систем смазки авиационных двигателей и пути их решения. *Сб. мат. док. межд. молодеж. науч. конф. 25 Туполевские чтения*. Т. 2. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2021, с. 72–83.
- [13] Львов М.В., Каськов А.С., Щиголев А.А. и др. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *16-ые Королевские чтения. Сб. мат. Межд. молодеж. науч. конф.* Т. 1. Самара, Изд-во Самарского ун-та, 2021, с. 240–241.
- [14] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть 1. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 12, с. 530–542, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-530-542>
- [15] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголев А.А. и др. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования особенностей тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторных авиационных масел. *Тез. докл. 20-ой Межд. конф. Авиация и космонавтика*. Москва, Перо, 2021, с. 124–125.
- [16] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть II. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 1, с. 9–21, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-1-9-21>

References

- [1] Tryanov A.E. *Konstruktsiya maslyanykh sistem aviatsionnykh dvigateley* [Design of oil systems of aircraft engines]. Samara, Izd-vo SGAU Publ., 2007. 81 p. (In Russ.).
- [2] Konyaev E.A., Nemchikov M.L. *Khimmotologiya aviatsionnykh masel i gidravlicheskiykh zhidkostey* [Chemotology of aviation oils and hydraulic fluids]. Moscow, MGTUGA Publ., 2008. 79 p. (In Russ.).
- [3] Georgi C.W. *Motor oils and engine lubrication*. Reinhold Publ. Corp., 1954. 514 p. (Russ. ed.: *Motornye masla i smazka dvigateley*. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1959. 529 p.)
- [4] Yanovskiy L.S., Kharin A.A., Babkin V.I. *Osnovy khimmotologii* [Fundamentals of chemotology]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 2016. 482 p. (In Russ.).
- [5] Ventsel S.V. *Primenenie smazochnykh masel v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Application of lubricating oils in combustion engines]. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 240 p. (In Russ.).
- [6] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N. et al. Methods for life-extension and increase of reliability of lubrication systems in internal combustion engines used in ground transportation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2015, no. 10, pp. 48–58, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-10-47-57> (in Russ.).
- [7] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S. et al. [Problems of sedimentation in lubrication systems of aircraft engines]. *Tsiolkovskiy i progress nauki i tekhniki v 21 veke. Mat. dok. 56-ykh nauch. chteniy*. Ch. 1 [Tsiolkovsky and the Progress of Science and Technology in the 21st Century. Proc. 56-th Scientific Readings.]. Kaluga, Eydos Publ., 2021, pp. 220–224. (In Russ.).
- [8] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S. et al. [Problems of sedimentation in lubrication systems of aircraft engines]. *Sovremennyye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki. Sb. nauch. st. 56 nauch. chteniy* [Modern Problems of Rocket and Space Engineering. Proc. 56 Scientific Readings]. Kazan, Shkola Publ., 2022, pp. 99–113. (In Russ.).
- [9] Altunin V.A., Lvov M.V., Shigapov R.R. et al. [Fundamental problems of lubrication systems of engines and power plants of flying vehicles.]. *Tr. 11-oy Vseros. konf. Neobratimyye protsessy v prirode i tekhnike*. Ch. 2 [Proc. 11th Russ. Conf. Irreversible Processes in Nature and Technique. Part 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021, pp. 116–119. (In Russ.).
- [10] Altunin V.A., Altunin K.V., Gortyshov Yu.A. et al. Influence of magnetic and electrostatic fields on heat processes at oils of aircraft engines and power plants. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* [Vestnik of KNRTU n.a. A.N. Tupolev], 2016, no. 1, pp. 60–66. (In Russ.).
- [11] Altunin V.A., Altunin K.V., Lvov M.V. et al. Problems of aircraft engine lubrication systems. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-8-357-384> (in Russ.).
- [12] Altunin V.A., Lvov M.V. [Some problems of lubrication systems of aircraft engines and their solutions]. *Sb. mat. dok. mezhd. molodezh. nauch. konf. 25 Tupolevskie chteniya*. T. 2 [Proc. Int. Youth Sci. Conf. 25 Tupolev Readings. Vol. 2]. Kazan, Izd-vo KNITU-KAI Publ., 2021, pp. 72–83. (In Russ.).
- [13] Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A. et al. [Problems of sedimentation in lubrication systems of aircraft engines]. *16-ye Korolevskie chteniya. Sb. mat. Mezhd. molodezh. nauch. konf.* T. 1 [Proc. 16th Korolev Readings. Vol. 1]. Samara, Izd-vo Samarskogo un-ta Publ., 2021, pp. 240–241. (In Russ.).
- [14] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R. et al. Some ways to improve engines and energy plants brand "NK". Part I. Chast 1. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2021, vol. 13, no. 12, pp. 530–542, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-530-542> (in Russ.).
- [15] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A. et al. [Development and creation of an experimental installation for studying the features of thermal processes under conditions of forced convection of engine aviation oils]. *Tez. dokl. 20-oy Mezhd. konf. Aviatsiya i kosmonavtika* [Abs. 20th Int. Conf. Aviation and Cosmonautics]. Moscow, Pero Publ., 2021, pp. 124–125. (In Russ.).

- [16] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R. et al. Certain ways to the “NK” brand engines and power plants improvement. Part 2. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2022, vol. 14, no. 1, pp. 9–21, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-1-9-21> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 11.01.2023

Информация об авторах

АЛТУНИН Виталий Алексеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, президент Казанского регионального отделения Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, заслуженный изобретатель Республики Татарстан. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

ЛЬВОВ Михаил Валерьевич — аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10).

ЩИГОЛЕВ Александр Александрович — докторант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10).

ЮСУПОВ Артур Альбертович — аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10).

ЯНОВСКАЯ Мария Леонидовна — кандидат технических наук, младший научный сотрудник. Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная, д. 2).

Information about the authors

ALTUNIN Vitaly Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Thermal Engineering and Power Engineering, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, President of the Kazan Regional Branch of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Honored inventor of the Republic of Tatarstan. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

LVOV Mikhail Valerievich — Postgraduate, Department of Thermal Engineering and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).

SHCHIGOLEV Alexander Aleksandrovich — Doctoral Candidate, Department of Heat Engineering and Energy Engineering. Department of Thermal Engineering and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).

YUSUPOV Arthur Albertovich — Postgraduate, Department of Thermal Engineering and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).

YANOVSKAYA Maria Leonidovna — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher. Baranov Central Institute of Aviation Motors (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Алтунин В.А., Львов М.В., ЩигOLEV А.А., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Экспериментальная установка для исследования влияния электростатических полей на теплообмен и процесс осадкообразования в моторном авиационном масле при его вынужденной конвекции. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 113–123, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-113-123](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123)

Please cite this article in English as:

Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Experimental installation for the study of the influence of electrostatic fields on heat exchange and the process of sedimentation in motor aviation oil with its forced convection. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 113–123, doi: [10.18698/0536-1044-2023-7-113-123](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123)