

Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. Часть 2

© В.А. Алтунин¹, М.В. Львов¹, А.А. Юсупов¹, А.А. Щиголов¹,
Ю.Ф. Гортышов¹, Е.П. Кореев¹, М.Л. Яновская²

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

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

Проведены экспериментальные исследования влияния поперечных электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции в кольцевом канале при разных плотностях теплового потока рабочей нагреваемой трубки, давлениях и скоростях прокачки масла, а также расстояниях между рабочими соосными иглами и подаваемых высоковольтных электростатических напряжений. Создана экспериментальная база данных по температуре стенки рабочей нагреваемой трубки и коэффициенту теплоотдачи к моторному авиационному маслу при различных рабочих параметрах без влияния и с влиянием поперечных электростатических полей. Обнаружена зона насыщения электростатическими полями, в которой дальнейшее повышение подаваемого на отдающую иглу электростатического напряжения не приводит к снижению температуры стенки рабочей трубки и к возрастанию коэффициента теплоотдачи к моторному маслу, значения которых остаются постоянными. В части 2 работы установлена граница применимости поперечных электростатических полей на рабочем участке по скорости прокачки масла, при которой электрический ветер уже не влияет на интенсификацию теплоотдачи и предотвращение осадкообразования. Показаны полученные после вторичной обработки экспериментальные данные. Применение результатов исследования будет способствовать созданию новых масляных систем с улучшенными характеристиками для двигателей летательных аппаратов, энергоустановок и техносистем разного назначения и применения.

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

Введение. В продолжение исследований, представленных в части 1 статьи [1], в части 2 рассмотрены результаты, полученные после вторичной обработки экспериментальных данных по изучению влияния поперечных электростатических полей E на теплоотдачу к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях вынужденной конвекции в кольцевом канале с нагреваемой металлической трубкой. Материал части 2 статьи также является актуальным и необходимым, так как содержит результаты впервые проведенного экспериментального исследования по влиянию поперечных электростатических полей E

на интенсификацию теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 при разных рабочих параметрах, а также результаты вторичной обработки данных эксперимента.

Цель данной работы — представить экспериментальные и обработанные данные о зависимости коэффициента теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 в кольцевом нагреваемом канале с поперечными электростатическими полями, относительного коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта от следующих параметров: скорости прокачки масла, давления, расстояния между соосными рабочими иглами, подаваемого высоковольтного электростатического напряжения, числа Рейнольдса.

Результаты вторичной обработки экспериментальных данных. Эти данные были получены при исследовании теплопередачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 с использованием электростатических полей E при следующих параметрах:

скорость прокачки $W = 1,0 \dots 4,0$ м/с;

давление в системе $p = 0,5 \dots 1,0$ МПа;

температура жидкости $T_{ж} = 313$ К;

температура нагреваемой поверхности $T_{ст} = 313 \dots 433$ К;

плотность теплового потока $q = (0,2 \dots 10) \cdot 10^4$ Вт/м²;

расстояние между соосными рабочими иглами $h = 6 \dots 10$ мм;

подаваемое электростатическое напряжение на отдающую иглу $U = 0 \dots 25$ кВ.

Результаты влияния скорости прокачки моторного авиационного масла марки МС-20 на коэффициент теплоотдачи α_E при разных плотности теплового потока и подаваемого электростатического напряжения показаны на рис. 1, где видно, что скорость прокачки масла W способствует общему возрастанию коэффициента теплоотдачи α_E , а подаваемое электростатическое напряжение (кривые 2–4) его еще больше увеличивает.

Результаты влияния расстояния между соосными рабочими иглами ($h = 6 \dots 10$ мм) на коэффициент теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при различных плотности теплового потока q , скорости прокачки масла W и подаваемого электростатического напряжения представлены на рис. 2. Согласно графикам на рисунке, увеличение расстояния между соосными рабочими иглами приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи, что связано со снижением силы поперечного электростатического поля, а также с уменьшением электрогидродинамики электрического ветра в кольцевом масляном канале.

Для примера на рис. 3 показано, как влияет изменение давления на коэффициент теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при $h = 8$ мм, $q = 5,2 \cdot 10^4$ Вт/м² и $W = 2$ м/с. Видно, что увеличение давления способствует небольшому понижению коэффициента теплоотдачи.

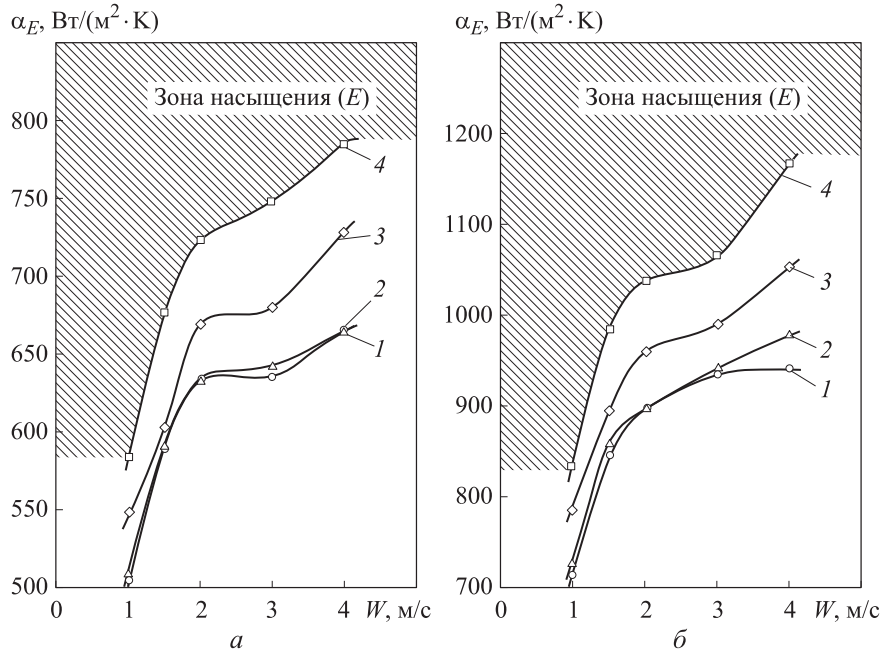


Рис. 1. Влияние скорости прокатки W масла марки МС-20 на изменение коэффициента теплоотдачи α_E при $h = 6$ мм, $q = 2,6 \cdot 10^4$ Вт/м² (а) и $q = 8,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (б) и электростатическом напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4)

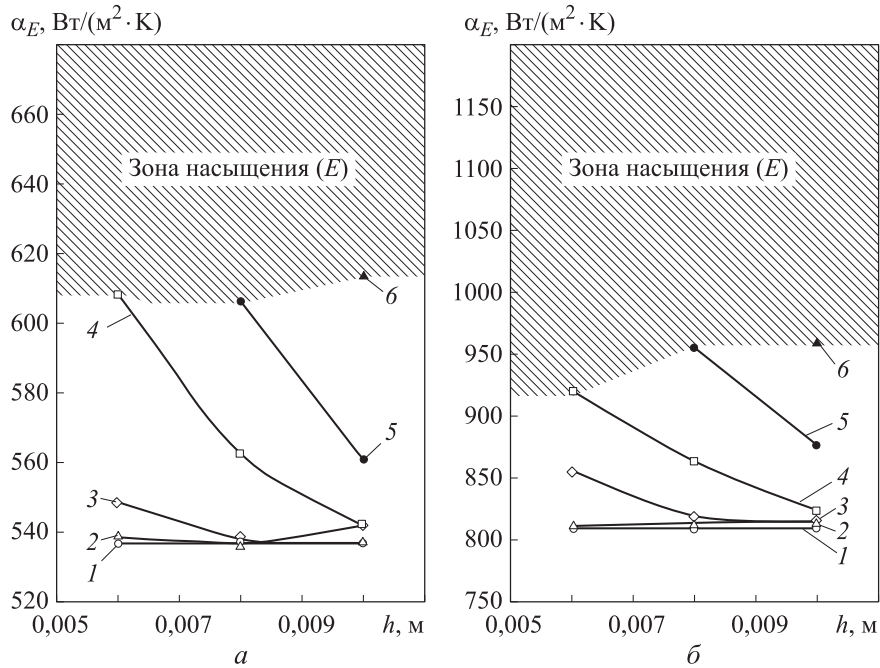


Рис. 2. Влияние расстояния между соосными рабочими иглами на изменение коэффициента теплоотдачи к маслу марки МС-20 при $q = 1,7 \cdot 10^4$ Вт/м², $W = 1,5$ м/с (а) и $q = 6,9 \cdot 10^4$ Вт/м², $W = 2,0$ м/с (б) и электростатическом напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_4 = 20$ кВ (5); $U_5 = 25$ кВ (6)

Это обусловлено тем, что при повышении давления изменяются теплофизические свойства (ТФС) моторных авиационных масел, в том числе масла марки МС-20, а также возникают затруднения для эффективной работы электрического ветра.

Зависимость коэффициента теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 от подаваемого электростатического напряжения U при рабочей плотности теплового потока $q = (0,2...8,7) \cdot 10^4$ Вт/м², $h = 6$ мм и $W = 1$ м/с продемонстрирована на рис. 4. Повышение напряжения U приводит к увеличению α_E , связанному с тем, что при возрастании электростатического напряжения повышается и электрогидродинамическая сила электрического ветра. Это означает, что усиливается его турбулизация, и процесс разрушения пограничного слоя происходит с дальнейшим нарастанием охлаждения горячей стенки рабочей трубки.

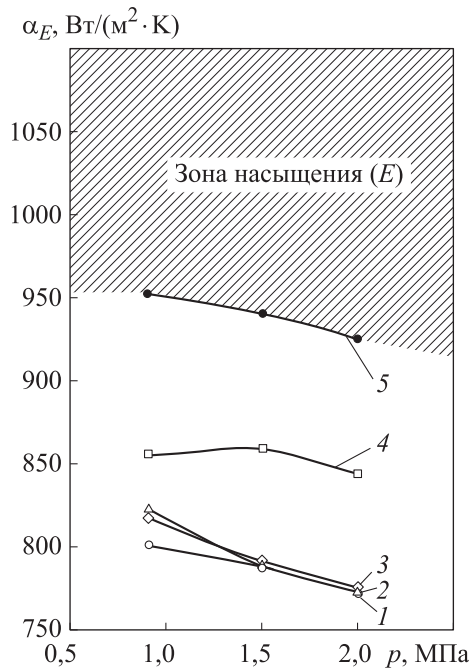


Рис. 3. Влияние возрастания давления на коэффициент теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при $q = 5,2 \cdot 10^4$ Вт/м², $h = 8$ мм, $W = 2,0$ м/с и электростатическом напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_4 = 20$ кВ (5)

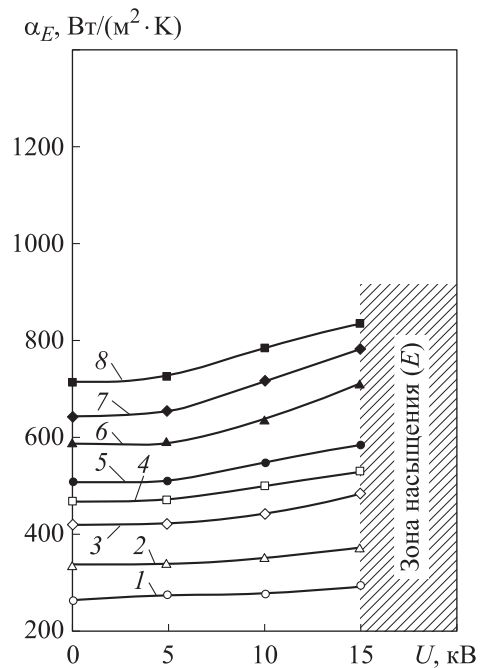


Рис. 4. Влияние подаваемого электростатического напряжения на изменение коэффициента теплоотдачи к маслу марки МС-20 при $h = 6$ мм, $W = 1,0$ м/с и при рабочей плотности теплового потока q , равной:

$0,2 \cdot 10^4$ Вт/м² (1); $0,4 \cdot 10^4$ Вт/м² (2);
 $0,9 \cdot 10^4$ Вт/м² (3); $1,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (4);
 $2,6 \cdot 10^4$ Вт/м² (5); $5,2 \cdot 10^4$ Вт/м² (6);
 $6,9 \cdot 10^4$ Вт/м² (7); $8,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (8)

Необходимо отметить, что с возрастанием плотности теплового потока q коэффициент α_E повышается интенсивнее, что связано с изменением ТФС масла марки МС-20, особенно его плотности и вязкости, т. е. для эффективной работы электрического ветра создаются более благоприятные условия. Следует также отметить, что интенсификация теплоотдачи происходит только до зоны насыщения электростатическими полями E .

Влияние подаваемого электростатического напряжения U на изменение коэффициента теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при рабочей плотности теплового потока $q = (0,2...10) \cdot 10^4$ Вт/м², $h = 6$ мм и $W = 4,0$ м/с показано на рис. 5. При этом напряжение U , оказывающее влияние на повышение α_E , подобно представленному на рис. 4, однако из-за увеличения скорости прокатки масла с 1 м/с до 4 м/с итоговые значения α_E возрастают, но только до зоны насыщения E .

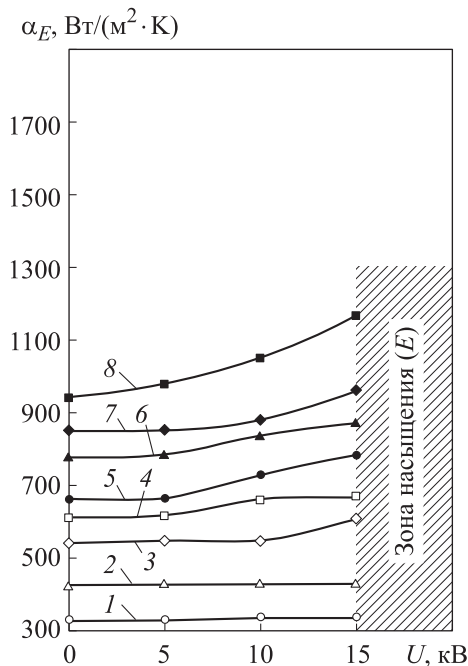


Рис. 5. Влияние подаваемого электростатического напряжения на изменение коэффициента теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при $h = 6$ мм, $W = 4,0$ м/с и при рабочей плотности теплового потока q , равной:
 $0,2 \cdot 10^4$ Вт/м² (1); $0,4 \cdot 10^4$ Вт/м² (2);
 $0,9 \cdot 10^4$ Вт/м² (3); $1,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (4);
 $2,6 \cdot 10^4$ Вт/м² (5); $5,2 \cdot 10^4$ Вт/м² (6);
 $6,9 \cdot 10^4$ Вт/м² (7); $8,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (8)

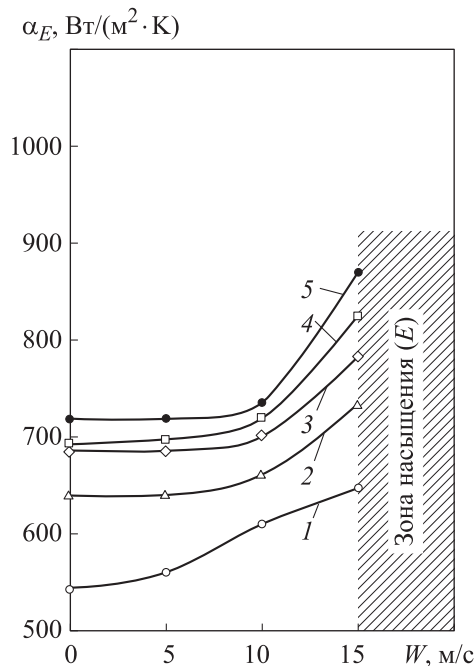


Рис. 6. Влияние подаваемого электростатического напряжения на изменение коэффициента теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при $q = 3,9 \cdot 10^4$ Вт/м², $h = 6$ мм и при его рабочей скорости прокатки W , равной:
 1 м/с (1); 1,5 м/с (2); 2 м/с (3); 3 м/с (4);
 4 м/с (5)

Влияние подаваемого электростатического напряжения U на изменение коэффициента теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при его рабочей скорости прокачки $W = 1 \dots 64$ м/с, $q = 3,9 \cdot 10^4$ Вт/м² и $h = 6$ мм приведено на рис. 6, где видно, что повышение напряжения U приводит к росту α_E , особенно в диапазоне значений 10...15 кВ, но только до зоны насыщения электростатическими полями E .

Зависимость коэффициента теплоотдачи α_E от подаваемого электростатического напряжения U при $q = 8,7 \cdot 10^4$ Вт/м² и $h = 6$ мм и при рабочей скорости прокачки масла $W = 1 \dots 4$ м/с представлена на рис. 7. На графиках видно, что при повышенном значении q увеличение электростатического напряжения U приводит к более высокой интенсификации α_E , чем показано на рис. 6, причем в отличие от значений на рис. 6, начиная уже с $U = 5$ кВ и заканчивая при $U = 15$ кВ, но только до зоны насыщения E .

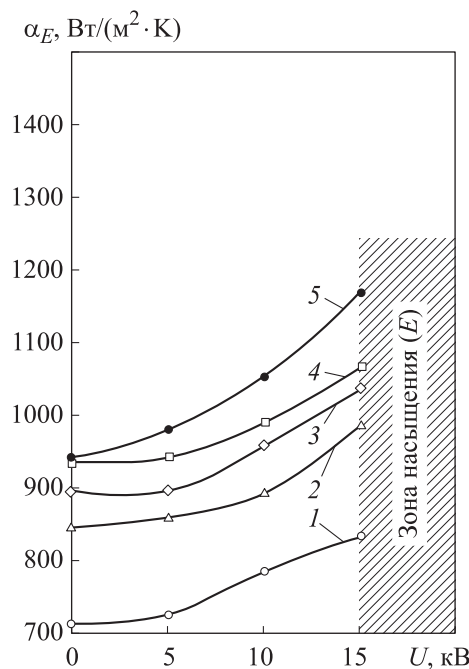


Рис. 7. Влияние подаваемого электростатического напряжения на изменение коэффициента теплоотдачи α_E к маслу марки МС-20 при плотности теплового потока $q = 8,7 \cdot 10^4$ Вт/м², расстоянии между соосными рабочими иглами $h = 6$ мм и при рабочей скорости прокачки масла W , равных 1 м/с (1); 1,5 м/с (2); 2 м/с (3); 3 м/с (4); 4 м/с (5)

Следует отметить, что влияние электростатического поля E на увеличение коэффициента теплоотдачи α_E в дальнейшем будет ограничиваться скоростью прокачки масла $W = 6$ м/с. Ранее академик

В.И. Попов утверждал [2–6], что при скорости прокачки любой электропроводной жидкости более 6 м/с электростатическое поле (электрический ветер) уже не способно интенсифицировать теплоотдачу или оказывать какое-либо другое влияние, так как электрические заряды в подвижной среде уносятся потоком и не могут взаимодействовать с внешним электростатическим полем.

Для анализа эффективности интенсификации теплоотдачи с помощью электростатического поля E был рассчитан относительный коэффициент K_E по формуле

$$K_E = \alpha_E / \alpha_0,$$

где α_E — коэффициент теплоотдачи при воздействии электростатического поля, Вт/(м² · К); α_0 — коэффициент теплоотдачи без воздействия электростатического поля, Вт/(м² · К), который определяет, во сколько раз воздействие электростатического поля интенсифицирует теплоотдачу к маслу марки МС-20.

Влияние давления на изменение относительного коэффициента теплоотдачи K_E к маслу марки МС-20 при рабочих значениях подаваемого электростатического напряжения $U = 0...20$ кВ, плотности теплового потока $q = 5,2 \cdot 10^4$ Вт/м², расстоянии между соосными рабочими иглами $h = 8$ мм и скорости прокачки масла $W = 2,0$ м/с продемонстрировано на рис. 8. При таких термодинамических условиях изменение p неоднозначно воздействует на K_E при разных значениях подаваемого электростатического напряжения U . Так, линия 1 ($U = 0$) является прямой горизонтальной, параллельной оси абсцисс, где $K_E = 0$. Переплетающиеся между собой линии 2 и 3 свидетельствуют об уменьшении коэффициента K_E , стремятся к линии 1, а при давлении $p = 1,5...2,0$ МПа они проходят параллельно чуть выше линии 1. Линия 4 ($U = 15$ кВ) плавно идет вверх (K_E увеличивается), а при $p = 1,5...2,0$ МПа становится параллельной оси абсцисс и значения на ней чуть меньше ($K_E = 1,1$). Линия 5 ($U = 20$ кВ) монотонно под малым углом идет вверх, K_E увеличивается до 1,2 при $p = 2,0$ МПа. Дальнейшее повышение U невозможно из-за наступления зон насыщения E . Все эти неравномерности связаны с особенностями ТФС масла марки МС-20 при указанной плотности теплового потока и скорости прокачки масла в кольцевом нагреваемом канале, а также с возможностями электрического ветра по разрушению и турбулизации пограничного слоя.

Графики зависимости относительного коэффициента K_E от увеличения плотности теплового потока q при разном подаваемом электростатическом напряжении U и скорости прокачки моторного масла МС-20 в кольцевом канале W при значениях 1 м/с и 3 м/с приведены на рис. 9.

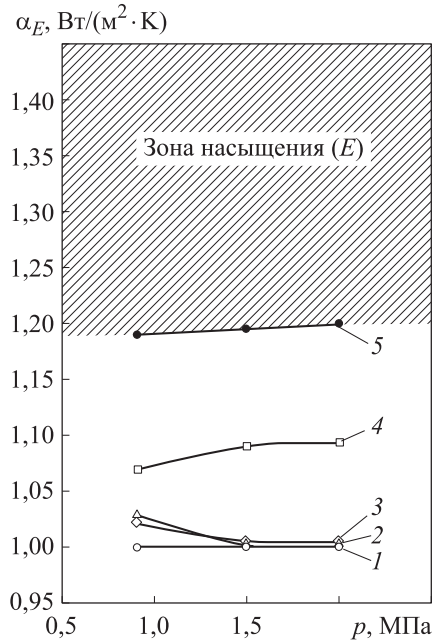


Рис. 8. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи K_E к маслу марки МС-20 от давления при $q = 5,2 \cdot 10^4$ Вт/м², $h = 8$ мм, $W = 2,0$ м/с и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4); $U_4 = 20$ кВ (5)

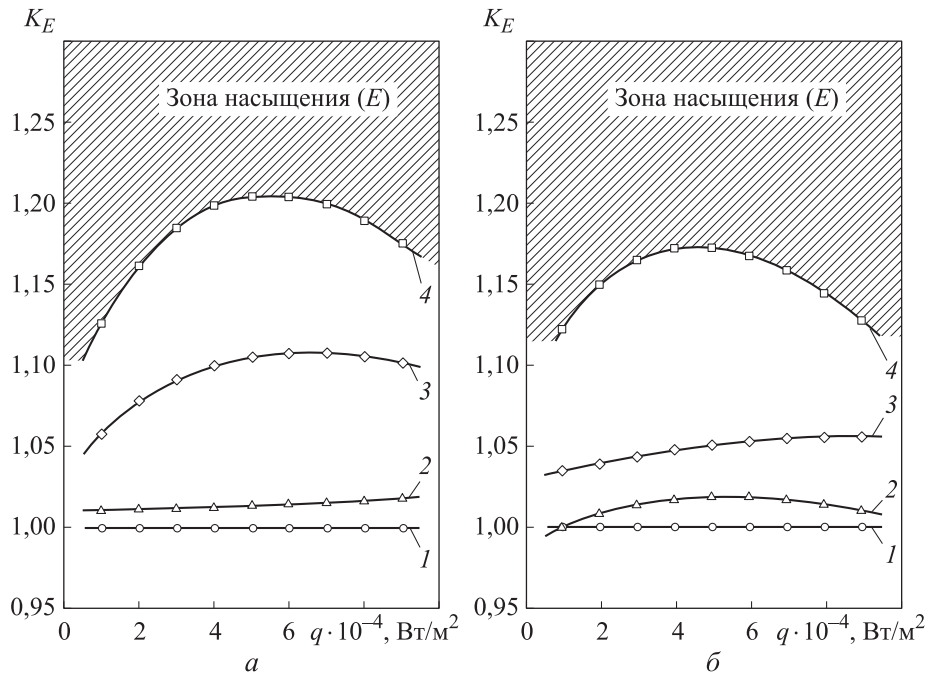


Рис. 9. Влияние плотности теплового потока q на изменение относительного коэффициента K_E при $h = 6$ мм и скорости прокачки масла марки МС-20 $W = 1$ м/с (а) и $W = 3$ м/с (б) при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4)

Изменение относительного коэффициента K_E в зависимости от числа Рейнольдса Re при малом значении плотности теплового потока $q = 1,0 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ показано на рис. 10. Относительный коэффициент K_E принимает максимально возможное значение при $U = 15 \text{ кВ}$ и числе Рейнольдса $Re = 17,5$ (линия 4). Это означает, что в кольцевом канале при заданных рабочих параметрах сложились оптимальные термодинамические условия для работы электрического ветра (электростатического поля). При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса значения коэффициента K_E при том же напряжении (линия 4) уменьшаются и будут стремиться к $K_E = 1$ (линия 1), так как повышение скорости прокачки масла всегда приводит к снижению влияния электрического ветра.

При $U = 5 \text{ кВ}$ (линия 2 на рис. 10) значения K_E приближаются к значениям, соответствующим линии 1 ($U = 0$), а при $Re = 26,5$ они даже совпадают с ней. Это означает, что при $U = 5 \text{ кВ}$ электрический ветер имеет слабую электрогидродинамическую силу, и поэтому он оказывает небольшое поперечное турбулизирующее влияние на разрушение пограничного слоя и интенсификацию теплоотдачи к маслу марки МС-20.

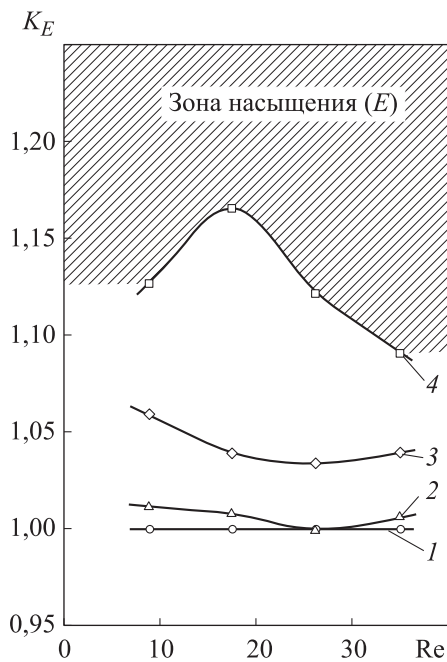


Рис. 10. Влияние числа Рейнольдса на изменение относительного коэффициента K_E при $q = 1,0 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $h = 6 \text{ мм}$ в масле марки МС-20 и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5 \text{ кВ}$ (2); $U_2 = 10 \text{ кВ}$ (3); $U_3 = 15 \text{ кВ}$ (4)

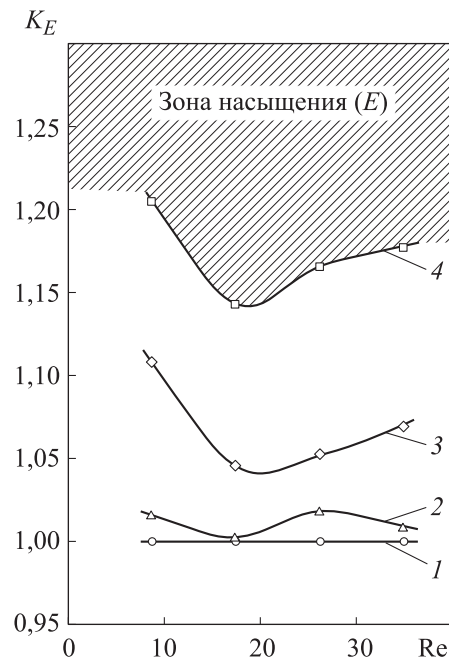


Рис. 11. Влияние числа Рейнольдса на изменение относительного коэффициента K_E при $q = 6,0 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$, $h = 6 \text{ мм}$ и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5 \text{ кВ}$ (2); $U_2 = 10 \text{ кВ}$ (3); $U_3 = 15 \text{ кВ}$ (4)

При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса наступит момент, когда линия 2 полностью совпадет с линией 1, т. е. электрический ветер далее будет оказывать нулевое влияние на какую-либо интенсификацию теплоотдачи. Для линии 3 такой момент наступит позднее, при дальнейшем увеличении скорости прокачки масла и увеличении числа Рейнольдса, так как при электростатическом напряжении $U = 10$ кВ в среде моторного масла создается электрический ветер большей электрогидродинамической силы, чем при $U = 5$ кВ. Следовательно, для линии 4 при $U = 15$ кВ такой момент наступит позднее, чем для линий 1–3. На рис. 10 отсутствуют кривые, соответствующие электростатическому напряжению, равному 20 кВ, 25 кВ и 30 кВ, так как линия 4 ($U = 15$ кВ) является граничной, после которой начинается зона насыщения электростатическим полем E , где при дальнейшем повышении подаваемого электростатического напряжения на отдающую иглу интенсификация теплоотдачи не происходит.

Зависимость относительного коэффициента K_E от числа Рейнольдса при увеличенной плотности теплового потока $q = 6,0 \cdot 10^4$ Вт/м² расстоянии между иглами $h = 6$ мм представлена на рис. 11, на котором видно, что при малых числах Re коэффициент K_E имеет увеличенные значения. Следует отметить, что в условиях естественной конвекции моторных авиационных масел, т. е. при $Re = 0$, ранее было экспериментально установлено [2, 7, 8], что значения относительного коэффициента K_E могут увеличиваться в 4 раза и более.

В заданных термодинамических условиях (см. рис. 11) при $Re = 18$ – 20 , разном подаваемом электростатическом напряжении U и повышенных значениях плотности теплового потока q возникает своеобразный минимум значений K_E , после которого при дальнейшем увеличении числа Re происходит рост значений K_E . Но для линии 2 ($U = 5$ кВ) это возрастание относительного коэффициента K_E завершается его уменьшением, при котором линия 2 стремится к линии 1 ($U = 0$). Данный процесс был довольно полно описан выше при рассмотрении кривых на рис. 10. Отметим также, что и линии 3, 4 при дальнейшем увеличении числа Re будут подходить к линии 1 и сливаться с ней. На рис. 11 тоже есть зона насыщения E , границей которой является линия 4 ($U = 15$ кВ).

Наиболее полно и всесторонне влияние электростатических полей E на теплоотдачу к маслу марки МС-20 при его вынужденной конвекции представлено на графиках зависимости числа Нуссельта Nu_E от числа Рейнольдса (рис. 12–14). На рис. 12 видно, что электростатические поля E оказывают влияние на интенсификацию теплоотдачи только до $Re = 35$, где все линии (см. линии 2–4) сходятся с линией 1 ($U = 0$) в одной точке, т. е. при такой скорости прокачки масла и таких термодинамических условиях поперечный электрический ветер уже

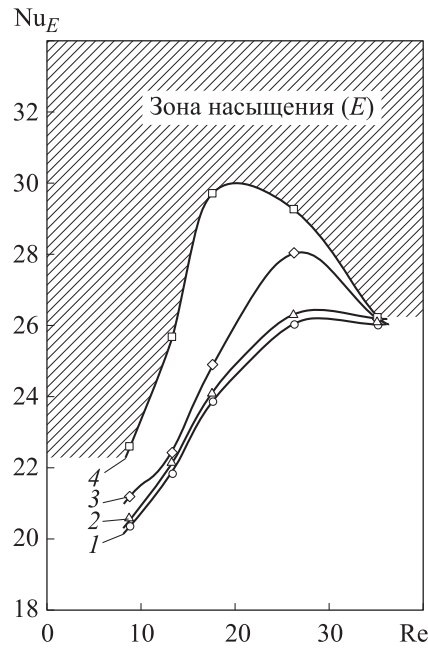


Рис. 12. Влияние числа Рейнольдса на изменение числа Нуссельта при $q = 0,4 \cdot 10^4$ Вт/м², $h = 6$ мм и напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4)

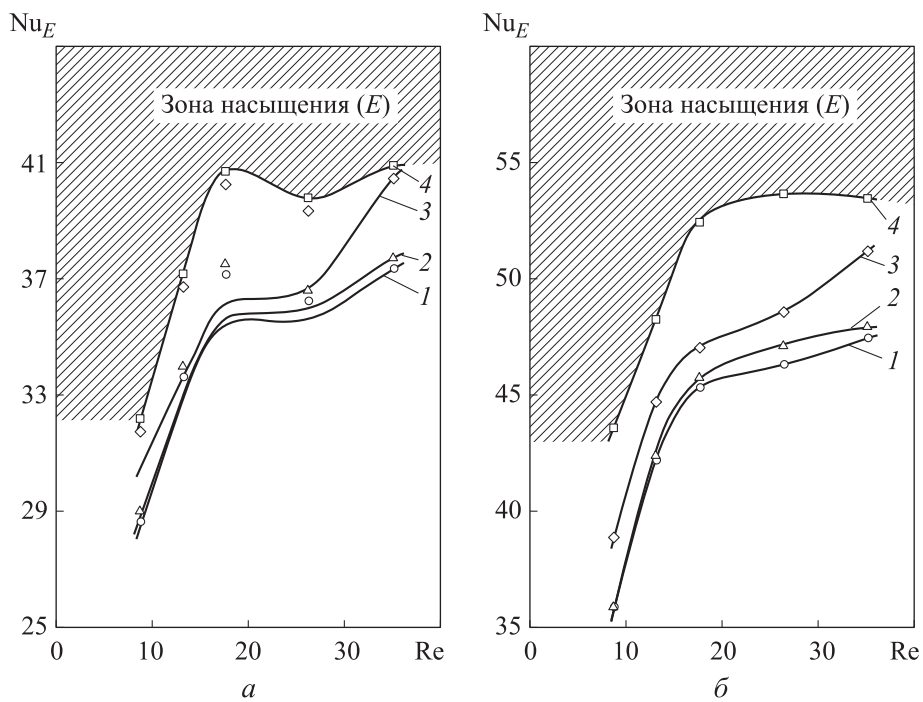


Рис. 13. Влияние числа Рейнольдса на изменение числа Нуссельта при $h = 6$ мм, плотности теплового потока $q = 1,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (а) и $q = 5,2 \cdot 10^4$ Вт/м² (б) и при напряжении $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4)

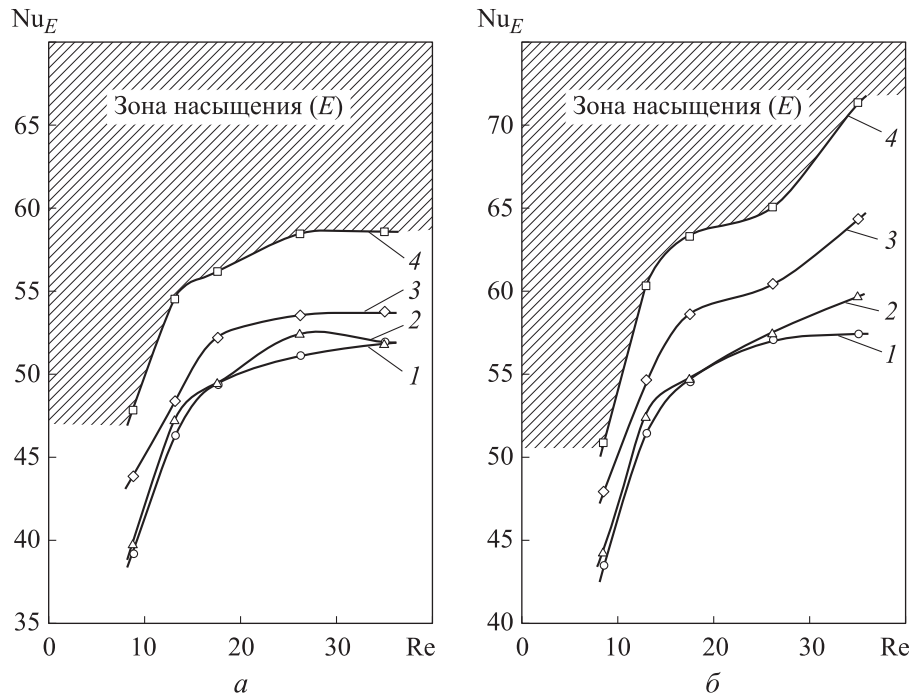


Рис. 14. Влияние числа Рейнольдса на изменение числа Нуссельта при $h = 6$ мм, $q = 6,9 \cdot 10^4$ Вт/м² (а), $q = 8,7 \cdot 10^4$ Вт/м² (б) и напряжениях $U_0 = 0$ (1); $U_1 = 5$ кВ (2); $U_2 = 10$ кВ (3); $U_3 = 15$ кВ (4)

не способен разрушать и турбулизовать пограничный слой в кольцевом канале на поверхности металлической нагреваемой рабочей трубки. Здесь также сказываются и ТФС данного масла при малой плотности теплового потока, причем особенно затрудняют и затормаживают работу электрического ветра высокая плотность и большая вязкость масла при низкой температуре.

Следует отметить, что все углеводородные жидкости (горючие, масла) до температуры 313К являются диэлектриками, т. е. в них отсутствуют положительные и отрицательные электрические заряды. При повышении температуры более 313К данные углеводородные жидкости становятся электропроводными средами, т. е. в них появляются электрические заряды. При температуре 373К и выше в углеводородных жидкостях появляются диполи, которые способствуют возникновению и негативного процесса осадкообразования. Такие процессы ранее были предположительно описаны Г.Ф. Большаковым и экспериментально подтверждены В.А. Алтуниным, К.В. Алтуниным, А.А. Щиголовым, М.В. Львовым при исследовании влияния электростатических полей E на тепловые процессы в углеводородных горючих и маслах в условиях их естественной и вынужденной конвекции [2–22].

Таким образом, для данной термодинамической ситуации при низких температурах металлической трубки в рабочем участке границей применимости E стала скорость прокачки масла или число Рейнольдса $Re = 35$, причем свою роль сыграли не только ТФС масла, но и его электропроводные свойства и качества.

При дальнейшем увеличении плотности теплового потока, а значит, и повышении температуры металлической стенки рабочей трубки, будут изменяться температура пограничного масляного слоя в кольцевом канале рабочего участка, а также ТФС и электропроводные свойства масла, из-за чего изменятся и значения числа Нуссельта Nu_E (см. рис. 13–14). Интересно сравнивать расположение линий 1–4 на всех этих рисунках при увеличении плотности теплового потока и подаваемом электростатическом напряжении. Например, линия 2 ($U = 5$ кВ) на рис. 13, *а* в начале практически сливается с линией 1 ($U = 0$), а в дальнейшем идет параллельно линии 1. На рис. 13, *б* линия 2 ($U = 5$ кВ) в конце своего пути стремится к линии 1 ($U = 0$), т. е. сила электрического ветра при 5 кВ начинает уменьшаться в сложившихся термодинамических условиях, при ТФС и электропроводных свойствах масла. На рис. 13, *а* эта линия 2 ($U = 5$ кВ) практически совпала с линией 1 ($U = 0$) в районе числа Рейнольдса $Re = 35$. Это означает, что в данной точке и справа от нее электрический ветер уже не влияет на теплоотдачу к маслу марки МС-20.

При большом увеличении плотности теплового потока (рис. 14, *б*) линия 2 ($U = 5$ кВ) вновь отрывается от линии 1 ($U = 0$) и устремляется вверх. Это свидетельствует о том, что сложились очень благоприятные условия для работы электрического ветра, так как значительно понизились плотность и вязкость масла, увеличились его электропроводные свойства. На рис. 14, *б* рабочие линии 2–4 практически при влиянии E устремились вверх, что также свидетельствует о благоприятной термодинамической обстановке для эффективной работы электрического ветра.

Следует еще раз отметить, что при дальнейшем повышении скорости прокачки масла или увеличении числа Рейнольдса каждая из рабочих линий на всех графиках (см. рис. 13–14) обязательно сольется с линией 1 ($U = 0$), а максимально возможная линия 4 ($U = 15$ кВ), являющаяся границей начала зоны насыщения E , непременно будет сливаться с линией 1 ($U = 0$) при скорости прокачки масла $W = 6$ м/с.

Заключение. Представлены результаты впервые выполненных экспериментальных исследований по влиянию поперечных электростатических полей E на теплоотдачу к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции в кольцевом нагреваемом канале при разных термодинамических условиях,

а также результаты вторичной обработки полученных экспериментальных данных. В процессе первичной и вторичной обработок создана всесторонняя экспериментальная база данных в виде таблиц и графиков, которые позволят без проведения сложных и дорогих экспериментов быстро определять значения коэффициента теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20, относительного коэффициента теплоотдачи, числа Нуссельта в зависимости от расстояния между соосными рабочими иглами, подаваемого электростатического напряжения, плотности теплового потока, скорости прокачки масла в кольцевом канале, давления и от числа Рейнольдса. Установлено, что применимость поперечных электростатических полей E в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20 в кольцевом канале ограничивается скоростью прокачки масла, зоной насыщения E , малыми значениями плотности теплового потока при нагреве рабочей трубки и низкими начальными температурами масла, что связано с его теплофизическими и электропроводными особенностями, а также с электрогидродинамикой электрического ветра, особенно при больших значениях вязкостных и плотностных характеристик масла.

Разработанную и созданную экспериментальную базу, а также методики проведения экспериментов и обработки результатов исследования можно широко применять при исследовании других моторных авиационных масел, что будет реализовано авторами в их дальнейшей научно-исследовательской работе. На основе полученных экспериментальных данных ведутся разработки новых методик расчета тепловых процессов в моторных авиационных маслах при их вынужденной конвекции в кольцевом нагреваемом канале с поперечными электростатическими полями, что будет подробно рассмотрено в следующей статье данного журнала.

Полученные новые экспериментальные результаты, а также результаты вторичной обработки можно использовать при разработке, проектировании и создании новых систем смазки и охлаждения авиационных двигателей, энергетических установок и технических систем различного базирования и назначения одно- и многофазового использования с повышенными характеристиками по ресурсу, надежности, безопасности и эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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>

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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. *Труды 54-х чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. (Калуга, 17–18 сентября 2019 г.)*. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 2020, с. 77–82.
- [5] 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
- [6] 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. «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., г. Калуга, ГМИК). Казань, Изд-во «Школа», 2023, с. 204–218.
- [7] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Адиятуллин И.Р., Ермолаев А.В., Маханько Д.В., Щиголов А.А., Обухова Л.А., Платонов Е.Н., Демиденко В.П., Монда В.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Исследование и применение электростатических полей в различных средах в земных и космических условиях. *Труды VIII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении»*, Казань, Изд-во КГЭУ, 2012, с. 193–200.
- [8] 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 высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 3 (684), с. 76–88.
- [9] 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 высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 10 (667), с. 48–58.
- [10] Алтунин В.А., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Анализ проблем систем смазки поршневых и реактивных двигателей летательных аппаратов. *Материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ-2015)*. Казань, Изд-во «Бриг», 2015, с. 574–579.
- [11] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Коханова Ю.С., Яновская М.Л. Разработка новых конструктивных схем систем смазки дви-

- гателей для гиперзвуковых и аэрокосмических летательных аппаратов. *Сб. тезисов докладов 41-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 378–379.
- [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. *ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ*, 2020, № 62, с. 312–313.
- [13] Алтунин В.А., Демиденко В.П., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Шигапов Р.Р., Яновская М.Л. Пути повышения ресурса и надежности систем смазки авиационных и аэрокосмических двигателей и энергоустановок. *Труды 51-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (г. Калуга, 20–22 сентября 2016 г.)*. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 2017, с. 142–152.
- [14] 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.
- [15] 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. *Материалы докладов 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского*. Калуга, Эйдос, 2022, с. 233–236.
- [16] 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 по секции № 2: «Проблемы ракетной и космической техники» (Калуга, 21–22 сентября 2021 г.)*. Казань, РИЦ «Школа», 2022, с. 99–113.
- [17] 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>
- [18] 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. тезисов докладов 47-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, т. 1, с. 370–372.
- [19] 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>
- [20] 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>

- [21] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголев 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 (Калуга, 19–20 сентября 2023 г., ГМИК им. К.Э. Циолковского)*. Калуга, Изд-во «Наша полиграфия», ч. 1, с. 206–208.
- [22] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголев А.А., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования тепловых процессов в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Сб. тезисов докладов Международ. науч.-техн. конф. «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации (18–19 мая 2023 г., Москва, МГТУ ГА)*. Москва, ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023, с. 51–52.

Статья поступила в редакцию 26.10.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголев 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>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева — КАИ; академик Российской академии космонавтики имени 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 имени А.Н. Туполева — КАИ.

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

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

Гортышов Юрий Фёдорович — д-р техн. наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Теплотехники и энергетического машиностроения», президент Казанского национального исследовательского технического университета имени 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, Почётный член Российской академии космонавтики К.Э. Циолковского, лауреат Премии Правительства РФ в области

В.А. Алтунин, М.В. Львов, А.А. Юсупов, А.А. Щиголев, Ю.Ф. Гортышов и др.

образования, лауреат Государственной научной стипендии выдающимся ученым России, Заслуженный профессор КНИТУ — КАИ.

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

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

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

© 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
(KNRTU—KAI), Kazan, 420111, Russia

²Baranov Central Institute of Aviation Motor Development,
Moscow, 111116, Russia

The transverse electrostatic fields influence on thermal processes in the MS-20 aviation engine exposed to its forced convection in the annular channel was experimentally studied at the different conditions. Those conditions included various heat flux densities in the working heated tube, different pressures and oil pumping rates, different distances between the working coaxial needles and the supplied high-voltage electrostatic voltages. An experimental database was created on the wall temperature of the working heated tube and the heat transfer coefficient to the aviation engine oil at various operating parameters without and with the transverse electrostatic fields influence. A zone of the electrostatic fields saturation was discovered, where further increase in the electrostatic voltage supplied to the output needle was not leading to a decrease in the working tube wall temperature and to an increase in the heat transfer coefficient to the engine oil, which values remained constant. Part 2 of the article establishes applicability boundary of the transverse electrostatic fields in the working area according to the oil pumping rate, when the electric wind no longer affects the heat transfer intensification and prevention of the sedimentation. Results of the experimental data secondary processing are provided. The research results introduction would contribute to creation of the new oil systems with improved performance for aircraft engines, power plants and technical systems for various purposes and applications.

Keywords: *aviation engine oil, forced convection, thermal processes, annular channel, heated metal tube, temperature, pressure, pumping rate, heat flux density, electrostatic fields, coaxial working needles*

REFERENCES

- [1] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. 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>
- [2] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analiz issledovaniy elektricheskikh poley v razlichnykh sredakh i usloviyakh [Analysis of studies of the electric fields in various media and conditions]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896.
- [3] Lvov M.V., Yusupov A.A., Kaskov A.S., Shchigolev A.A. Analiz rezultatov issledovaniya vliyaniya magnitnykh i elektrostaticheskikh 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.
- [4] 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 (Kaluga, 17–18 sentyabrya 2019 g.)* [Proceedings of the 54th Readings dedicated to development of scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 17–18, 2019)]. Kazan, Kazan University Publ., 2020, pp. 77–82.
- [5] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya vliyaniya elektrostatičeskikh poley na teploobmen i protsess osadkoobrazovaniya v motornom aviatsionnom masle pri ego vynuždennoy 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>
- [6] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnoe issledovanie teplovykh protsessov pri vynuždennoy konveksii aviatsionnykh motornykh masel [Experimental study of thermal processes during forced convection of the aviation motor oils]. In: *Sovremennye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki: sb. polnykh dokladov na sekcii 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.
- [7] Altunin V.A., Altunin K.V., Adiyatullin I.R., Ermolaev A.V., Makhanko D.V., Shchigolev A.A., Obukhova L.A., Platonov E.N., Demidenko V.P., Monda V.A., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. Issledovanie i primeneniye elektrostatičeskikh poley v razlichnykh sredakh v zemnykh i kosmicheskikh usloviyakh [Research and application of the electrostatic fields in various environments in terrestrial and space conditions]. In: *Trudy VIII shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov akademika RAN V.E. Alemasova “Problemy teplomassobmena i gidrodinamiki v energomashinostroenii”* [Proceeding of the VIII school-seminar of young scientists and specialists of RAS Academician V.E. Alemasov “Problems of heat-mass transfer and hydrodynamics in the power engineering”]. Kazan, KGEU Publ., 2012, pp. 193–200.
- [8] 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. 48–58.
- [9] 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 energetika" (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.
- [10] Altunin V.A., Altunin K.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Kokhanova Yu.S., Yanovskaya M.L. Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki Dvigatelay 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 abstracts of the reports of 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.
- [11] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Yusupov A.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya magnitnykh i elektrosticheskikh 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.
- [12] 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 "VOENMEKH. Bulletin of BSTU"*, 2020, no. 62, pp. 312–313.
- [13] Altunin V.A., Demidenko V.P., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Shigapov R.R., Yanovskaya M.L. Puti povysheniya resursa i nadezhnosti sistem smazki aviatsionnykh i kosmicheskikh dvigateley i energoustanovok [Ways to increase service life and reliability of lubrication systems for aviation and aerospace engines and power plants. In: *Trudy 51-kh Chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo (g. Kaluga, 20–22 sentyabrya 2016 g.)*. [Proceedings of the 51st Readings dedicated to development of scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky. (Kaluga, September 20–22, 2016)]. Kazan, Kazan University Publ., 2017, pp. 142–152.
- [14] 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]. *Teplivye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384.
- [15] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnoe issledovanie teplovykh protsessov pri vyzhdennoy konveksii aviatsionnykh motornykh masel [Experimental study

- of thermal processes during forced convection of the aviation motor oils]. In: *Materialy dokladov 57-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo* [Materials of reports of the 57th scientific readings dedicated to development of scientific heritage and of K.E. Tsiolkovsky]. Kaluga, Eidos Publ., 2022, pp. 233–236.
- [16] 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 po seksii No. 2: "Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki"* (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, Section no. 2 "Problems of rocket and space systems (Kaluga, September 21–22, 2021)]. Kazan, Shkola Publ., 2022, pp. 99–113.
- [17] 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>
- [18] 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.
- [19] 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>
- [20] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analiz metodiki rascheta teplotdachi k motornomu aviatsionnomu maslu marki MS-20 v usloviyakh vynuuzhdennoy konveksii v koltsevom kanale s uchetom 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>
- [21] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analiz metodik rascheta koeffitsienta teplotdachi k motornomu aviatsionnomu maslu v slozhnykh termodinamicheskikh usloviyakh avia-

- tsionnykh 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 (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 (Kaluga, September 19–20, 2023, State Museum of Culture named after K.E. Tsiolkovsky)]. Kaluga, Nasha Poligrafiya Publ., part 1, pp. 206–208.
- [22] 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-tekhn. 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, N.E. Zhukovsky Academy Publ., 2023, pp. 51–52.

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.

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. Sci. (Eng.), Junior Researcher, Baranov Central Institute of Aviation Motors.