

Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20

© В.А. Алтунин¹, М.В. Львов¹, А.А. Юсупов¹, А.А. Щиголев¹,
И.Р. Пукачѳв¹, М.Л. Яновская²

¹КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

²ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

Показаны результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20 в кольцевом канале с внутренним подогревом. Раскрыты тепловые и другие проблемы масляных систем поршневых и реактивных двигателей летательных аппаратов. Даны краткие сведения об экспериментальной установке и рабочих участках, о методике проведения экспериментальных исследований, о рабочих параметрах. Приведены графики первичной и вторичной обработки полученных экспериментальных материалов по теплоотдаче к маслу МС-20 при различных рабочих параметрах по давлению, скорости прокачки, плотности теплового потока. Проанализированы изменения температуры стенки нагреваемой рабочей трубки, а также коэффициента теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 в зависимости от плотности теплового потока, давления, скорости прокачки масла в кольцевом канале. Показаны и проанализированы обобщающие зависимости числа Нуссельта от скорости прокачки масла, от числа Рейнольдса при различных плотностях теплового потока и давлениях. Экспериментально установлено, что при температуре наружной стенки рабочего участка 373К и ниже углеродистый осадок на ней не образуется, что подтверждает теорию Г.Ф. Большакова о температурной зависимости процесса осадкообразования в углеводородных жидкостях. На основании этого авторами статьи был разработан новый способ борьбы с осадкообразованием в моторных авиационных маслах, предотвращающий появление осадка на нагреваемых металлических поверхностях в объеме масла. Результаты данного экспериментального исследования стали стартовой площадкой для дальнейших исследований по интенсификации теплоотдачи к моторным авиационным маслам и борьбе с осадкообразованием в двигателях летательных аппаратов — при использовании электростатических полей, что будет опубликовано в следующих статьях авторов в данном журнале.

Ключевые слова: моторное авиационное масло, вынужденная конвекция, тепловые процессы, кольцевой канал, нагреваемая металлическая трубка, температура, давление, скорость прокачки, плотность теплового потока, коэффициент теплоотдачи, поршневые двигатели внутреннего сгорания, воздушно-реактивные двигатели, энергоустановки, авиационные и аэрокосмические летательные аппараты

Введение. Развитие современного авиационного двигателестроения приводит к увеличению удельных мощностей авиационных двигателей и энергетических установок (ЭУ) и, как следствие, к повышению тепловой нагрузки на узлы двигателей. Известно, что

моторные авиационные масла выполняют сразу несколько функций в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и в воздушно-реактивных двигателях (ВРД) летательных аппаратов (ЛА): функцию снижения трения; функцию отвода тепла от нагреваемых деталей; функцию очистки двигателей и их масляных каналов от металлических и других частиц [1–18].

Например, в газотурбинном двигателе (ГТД) для смазки теплонапряженного шарикоподшипника требуется подавать более чем на три порядка меньше масла, чем для съема выделяемой им теплоты [1–3]. Через масляную систему проходит большой тепловой поток, например, в турбореактивном двигателе (ТРД) теплоотдача в масло составляет 3...6 кВт на 10 кН стеновой тяги, в турбовинтовом двигателе (ТВД) — 15...25 кВт на 1000 кВт эквивалентной стеновой мощности, а в средних и крупных двухконтурных турбореактивных двигателях (ТРДД) тепловой поток в масло составляет 35...55 кВт.

Температура узлов, охлаждаемых моторным маслом, достигает 600К и более. Так, в двигателе Д-36 на взлетном режиме температура внутри контактно-кольцевого уплотнителя шарикоподшипника компрессора доходит до 598К, температура стакана роликоподшипников турбины после останова двигателя — 613К, температура в полости подшипников роторов вентилятора и КНД составляет 460К [2]. Само моторное масло в двигателе нагревается до 400К.

В зависимости от температуры и давления изменяются и теплофизические свойства (ТФС) моторных авиационных (и других) масел [13–18]. Все это требует пристального изучения тепловых процессов, протекающих в масляных системах авиационных двигателей и ЭУ. Поэтому необходимо находить новые решения в области интенсификации теплообмена в системах смазки авиационных и аэрокосмических ЛА.

Еще одна проблема масляных систем авиационных и аэрокосмических ЛА — негативный процесс осадкообразования [1–17], который происходит при контакте моторного масла с нагретыми поверхностями в различных поршневых ДВС и ВРД. Процесс осадкообразования может оказаться опасным для нормальной работы двигателя или энергоустановки и 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 каналов смазки и охлаждения поршневых ДВС приводит к преждевременному и неожиданному выходу из строя всей системы смазки и всего ДВС [2–7, 15–17]. Закоксовывание масляных форсунок ВРД также может вывести из строя весь двигатель и создать сложные и опасные аварийные ситуации. Известно, что могут полностью закоксовываться масляные форсунки различных ВРД после

800 ч (циклов) работы двигателя [1–3, 7–15], а также масляные теплообменные аппараты (ТА). Данный процесс происходит не только в земных, но и в аэрокосмических и космических условиях. Поэтому важно контролировать состояние масляной системы двигателей ЛА, в том числе и протекающий в ней процесс осадкообразования [4–17]. Необходимо организовывать борьбу с осадкообразованием уже на ранней стадии проектирования, расчета и создания двигателей ЛА, используя существующие и перспективные способы борьбы с этим негативным и очень опасным явлением [2, 4, 5, 7, 10–17].

Сведений о реальных тепловых процессах в системах смазки авиационных двигателей и ЭУ довольно мало. Поэтому следует проводить реальные и достоверные экспериментальные исследования, особенно в условиях вынужденной конвекции моторных авиационных масел. Это необходимо для создания новых, более совершенных систем смазки и охлаждения и, как следствие, более мощных и эффективных двигателей и ЭУ авиационных и аэрокосмических ЛА.

Для исследования тепловых процессов в условиях, приближенных к условиям в масляных системах авиационных двигателей и ЭУ, авторами данной статьи ранее была разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая исследовать теплоотдачу при продольном обтекании моторным маслом нагреваемой металлической трубки в кольцевом канале при различных температурах, скоростях прокачки и давлениях [6, 8, 9]. Данная статья посвящена экспериментальным исследованиям тепловых процессов в моторном авиационном масле марки МС-20 и борьбе с осадкообразованием в двигателях ЛА и ЭУ.

Цель статьи — показать результаты экспериментального исследования тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20 в кольцевом канале.

Задачи данной статьи:

– провести анализ влияния рабочих параметров на теплоотдачу к моторному авиационному маслу в сложных термодинамических условиях при его вынужденной конвекции;

– на основе полученных результатов разработать план дальнейших экспериментальных исследований по интенсификации теплоотдачи к моторным авиационным маслам при их вынужденной конвекции, а также по борьбе с осадкообразованием в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА.

Сведения об экспериментальной установке и сменных рабочих участках. Для проведения экспериментальных исследований была создана экспериментальная база [6, 8, 9]. Схема экспериментальной установки по исследованию тепловых процессов в моторных авиационных маслах в условиях вынужденной конвекции приведена

на рис. 1. Она позволяет имитировать термогидродинамические условия движения моторного масла в масляных каналах двигателей ЛА, а также исследовать влияние воздействия электростатических полей (Е) в различных режимах на протекающие тепловые процессы благодаря использованию сменных рабочих участков.

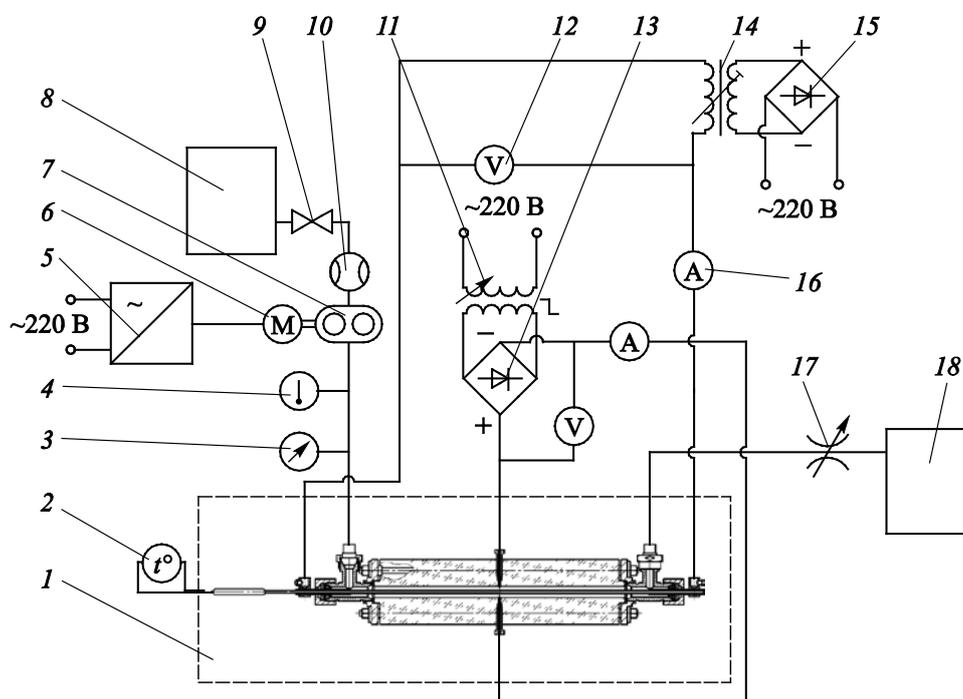


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — рабочий участок; 2 — цифровой термоэлектрический термометр; 3 — манометр; 4 — термометр; 5 — частотный преобразователь; 6 — электродвигатель; 7 — шестеренный насос; 8 — маслобак; 9 — запорный кран; 10 — турбинный расходомер; 11 — прибор АФ-3; 12 — вольтметр; 13 — выпрямитель тока; 14 — регулируемый трансформатор тока; 15 — выпрямитель тока; 16 — амперметр; 17 — регулируемый дроссель; 18 — сливной бак

Необходимо отметить, что ниже будут приведены результаты исследований без применения электростатических полей (Е).

Установка включает в себя систему подачи моторного масла, систему контроля параметров эксперимента, трансформатор для нагрева рабочего участка посредством джоулевой теплоты, трансформатор для генерации высоконапряженного электростатического поля и сменные рабочие участки с различными геометрическими параметрами. Система подачи предназначена для прокачки рабочей жидкости (моторного авиационного масла) через рабочий участок с требуемыми скоростью и давлением, а также для поддержания заданной температуры рабочей жидкости. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Схема рабочего участка с рабочими соосными иглами приведена на рис. 3 (см. рис. 1), общий вид рабочего участка экспериментальной установки представлен на рис. 4.

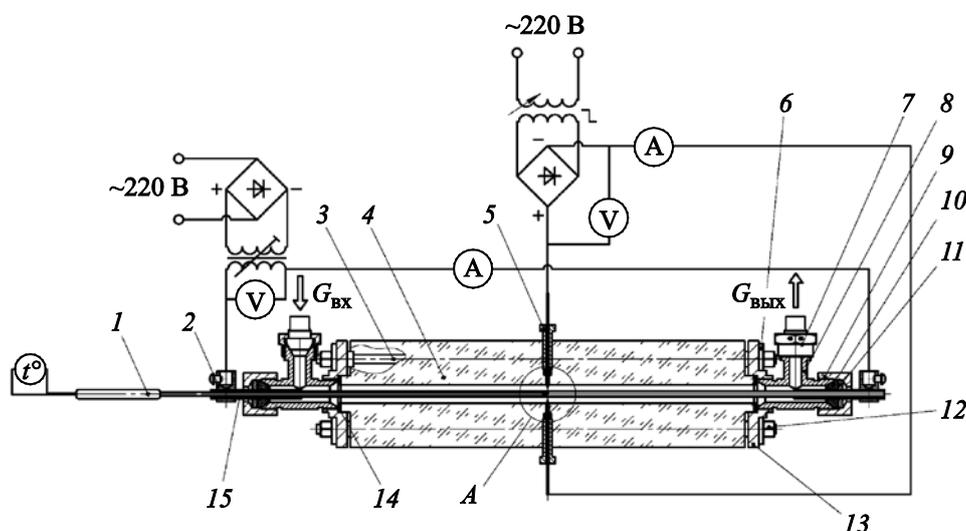
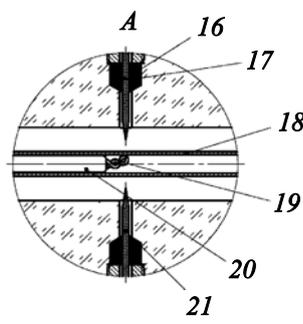


Рис. 3. Рабочий участок экспериментальной установки с одной парой электродов:

1 — ручка подвижной термопары; 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 — фланец; 14 — уплотнительное кольцо; 15 — медная втулка; 16 — токопроводящая игла для положительного заряда (отдающая соосная рабочая игла); 17 — резиновый гидроэлектроизолятор уплотнительного типа для ввода рабочей соосной иглы в рабочий участок; 18 — металлическая (медная, алюминиевая, стальная) трубка; 19 — отогнутый королек термопары; 20 — корпус подвижной термопары; 21 — токопроводящая игла для отрицательного заряда (принимающая соосная рабочая игла)



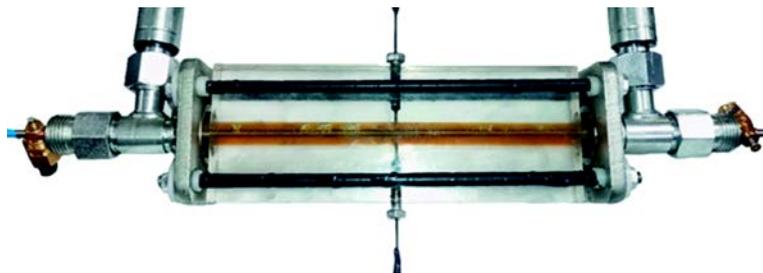


Рис. 4. Общий вид рабочего участка экспериментальной установки с кольцевым каналом

Данная экспериментальная установка позволяет проводить исследования практически с любыми моторными авиационными (и другими) маслами. Кроме того, на ней можно проводить подобные исследования и с различными жидкими углеводородными горючими, а также со смесями масел и горючих в различных пропорциях. Ее конструкция дает возможность проводить исследование обоих явлений (теплоотдачи и осадкообразования) одновременно, что позволяет сократить материальные и временные затраты на эксперимент.

Для того чтобы более полно исследовать и изучить влияние термодинамических условий на теплоотдачу и осадкообразование в моторном авиационном масле, все эксперименты сначала проводили со сменными рабочими трубками из меди, затем — с трубками из алюминия и нержавеющей стали. После завершения экспериментальной части исследования производилась первичная обработка экспериментальных данных: создавались таблицы полученных данных, по которым строились экспериментальные графики зависимости температуры стенки рабочей сменной трубки от плотности теплового потока, от скорости прокачки моторного авиационного масла, от давления в масляной системе. Затем проводилась вторичная обработка экспериментальных данных, при которой определялись значения коэффициента теплоотдачи и значения числа Нуссельта ($Nu_{0_{\text{экс}}}$) при различных термодинамических условиях. После выполнения всех расчетов была сформирована полная экспериментальная база данных в виде таблиц и графиков.

Методика экспериментального исследования. Исследование теплоотдачи к моторному маслу при вынужденном ламинарном течении проводилось при температуре масла $T_{\text{ж}} = 313\text{K}$; температуре нагреваемой поверхности $T_{\text{ст}} = 313...433\text{K}$; давлении в системе $p = 0,5...1,0\text{ МПа}$; скорости прокачки масла $W = 1...4\text{ м/с}$.

Для того чтобы сократить время проведения и число экспериментов, была осуществлена рандомизация и составлен план проведения исследования. Первая часть исследований проходила с рабочими

трубками из меди, вторая — с рабочими трубками из алюминия, третья — с рабочими трубками из нержавеющей стали марки Х18Н9Т.

Первый этап экспериментальных исследований проводился при давлении 0,5 МПа. Первая серия экспериментов осуществлялась при различных плотностях теплового потока и при скорости прокачки 1 м/с. Во второй, третьей, четвертой и пятой сериях были приняты такие же плотности теплового потока и скорости прокачки, соответствующие 2 м/с, 3 м/с и 4 м/с.

Второй этап экспериментальных исследований был проведен при давлении 0,6 МПа, где повторялись все пять серий, описанных выше; третий этап — при давлении 0,7 МПа, четвертый — при давлении 0,8 МПа, пятый — при давлении 0,9 МПа, шестой — при давлении 1,0 МПа.

В ходе экспериментов снимались по приборам контроля следующие показания: объемный расход рабочей жидкости; давление в системе; температура рабочей жидкости; температура нагреваемой металлической трубки рабочего участка; сила тока и напряжение, подаваемые на металлическую трубку для джоулева нагрева.

После каждого эксперимента использованную рабочую трубку заменяли новой, а затем подвергали визуальному осмотру и исследовали под микроскопом на предмет наличия углеродистого осадка.

По полученным первичным экспериментальным данным вычислялись следующие величины: скорость течения жидкости в рабочем участке W , плотность теплового потока q , коэффициент теплоотдачи α_0 , число Нуссельта $Nu_{\text{экс}}$. Скорость потока W определялась из расхода рабочей жидкости с учетом геометрических параметров рабочего участка по формуле

$$W = 4V / \pi(D^2 - d^2), \quad (1)$$

где V — объемный расход рабочей жидкости, м³/с; D — наружный диаметр кольцевого канала рабочего участка, м; d — внутренний диаметр кольцевого канала рабочего участка, м.

Поскольку вся мощность электрического тока, подаваемого на металлическую трубку, переходит в тепловой поток, плотность теплового потока определялась выражением

$$q = IU / S, \quad (2)$$

где I — сила тока, подаваемая на нагреваемую трубку рабочего участка, А; U — напряжение на нагреваемой трубке рабочего участка, В; S — площадь внешней поверхности нагреваемой трубки, м².

Коэффициент теплоотдачи α_0 , Вт/(м²·К), вычислялся по формуле

$$\alpha_0 = q / (T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}), \quad (3)$$

где $T_{ж}$ — температура рабочей жидкости, К; $T_{ст}$ — температура стенки нагреваемой трубки, К.

Течение рабочей жидкости во всех экспериментах являлось ламинарным, так как при максимальной скорости $W = 4$ м/с наибольшее значение числа Рейнольдса, рассчитанное по формуле

$$Re = WD_3 / \nu, \quad (4)$$

где W — скорость течения рабочей жидкости, м/с; D_3 — эквивалентный диаметр кольцевого канала, м; ν — кинематическая вязкость рабочей жидкости, м²/с, составило $Re = 116$.

При обработке экспериментальных данных учитывались погрешности приборов. Все результаты экспериментов первичной и вторичной обработок заносили в рабочий журнал.

Результаты экспериментального исследования. В данной статье показаны основные результаты исследования, проведенного с рабочими трубками, выполненными из нержавеющей стали марки Х18Н9Т. Эксперименты проводились с прокачкой моторного авиационного масла марки МС-20 при рабочем давлении $p = (0,5 \dots 1,0)$ МПа, температуре рабочей жидкости $T_{ж} = 313$ К, температуре стенки нагреваемой трубки $T_{ст} = (313 \dots 433)$ К.

Результаты исследования изменения температуры стенки сменной рабочей трубки при скорости прокачки масла в кольцевом канале $W = 1$ м/с показаны на рис. 5, а, график на котором свидетельствует о том, что увеличение плотности теплового потока приводит к росту температуры стенки сменной рабочей трубки.

Графики, представленные на рис. 5, б–д, отражают результаты исследования изменения температуры стенки сменной рабочей трубки при скоростях прокачки масла W , равных 1,5; 2; 3; 4 м/с соответственно. Из анализа этих графиков следует, что возрастание плотности теплового потока приводит к повышению температуры стенки сменной рабочей трубки и что с увеличением скорости прокачки масла уменьшается температура стенки сменной рабочей трубки. Это хорошо иллюстрирует обобщающий график (рис. 6).

Влияние плотности теплового потока на коэффициент теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 при его различных скоростях прокачки продемонстрировано на рис. 7, а–д. По графикам на рис. 7 видно, что повышение плотности теплового потока приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи α_0 к маслу при всех скоростях прокачки, а рост скорости прокачки масла также его увеличивает, что особенно хорошо подтверждают обобщающие графики, представленные на рис. 8.

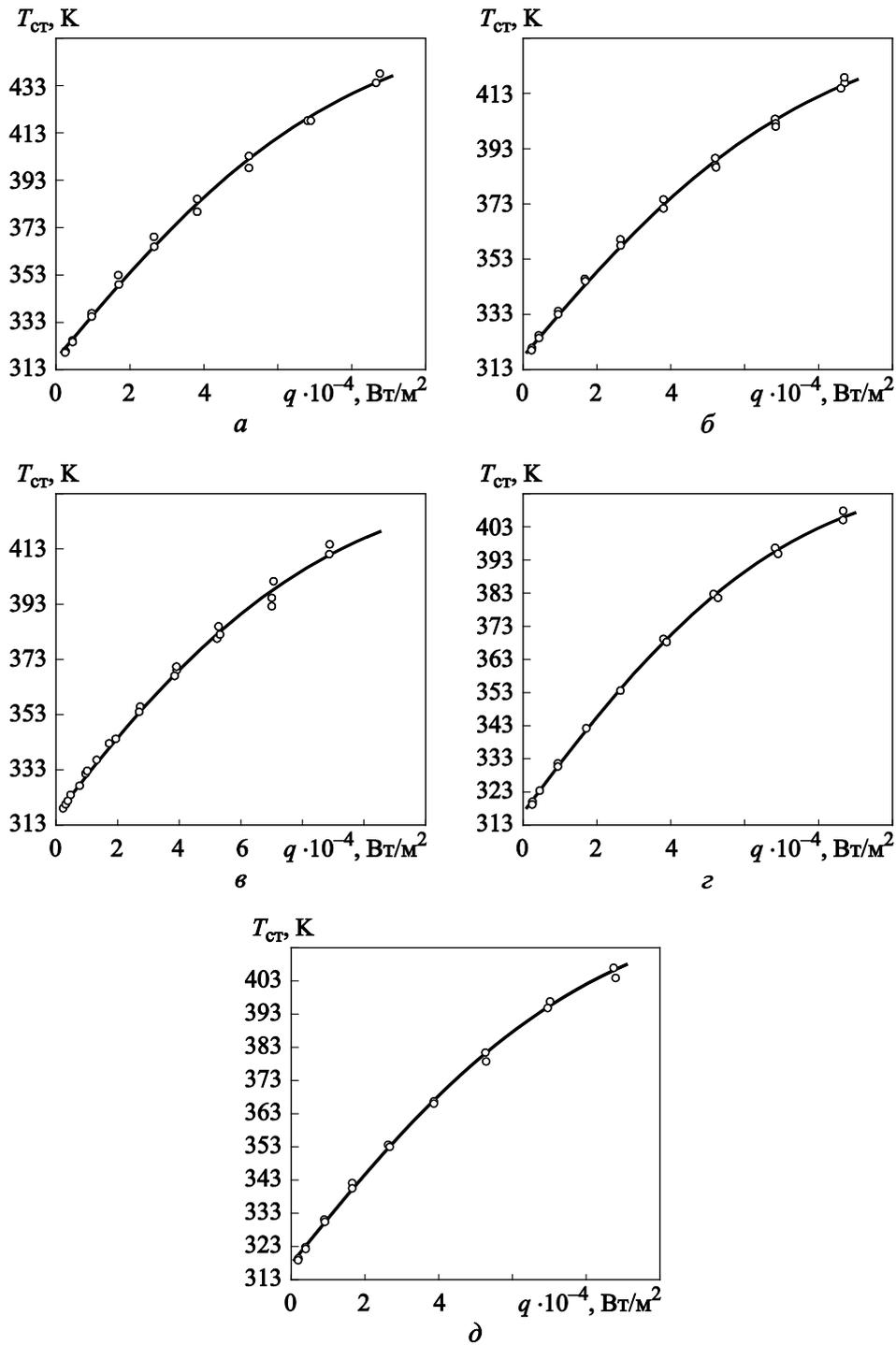


Рис. 5. Зависимость температуры стенки рабочей трубки $T_{ст}$ от плотности теплового потока q при скорости прокачки масла W , равной 1 м/с (а), 1,5 м/с (б), 2 м/с (в), 3 м/с (з), 4 м/с (д). Экспериментальные значения $T_{ст}$ обозначены как (о)

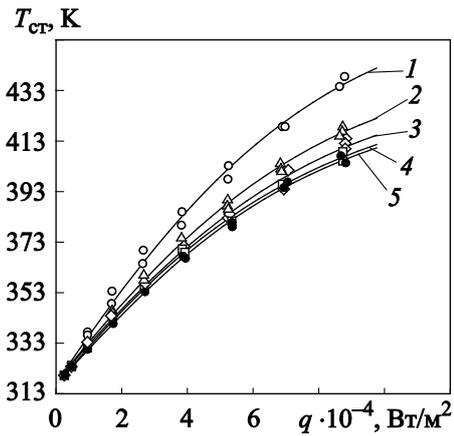


Рис. 6. Зависимость температуры стенки рабочей трубки от плотности теплового потока q при различных скоростях прокачки масла W :

1 — 1 м/с (○); 2 — 1,5 м/с (△); 3 — 2 м/с (◇);
4 — 3 м/с (□); 5 — 4 м/с (●)

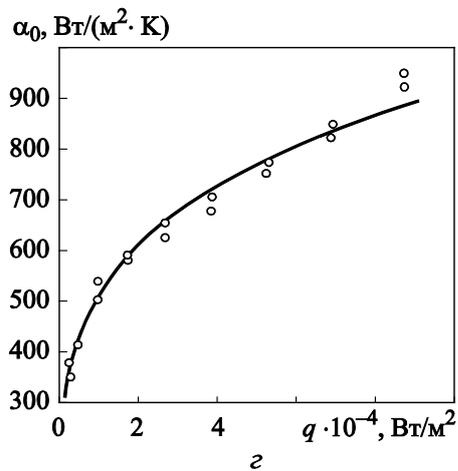
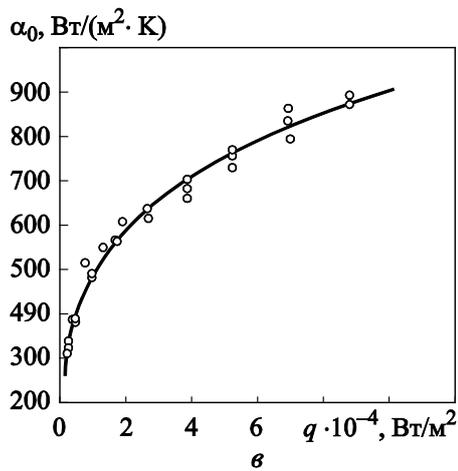
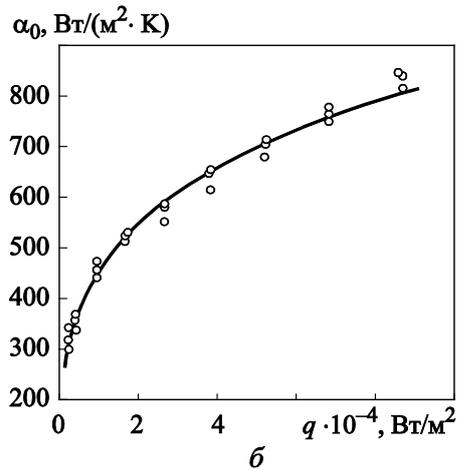
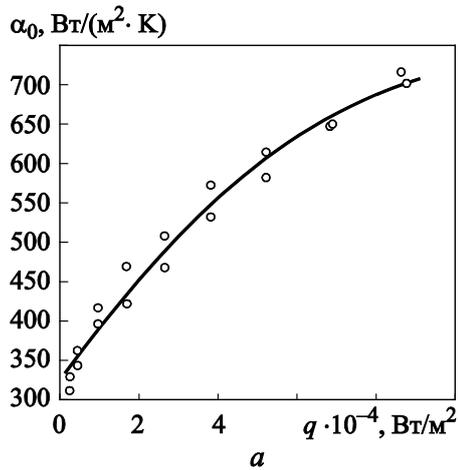


Рис. 7 (начало). Экспериментальные графики зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 от плотности теплового потока q при скорости прокачки масла W , равной 1 м/с (а), 1,5 м/с (б), 2 м/с (в), 3 м/с (г). Экспериментальные значения α_0 как (○)

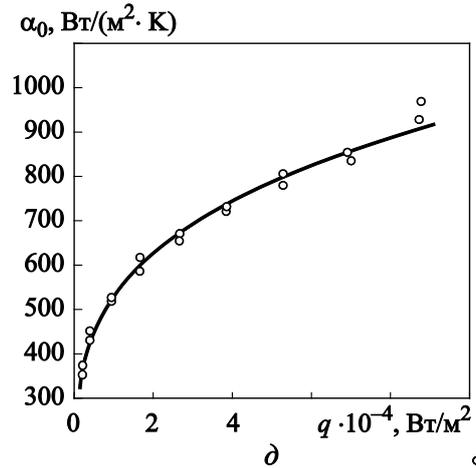


Рис. 7 (окончание). Экспериментальные графики зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 от плотности теплового потока q при скорости прокатки масла W , равной 4 м/с (δ). Экспериментальные значения α_0 как (\circ)

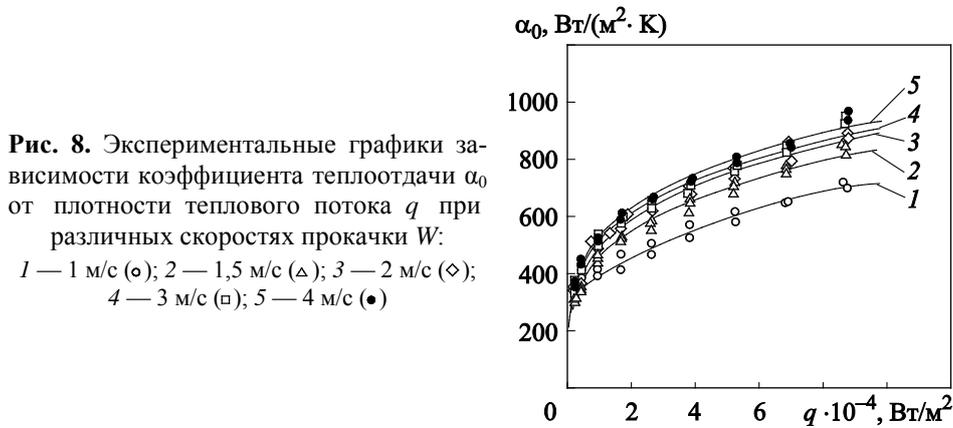


Рис. 8. Экспериментальные графики зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 от плотности теплового потока q при различных скоростях прокатки W :
 1 — 1 м/с (\circ); 2 — 1,5 м/с (Δ); 3 — 2 м/с (\diamond);
 4 — 3 м/с (\square); 5 — 4 м/с (\bullet)

Экспериментальные графики зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 от скорости прокатки W масла марки МС-20 при различных плотностях теплового потока q представлены на рис. 9, а. Видно, что увеличение скорости прокатки масла приводит к волнообразному изменению коэффициента теплоотдачи при любых плотностях теплового потока, что связано, вероятно, с ТФС масла марки МС-20, с формированием и нагревом пограничного слоя в кольцевом канале.

Графики зависимости числа Нуссельта $Nu_{0\text{эксп}}$ от скорости прокатки W масла марки МС-20 при различной плотности теплового потока q приведены на рис. 9, б.

Характерное волнообразное изменение числа Нуссельта $Nu_{0\text{эксп}}$ в зависимости от скорости прокатки масла при любых плотностях теплового потока, видимо, также связано с ТФС данного масла, а также с формированием и прогревом пограничного слоя в кольцевом канале.

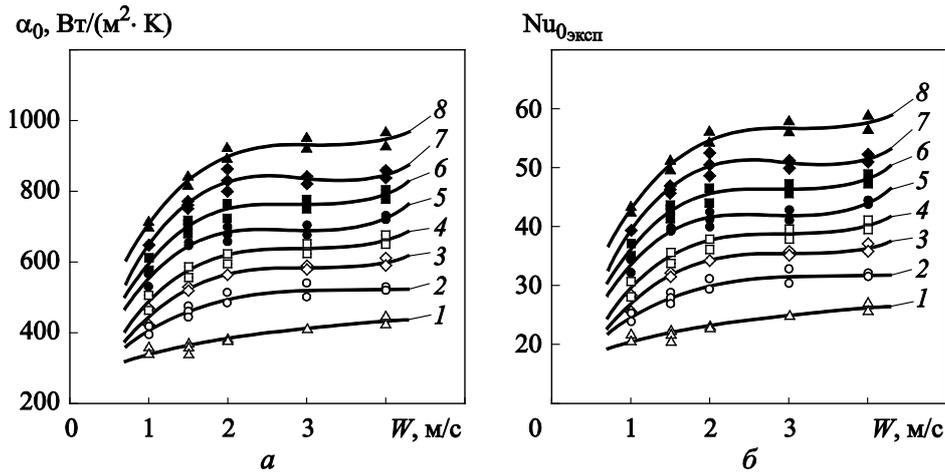


Рис. 9. Экспериментальные графики зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 (а) и числа Нуссельта $Nu_{0\text{эксп}}$ (б) от скорости прокачки W масла при различных плотностях теплового потока q :

1 — 4 кВт/м² (Δ); 2 — 9 кВт/м² (\circ); 3 — 17 кВт/м² (\diamond); 4 — 26 кВт/м² (\square); 5 — 38 кВт/м² (\bullet); 6 — 52 кВт/м² (\blacksquare); 7 — 68 кВт/м² (\blacklozenge); 8 — 87 кВт/м² (\blacktriangle)

Графики зависимости числа Нуссельта $Nu_{0\text{эксп}}$ от числа Рейнольдса Re масла марки МС-20 при различной плотности теплового потока q даны на рис. 10. Кроме того, на этом обобщающем рисунке видно волнообразное изменение числа Нуссельта при увеличении числа Рейнольдса для различной плотности теплового потока, которое также связано, видимо, с ТФС данного масла и с формированием и прогревом пограничного слоя в кольцевом канале.

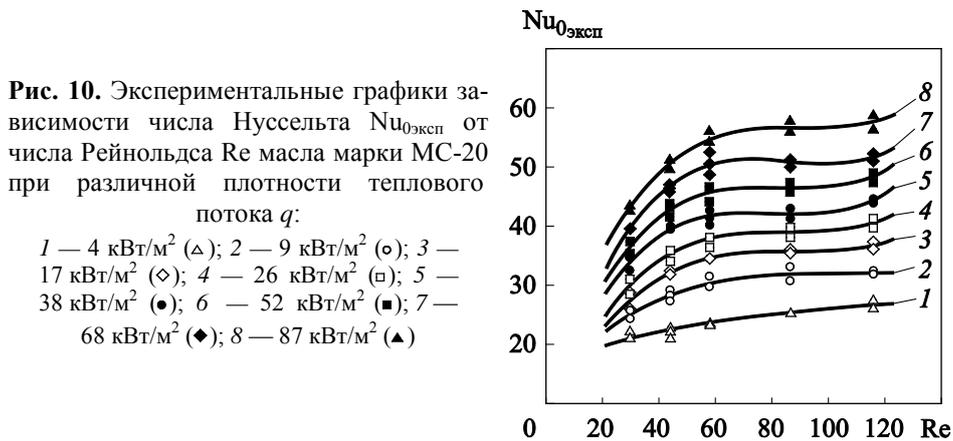


Рис. 10. Экспериментальные графики зависимости числа Нуссельта $Nu_{0\text{эксп}}$ от числа Рейнольдса Re масла марки МС-20 при различной плотности теплового потока q :

1 — 4 кВт/м² (Δ); 2 — 9 кВт/м² (\circ); 3 — 17 кВт/м² (\diamond); 4 — 26 кВт/м² (\square); 5 — 38 кВт/м² (\bullet); 6 — 52 кВт/м² (\blacksquare); 7 — 68 кВт/м² (\blacklozenge); 8 — 87 кВт/м² (\blacktriangle)

График зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 от давления p для моторного авиационного масла марки МС-20 при $W = 2$ м/с, $q = 52$ кВт/м² и $T_{\text{ж}} = 343$ К показан на рис. 11. На нем видно, что увеличение давления приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи к моторному маслу.

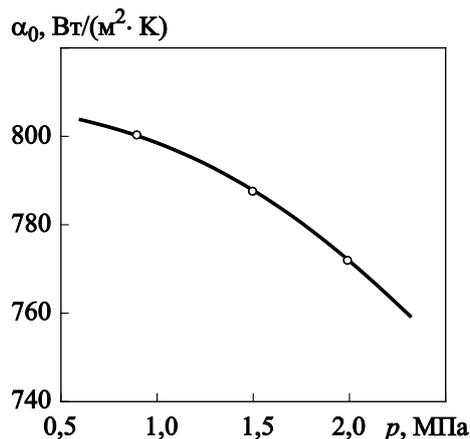


Рис. 11. Экспериментальный график зависимости коэффициента теплоотдачи α_0 от давления p для масла марки МС-20. Экспериментальные значения α_0 (о)

Эксперименты показали, что на наружной поверхности каждой рабочей трубки появлялся углеродистый осадок темно-коричневого и черного цвета. Этот процесс начинался при температуре нагрева трубки более 373К. Иными словами, данная температура является границей, ниже которой осадок на нагреваемых металлических поверхностях не образуется.

Этот эффект в экспериментах с жидкими углеводородными горючими и охладителями (с ТС-1 и пр.) ранее был обнаружен автором В.А. Алтуниным, чем он подтвердил теорию Г.Ф. Большакова [19] об осадкообразовании в жидких углеводородных горючих и охладителях. На основе этого эффекта В.А. Алтуниным был разработан новый перспективный способ борьбы с осадкообразованием в жидких углеводородных горючих и охладителях, предотвращающий осадкообразование в двигателях и ЭУ на жидких углеводородных горючих и охладителях.

Результаты экспериментальных исследований с моторным авиационным маслом марки МС-20 позволили авторам данной статьи создать подобный новый и перспективный способ предотвращения осадкообразования в системах смазки авиационных двигателей и ЭУ ЛА. Полученные результаты по теплоотдаче к моторному авиационному маслу марки МС-20 могут служить основой для дальнейших новых экспериментальных исследований с электростатическими полями, которые будут интенсифицировать теплоотдачу и предотвращать осадкообразование. Решению этой задачи будут посвящены статьи авторов в следующих выпусках этого журнала.

Заключение. В данной статье подробно показаны и обсуждены результаты экспериментального исследования тепловых процессов в моторном авиационном масле марки МС-20 при сложных термоди-

намических условиях и вынужденной конвекции. Создана представленная в виде таблиц и графиков база экспериментальных данных по тепловым процессам в моторном авиационном масле марки МС-20 в кольцевом канале при различных рабочих параметрах по давлению, скорости прокачки и температурах самого масла и рабочей сменной трубки.

На основе полученных результатов намечены пути дальнейших экспериментальных исследований по интенсификации теплоотдачи и борьбе с осадкообразованием. Полученные результаты экспериментального исследования стали основным фундаментом для продолжения исследований, посвященных влиянию электростатических полей на теплоотдачу и осадкообразование в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА.

Материалы данной статьи могут послужить для авторов стартовой площадкой для опубликования следующих статей, в которых будут представлены обзорные материалы, приведенные результаты будут сравниваться с аналогичными параметрами, полученными другими авторами, а также будут даны новые формулы и методики расчета тепловых процессов в моторных авиационных маслах, в свою очередь, в сравнении с предложенными разными авторами — без применения и с применением электростатических полей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин В.И., Алексахин А.А., Яновский Л.С., Дунаев С.В., Хурумова А.Ф. Отечественные смазочные масла для авиационных газотурбинных двигателей: проблемы и перспективы. *Двигатель*, 2012, № 5 (83), с. 8–11.
- [2] Яновский Л.С., Харин А.А., Бабкин В.И. *Основы химмотологии*. Москва–Берлин, Директ-Медиа, 2016, 482 с.
- [3] Трянов А.Е. *Конструкция масляных систем авиационных двигателей*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007, 81 с.
- [4] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Щиголов А.А., Платонов Е.Н. Разработка способов увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей внутреннего сгорания наземного транспорта. *Известия вузов. Машиностроение*, 2015, № 10 (667), с. 47–57.
- [5] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Щиголов А.А., Юсупов А.А. Исследование возможности применения магнитных и электростатических полей для борьбы с осадкообразованием в авиационных моторных маслах двигателей, энергоустановок и техносистем наземного, воздушного и аэрокосмического базирования. *Известия вузов. Машиностроение*, 2017, № 3 (684), с. 76–88.
- [6] Алтунин В.А., Львов М.В., Зырянов С.П., Яновская М.Л. Разработка экспериментальной базы для исследования тепловых процессов в авиационных моторных маслах // *Авиакосмические технологии (АКТ–2019): Тез. XX Междунар. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов*. Воронеж, ООО Фирма «Элист», 2019, с. 11–12.
- [7] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Демиденко В.П., Яновская М.Л. Исследование тепловых процессов в моторных авиационных маслах и системах смазки двигателей летательных аппаратов.

- Материалы докл. 43-х Академ. чтений по космонавтике, посвящ. памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. (Москва, 29 января — 1 февраля 2019 г.).* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, т. 1, с. 158–160.
- [8] Львов М.В., Алтунин В.А. Разработка экспериментальной установки для исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторных авиационных маслах в условиях вынужденной конвекции. *XLVI Академические чтения по космонавтике: Сб. тез., посвящ. памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, 25–28 января 2022 года.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 458–461.
- [9] Львов М.В., Алтунин В.А., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования особенностей тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторных авиационных масел. *Авиация и космонавтика: Тез. докл. 20-й Междунар. конф., Москва, 22–26 ноября 2021 года.* Москва, Изд-во «Перо», 2021, с. 124–125.
- [10] Алтунин В.А., Кошелев Д.В., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Анализ проблем увеличения ресурса и надёжности топливосмазочных фильтрующих систем двигателей летательных аппаратов. *Сб. тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. молодых учёных и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки». 28–30 мая 2019 г., Москва.* Москва, Изд-во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 2019, с. 311–313.
- [11] Алтунин В.А., Демиденко В.П., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Применение результатов экспериментальных исследований для создания новых конструктивных схем систем смазки двигателей летательных аппаратов воздушного и аэрокосмического базирования. *Труды 53-х Науч. чтений, посвящ. памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 18–19 сентября 2018 г.).* Казань, Изд-во Казанского университета, 2019, с. 160–176.
- [12] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Каськов А.С. Разработка новых конструктивных схем систем смазки двигателей летательных аппаратов воздушного и аэрокосмического применения. *Труды 12-й Общерос. науч.-практич. конф. «Инновационные технологии и технические средства специального назначения» (Санкт — Петербург, БГТУ им. Д.Ф. Устинова (ВОЕНМЕХ), 20 — 22 ноября 2019 г.). Журнал «ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ», 2020, № 62, с. 312–313.*
- [13] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А. Разработка способов борьбы с осадкообразованием в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Сб. науч. статей 8-й Междунар. науч.-практич. конф. «Академические Жуковские чтения», посвящ. 100-летию юбилею Военно-воздушной академии (Воронеж, 25–26 ноября 2020 г.).* Воронеж, Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020, с. 23–24.
- [14] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Яновская М.Л. Алгоритм учёта особенностей тепловых процессов в моторных авиационных маслах при проектировании и создании систем смазки воздушно-реактивных двигателей летательных аппаратов. *Тр. 12-й Общерос. молодежной науч.-техн. конф. «Молодёжь. Техника. Космос». (23 — 25 апреля 2020 г., г. Санкт-Петербург, БГТУ им. Д.Ф. Устинова, «ВОЕНМЕХ»). Том 1.* Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2020, с. 221–224.
- [15] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Матер. докл. 56-х Науч. чтений, посвящ. разработке научного*

- наследия и развитию идей К.Э. Циолковского: «Циолковский и прогресс науки и техники в 21 веке». Калуга, Изд-во «Эйдос», 2021, ч. 1, с. 220–224.
- [16] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Львов М.В., Щиголов А.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Проблемы систем смазки авиационных двигателей. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 8, с. 357–384.
- [17] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Современные проблемы ракетной и космической техники: сб. научных статей (полных докладов) 56-х Науч. чтений памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 21–22 сентября 2021 г.)*. Казань, Редакционно-издательский центр «Школа», 2022, с. 99–113.
- [18] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Расчет плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2252>
- [19] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.

Статья поступила в редакцию 10.05.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Пукачѳв И.Р., Яновская М.Л. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), президент Казанского регионального отделения РАКЦ (КазРО РАКЦ), Заслуженный изобретатель Республики Татарстан. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: altspacevi@yahoo.com

Львов Михаил Валерьевич — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Юсупов Артур Альбертович — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Щиголов Александр Александрович — докторант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Пукачѳв Ильяс Ринатович — магистрант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

Яновская Мария Леонидовна — кандидат технических наук, младший научный сотрудник Центрального института авиационного моторостроения им. П.И. Баранова.

Results of experimental study of the thermal processes at forced convection of the MS-20 engine aviation oil

© V.A. Altunin¹, M.V. Lvov¹, A.A. Yusupov¹, A.A. Shchigolev¹,
I.R. Pukachev¹, M.L. Yanovskaya²

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev — KAI,
Kazan, 420111, Russia

² Baranov Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia

The paper presents results of experimental study of the thermal processes under conditions of the MS-20 aviation engine oil forced convection in the annular channel with internal heating. Thermal and other problems of the aircraft piston and jet engines oil systems are disclosed, the goal is set, and the tasks of this article are provided. Brief information about the experimental setup and the working sections, the methodology for conducting experimental studies and the operating parameters are given. The paper provides graphs of primary and secondary processing of the obtained experimental materials on heat transfer in regard to the MS-20 oil at various operating parameters for pressure, pumping rate and heat flux density. It analyzes alterations in the wall temperature of the heated working tube, as well as the heat transfer coefficient of the MS-20 aviation engine oil depending on heat flux density, pressure and oil pumping rate in the annular channel. Generalizing dependences of the Nusselt number on the oil pumping rate and on the Reynolds number are shown and analyzed at various heat flux densities and pressures. It was experimentally established that at the temperature of the working section outer wall of 373 K and below, no carbon deposits was forming on it, which confirmed the theory of G.F. Bolshakov on temperature dependence of the sedimentation process in the hydrocarbon liquids. Based on this, authors of the article developed a new method for preventing sludge formation in the aviation motor oils and averting sludge appearance on the heated metal surfaces in the oil volume. Experimental study results became a launching pad for further research in heat transfer intensification to the aircraft engine oils and preventing sludge formation in the aircraft engines using the electrostatic fields. That would be published in the following articles by the authors in this journal.

Keywords: *aviation engine oil, forced convection, thermal processes, annular channel, heated metal tube, temperature, pressure, pumping rate, heat flux density, heat transfer coefficient, piston internal combustion engines, air jet engines, power plants, aircraft and spacecraft*

REFERENCES

- [1] Babkin V.I., Aleksashin A.A., Yanovsky L.S., Dunaev S.V., Khurumova A.F. Otechestvennye smazochnye masla dlya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley: problemy i perspektivy [Domestic lubricants for aviation gas turbine engines: problems and prospects]. *Dvigatel — Engine*, 2012, no. 5 (83), pp. 8–11.
- [2] Yanovsky L.S., Kharin A.A., Babkin V.I. *Osnovy khimmotologii* [Fundamentals of chemotology]. Moscow–Berlin, Direkt-Media Publ., 2016, 482 p.
- [3] Tryanov A.E. *Konstruktsiya maslyanykh sistem aviatsionnykh dvigateley* [Design of oil systems of the aircraft engines]. Samara, SamGAU Publ., 2007, 81 p.
- [4] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Platonov E.N. Razrabotka sposobov uvelicheniya resursa i nadezhnosti sistem smazki dvigateley vnutrennego sgoraniya nazemnogo transporta [Methods of life-extension and increase of reliability of lubrication systems in internal combustion engines used in ground

- transportation]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 10 (667), pp. 47–57.
- [5] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Yusupov A.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya magnitnykh i elektrosticheskih poley dlya borby s osadkoobrazovaniem v aviatsionnykh motornykh maslakh dvigateley, energoustanovok i tekhnosistem nazemnogo, vozdušnogo i aerokosmicheskogo bazirovaniya [Researching the possible use of magnetic and electrostatic fields to address the problem of deposit formation in aviation oil for engines, power plants and technical systems of aircraft for aerial and aerospace use]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2017, no. 3 (684), pp. 76–88.
- [6] Altunin V.A., Lvov M.V., Zyryanov S.P., Yanovskaya M.L. Razrabotka eksperimentalnoy bazy dlya issledovaniya teplovykh protsessov v aviatsionnykh motornykh maslakh [Development of an experimental base for the study of thermal processes in the aviation motor oils]. In: *Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2019): Tez. XX Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. i shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Aerospace Technologies (AST-2019): Proceedings of the XX International scientific and technical conference and school for young scientists, graduate students and students]. Voronezh, OOO Firma Elist Publ., 2019, pp. 11–12.
- [7] Altunin V.A., Altunin K.V., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Demidenko V.P., Yanovskaya M.L. Issledovanie teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh i sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Study of thermal processes in the aircraft motor oils and lubrication systems of the aircraft engines]. In: *Mater. dokl. 43-kh Akadem. chteniy po kosmonavtike, posvyasch. pamyati akademika S.P. Koroleva i dr. vydavushchikhsya otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Materials of reports at the 43rd Academic readings on cosmonautics devoted to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers in space exploration (Moscow, January 29 – February 1, 2019)]. Moscow, BMSTU Publ., 2019, vol. 1, pp. 158–160.
- [8] Lvov M.V., Altunin V.A. Razrabotka eksperimentalnoy ustanovki dlya issledovaniya vliyaniya elektrosticheskih poley na teplovykh protsessy v motornykh aviatsionnykh maslakh v usloviyakh vynuzhdennoy konveksii [Development of an experimental setup for studying the effect of electrostatic fields on thermal processes in engine oils under the forced convection]. In: *XLVI Akademicheskie chteniya po kosmonavtike, posvyasch. pamyati S.P. Koroleva i drugikh vydavushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. Moskva, 25–28 yanvarya 2022 goda* [XLVI Academic readings on cosmonautics dedicated to memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of space exploration. Moscow, January 25–28, 2022]. Moscow, BMSTU Publ., 2022, pp. 458–461.
- [9] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Razrabotka i sozdanie eksperimentalnoy ustanovki dlya issledovaniya osobennostey teplovykh protsessov v usloviyakh vynuzhdennoy konveksii motornykh aviatsionnykh masel [Development and creation of experimental installation for the study of the thermal processes features in conditions of forced convection of the motor aviation oils]. In: *Aviatsiya i kosmonavtika: Tez. dokl. 20-y Mezhdunar. konf., Moskva, 22–26 noyabrya 2021 g.* [Thesis of reports of the 20th International Conference “Aviation and Cosmonautics”, Moscow, November 22–26, 2021]. Moscow, Pero Publ., 2021, pp. 124–125.
- [10] Altunin V.A., Koshelev D.V., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Analiz problem uvelicheniya resursa i nadezhnosti toplivo-

- smazochnykh filtruyuschikh sistem dvigateley letatelnykh apparatov [Analysis of the problems of increasing service life and reliability of the fuel-lubricating filtering systems of the aircraft engines]. In: *Sbornik tez. dokl. Vseros. nauchno-tekhn. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov "Aviatsionnye dvigateli i silovye ustanovki"*. (FGUP "TsIAM im. P.I. Baranova", 28–29 maya 2019 g., Moskva) [Collection of abstracts of reports at the All-Russian scientific and technical conference of young scientists and specialists "Aircraft engines and power plants". (FSUE "CIAM named after P.I. Baranov", May 28–30, 2019, Moscow)]. Moscow, FGUP TsIAM im. P.I. Baranova Publ., 2019, pp. 311–313.
- [11] Altunin V.A., Demidenko V.P., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Primenenie rezultatov eksperimentalnykh issledovaniy dlya sozdaniya novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki dvigateley letatelnykh apparatov vozdushnogo i aerokosmicheskogo bazirovaniya [Application of the results of experimental studies to create new design schemes for lubrication systems for engines of aircraft and aerospace vehicles]. In: *Trudy 53-kh Nauchnykh chteniy, posvyasch. pamyati K.E. Tsiolkovskogo. Kaluga, 18–19 sentyabrya 2018 g.* [Proceedings of the 53rd Scientific Readings dedicated to the memory of K.E. Tsiolkovsky. (Kaluga, September 18–19, 2018)]. Kazan, Kazan University Publ., 2019, pp. 160–176.
- [12] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Kaskov A.S. Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki dvigateley letatelnykh apparatov vozdushnogo i aerokosmicheskogo primeneniya [Development of new design schemes for lubrication systems for aircraft engines for air and aerospace applications]. In: *Trudy 12-y Obscheros. nauchn.-prakt. konf. "Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsialnogo naznacheniya"*. (Sankt-Peterburg, BGTU im. D.F. Ustinova VOENMEKH), 20–22 noyabrya 2019 g. [Proceedings of the 12th All-Russian scientific and practical conference "Innovative technologies and technical means of special purpose". (St. Petersburg, BSTU named after D.F. Ustinov (VOENMEH), November 20–22, 2019)]. *Zhurnal "Voenmekh. Vestnik BGTU" — Journal "Voenmeh. Bulletin of BSTU"*, 2020, no. 62, p. 312–313.
- [13] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A. Razrabotka sposobov borby s osadkoobrazovaniem v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Development of ways to control sedimentation in the aircraft engine lubrication systems]. In: *Sb. nauch. statey 8-y Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. "Akademicheskie Zhukovskie chteniya", posvyasch. 100-letnyu yubileyu Voenno-vozdushnoy akademii (Voronezh, 25–26 noyabrya 2020 g.)* [Collection of scientific articles of the 8th International scientific and practical conference "Academic Zhukovsky readings" dedicated to the 100th anniversary of the Air Force Academy (Voronezh, November 25–26, 2020)]. Voronezh, VUNTs VVS "VVA" Publ., 2020, pp. 23–24.
- [14] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Yanovskaya M.L. Algoritm ucheta osobennostey teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh pri proektirovani i sozdanii sistem smazki vozdushno-reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov [Algorithm for considering peculiarities of thermal processes in the aviation motor oils in design and creation of lubrication systems for the aircraft air-breathing engines]. In: *Tr. 12-y Obscheros. molodezhnoy nauchno-tekhn. konf. "Molodezh. Tekhnika. Kosmos"*. (23–25 aprelya 2020 g., g. Sankt-Peterburg, BGTU im. D.F. Ustinova, "VOENMEH") [Proceedings of the 12th All-Russian youth scientific and technical conference "Youth. Technique. Space". (April 23–25, 2020, St. Petersburg, BSTU named after D.F. Ustinov, "VOENMEH")]. Volume 1. St. Petersburg, BGTU "VOENMEH" Publ., 2020, pp. 221–224.

- [15] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Problemy osadkoobrazovaniya v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Problems of sediment formation in the aircraft engine lubrication systems]. In: *Mater. dokl. 56-kh Nauchnykh chteniy, posvyasch. razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo: "Tsiolkovskiy i progress nauki i tekhniki v 21 veke"* [Materials of the reports at the 56th Scientific readings dedicated to development of the scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky: "Tsiolkovsky and the progress of science and technology in the 21st century"]. Kaluga, Eydos Publ., 2021, part 1, pp. 220–224.
- [16] Altunin V.A., Altunin K.V., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Aliyev I.N., Yanovskaya M.L. Problemy sistem smazki aviatsionnykh dvigateley [Problems of lubrication systems of the aviation engines]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384.
- [17] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Problemy osadkoobrazovaniya v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Recording problems in aircraft engines lubricating systems]. In: *Sovremennye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki: sb. nauchnykh statey (polnykh dokladov) 56-kh nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 21–22 sentyabrya 2021 g.)*. [Modern problems of missile and space technology: collection of scientific articles (full reports) of the 56th scientific readings devoted to the memory of K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 21–22, 2021)]. Kazan, Redaktsionno-izdatelskiy Tsentr "Shkola" Publ., 2022, pp. 99–113.
- [18] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Raschet plotnosti motornogo aviatsionnogo masla Marki MS-20 pri razlichnykh temperaturakh i davleniyakh [Calculation of the density of motor aviation MS-20 brand oils at various temperature and pressure]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 2. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2252>
- [19] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physical and chemical bases of precipitation formation in the jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.

Altunin V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI; Academician, Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky (RACTs); President, Kazan Regional Branch of the RACTs (KazRB RACTs); Honored Inventor of the Republic of Tatarstan. e-mail: altspacevi@yahoo.com

Lvov M.V., Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.

Yusupov A.A., Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.

Shchigolev A.A., Doctoral Student, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.

Pukachev I.R., Master's Program Student, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.

Yanovskaya M.L., Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher, Baranov Central Institute of Aviation Motors.