

Методики расчета влияния электростатических полей на теплоотдачу к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции

© В.А. Алтунин¹, М.В. Львов¹, А.А. Юсупов¹, А.А. Щиголев¹,
Ю.Ф. Гортышов¹, Е.П. Кореев¹, М.Л. Яновская²

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

²ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Российская Федерация

Разработаны новые методики расчета коэффициентов теплоотдачи и относительных коэффициентов теплоотдачи K_E . В их основе лежат результаты проведенных экспериментальных исследований по влиянию поперечных электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции в кольцевом канале при различных значениях таких параметров, как: плотность теплового потока от рабочей нагреваемой металлической трубки, давление и скорость прокачки масла, расстояние между рабочими соосными иглами и подаваемых высоковольтных электростатических напряжений. Применение данных методик будет способствовать быстрому и качественному расчету, проектированию и созданию новых масляных систем двигателей летательных аппаратов повышенных характеристик.

Ключевые слова: моторное авиационное масло, вынужденная конвекция, тепловые процессы, кольцевой канал, нагреваемая металлическая трубка, температура, давление, скорость прокачки, плотность теплового потока, электростатические поля, соосные рабочие иглы, коэффициент теплоотдачи, относительный коэффициент теплоотдачи

Введение. Экспериментальные исследования с моторными авиационными маслами (МAM) являются основой для создания новых методик расчета тепловых процессов в них без влияния и с влиянием электростатических полей E [1–20]. В предыдущих публикациях [21–35, 37–40] подробно были показаны: экспериментальные установки и рабочие участки по вынужденной конвекции моторных авиационных масел, результаты экспериментальных исследований без влияния и с влиянием электростатических полей E , новые методики расчета тепловых процессов без влияния электростатических полей E .

Проведенные экспериментальные исследования позволили авторам создать экспериментальную базу данных, в которой показаны границы зоны насыщения электростатических полей E , границы применимости электростатических полей E по скорости прокачки МAM в кольцевом канале, области оптимального применения электростатических полей E . Была также разработана методика применения электростатических полей E в реальных масляных системах двигателей и энергоустановок (ЭУ) летательных аппаратов (ЛА) воздушного, аэрокосмического и космического базирования.

Отечественные и зарубежные ученые [4–19, 36], которые занимались и занимаются исследованием электростатических полей E в различных средах, проводили также эксперименты с различными жидкостями, в том числе и с маслами (касторовым, подсолнечным, трансформаторным), но преимущественно в условиях их естественной конвекции при небольших давлении и температуре. Используемые методики расчетов влияния электростатических полей E на теплоотдачу являются разнотипными и труднодоступными для реальных и быстрых инженерных расчетов. Кроме того, отсутствуют исследования электростатических полей E в МАМ при естественной и вынужденной конвекции.

Экспериментальные исследования по влиянию электростатических полей E в МАМ в условиях естественной конвекции в широком диапазоне параметров по давлению и температуре были проведены авторами работ [21, 24, 26, 28, 29], а также ими были разработаны новые методики расчета тепловых процессов. Экспериментальные исследования по влиянию электростатических полей E в МАМ в условиях вынужденной конвекции провели авторы статей [20, 22, 23, 25, 27–30, 32–40]. В настоящее время отсутствуют методики расчета коэффициентов теплоотдачи и относительных коэффициентов теплоотдачи к МАМ в условиях вынужденной конвекции при влиянии электростатических полей E .

Цель данной статьи — разработка новых методик расчета тепловых процессов в МАМ в условиях вынужденной конвекции при влиянии электростатических полей E на базе экспериментов с МАМ марки МС-20.

Перед рассмотрением этих расчетных методик необходимо представить общую методику учета и использования электростатических полей E при расчете, проектировании и создании масляных систем новой техники наземного, воздушного и аэрокосмического базирования.

Общая методика учета и использования электростатических полей E в МАМ. Перед проведением расчетов ученые, конструкторы и разработчики новой техники должны знать общие требования, правила и допущения, которые были сформированы после проведения и анализа экспериментальных исследований по вынужденной конвекции МАМ при влиянии электростатических полей E :

– считаем диэлектрическую проницаемость в МАМ величиной постоянной, поэтому в формулах ее не учитываем;

– полагаем, что диаметр соосных рабочих игл (от 1 до 3 мм) и углы их заточки (от 15° до 85°) не влияют на тепловые процессы в МАМ;

– принимаем, что электростатические поля E необходимо включать в работу в постоянном режиме до начала нагрева рабочего

участка (металлической рабочей трубки — при экспериментах), двигателя или ЭУ, а выключать — при их охлаждении до температуры 373К и меньше, что связано с термоокислительной стабильностью масла, с негативным процессом осадкообразования и способами борьбы с ним в масляных системах двигателей и ЭУ ЛА (более подробно этот вопрос будет освещен авторами в следующей статье);

– выбираем расчетные рабочие параметры (расстояния между соосными рабочими иглами, подаваемые электростатические напряжения, скорости прокачки МАМ) в зоне возможной интенсификации теплоотдачи — по экспериментальной базе данных авторов статьи (по экспериментальным графикам и таблицам).

Для расчетов тепловых процессов в МАМ при проектировании и создании двигателей и ЭУ ЛА необходимо знать значения следующих величин:

α_0 — коэффициента теплоотдачи к МАМ (без влияния электростатических полей E);

α_E — коэффициента теплоотдачи к МАМ (с влиянием электростатических полей E);

Nu_0 — числа Нуссельта (без влияния электростатических полей E);

Nu_E — числа Нуссельта (с влиянием электростатических полей E);

K_E — относительного коэффициента теплоотдачи,

$$K_E = \frac{\alpha_E}{\alpha_0} = \frac{Nu_E}{Nu_0}, \quad (1)$$

который зависит от семи параметров:

$$K_E = f(Re, Pr, q, U, h, T_{ж}, TФС), \quad (2)$$

где Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; q — плотность теплового потока от нагреваемой рабочей трубки; U — высоковольтное электростатическое напряжение, подаваемое на отдающую рабочую иглу; h — расстояние между электродами (между соосными рабочими иглами); $T_{ж}$ — температура рабочей жидкости (МАМ); $TФС$ — теплофизические свойства (теплопроводность, теплоемкость, вязкость, плотность) рабочей жидкости (МАМ).

Значения K_E , рассчитанные по формуле (1), являются экспериментальными и базовыми, т. е. основными и точными. Все другие значения K_E , полученные при использовании разработанных новых формул, далее будут обязательно сравниваться с базовыми значениями.

Экспериментально были определены значения α_0 , α_E , K_E для МАМ марки МС-20 при следующих условиях [39, 40]:

- скорость прокачки (потока) рабочей жидкости (МAM) $W = 1 \dots 4$ м/с;
- давление в системе $p = 0,5 \dots 1,0$ МПа;
- температура жидкости (МAM) $T_{ж} = 313$ К;
- температура нагреваемой поверхности рабочей металлической трубки $T_{ст} = 313 \dots 433$ К;
- плотность теплового потока q от поверхности рабочей металлической трубки, нагреваемой джоулевой теплотой, устанавливалась перед каждым экспериментом без влияния электростатических полей E и сохранялась при их включении;
- напряжение подаваемого электростатического поля $U = 5 \dots 25$ кВ;
- расстояние между электродами системы «игла — игла» $h = 0,006 \dots 0,01$ м.

Главная задача при расчетах с использованием электростатических полей E — нахождение значений α_E или Nu_E . Исходя из формул (1) и (2), значения α_E и Nu_E можно определить так:

$$\alpha_E = K_E \alpha_0; \quad (3)$$

$$Nu_E = K_E Nu_0. \quad (4)$$

Без влияния электростатических полей E значения α_0 и Nu_0 можно находить по общепринятым известным формулам различных авторов, а также по формулам, подробно рассмотренным в предыдущих статьях [34, 35] и являющихся наиболее точными. Эти значения можно быстро получать из экспериментальной базы данных, т. е. по экспериментальным таблицам и графикам, приведенным в работах [34, 35, 39, 40].

При влиянии электростатических полей E значения α_E и Nu_E можно находить сразу из экспериментальной базы данных, т. е. в экспериментальных таблицах и на графиках авторов статьи, а также расчетным путем, используя относительный коэффициент теплоотдачи K_E .

Далее более подробно рассмотрим методики определения теплоотдачи к МAM без влияния и с влиянием электростатических полей E .

Разработка методик расчета теплоотдачи к МAM в условиях их вынужденной конвекции без влияния электростатических полей E . Согласно *первой методике*, значения α_0 , Nu_0 определяются из экспериментальной базы авторов статьи [34, 35] — по экспериментальным таблицам. Эта методика довольно быстрая и точная, но для определения промежуточных значений α_0 , Nu_0 требуется выполнять корреляционные расчеты (интерполяцию) для промежуточных давлений, скоростей прокачки МAM, плотностей теплового потока.

По второй методике значения α_0 , Nu_0 определяются из экспериментальной базы [34, 35] — по экспериментальным графикам. Применение этой методики также дает результат быстро и точно, а кроме того, в этом случае отпадает необходимость в проведении корреляционных расчетов (интерполяции).

В случае применения третьей методики, значения α_0 , Nu_0 определяются:

– по формулам различных авторов, однако точность получаемых значений имеет очень большой разброс, так как при расчетах у каждого автора будут свои значения из-за разнообразия индивидуальных формул, что подробно было изложено в [34, 35];

– по экспериментальным формулам авторов данной статьи, что также было показано в [34, 35]; применение этих формул приводит к наиболее точным расчетам, результаты которых практически совпадают с результатами экспериментальных исследований.

Разработка методик расчета теплоотдачи к МАМ в условиях их вынужденной конвекции при влиянии электростатических полей E . Согласно первой методике, значения α_E , Nu_E , K_E определяются из экспериментальной базы авторов статьи — по экспериментальным таблицам. Табличные экспериментальные значения α_E , Nu_E , K_E были показаны в работах [39, 40], экспериментальные значения K_E , для примера, также приведены в табл. 1.

При $U = 20...25$ кВ создается зона насыщения электростатических полей E , о которой была приведена информация в публикациях [20, 22, 23, 34, 27–30, 32–35, 37–40]. В этой зоне дальнейшее

Таблица 1

Коэффициент K_E при расстоянии между электродами $h = 6$ мм

$q \times 10^{-4}$, Вт/м ²	Значения K_E при W , равном				
	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с	3 м/с	4 м/с
	$U = 5$ кВ				
1	1,011	1,003	1,008	1,001	1,006
2	1,012	1,003	1,006	1,009	1,000
3	1,013	1,003	1,004	1,014	1,000
4	1,013	1,005	1,003	1,017	1,000
5	1,014	1,007	1,003	1,018	1,004
6	1,015	1,011	1,002	1,018	1,009
7	1,016	1,014	1,002	1,016	1,017
8	1,018	1,019	1,002	1,013	1,026
9	1,019	1,024	1,003	1,010	1,037

$q \times 10^{-4}$, Вт/м ²	Значения K_E при W , равном				
	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с	3 м/с	4 м/с
$U = 10$ кВ					
1	1,058	1,034	1,039	1,034	1,040
2	1,078	1,033	1,029	1,040	1,044
3	1,092	1,034	1,026	1,044	1,050
4	1,101	1,036	1,029	1,048	1,056
5	1,106	1,040	1,035	1,050	1,063
6	1,109	1,044	1,045	1,052	1,071
7	1,108	1,050	1,058	1,054	1,080
8	1,106	1,056	1,074	1,055	1,091
9	1,102	1,064	1,091	1,056	1,103
$U = 15$ кВ					
1	1,127	1,141	1,165	1,122	1,091
2	1,162	1,142	1,156	1,149	1,118
3	1,186	1,144	1,150	1,164	1,138
4	1,199	1,148	1,146	1,172	1,154
5	1,205	1,152	1,144	1,172	1,167
6	1,205	1,157	1,144	1,167	1,178
7	1,200	1,163	1,145	1,157	1,189
8	1,190	1,169	1,148	1,144	1,200
9	1,176	1,176	1,151	1,127	1,212

увеличение подаваемого на отдающую иглу высоковольтного электростатического напряжения не приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи, т. е. $\alpha_E = \text{const}$ в зоне насыщения (E). Данная методика довольно быстрая и точная, но для определения промежуточных значений $\alpha_E, \text{Nu}_E, K_E$ придется проводить корреляционные расчеты (интерполяцию): для промежуточных давлений, скоростей прокачки МАМ, плотностей теплового потока, подаваемых высоковольтных электростатических напряжений.

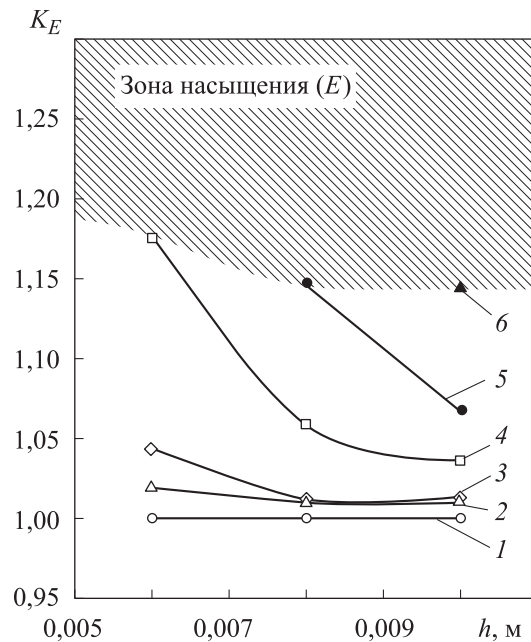
Во второй методике значения $\alpha_E, \text{Nu}_E, K_E$ определяются из экспериментальной базы авторов статьи с помощью экспериментальных графиков. Применение этой методики тоже обеспечивает быстрое и точное получение результата, а кроме того, в этом случае отпадает необходимость в проведении корреляционных расчетов (интерполяции) при нахождении промежуточных значений.

Экспериментальные значения $\alpha_E, \text{Nu}_E, K_E$ были показаны на графиках в работах [20, 22, 23, 34, 27–30, 32–35, 37–40]. Для примера

экспериментальные значения K_E в зависимости от различных рабочих параметров также приведены в этой статье на рис. 1–5 с дальнейшим раскрытием особенностей тепловых процессов при наличии электростатических полей E .

На рис. 1 видно, что с увеличением расстояния между электродами h уменьшается относительный коэффициент K_E . Это связано с сокращением возможностей электрического ветра по турбулизации МАМ, т. е. с понижением его электрогидродинамической силы. Интересно, что при подаче электростатического напряжения $U = 5$ кВ (кривая 2 на рис. 1) при $h = 0,008$ м значения K_E становятся уже постоянными и сохраняются также при $h = 0,01$ м. Следует отметить, что рабочая нагреваемая трубка находится между электродами, т. е. между соосными рабочими иглами, а это означает, что она расположена в средней части электродинамического факела, поэтому даже при малых значениях подаваемого электростатического напряжения ($U = 5$ кВ) при увеличении h все-таки сохраняется небольшое значение K_E в постоянном виде ($K_E = \text{const}$), например при $h = 0,01$ м. Однако при дальнейшем возрастании h наступит момент, когда электродинамический факел между соосными рабочими иглами практически вообще перестанет существовать, и кривая 2 сольется с линией 1 (см. рис. 1), а параметр K_E будет равен единице. Это также касается кривых 3, 4 и линии 5, но каждая из них обязательно пройдет свой участок, где значения $K_E = \text{const}$. Эти участки можно назвать «Зонами постоянных значений K_E ».

Рис. 1. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи K_E к маслу марки МС-20 от расстояния между электродами h при скорости $W = 1,5$ м/с, плотности теплового потока $q = 6,8 \times 10^4$ Вт/м² и при различных значениях напряжения: $U = 0$ (1); $U = 5$ кВ (2); $U = 10$ кВ (3); $U = 15$ кВ (4); $U = 20$ кВ (5); $U = 25$ кВ (6)



При увеличении числа Рейнольдса до $Re = 17...18$ значения K_E уменьшаются, а затем — возрастают, как показано на рис. 2. Это связано с перестройкой пограничного слоя, с ТФС МАМ, с термодинамическими условиями МАМ в кольцевом канале с центральной нагреваемой трубкой, с расстоянием между рабочими соосными иглами и подаваемым электростатическим напряжением.

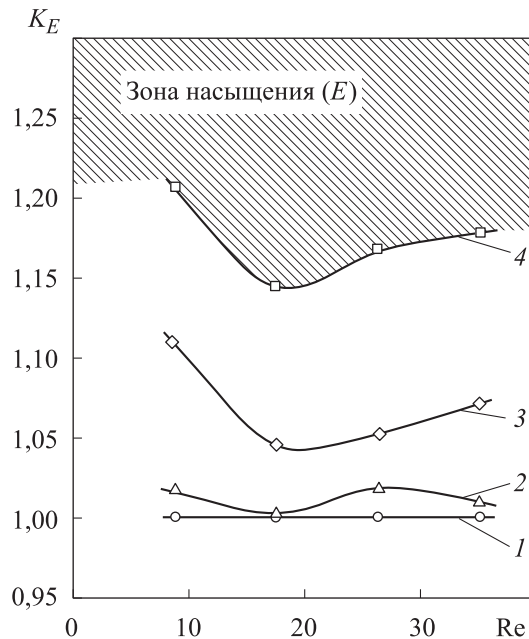


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи K_E к маслу марки МС-20 от числа Рейнольдса при расстоянии между электродами $h = 6$ мм, плотности теплового потока $q = 6 \times 10^4$ Вт/м² и при напряжении $U = 0$ (1); $U = 5$ кВ (2); $U = 10$ кВ (3); $U = 15$ кВ (4)

Интересно, что при $Re = 26...27$ кривая 2 на рис. 2 проходит через максимальные значения K_E с последующим их уменьшением, а при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса она сольется с линией 1, и относительный коэффициент K_E примет значение 1. Это будет свидетельствовать о том, что в точке слияния линий 2 и 1:

- электрогидродинамическая сила электрического ветра уже будет равна гидродинамической силе масляного потока в условиях вынужденной конвекции МАМ или меньше ее;
- скорость прокачки МАМ уносит все заряженные частицы, а электростатическое поле уже не может удерживать и оказывать на эти частицы какое-либо влияние;
- исчезает электрогидродинамический факел электрического ветра.

Необходимо отметить, что кривые 3, 4 (см. рис. 2) при дальнейшем увеличении числа Рейнольдса также пройдут свои максимальные значения K_E с дальнейшим слиянием с линией 1 (за пределами поля приведенного графика).

Экспериментальные значения K_E в зависимости от числа Рейнольдса, но при несколько других термодинамических условиях и при увеличенном расстоянии между соосными рабочими иглами, где $h = 0,008$ м, показаны на рис. 3. Из анализа кривых следует, что основные правила и законы влияния электрического ветра на теплоотдачу к МАМ в условиях вынужденной конвекции сохраняются.

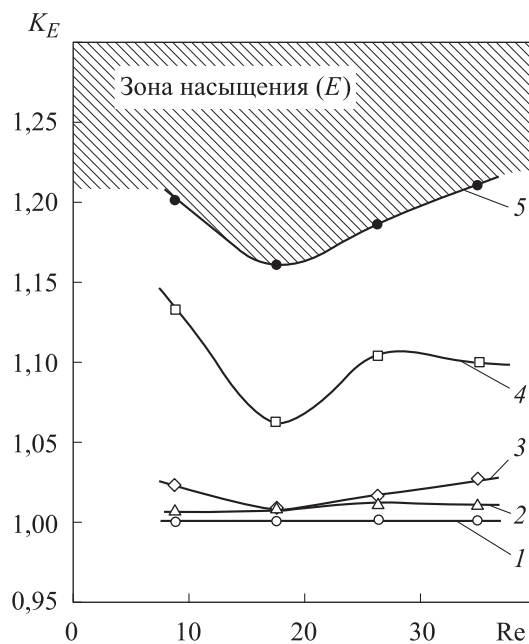


Рис. 3. Зависимость коэффициента K_E от числа Рейнольдса при расстоянии между электродами $h = 8$ мм, плотности теплового потока $q = 2 \times 10^4$ Вт/м² и при напряжении $U = 0$ (1); $U = 5$ кВ (2); $U = 10$ кВ (3); $U = 15$ кВ (4); $U = 20$ кВ (5)

Экспериментальные значения K_E в зависимости от плотности теплового потока при скорости прокачки МАМ $W = 3$ м/с и расстоянии между электродами $h = 0,006$ м приведены на рис. 4. На графике видно, что кривая 2 (при $U = 5$ кВ) при увеличении плотности теплового потока q проходит через максимальные значения K_E и стремится к линии 1 с дальнейшим слиянием с ней в некоторой точке.

Эта точка слияния будет означать, что в данных термодинамических условиях при больших значениях плотности теплового потока на греющей наружной стенке рабочей трубки:

- будут возникать тепловые свили, гидродинамическая сила которых будет равна электрогидродинамической силе электрического ветра или больше ее;
- электрический ветер уже не будет способен турбулизовать МАМ между соосным рабочими иглами в кольцевом канале;
- начинается граница тепловых процессов по невозможности применения электростатических полей E при высоких плотностях теплового потока. Кривые 3, 4 (см. рис. 4) также будут проходить через максимальные значения K_E с дальнейшим их уменьшением и слиянием с линией 1 (за пределами поля данного графика).

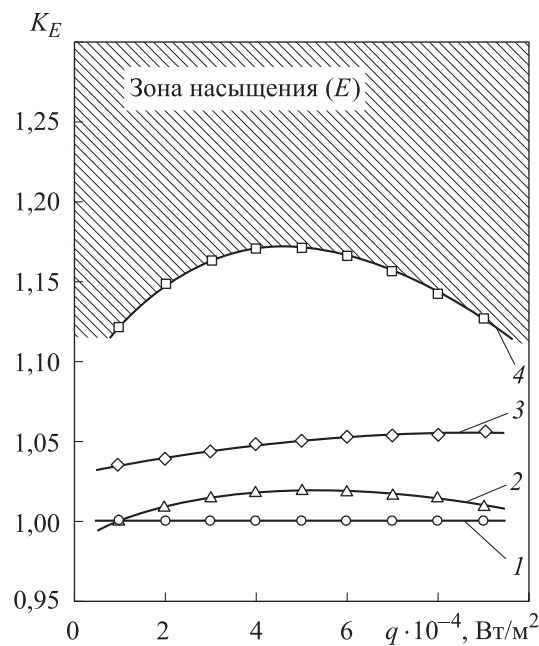


Рис. 4. Зависимость коэффициента K_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 6$ мм, скорости $W = 3$ м/с и при напряжении $U = 0$ (1); $U = 5$ кВ (2); $U = 10$ кВ (3); $U = 15$ кВ (4)

Экспериментальные значения K_E в зависимости от плотности теплового потока при скорости прокачки МАМ $W = 2$ м/с и расстоянии между электродами $h = 0,008$ м приведены на рис. 5. Анализ представленных графиков дает возможность понять, что кривая 2 (при $U = 5$ кВ) с увеличением плотности теплового потока стремится к линии 1 (при $U = 0$); при больших q кривая 2 сольется с линией 1 с дальнейшими такими же последствиями, которые подробно прокомментированы выше для рис. 4. Кривые 3, 4, 5 также будут иметь свои индивидуальные точки слияния с линией 1 (но уже за пределами поля данного графика) — при дальнейшем увеличении плотности теплового потока.

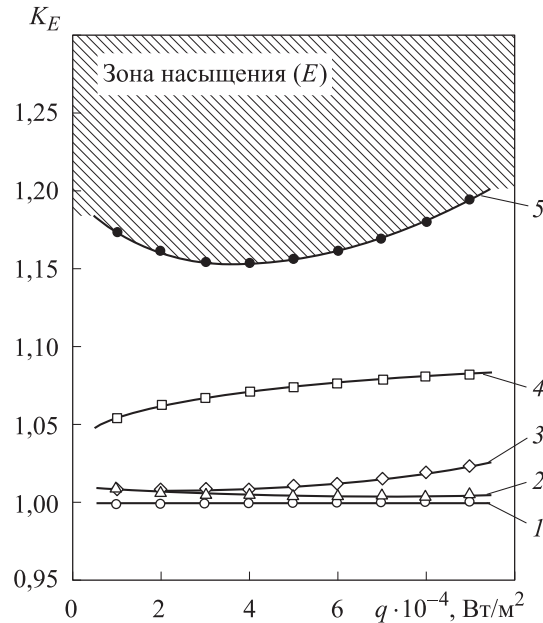


Рис. 5. Зависимость коэффициента K_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 8$ мм, скорости $W = 2$ м/с и при напряжении $U = 0$ (1); $U = 5$ кВ (2); $U = 10$ кВ (3); $U = 15$ кВ (4); $U = 20$ кВ (5)

В случае применения *третьей методики*, значения α_E, Nu_E, K_E определяются расчетным путем по новым формулам, созданным авторами статьи по результатам экспериментальных исследований.

Способы расчетного определения K_E . Было выдвинуто предположение, что формула расчета коэффициента K_E имеет степенной вид, аналогичный виду критериальных уравнений теплоотдачи, но с учетом дополнительных безразмерных параметров:

$$K_E = f\left(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}, \frac{U}{U_0}, \frac{h}{h_0}, \frac{q}{q_0}\right), \quad (5)$$

где $\frac{U}{U_0}, \frac{h}{h_0}, \frac{q}{q_0}$ — симплексы подобия, учитывающие влияние подаваемого высоковольтного электростатического напряжения, расстояния между электродами (рабочими соосными иглами) и плотности теплового потока соответственно.

Для упрощения использования симплексов подобия в формуле (5) и в последующих формулах приняли $U_0 = 1$ кВ, $h_0 = 1$ м, $q_0 = 1$ Вт/м².

Далее был разработан и предложен наиболее оптимальный вид уравнения для расчета коэффициента K_E , который отличается от первоначального вида формулы (1):

$$K_E = 1 + a \text{Re}^b \text{Pr}_f^c \text{Pr}_w^d \left(\frac{U}{U_0} \right)^e \left(\frac{H}{H_0} \right)^f \text{Gr}^g \left(\frac{q}{q_0} \right)^k, \quad (6)$$

где Pr_f и Pr_w — числа Прандтля при температуре масла в потоке и при температуре стенки соответственно.

Уравнение (6) состоит из двух слагаемых, первое учитывает составляющую теплоотдачи без влияния электростатических полей, второе определяет усиление теплоотдачи от воздействия электростатическим полем. Коэффициенты a, b, c, d, e, f, g, k были рассчитаны с помощью численного метода последовательного приближения.

В качестве алгоритма оптимизации был выбран метод Бройдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS) [41]. Полученные коэффициенты для уравнения (6) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты для уравнения (6)

a	b	c	d	e	f	g	k	R^2
0,00056	-0,18969	-2,61152	-0,24425	2,571005	-2,52922	-1,1918	0,722049	0,846546

У данной модели коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,846$, а среднеквадратичное отклонение — $S = 0,027$, что характеризует ее как достаточно точную для инженерных расчетов.

Максимальное относительное отклонение δ коэффициента теплоотдачи α_E от экспериментальных значений $\alpha_{\text{экс}} E$, определяемое по формуле (6), составляет 11,3 %. Это неплохой результат, так как при использовании электростатических полей E в различных жидких средах и при расчетах по разработанным формулам $\alpha(E)$ в условиях вынужденной конвекции у других авторов отклонения составляли от 30 до 40 %.

В целях повышения точности расчетов, определяемых формулой (6), был реализован дифференцированный подход, заключающийся в выборе различных коэффициентов в соответствии с конкретными условиями. Был создан и определен комплекс

$$\frac{U \cdot 10^{-6}}{\text{Re}h}, \text{ В/м}, \quad (7)$$

позволяющий учесть особенности теплоотдачи в зависимости от параметров течения МАМ и параметров электростатического поля E . Выбор комплекса (7) обусловлен наблюдением прямой зависимости коэффициента K_E от величины напряжения электростатического поля и обратной зависимостью K_E от расстояния между электродами и числом Рейнольдса. Коэффициенты, вычисленные с учетом комплекса (7), приведены в табл. 3.

Коэффициенты уравнения (6) с учетом комплекса (7)

$\frac{U \cdot 10^{-6}}{Re h}$	a	b	c	d	e	f	g	k	R^2
[3–24]	4,9730	0,4592	-2,4455	-0,8711	3,5575	0,3259	-2,0093	0,7730	0,9641
[24–45]	4,2950	0,4392	-11,2611	1,4822	1,7267	0,7118	-5,7850	6,2893	0,9516
[45–65]	4,6954	0,3347	-5,4715	-0,5904	2,6954	-2,3035	-2,9633	1,8369	0,9518
[65–86]	0,0003	2,4239	-2,9238	0,2517	0,5961	0,3376	-1,6272	1,6021	0,9290
[86–106]	4,8334	0,5911	-5,6650	0,2330	1,5431	-0,7470	-2,8842	2,4935	0,8664
[106–126]	4,8380	0,0363	-2,4418	-0,5124	2,0719	-1,3552	-1,1939	0,4501	0,8946
[126–146]	4,9952	-3,0825	-4,8772	-0,1759	4,5621	-4,5148	-1,5999	0,9826	0,8131
[146–176]	5,0562	-1,0947	-5,4795	-0,6165	4,7615	-5,0147	-1,9822	0,7811	0,9599
[176–196]	4,9837	-0,2796	-3,0922	-0,2221	1,8556	-2,8686	-0,8279	0,4543	0,9716
[196–256]	4,9772	-1,0341	0,8066	0,3237	4,6994	0,4863	2,4287	-1,1514	0,9550

У данной модели коэффициент детерминации составляет $R^2 = 0,947$, а среднее квадратичное отклонение — $S = 0,016$. Максимальное относительное отклонение δ значений α_E , рассчитанных по формуле (6) с учетом комплекса (7), от экспериментальных значений $\alpha_{\text{эксп } E}$ составляет 11,3 %.

Для примера на рис. 6–9 приведены графики, по которым можно сравнить экспериментальные и расчетные значения коэффициента K_E в зависимости от плотности теплового потока q , где сплошной линией показаны экспериментальные значения относительного коэффициента K_E , а пунктирной — рассчитанные по формуле (6) с учетом комплекса (7). На рис. 6 хорошо видно, что при подаваемом электростатическом напряжении $U = 5$ кВ расчетная (пунктирная) линия 6 практически полностью совпала с экспериментальной линией 2. При напряжении $U = 10$ кВ расчетная кривая 7 при малых значениях q находится под экспериментальной кривой 3 и пересекает ее при $q = 3 \times 10^4$ Вт/м², а далее занимает область над ней. При напряжении $U = 15$ кВ расчетная линия 8 является практически возрастающей прямой, которая пересекает экспериментальную линию в двух точках: при $q = 1 \times 10^4$ Вт/м² и $q = 6 \times 10^4$ Вт/м². При напряжении $U = 20$ кВ расчетная кривая 9 почти полностью повторяет экспериментальную кривую 5, но пересекает ее в точке при $q = 4 \times 10^4$ Вт/м². Можно считать, что расчетные линии на графике (см. рис. 6) не совпадают с экспериментальными в диапазоне $\delta = 0 \dots 11,3$ %.

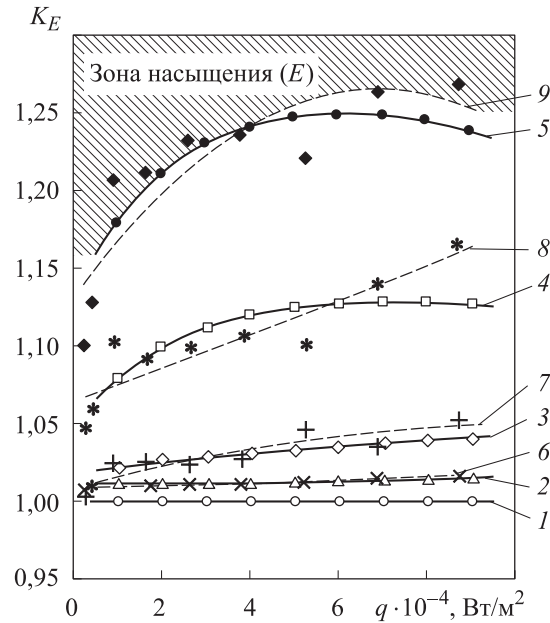


Рис. 6. Зависимость экспериментального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) по формуле (6) с учетом комплекса (7) коэффициента K_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 8$ мм, скорости $W = 4$ м/с и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_4 = 20$ кВ (5); $U_{1p} = 5$ кВ (6); $U_{2p} = 10$ кВ (7); $U_{3p} = 15$ кВ (8); $U_{4p} = 20$ кВ (9)

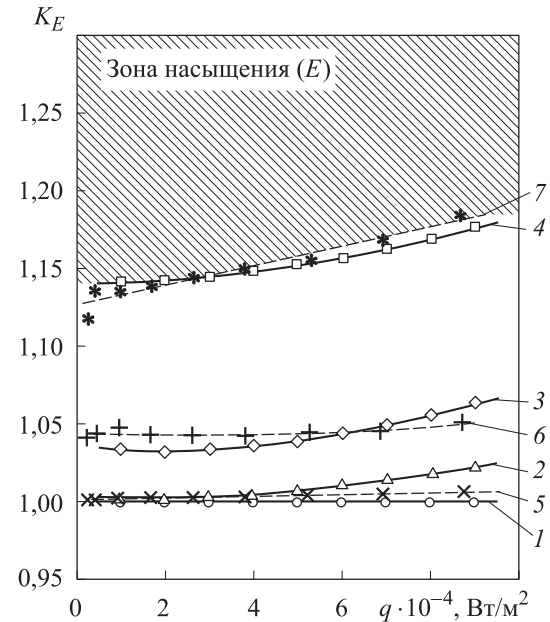


Рис. 7. Зависимость экспериментального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) по формуле (6) с учетом комплекса (7) коэффициента K_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 6$ мм, скорости $W = 1,5$ м/с и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_{1p} = 5$ кВ (5); $U_{2p} = 10$ кВ (6); $U_{3p} = 15$ кВ (7)

Приведенная на рис. 7 расчетная линия 5 при $U = 5$ кВ практически полностью совпадает с экспериментальной кривой 2, но только до плотности теплового потока $q = 4 \times 10^4$ Вт/м², а далее она формируется с более малым углом подъема и находится ниже экспериментальной кривой 2. При $U = 10$ кВ расчетная кривая 6 находится над экспериментальной кривой 3, но только до плотности теплового потока $q = 6 \times 10^4$ Вт/м², а далее, пересекая ее, она движется с малым углом подъема под экспериментальной кривой.

В случае $U = 15$ кВ расчетная линия 7 является практически наклонной возрастающей прямой и находится под экспериментальной кривой 4, при $q = 3 \times 10^4$ Вт/м² пересекает ее, а далее она продолжает движение вверх практически параллельно с ней. Можно считать, что расчетные линии на графике (см. рис. 7) не совпадают с экспериментальными также в пределах $\delta = 0 \dots 11,3$ %.

Графики, приведенные на рис. 8 и 9, были созданы при других термодинамических условиях при влиянии электростатических полей E , но они почти также описывают тепловые процессы, как и графики на рис. 6 и 7. Следует отметить, что отклонения расчетных линий от экспериментальных (см. рис. 8, 9) находятся примерно в тех же пределах ($\delta = 0 \dots 11,3$ %).

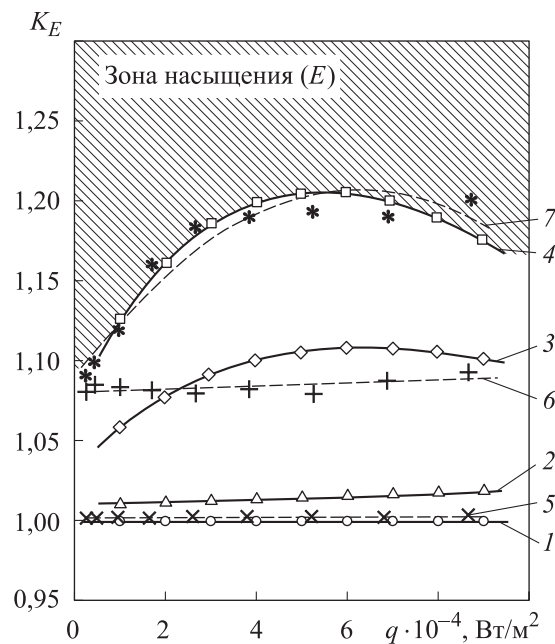


Рис. 8. Зависимость экспериментального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) по формуле (6) с учетом комплекса (7) коэффициента K_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 6$ мм, скорости $W = 1$ м/с и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_{1p} = 5$ кВ (5); $U_{2p} = 10$ кВ (6); $U_{3p} = 15$ кВ (7)

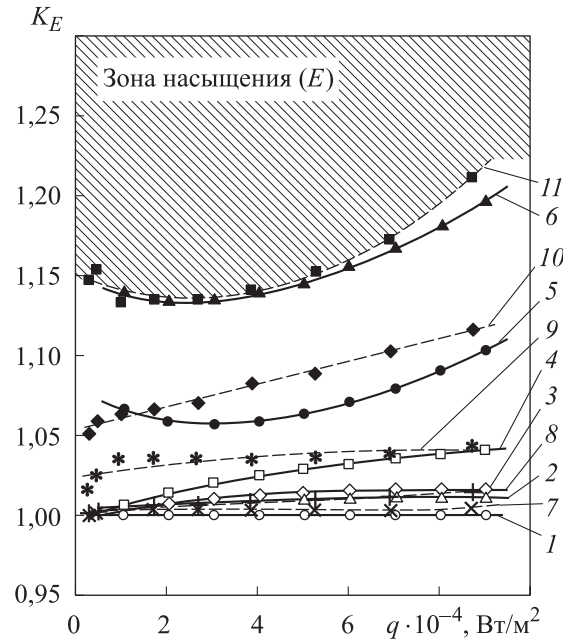


Рис. 9. Зависимость экспериментального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) по формуле (6) с учетом комплекса (7) коэффициента K_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 10$ мм, скорости $W = 1,5$ м/с и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_4 = 20$ кВ (5); $U_5 = 25$ кВ (6); $U_{1p} = 5$ кВ (7); $U_{2p} = 10$ кВ (8); $U_{3p} = 15$ кВ (9); $U_{4p} = 20$ кВ (10); $U_{5p} = 25$ кВ (11)

На всех графиках (см. рис. 6–9) самые верхние расчетные линии, расположенные на границе зоны насыщения (E), описывают экспериментальные линии более точно, чем остальные, как по численным значениям, так и по форме.

Далее рассмотрим другие новые формулы и методики расчета, которые позволили уменьшить отклонения расчетных линий от экспериментальных до 4,8 %.

Способы определения Nu_E и α_E . В ходе анализа и обсуждения результатов исследования было разработано критериальное уравнение расчета числа Нуссельта Nu_E для вынужденной конвекции при воздействии электростатическими полями на МАМ марки МС-20:

$$Nu_E = a Re^b Pr_f^c Pr_w^d \left(\frac{U}{U_0} \right)^e \left(\frac{H}{H_0} \right)^f Gr^g \left(\frac{q}{q_0} \right)^k. \quad (8)$$

В формуле (8) применяются коэффициенты, найденные численным методом последовательного приближения, которые приведены в табл. 4.

Коэффициенты для уравнения (8)

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>k</i>	R^2
3474,871	0,022046	-2,0403	0,008446	-0,00095	-0,01264	-0,99641	1,007198	0,999164

Коэффициент детерминации у данной модели $R^2 = 0,999$, а среднеквадратичное отклонение — $S = 0,347$, что свидетельствует о высокой точности модели. Максимальное относительное отклонение δ расчетных значений Nu_E от экспериментальных составляет 4,8 %. Это очень хороший результат.

Далее рассмотрим способ определения расчетных значений α_E с помощью формулы (8) при использовании известного выражения [42]

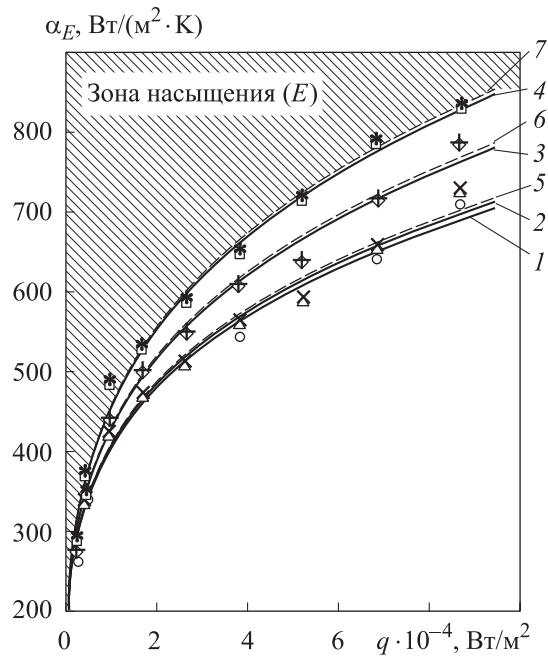
$$Nu_E = \frac{\alpha_E d}{\lambda}, \quad (9)$$

где d — характерный размер (в данном случае — наружный диаметр рабочей металлической нагреваемой трубки); λ — теплопроводность среды (в данном случае — теплопроводность МАМ марки МС-20 в кольцевом канале рабочего участка).

Итак, расчетные значения α_E находим по формуле

$$\alpha_E = \frac{Nu_E \lambda}{d}. \quad (10)$$

Рис. 10. Зависимость экспериментального (сплошная линия) и рассчитанного (пунктирная линия) с использованием формул (8) и (10) коэффициента теплоотдачи α_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 6$ мм, скорости $W = 1$ м/с и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_{1p} = 5$ кВ (5); $U_{2p} = 10$ кВ (6); $U_{3p} = 15$ кВ (7)



Для примера, на рис. 10 представлены графики коэффициентов теплоотдачи α_E , полученные экспериментальным путем и построенные по результатам расчетов с использованием формул (8), (10). Максимальное относительное отклонение δ коэффициента теплоотдачи α_E , рассчитанного по этим формулам, от экспериментальных значений $\alpha_{\text{эсп } E}$ также составляет 4,8 %.

Оценивая все рассмотренные выше формулы и результаты расчетов, можно утверждать, что наиболее точными для нахождения Nu_E и α_E являются формулы (8), (10), в случае применения которых отпадает необходимость рассчитывать относительный коэффициент теплоотдачи K_E , а также — формулы (1), (3), (4).

Особенности применения формулы (1). Эта формула является уникальной и универсальной, так как позволяет быстро находить неизвестные параметры, причем даже без использования коэффициента K_E . Например, из формулы (1) можно получить следующие равенства:

$$\frac{\alpha_E}{\alpha_0} = \frac{Nu_E}{Nu_0}, \quad (11)$$

$$\alpha_E Nu_0 = Nu_E \alpha_0, \quad (12)$$

$$\alpha_E = \frac{Nu_E \alpha_0}{Nu_0}, \quad (13)$$

$$Nu_E = \frac{\alpha_E Nu_0}{\alpha_0}, \quad (14)$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha_E Nu_0}{Nu_E}, \quad (15)$$

$$Nu_0 = \frac{\alpha_0 Nu_E}{\alpha_E}. \quad (16)$$

Следует отметить, что с помощью формул (15), (16) можно быстро определять неизвестные величины, которые приходилось находить длинными, затратными и сложными экспериментальными или расчетными путями — без влияния электростатических полей E , а с использованием формул (13), (14) — при влиянии этих полей. Из формулы (1) были также получены формулы (3) и (4) с относительным коэффициентом теплоотдачи K_E , позволяющие быстро решать прямые задачи, т. е. находить искомые значения α_E и Nu_E , но в каком-то случае, когда будут известны, например, значения K_E , α_E ,

Nu_E (связанные с (E)), возможно также быстро решать и обратные задачи, т. е. находить значения α_0 и Nu_0 (которые не связаны с электростатическими полями E).

Несмотря на свою простоту, данный подраздел статьи специально представлен с целью показать реальные возможности упрощенных вариантов быстрого, беззатратного и легкого нахождения искомым величин без влияния и с влиянием электростатических полей E , чтобы этими вариантами при необходимости обязательно пользовались ученые, инженеры, конструкторы, специалисты и разработчики новой техники.

Заключение. Данная статья является логическим завершением целого ряда публикаций, посвященных исследованию теплоотдачи к МАМ марки МС-20 в условиях вынужденной конвекции без влияния и с влиянием электростатических полей E [20–35, 37–40]. Материалы данной статьи являются новыми. Авторами разработаны и показаны общая методика применения электростатических полей E в МАМ двигателей и ЭУ ЛА, а также различные пути определения влияния электростатических полей E на теплоотдачу к МАМ марки МС-20 при вынужденной конвекции в кольцевом канале. Новые методики расчета теплоотдачи к МАМ марки МС-20 являются примером научно-методического направления для разработки новых формул для других МАМ в аналогичных термодинамических условиях без использования и с использованием электростатических полей E .

Материалы данной статьи будут способствовать быстрому и эффективному проектированию, расчету и созданию новых и перспективных масляных систем повышенных характеристик для отечественных двигателей и ЭУ летательных аппаратов различного назначения и базирования.

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., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Обухова Л.А., Тарасевич С.Э., Яновская М.Л. Анализ исследований электрических полей в различных средах и условиях. *Инженерно-физический журнал*, 2012, т. 85, № 4, с. 881–896.
- [5] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov, Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.

- [6] Болога М.К., Бабой Н.Ф. Влияние электрического поля на теплообмен при кипении органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*, 1967, № 3, с. 30–40.
- [7] Бабой Р.Ф., Болога М.К. Некоторые особенности процесса кипения в электрическом поле. *Электронная обработка материалов*, 1968, № 2, с. 57–70.
- [8] Бабой Р.Ф., Болога М.К. Теплообмен при кипении органических жидкостей в электрическом поле. *Тепло- и массоперенос*, 1968, т. 2, с. 197–204.
- [9] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев, Изд-во «Штиинца», 1977, 320 с.
- [10] Болога М.К., Смирнов Г.Ф., Климов С.М., Майборода А.Н. Теплообмен при кипении в щелевых каналах под воздействием электрического поля. *Тепломассообмен–7*. Минск, Изд-во ИТМО, 1984, с. 20–25.
- [11] Миролобов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. *Методы расчета электростатических полей*. Москва, Высшая школа, 1963, 416 с.
- [12] Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. Москва, Наука, 1979, 320 с.
- [13] Остроумов Г.А. Электрическая конвекция. *Инженерно-физический журнал*, 1966, т. 10, № 5, с. 683–695.
- [14] Гросу Ф.П., Болога М.К. Особенности электризации слабопроводящей диэлектрической жидкости во внешнем электрическом поле. *Электронная обработка материалов*, 2006, № 4, с. 37–45.
- [15] Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроизотермическая конвекция и ее роль в процессе теплообмена. *Электронная обработка материалов*, 2008, № 3, с. 25–35.
- [16] Kronig R., Schwarz N. On the theory of heat transfer from a wire in an electric field. *Applied Scientific Research*, 1949, vol. 1, pp. 35–54.
DOI: 10.1007/BF02120314 Corpus ID: 123611335
- [17] Senfleben E., Braun W. Der Einfluß elektrischer Felder auf den Wärmestrom in Gasen. *Z. Physik*, 1936, Bd. 102, S. 480–506.
- [18] Кожевников И.В., Болога М.К. Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 1. Электрогидродинамические течения и характеристики одноступенчатых ЭГД насосов. *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 1, с. 58–78.
- [19] Кожевников И.В., Болога М.К., Гросу Ф.П. Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 3. Электроконвекция и электрогидродинамические насосы в системах охлаждения и термостагирования. *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 3, с. 34–54.
- [20] Львов М.В., Юсупов А.А., Алтунин В.А. Результаты экспериментального исследования тепловых процессов в моторных авиационных маслах при их естественной и вынужденной конвекции. *Материалы Всерос. молодежной науч. конф. с междунар. участием «17-е Королевские чтения», посвященной 35-летию со дня первого полета МКТС «Энергия — Буран» (3–5 октября 2023 г., Самара)*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2023, т. 1, с. 203–204.
- [21] 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. 48–58.
- [22] Алтунин В.А., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Анализ проблем систем смазки поршневых и реактивных двигателей летательных аппаратов. *Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и пер-*

- спективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ–2015). Казань, Изд-во «Бриг», 2015, с. 574–579.
- [23] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Коханова Ю.С., Яновская М.Л. Разработка новых конструктивных схем систем смазки двигателей для гиперзвуковых и аэрокосмических летательных аппаратов. *Сб. тез. докл. 41-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 378–379.
- [24] 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.
- [25] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Экспериментальное исследование тепловых процессов при вынужденной конвекции авиационных моторных масел. *Сб. статей «Современные проблемы ракетной и космической техники», материалы полных докладов на секции № 2: «Проблемы ракетной и космической техники» 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (21 сентября 2022 г., Калуга, ГМИК)*. Казань, Изд-во «Школа», 2023, с. 204–218.
- [26] Львов М.В., Юсупов А.А., Каськов А.С., Щиголов А.А. Анализ результатов исследования влияния магнитных и электростатических полей на тепловые процессы в авиационных моторных маслах в условиях естественной конвекции. *ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ*, 2018, № 45, с. 23.
- [27] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Анализ эффективности применения электростатических полей в существующих и перспективных системах смазки двигателей летательных аппаратов воздушного и аэрокосмического базирования. *Тр. 54-х Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 17–18 сентября 2019 г.* Казань, Изд-во Казанского университета, 2020, с. 77–82.
- [28] 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. *ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ*, 2020, № 62, с. 312–313.
- [29] 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.
- [30] 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 Научных чтений памяти К.Э. Циолковского, Калуга, 21–22 сентября 2021 г.* Казань, Редакционно-издательский центр «Школа», 2022, с. 99–113.
- [31] 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>
- [32] Львов М.В., Алтунин В.А., Юсупов А.А., Пукачев И.Р., Яновская М.Л. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в моторных авиационных маслах двигателей летательных аппаратов. *Сб. тез. докл.*

- 47-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти акад. С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, т. 1, с. 370–372.
- [33] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов 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
- [34] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Пукачев 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>
- [35] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Анализ методик расчета теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях вынужденной конвекции в кольцевом канале с учетом их верификации с экспериментом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2293>
- [36] Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Газостойкость и термостабильность трансформаторных масел в электрическом поле. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика*, 2018, т. 18, № 3, с. 46–51. DOI: 10.14529/power180306
- [37] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Анализ методик расчета коэффициента теплоотдачи к моторному авиационному маслу в сложных термодинамических условиях авиационных и аэрокосмических двигателей. *Материалы 58-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники» (19–20 сентября 2023 г., Калуга, ГМИК им. К.Э. Циолковского)*. Калуга, Изд-во «Наша полиграфия», 2023, ч. 1, с. 206–208.
- [38] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования тепловых процессов в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Сб. тез. докл. Международной науч.-техн. конф. «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации (18–19 мая 2023 г., МГТУ ГА, Москва)*. Москва, ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023, с. 51–52.
- [39] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Гортышов Ю.Ф., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. Часть 1. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 11.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2317>
- [40] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Гортышов Ю.Ф., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. Часть 2. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 12.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-12-2324>

- [41] Nocedal J., Wright S.J. *Numerical Optimization*. 2nd edition. Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-0-387-30303-1.
- [42] Михеев М.А., Михеева И.М. *Основы теплопередачи*. 2-е изд., стер. Москва, Энергия, 1977, 343 с.

Статья поступила в редакцию 13.05.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Львов М., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Гортышов Ю.Ф., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Методики расчета влияния электростатических полей на теплоотдачу к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 7.

EDN KVVODU

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

Гортышов Юрий Федорович — д-р техн. наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Теплотехники и энергетического машиностроения», президент, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ; Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан; академик Академии наук Республики Татарстан, академик Российской академии естественных наук, академик Международной инженерной академии, академик Академии авиации и воздухоплавания им. Н.Е. Жуковского, академик Академии военных наук, Почетный член Российской академии космонавтики К.Э. Циолковского, Лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Лауреат Государственной научной стипендии выдающимся ученым России, Заслуженный профессор КНИТУ — КАИ им. А.Н. Туполева.

Кореев Егор Павлович — магистрант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ.

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

Methods for computing the electrostatic fields influence on heat transfer to the MS-20 aviation motor oil exposed to its forced convection

© V.A. Altunin¹, M.V. Lvov¹, A.A. Yusupov¹, A.A. Shchigolev¹,
Yu.F. Gortyshov¹, E.P. Koreev¹, M.L. Yanovskaya²

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,
Kazan, 420111, Russian Federation

²Baranov Central Institute of Aviation Motors,
Moscow, 111116, Russian Federation

The paper presents new methods to compute the heat transfer coefficients and the relative heat transfer coefficients. They are based on the results of experimental studies on the influence of transverse electrostatic fields on the thermal processes in the MS-20 aviation motor oil. The oil was exposed to forced convection in an annular channel at different heat flux densities from the working heated metal tube, different pressures and oil pumping rates, different distances between the coaxial working needles and different applied high-voltage electrostatic voltages. These methods introduction would contribute to rapid and high-quality computation, as well as to design and creation of the new oil systems for aircraft engines with the improved performance.

Keywords: aviation motor oil, forced convection, thermal processes, annular channel, heated metal tube, temperature, pressure, pumping speed, heat flux density, electrostatic fields, coaxial working needles, heat transfer coefficient, relative heat transfer coefficient

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 khimnologii* [Fundamentals of chemotology]. Moscow, Berlin, Direkt–Media Publ., 2016, 482 p.
- [3] Tryanov A.E. *Konstruktsiya maslyanykh sistem aviatsionnykh dvigateley* [Design of the oil systems of aviation engines]. Samara, Samara State Aerospace University Publ., 2007, 81 p.
- [4] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov, Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analiz issledovaniy elektricheskikh poley v razlichnykh sredakh i usloviyakh [Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896 (in Russ.).
- [5] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov, Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [6] Bologa M.K., Baboi N.F. Vliyanie elektricheskogo polya na teploobmena pri kipenii organicheskikh zhidkostey [The influence of the electric field on heat transfer during boiling of the organic liquids]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1967, no. 3, pp. 30–40.

- [7] Baboi R.F., Bologa M.K. Nekotorye osobennosti protsessa kipeniya v elektricheskom pole [Certain features of the boiling process in the electric field]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1968, no. 2, pp. 57–70.
- [8] Baboi R.F., Bologa M.K. Teploobmen pri kipenii organicheskikh zhidkostey v elektricheskom pole [Heat transfer during boiling of organic liquids in the electric field]. *Teplo- i massoperenos — Heat and Mass Transfer*, 1968, vol. 2, pp. 197–204.
- [9] Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection and heat transfer]. Chisinau, Shtiintsa Publ., 1977, 320 pp.
- [10] Bologa M.K., Smirnov G.F., Klimov S.M., Mayboroda A.N. Teploobmen pri kipenii v shchelevykh kanalakh pod vozdeystviem elektricheskogo polya [Heat transfer during boiling in slot channels under the influence of the electric field]. *Tplomassoobmen-7 — Heat and Mass Transfer-7*. Minsk, 1984, ITMO Publ., pp. 20–25.
- [11] Mirolyubov N.N., Kostenko M.V., Levinshtein M.L., Tikhodeev N.N. *Metody rascheta elektrosticheskikh poley* [Methods for calculating electrostatic fields]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1963, 416 p.
- [12] Ostroumov G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 320 p.
- [13] Ostroumov G.A. Elektricheskaya konvektsiya [Electric convection]. *Inzhenernofizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1966, vol. 10, no. 5, pp. 683–695.
- [14] Grosu F.P., Bologa M.K. Osobennosti elektrizatsii slaboprovodyashchey dielektricheskoy zhidkosti vo vneshnem elektricheskom pole [Features of electrization of a weakly conducting dielectric liquid in an external electric field]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 2006, no. 4, pp. 37–45.
- [15] Grosu F.P., Bologa M.K. Elektroizotermicheskaya konvektsiya i yeye rol' v protsesse teploobmena [Electroisothermal convection and its role in the heat transfer process] *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 2008, no. 3, pp. 25–35.
- [16] Kronig R., Schwarz N. On the theory of heat transfer from a wire in an electric field. *Applied Scientific Research*, 1949, vol. AJ, pp. 35–54.
- [17] Senftleben E., Braun W., *Z. Physik*, 1936, no. 102, p. 480.
- [18] Kozhevnikov I.V., Bologa M.K. Vliyanie elektrogidrodinamicheskikh techeniy na intensivatsiyu protsessov teplo- i massoobmena. Chast 1. Elektrogidrodinamicheskie techeniya i kharakteristiki odnostupenchatykh EGD nasosov [The influence of electrohydrodynamic flows on intensification of the heat and mass transfer processes. Part 1. Electrohydrodynamic flows and characteristics of single-stage EHD pumps]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 58–78.
- [19] Kozhevnikov I.V., Bologa M.K., Grosu F.P. Vlianie elektrogidrodinamicheskikh techeniy na intensivatsiyu protsessov teplo – massoobmena. Chast 3. Elektrokonvektsiya i elektrogidrodinamicheskie nasosy v sistemakh okhlazhdeniya i termostatirovaniya [The influence of electrohydrodynamic flows on intensification of the heat and mass transfer processes. Part 3. Electroconvection and electrohydrodynamic pumps in cooling and temperature control systems]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 34–54.

- [20] Lvov M.V., Yusupov A.A., Altunin V.A. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh pri ikh estestvennoy i vynuzhdennoy konveksii [Results of an experimental study of thermal processes in aviation motor oils during their natural and forced convection]. In: *Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "17 Korolevskie chteniya", posvyashchenoy 35-letiyu so dnya pervogo poleta MKTS "Energiya — Buran" (3–5 oktyabrya 2023 g., g. Samara* [Materials of the All-Russian youth scientific conference with international participation "17th Korolev Readings", dedicated to the 35th anniversary of the first flight of the ICTS "Energiya — Buran" (October 3–5, 2023, Samara)]. Samara, Samara University Publ., 2023, vol. 1, pp. 203–204.
- [21] 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 — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2015, no. 10 (667), pp. 48–58.
- [22] Altunin V.A., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Analiz problem sistem smazki porshnevnykh i reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov [Analysis of problems of lubrication systems for the aircraft piston and jet engines]. In: *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konf. "Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki" (ANTE-2015)* [Materials of the VIII International scientific and technical conference "Problems and prospects for the development of aviation, ground transport and energy" (ANTE-2015)]. Kazan, Brig Publ., 2015, pp. 574–579.
- [23] Altunin V.A., Altunin K.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Kokhanova Yu.S., Yanovskaya M.L. Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki dvigateley dlya giperzvukovykh i aerokosmicheskikh letatelnykh apparatov [Development of new design schemes for engine lubrication systems for hypersonic and aerospace flying vehicles]. In: *Sb. tezisov dokladov 41-kh Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Collection of reports abstracts for the 41st Academic readings on cosmonautics dedicated in memory of academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, pp. 378–379.
- [24] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Yusupov A.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya magnitnykh i elektrostaticheskikh poley dlya borby s osadkoobrazovaniem v aviatsionnykh motornykh maslakh dvigateley, energoustanovok i tekhnosistem nazemnogo, vozdushnogo 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 — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 3 (684), pp. 76–88.
- [25] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnoe issledovanie teplovykh protsessov pri vynuzhdennoy konveksii aviatsionnykh motornykh masel [Experimental study of thermal processes during forced convection of the aviation motor oils]. In: *"Sovremennye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki": materialy polnykh dokladov na seksii No. 2 "Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki" 57kh nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i*

- razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo (21 sentyabrya 2022 g., g. Kaluga, GMIK) [Modern problems in rocket and space technology: collection of full reports at Section no. 2 “Problems of the rocket and space technology” of the 57th scientific readings dedicated to development of scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky (September 21, 2022, Kaluga, GMIC)]. Kazan, Shkola Publ., 2023, pp. 204–218.
- [26] Lvov M.V., Yusupov A.A., Kaskov A.S., Shchigolev A.A. Analiz rezultatov issledovaniya vliyaniya magnitnykh i elektrostatičeskikh poley na teplovye protsessy v aviatsionnykh motornykh maslakh v usloviyakh estestvennoy konveksii [Analysis of the results of a study of the influence of magnetic and electrostatic fields on thermal processes in the aviation engine oils under conditions of natural convection]. *VOENMEKH. Vestnik BGTU — Journal “VOENMEH. Bulletin of BSTU”*, 2018, no. 45, p. 23.
- [27] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Analiz effektivnosti primeneniya elektrostatičeskikh poley v sushchestvuyushchikh i perspektivnykh sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov vozdušnogo i aerokosmicheskogo bazirovaniya [Analysis of the effectiveness of the use of electrostatic fields in existing and future lubrication systems for engines of airborne and aerospace-based flying vehicles]. In: *Trudy 54-kh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Sek. No. 2: “Problemy raketnoy – kosmicheskoy tekhniki”*. (Kaluga, 17–18 sentyabrya 2019 g.) [Proceedings of the 54th Readings dedicated to development of scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky. Section 2: “Rocket and Space Technology Problems”. (Kaluga, September 17–18, 2019)]. Kazan, Kazan University Publ., 2020, pp. 77–82.
- [28] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Kaskov A.S. Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki dvigateley letatelnykh apparatov vozdušnogo i aerokosmicheskogo primeneniya [Development of new design schemes for lubrication systems for aircraft engines for air and aerospace applications]. *VOENMEKH. Vestnik BGTU — Journal “VOENMEH. Bulletin of BSTU”*, 2020, no. 62, pp. 312–313.
- [29] 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.
- [30] 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: *Sovremennyye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki: sb. nauchnykh statey (polnykh dokladov) 56-kh nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo po sektsii No. 2: “Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki”* (Kaluga, 21–22 sentyabrya 2021 g.) [Modern problems of rocket and space technology: collection of scientific articles (full reports) of the 56th scientific readings devoted to the memory of K.E. Tsiolkovsky, Section no. 2 “Rocket and Space Technology Problems”. (Kaluga, September 21–22, 2021)]. Kazan, Redaktsionno-izdatelskiy Tsentr Shkola Publ., 2022, pp. 99–113.
- [31] 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>

- [32] Lvov M.V., Altunin V.A., Yusupov A.A., Pukachev I.R., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh dvigateley letatelnykh apparatov [Results of experimental studies of thermal processes in aviation motor oils of the flying vehicles engines]. In: *Sb. tezisov dokladov 47-kh Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva* [Collection of abstract of the reports of the 47th Academic readings on cosmonautics, dedicated in memory of academician S.P. Korolev and other outstanding domestic scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU Publ., 2023, vol. 1, pp. 370–372.
- [33] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya vliyaniya elektrostaticheskikh poley na teploobmen i protsess osadkoobrazovaniya v motornom aviatsionnom masle pri ego vynuuzhdennoy konveksii [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]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 113–123.
<https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123>
- [34] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Pukachev I.R., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy teplovykh protsessov v usloviyakh vynuuzhdennoy konveksii motornogo aviatsionnogo masla marki MS-20 [Results of experimental study of the thermal processes at forced convection of the MS-20 engine aviation oil]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 6.
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>
- [35] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analiz metodiki rascheta teplootdachi k motornomu aviatsionnomu maslu marki MS-20 v usloviyakh vynuuzhdennoy konveksii v koltsevom kanale s uchedom ikh verifikatsii s eksperimentom [Analysis of the methods for calculating heat transfer in regard to the MS-20 brand motor aviation oil under conditions of forced convection in the ring channel given their verification with the experiment]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 7.
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2293>
- [36] Gainullina L.R., Tutubalina V.P. Gazostoykost' i termostabil'nost' transformatornykh masel v elektricheskoy pole [Gas stability and thermal stability of transformer oils in electric fields]. *Vestnik YUUrGU. Ser. Energetika — Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 46–51. DOI: 10.14529/power180306
- [37] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analiz metodik rascheta koeffitsienta teplootdachi k motornomu aviatsionnomu maslu v slozhnykh termodinamicheskikh usloviyakh aviatsionnykh i aerokosmicheskikh dvigateley [Analysis of methods for calculating coefficient of the heat transfer to aviation engine oil under complex thermodynamic conditions of the aviation and aerospace engines]. In: *Materialy 58-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya No. 2: "Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki"*. (Kaluga, 19–20 sentyabrya 2023 g., GMIK im. K.E. Tsiolkovskogo) [Materials of the 58th scientific readings dedicated to development of the scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky. Section 2: "Rocket and

- Space Technology Problems” (Kaluga, September 19–20, 2023, State Museum of Culture named after K.E. Tsiolkovsky)]. Kaluga, Nasha Poligrafiya Publ., part 1, pp. 206–208.
- [38] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya teplovykh protsessov v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Results of an experimental study of the thermal processes in lubrication systems of the flying vehicles engines]. In: *Sb. tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekh. konf. “Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva”, posvyashchennoy 100-letiyu otechestvennoy grazhdznskoj aviatsii (18–19 maya 2023 g., Moskva, MGTU GA)* [Collection of abstracts of reports of the International scientific and technical conference “Civil aviation at the current stage of science, technology and society development» dedicated to the 100th anniversary of the domestic civil aviation (May 18-19, 2023, MSTU CA, Moscow)]. Moscow, ID Akademii imeni N.E. Zhukovskogo Publ., 2023, pp. 51–52.
- [39] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya vliyaniya elektrostatcheskikh poley ne teplovye protsessy v motornom avaiatsionnom masle marki MS-20 v usloviyakh ego vynuuzhdennoy konveksii. Chast 1 [Results of an experimental study of the electrostatic fields’ influence on thermal processes in the MS-20 aviation engine oil exposed to its forced convection. Part 1]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 11.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2317>
- [40] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya vliyaniya elektrostatcheskikh poley ne teplovye protsessy v motornom avaiatsionnom masle marki MS-20 v usloviyakh ego vynuuzhdennoy konveksii. Chast 2 [Results of an experimental study of the electrostatic fields’ influence on thermal processes in the MS-20 aviation engine oil exposed to its forced convection. Part 2]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 12.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-12-2324>
- [41] Nocedal Jorge; Wright Stephen J. *Numerical Optimization*. 2nd edition, Springer, 2006. (ISBN 978-0-387-30303-1).
- [42] Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. 2nd ed., ster. Moscow, Energiya Publ., 1977, 343 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; 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.

Gortyshov Yu.F., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Acting Head of the Department of Heat Engineering and Power Engineering, President, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI; Honored Worker of Science of the Russian Federation; Honored Worker of Science and Technology of the Republic of Tatarstan; Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; Academician of the Russian Academy of Natural Sciences; Academician of the International Academy of Engineering; Academician of the Academy of Aviation and Aeronautics named after N.E. Zhukovsky; Academician of the Academy of Military Sciences; Honorary Member of the Russian Academy of Cosmonautics of K.E. Tsiolkovsky; Laureate of the Russian Government Prize in the Education Area; Laureate of the State Scientific Scholarship for the Outstanding Scientists of Russia, Honored Professor of the KNRTU-KAI. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI.

Koreev E.P., 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.