

Разработка новых критериальных уравнений расчета влияния электростатических полей на интенсификацию теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции

© М.В. Львов, В.А. Алтунин, К.В. Алтунин

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

Проведены экспериментальные исследования 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 плотностях теплового потока от рабочей нагреваемой металлической трубки, при разных давлении и скорости прокачки масла, различном расстоянии между рабочими соосными иглами и разном подаваемом высоковольтном электростатическом напряжении, что открыло возможность авторам статьи создать новые экспериментальные формулы расчета коэффициента теплоотдачи и провести их сравнение с формулами других авторов. Проверка работоспособности предложенного нового критерия подобия электрической конвекции Al для углеводородных горючих выполнена при его использовании в расчетах теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20. Применение данных формул и 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, кольцевой канал, нагреваемая металлическая трубка, скорость прокачки, плотность теплового потока, электростатические поля, соосные рабочие иглы, электроконвекция, теплоотдача

Введение. Применение электростатических полей E в науке и технике является всесторонним и многогранным. Однако и в наше время экспериментальные исследования по влиянию этих полей на тепловые процессы в различных средах весьма актуальны и необходимы. Отечественные и зарубежные ученые [1–14] внесли и продолжают вносить огромный вклад в развитие новой научной дисциплины — электрогазогидродинамики, ими разработаны экспериментальные формулы по влиянию электростатических полей E на тепловые процессы в различных неорганических и органических жидкостях, в том числе и в маслах, например, в касторовом, подсолнечном, трансформаторном. Обобщение и анализ научных статей и изобретений по применению и исследованию электростатических полей E в различных средах и условиях были ранее показаны в обзорной статье [15].

Сведения по исследованию электростатических полей E в моторных авиационных маслах (МAM) практически отсутствовали. Было

установлено, что расчетные формулы по их влиянию на теплоотдачу к разным жидкостям из [1–14] были громоздкими и труднодоступными для вычислений, а для МАМ в условиях их естественной и вынужденной конвекции при разном давлении они вообще отсутствовали.

В связи с изложенным, авторы статьи провели большую работу по созданию экспериментальной базы и исследованию тепловых процессов в МАМ при их естественной и вынужденной конвекции без применения и с применением электростатических полей E , по разработке новых формул для расчета тепловых процессов при разных термодинамических условиях МАМ без применения и с применением этих полей [15–34]. Результаты экспериментальных исследований электростатических полей E в МАМ при их естественной конвекции и разном давлении, а также новые методики и формулы расчета тепловых процессов в них без учета и с учетом влияния этих полей были опубликованы ранее [15–18].

Экспериментальная установка и рабочие участки по исследованию влияния электростатических полей E на тепловые процессы в МАМ в условиях их вынужденной конвекции были подробно изложены в статье [21].

Данная статья стала продолжением цикла статей, посвященных исследованию тепловых процессов в МАМ в условиях их вынужденной конвекции без применения и с применением электростатических полей E при разных давлении и скорости прокачки. В работах [19–30, 32, 33] были представлены результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в МАМ марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции при разных давлении и скорости прокачки, без применения и с применением этих полей, а также рассмотрены новые методики и формулы для расчета тепловых процессов, проведен сравнительный анализ коэффициентов теплоотдачи к МАМ, полученных в экспериментах и по разным новым формулам.

Соавтором данной статьи К.В. Алтуниным в ходе научных исследований был разработан новый критерий подобия электрической конвекции Al , с помощью которого можно эффективно проводить тепловые расчеты, связанные с электростатическими полями E , в углеводородных жидкостях, в том числе и в жидких углеводородных горючих (УВГ) и охладителях (УВО), что он показал в [31]. Но применение этого нового критерия подобия электрической конвекции Al при расчетах тепловых процессов в МАМ в условиях их вынужденной конвекции при влиянии этих полей пока не проводилось.

Цель данной статьи — представить исследование возможности применения нового критерия подобия электрической конвекции Al в новых формулах расчета теплоотдачи к МАМ в условиях их вынужденной конвекции при влиянии электростатических полей E , в частности, на примере МАМ марки МС-20.

Новый критерий подобия электрической конвекции Al в жидких углеводородных жидкостях. Повышение эффективности теплообмена в жидких углеводородных жидкостях, в УВГ и УВО, в том числе и в МАМ, — весьма актуальная задача, особенно для двигателей и энергоустановок летательных аппаратов.

Один из способов увеличения коэффициента теплоотдачи к жидким УВГ и УВО, а также к МАМ — применение электростатических полей, которые также способствуют [15–34]:

- полной предтопливной подготовке жидких УВГ и УВО, повышению экологичности, полноты и качества сжигания топлива;
- предотвращению осадкообразования в топливных и масляных системах ЛА;
- ионизации МАМ, поддержанию и восстановлению физических, теплофизических и технико-эксплуатационных свойств МАМ;
- увеличению эксплуатационного ресурса МАМ;
- повышению ресурса, надежности, эффективности и экономичности двигателей и энергоустановок ЛА на жидких УВГ и УВО с МАМ в системах смазки.

Алгоритмы и методики расчета влияния электростатических полей E на теплоотдачу к МАМ в условиях естественной и вынужденной конвекции были подробно рассмотрены в [16–30, 32, 33]. Однако для моделирования таких процессов требуется дальнейшая разработка универсальных методов расчета, учитывающих как гидродинамические, так и электрофизические параметры системы. В работе [31] предложен разработанный новый критерий подобия электрической конвекции Al , который был апробирован и показан в примерах по расчету влияния электростатических полей E на теплоотдачу к различным углеводородным жидкостям, в том числе и к жидким УВГ и УВО:

$$Al = \frac{U_E^2}{h\rho_f\alpha_0\Delta t}, \quad (1)$$

где U_E — напряжение тока (разность потенциалов на электродах), В; h — расстояние между электродами, м; ρ_f — удельное электрическое сопротивление рабочей среды (диэлектрика), Ом · м; α_0 — коэффициент теплоотдачи без электрической конвекции, Вт/(м² · К); $\Delta t = t_w - t_f$, °С (t_w — температура стенки, °С, t_f — температура флюида, °С).

Далее будут подробно рассмотрены величина h , экспериментальный рабочий участок и рабочие соосные иглы в нем. Поскольку h — это расстояние между электродами, оно равно расстоянию между остриями двух соосных рабочих игл. Одна из них является отдающей иглой, т. е. на нее подается высоковольтное электростатическое

напряжение и именно с острия иглы истекает электрический ветер, а другая — принимающей иглой, т. е. она имеет заземление и обеспечивает возникновение и работу электрического ветра, двигающегося к ней и турбулизирующего среду, в которой он находится, а именно, жидкость или газ (воздух). Такая система рабочих соосных игл, называемая системой типа «игла – игла», наиболее эффективна для создания электрического ветра [1–34].

В статьях [15–34] о влиянии электростатических полей E на тепловые процессы в жидких УВГ и МАМ при их вынужденной конвекции было отмечено, что рабочие соосные иглы располагались перпендикулярно потоку жидких УВГ и УВО, а в данном материале рассматриваются иглы, имеющие такое же расположение, но по отношению к потоку МАМ. Далее будут рассмотрены конструктивные схемы расположения соосных игл на рабочих участках по вынужденной конвекции МАМ, которые подробно обсуждались в статье [21].

Для исследования влияния электростатических полей E на процессы теплообмена и осадкообразования при вынужденной конвекции МАМ был разработан специальный рабочий участок [21]. Общий вид рабочего участка экспериментальной установки с системой рабочих соосных игл типа «игла – игла» показан на фото (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид рабочего участка экспериментальной установки с системой рабочих соосных игл типа «игла — игла»

Такой рабочий участок с системой рабочих соосных игл (рис. 2) представляет собой масляный канал с теплоотдающей внутренней металлической трубкой и поперечно размещенными электродами (соосными рабочими иглами), создающими электростатическое поле с разными геометрическими размерами силовых линий. Канал 4, выполненный из монолитного оргстекла, обжат с торцов металлическими фланцами 13 с помощью шпилек 3. Во фланцы ввинчены тройники 8, которые обжимают канал тройника 8 через уплотнительные кольца 14. Этот способ фиксации позволяет использовать сменные каналы с отверстиями разных диаметров, не изменяя другие элементы конструкции. Корпус канала 4 выполнен из оргстекла, обладающего диэлектрическими свойствами и дающего возможность визуально контролировать внутренние течения рабочей жидкости и воздействие

электрического ветра — так называется эффект влияния электростатических полей в жидкостях и газах при игольчатых электродах. Было сделано несколько таких каналов с разными внутренними диаметрами для создания различных кольцевых каналов с целью прокачки масла. Внутри канала 4 проходит тонкостенная металлическая трубка 18 диаметром 4 мм с толщиной стенки 0,5 мм. Такая ее толщина обусловлена тем, что необходимо создать электрическое сопротивление, достаточное для ее нагрева джоулевым теплом.

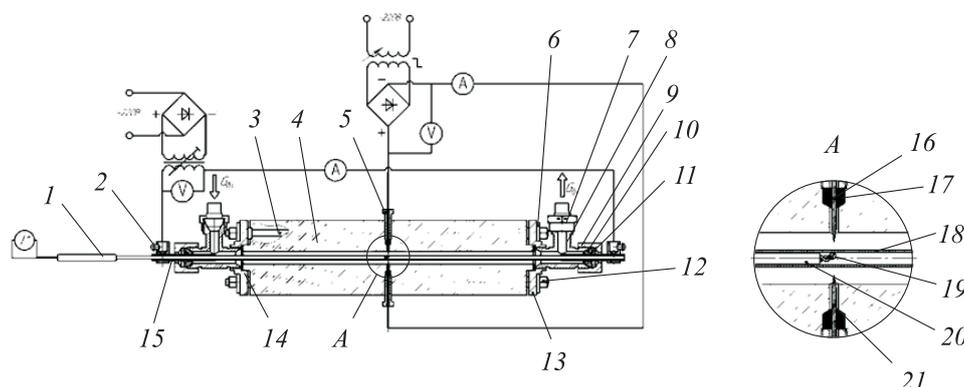


Рис. 2. Рабочий участок экспериментальной установки с одной парой электродов: 1 — ручка подвижной термопары; 2 — клемма; 3 — шпилька; 4 — канал; 5 — винт прижимной; 6 — втулка диэлектрическая; 7 — арматура трубопровода; 8 — тройник; 9 — гайка прижимная; 10 — уплотнитель конический; 11 — шайба; 12 — гайка; 13 — фланец; 14 — уплотнительное кольцо; 15 — втулка медная; 16 — игла токопроводящая для положительного заряда (отдающая соосная рабочая игла); 17 — резиновый электрогидроизолятор уплотнительного типа для ввода рабочей соосной иглы в рабочий участок; 18 — металлическая (медная, стальная) трубка; 19 — отогнутый королек термопары; 20 — корпус подвижной термопары; 21 — игла токопроводящая для отрицательного заряда (принимающая соосная рабочая игла)

С целью исследования влияния материала нагреваемой поверхности на процесс осадкообразования были применены внутренние трубки из меди, алюминия и стали (марки 1Х18Н9Т). Металлическая трубка 18 фиксировалась на рабочем участке с помощью прижимных гаек 9, конических уплотнителей 10 и шайб 11, обжимающих трубку канала 4, чтобы обеспечить необходимую герметичность. Для нагрева металлической трубки к ней подводится электрический ток через клеммы 2 и медные втулки 15. Эти втулки имеют значительно более толстые стенки, чем у металлической трубки 18 и, следовательно, значительно более низкое электрическое сопротивление. Такая втулка позволяет контролировать область нагрева металлической трубки 18, поскольку основной нагрев происходит в месте наибольшего сопротивления. Для того чтобы электрический ток (для нагрева трубки) проходил исключительно через металлическую трубку, шпильки 3 изолированы диэлектрическими втулками 6.

Одной из особенностей данного экспериментального рабочего участка является подвижная хромель-алюмелевая термопара, которая находится внутри нагреваемой металлической трубки. Подвижность такой термопары позволяет определять температуру по всей длине трубки. Эта термопара состоит из ручки 1, корпуса 20 и короляка 19. Ее корпус представляет собой керамический стержень диаметром 3 мм с двумя продольными отверстиями, через которые и проходит подвижная термопара. Он предназначен для изоляции проводов термопары от термического и электрического воздействия внутри металлической трубки 18. Для формирования на рабочем участке электростатических полей E используются токопроводящие рабочие соосные иглы 16 и 21, выполненные из стальной проволоки толщиной 1 мм с острями в 30° . Иглы фиксируются в корпусе канала 4 с помощью прижимных винтов 5 и резиновых уплотнителей — электрогидроизоляторов 17. Такая конструкция позволяет регулировать расстояние между иглами и, следовательно, параметры электростатического поля.

Исследование влияния электростатических полей E и электрического ветра на тепловые процессы в жидких УВГ и МАМ при их естественной конвекции, рассмотренное в [15–34], выявило следующее:

- паровые пузыри, которые образуются на нагреваемой рабочей металлической пластине, размещенной между соосными рабочими иглами, при начале кипения располагаются только вне зоны прохождения силовых линий электростатических полей E , а при дальнейшем увеличении плотности теплового потока, т. е. при дальнейшем возрастании температуры пластины, паровые пузыри превращаются в тепловые свили, полностью разрушаемые электрическим ветром (или электроконвекцией), т. е. в области пластины происходит турбулизация среды, из-за чего повышается коэффициент теплоотдачи;

- в области прохождения силовых линий электростатических полей E на нагреваемой рабочей металлической пластине не происходит негативного процесса осадкообразования.

Эксперименты, проводимые в условиях вынужденной конвекции жидких УВГ и МАМ в кольцевом канале с перпендикулярным размещением рабочих соосных игл с электростатическими полями E [15–34] показали:

- что в области размещения рабочих соосных игл из-за электрического ветра (или электроконвекции) происходит увеличение локального коэффициента теплоотдачи;

- при скорости прокачки 6 м/с электрический ветер уже не способен влиять на теплоотдачу из-за уноса заряженных частиц данной среды далее по потоку, что является границей применимости электростатических полей E в жидких УВГ и МАМ при их вынужденной конвекции;

– процесс осадкообразования на нагреваемой рабочей металлической трубке также не происходит в зоне прохождения силовых линий таких полей, но только до скорости прокачки 6 м/с;

– размещение рабочих соосных игл вдоль канала открывает возможность применения электрического ветра (или электроконвекции) для перекачки жидкого УВГ или МАМ.

В процессе исследования также было определено, что в жидких УВГ и в МАМ при их естественной и вынужденной конвекции [15–34]:

– толщина рабочих соосных игл 1...3 мм и их углы заточки $30^\circ \dots 85^\circ$ не влияют на результаты интенсификации теплоотдачи и на увеличение площади, где предотвращаются твердые углеродистые отложения на нагреваемых деталях в объеме жидкого УВГ или МАМ;

– самым эффективным и оптимальным расстояние h между остриями рабочих соосных игл, для того чтобы всесторонне использовать электростатические поля E и электрический ветер для интенсификации теплоотдачи и борьбы с осадкообразованием, является $h = 5 \dots 15$ мм;

– для эффективного использования электростатических полей E и электрического ветра в жидких УВГ, УВО и в МАМ необходимо обеспечивать включение их в работу в постоянном режиме, так как при импульсном включении, например, с интервалом 0,5...3,0 с электрический ветер не успевает войти в режим релаксации и не способствует интенсификации теплоотдачи, а кроме того, за эти малые промежутки времени уже начинает происходить негативный процесс осадкообразования.

По сути, данный новый критерий Al отражает соотношение между электрической силой, инициирующей конвективное движение, и факторами, препятствующими этому движению и влияющими на теплообмен. Значимость этого числа подобия заключается в его универсальности. Оно позволяет сравнивать и обобщать результаты исследований электроконвекции в различных системах независимо от абсолютных значений параметров. Необходимо еще раз отметить, что электроконвекция возникает на воздухе, в жидких и газообразных средах, в том числе в жидких УВГ, УВО и в МАМ, благодаря возникновению электрического ветра, который истекает с острия отдающей иглы при подаче на нее высоковольтного электростатического напряжения. Установлено, что электростатические поля E и электрический ветер имеют геометрические, гидродинамические и электрические характеристики [34, а также патенты на изобретения РФ № 2785830, 2785251, 2504843].

Использование нового критерия подобия электрической конвекции Al позволяет составить критериальное уравнение для расчета теплоотдачи к жидким УВГ в условиях влияния электростатических полей E вида [31]:

$$\text{Nu}_E = c\text{Re}^m\text{Pr}^n Al^b, \quad (2)$$

где Nu_E — число Нуссельта с учетом электроконвекции; c, m, n, b — эмпирические константы; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля жидкости; Al — критерий подобия электрической конвекции.

Для нахождения Al по формуле (1) требуется определить удельное электрическое сопротивление рабочей среды ρ_f , однако не для всех жидкостей существуют справочные данные по этой величине.

Известно, что для веществ с ионным характером электропроводности справедливо правило Вальдена — Писаржевского, которое показывает взаимосвязь удельной электропроводности и вязкости жидкости [35]:

$$\gamma\eta = \text{const}, \quad (3)$$

где γ — удельная электропроводность, См/м; η — динамическая вязкость, Па·с.

Исследование возможности применения нового критерия подобия электрической конвекции Al при расчетах теплоотдачи к МАМ марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции при влиянии электростатических полей. Было проведено исследование возможности применения Al при расчетах теплоотдачи к МАМ, например к МАМ марки МС-20.

Приведенные далее данные были получены при исследовании теплопередачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 с использованием электростатических полей E при следующих параметрах:

скорость прокачки $W = 1,0 \dots 2,0$ м/с;

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

температура жидкости $T_{ж} = 313$ К;

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

плотность теплового потока $q = (0,2 \dots 8,7) \cdot 10^4$ Вт/м²;

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

электростатическое напряжение, подаваемое на отдающую иглу, $U = 15 \dots 20$ кВ.

Согласно [36, 37], установлено, что для моторных масел правило Вальдена — Писаржевского (3) не выполняется, поэтому было предложено уточненное соотношение:

$$\gamma^s \eta = \text{const}, \quad (4)$$

где $s = W_b/W_e$ — отношение энергии активации вязкой проводимости W_b к энергии активации электрической проводимости W_e .

Используя равенство (4) и значения электропроводности моторного масла в одной точке, например при $t = 40$ °С, а также значения энергии активации вязкой W_b и электрической W_e проводимостей,

можно определить значение const в (4), а затем вычислить значения удельной электропроводности для каждого значения вязкости.

Для расчета значений удельной электропроводности моторного масла, ввиду отсутствия справочных и экспериментальных значений W_v и W_e , были использованы значения из формулы (3) для ближайшего по вязкостной характеристике масла. При принятых $W_e = 0,379 \text{ эВ}$, $W_v = 0,301 \text{ эВ}$, $s = 0,794$ определены значения для γ_0 и η_0 :

$$\gamma_0 = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ См/м}, \quad \eta_0 = 0,2436 \text{ Па} \cdot \text{с при } 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Рассчитав константу по формуле (4), получаем $\text{const} = 1,689 \cdot 10^{-7}$, а значит, можно вычислить значения удельной проводимости для всего диапазона температур:

$$\gamma = \left(\frac{1,689 \cdot 10^{-7}}{\eta} \right)^{\frac{1}{s}}. \quad (5)$$

Для определения критерия подобия Al по формуле (1) необходимо также найти коэффициент теплоотдачи α_0 без электрической конвекции. В рассматриваемом исследовании были использованы известные из экспериментов значения α_0 [32], а в инженерных расчетах предполагается принимать значения α_0 , вычисленные по известным формулам расчета теплоотдачи [32, 33].

Один из способов определения эмпирических констант уравнения (2) — с помощью графического метода обобщения эмпирических данных [38], который заключается в последовательном построении графиков в логарифмических координатах следующих зависимостей:

$$\lg \text{Nu}_E = f(\lg \text{Re}); \quad (6)$$

$$\lg \left(\frac{\text{Nu}_E}{\text{Re}^m} \right) = f(\lg \text{Pr}); \quad (7)$$

$$\lg \left(\frac{\text{Nu}_E}{\text{Re}^m \text{Pr}^n} \right) = f(\lg Al). \quad (8)$$

Эмпирические константы m , n равны соответственно тангенсам угла наклона прямых на графиках зависимостей (6)–(8) к оси абсцисс, а эмпирическая константа c определяется либо из уравнения

$$c = \frac{\text{Nu}_E}{\text{Re}^m \text{Pr}^n Al^b}, \quad (9)$$

которому должно удовлетворять любое экспериментальное значение, либо берется среднее значение c для всех значений эмпирических данных.

После применения вышеуказанного метода обобщения к экспериментальным данным для МАМ марки МС-20 при различной плотности теплового потока q_0 (без влияния электростатических полей E) [33] было получено уравнение

$$\text{Nu}_E = c\text{Re}^{0,35}\text{Pr}^{0,21}\text{Al}^{0,05}, \quad (10)$$

для которого значения коэффициента c приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения эмпирического коэффициента c для формулы (10)

Плотность теплового потока q_0 , Вт/м ²	Коэффициент c
$q_0 \leq 7,5 \cdot 10^4$,	1,15
$7,5 \cdot 10^4 < q_0 \leq 43 \cdot 10^4$	1,96
$q_0 > 43 \cdot 10^4$	2,2

В результате обобщения экспериментальных данных по (10) эмпирическая константа c принимала разные значения на разных диапазонах плотности теплового потока без влияния электростатических полей E — q_0 . По результатам оценки модели (10) были получены:

- коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,88$;
- среднеквадратичное отклонение значений Nu_E от экспериментальных данных $S = 4,17$;
- максимальное относительное отклонение расчетных значений Nu_E от экспериментальных $\delta_{\max} = 31$ %;
- среднее относительное отклонение расчетных значений Nu_E от экспериментальных $\delta_{\text{ср}} = 8,4$ %.

Для сравнения результатов были проведены расчеты числа Нуссельта по новой формуле (10) и по ранее полученной и представленной в работе [33] формуле

$$\text{Nu}_E = a\text{Re}^d\text{Pr}_f^e\text{Pr}_w^f\text{Gr}^g \left(\frac{U}{U_0} \right)^j \left(\frac{H}{H_0} \right)^k \left(\frac{q}{q_0} \right)^l, \quad (11)$$

где a, d, e, f, g, j, k, l — эмпирические коэффициенты, найденные численными методами, значения которых даны в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты уравнения (11)

a	d	e	f	g	j	k	l
3474,871	0,022046	-2,0403	0,008446	-0,99641	-0,00095	-0,01264	1,007198

Для сравнения на рис. 3–5 представлены графики зависимости числа Nu_E от плотности теплового потока q при различных термодинамических параметрах: для экспериментальных значений Nu_E , для значений Nu_E , рассчитанных по формуле (10) и по формуле (11). Из данных обобщающих графиков (см. рис. 3–5) видно, что линия 2, полученная при расчетах по (11) [33], практически совпадает с линией 1, полученной в ходе экспериментальных исследований, причем это совпадение происходит при различных плотностях теплового потока и других рабочих параметрах, особенно заметно практически полное слияние линий 1 и 2 на рис. 5, что свидетельствует о хорошей и качественной формуле (11) в МАМ марки МС-20. Линия 3, полученная при расчетах по формуле (10) с применением нового критерия подобия электрической конвекции Al (1), на рис. 3 и 4 располагается немного ниже линий 1 и 2, причем эта разница возрастает с увеличением плотности теплового потока, а на рис. 5 она практически совпадает с линиями 1 и 2. Причем до значения $q = 5 \cdot 10^4$ Вт/м² линия 3 идет сверху от линий 1 и 2, а при значениях, больших $q = 5 \cdot 10^4$ Вт/м², линия 3 идет ниже линий 1 и 2, что свидетельствует также о хорошей и качественной для расчета формуле (10) для МАМ марки МС-20.

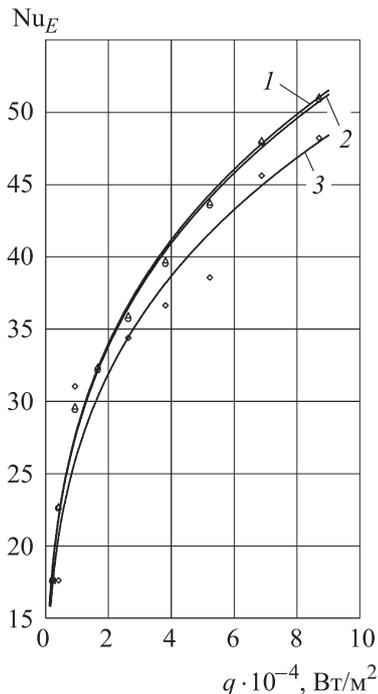


Рис. 3. Зависимость числа Нуссельта Nu_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 6$ мм, напряжении $U = 15$ кВ, скорости $W = 1$ м/с:
1 — получено экспериментально; 2 — рассчитано по формуле (11); 3 — определено по формулам (10)

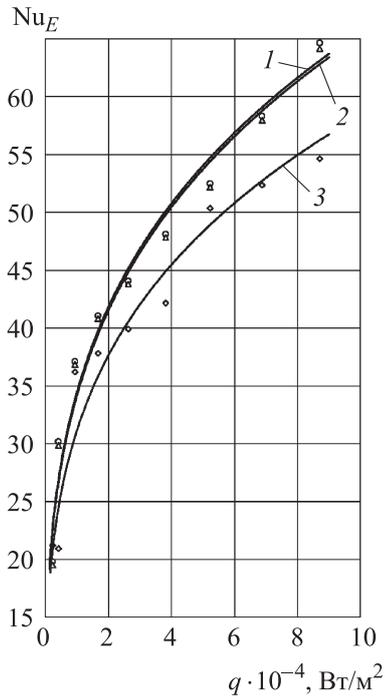


Рис. 4. Зависимость числа Нуссельта Nu_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 8$ мм, напряжении $U = 20$ кВ, скорости $W = 2$ м/с: 1 — определено экспериментально; 2 — рассчитано по формуле (11); 3 — вычислено по формулам (10)

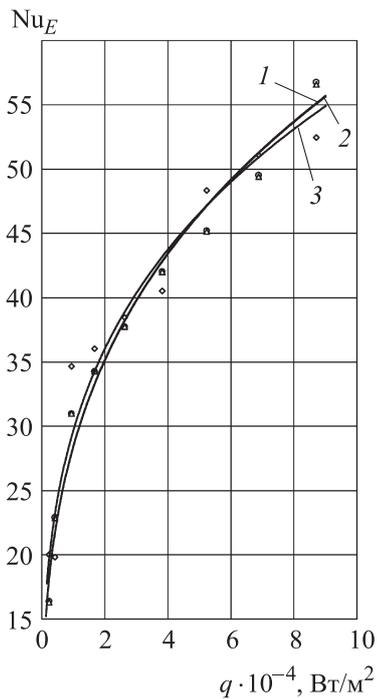


Рис. 5. Зависимость числа Нуссельта Nu_E от плотности теплового потока q при расстоянии между электродами $h = 10$ мм, напряжении $U = 20$ кВ, скорости $W = 1,5$ м/с: 1 — определено экспериментально; 2 — рассчитано по формуле (11); 3 — вычислено по формулам (10)

Более точно относительная погрешность δ рабочих линий 2 и 3, например при $q = 8 \cdot 10^4$ Вт/м², по отношению к экспериментальной линии 1 составляет:

на рис. 3:

- для линии 2, полученной по формуле (11), $\delta = +0,8 \%$;
- для линии 3, определенной по формуле (10), $\delta = -5,24 \%$;

на рис. 4:

- для линии 2, рассчитанной по формуле (11), $\delta = -0,8 \%$;
- для линии 3, вычисленной по формуле (10), $\delta = -10,93 \%$;

на рис. 5:

- для линии 2, полученной по формуле (11), $\delta = 0 \%$;
- для линии 3, определенной по формуле (10), $\delta = -1,28 \%$.

Для примера на рис. 6 приведен обобщенный график зависимости числа Nu_E от числа Re для всех экспериментальных точек при значении напряжения электростатического поля $U = 15$ кВ. Необходимо отметить, что при различных скоростях прокатки МАМ марки МС-20, т. е. при различных числах Re (см. рис. 6), линии 1 и 2 практически полностью совпали, что подтверждает высокую качественность формулы (11) для МАМ марки МС-20, а линия 3 расположилась несколько ниже линий 1 и 2, что также подтверждает высокую качественность формулы (10) для МАМ марки МС-20.

Более точно относительная погрешность δ рабочих линий 2 и 3, например при $q = 8 \cdot 10^4$ Вт/м², по отношению к экспериментальной линии 1 на рис. 6 составляет:

- для линии 2, полученной по формуле (11), $\delta = 0 \%$;
- для линии 3, рассчитанной по формуле (10), $\delta = -1,11 \%$.

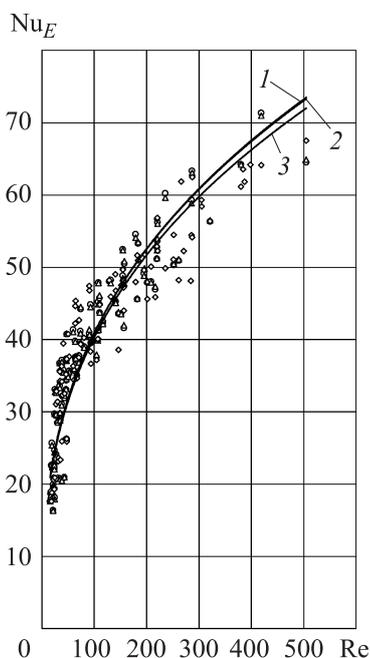


Рис. 6. Зависимости числа Нуссельта Nu_E от числа Рейнольдса (Re) для всех экспериментальных точек при значении высоковольтного электростатического напряжения $U = 15$ кВ:
 1 — получено экспериментально; 2 — рассчитано по формуле (11); 3 — вычислено по формулам (10)

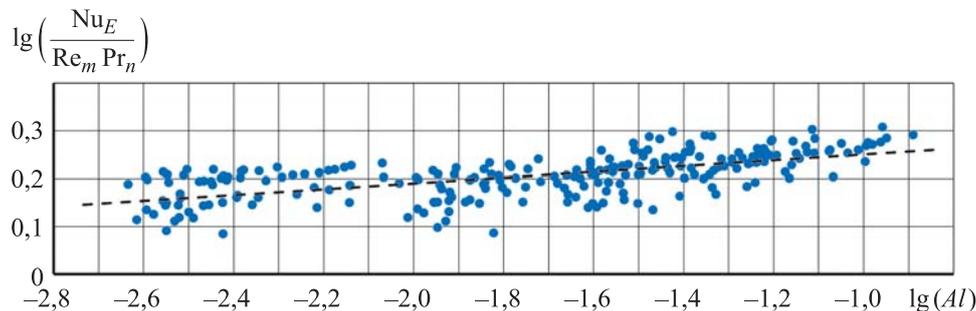


Рис. 7. График зависимости логарифма $f(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr})$ от логарифма Al для участка $c = 1,96$ в МАМ марки МС-20

Обобщенный график (см. рис. 6) демонстрирует адекватность полученных формул (10) и (11), а также их высокое качество для расчета теплоотдачи при вынужденной конвекции рабочей жидкости — МАМ марки МС-20 при влиянии электростатических полей E .

Для примера на рис. 7 представлен график зависимости логарифма $f(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr})$ от логарифма Al для участка $c = 1,96$ в МАМ марки МС-20, где пунктирной линией обозначены осредненные значения.

Оценивая полученные формулы (10) с применением нового критерия подобия электрической конвекции Al (1), можно утверждать, что предложенный К.В. Алтуниным в [31] способ расчета теплоотдачи при воздействии электростатических полей E в жидких УВГ и УВО работает, в том числе и для МАМ при их вынужденной конвекции, в частности для МАМ марки МС-20.

Точность получаемых моделей, даже при использовании графического метода обобщения эмпирических данных, позволяет проводить достаточно верные инженерные расчеты.

Заключение. Показаны результаты проверки нового метода расчета теплоотдачи к углеводородным жидкостям при воздействии электростатических полей на базе экспериментальных данных для МАМ марки МС-20. Этот метод вводит новый критерий подобия Al , который вносит в классические критериальные уравнения электроконвективную составляющую теплоотдачи. Критерий подобия Al позволяет учитывать напряжение электростатического поля и удельную электропроводность среды. Результаты сравнения показали, что такой метод обобщения эмпирических данных и расчета теплоотдачи в условиях высоковольтных электростатических полей E можно применять и для МАМ с достаточной точностью. Недостаток этого метода относительно МАМ — необходимость знать их электропроводность. К сожалению, существующие справочники и спецификации свойств МАМ не содержат информации по этому параметру. Однако даже в условиях использования приблизительных значений удельной электропроводности модель, полученная данным методом, оказалась

достаточно точной. Применение Al также способствует сокращению объемных формул, например формулы (11). Разработка нового критерия подобия Al расширяет науки, связанные с использованием электростатических полей E в жидких и газообразных средах: гидроэлектрогазодинамику, тепло- и массообмен, химмотологию топлив. Применение нового критерия подобия Al будет способствовать доступному расчету теплоотдачи при влиянии электростатических полей E не только к жидким УВГ и УВО, но и к МАМ марки МС-20, а также к другим МАМ разных марок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Болога М.К., Бабой Н.Ф. Влияние электрического поля на теплообмен при кипении органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*, 1967, № 3, с. 30–40.
- [2] Бабой Р.Ф., Болога М.К. Некоторые особенности процесса кипения в электрическом поле. *Электронная обработка материалов*, 1968, № 2, с. 57–70.
- [3] Федоненко А.И., Жакин А.И. Экспериментальные исследования электроконвективного движения в трансформаторном масле. *Магнитная гидродинамика*, 1982, № 3, с. 74–78.
- [4] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев, Изд-во «Штиинца», 1977, 320 с.
- [5] Апфельбаум М.С., Янговский Е.И. О силе, действующей от игольчатого электрода на слабопроводящий жидкий диэлектрик, и вызываемых ею течений. *Магнитная гидродинамика*, 1977, № 4, с. 73–80.
- [6] Миролобов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. *Методы расчета электростатических полей*. Москва, Высшая школа, 1963, 416 с.
- [7] Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. Москва, Наука, 1979, 320 с.
- [8] Остроумов Г.А. Электрическая конвекция. *Инженерно-физический журнал*, 1966, т. 10, № 5, с. 683–695.
- [9] Петриченко Н.А. Некоторые гидродинамические особенности электрического ветра в электроизолирующих жидкостях. *Электронная обработка материалов*, 1973, № 4, с. 28–29.
- [10] Семенов К.Н., Болога М.К., Видрашко В.К. Влияние электрического поля на конвективную теплоотдачу в неполярной жидкости. *Электронная обработка материалов*, 1966, № 2, с. 48–52.
- [11] Koulova-Nenova D., Slavtchev S. Electrohydrodynamic stability of two dielectric liquid layers at unipolar injection. *Electrostatics*, 1991, no. 118, pp. 317–322. Inst. Phys. Conf. Ser. Bristol, IOP Publishing Ltd.
- [12] Atten P., Lacroix J.C. Electrohydrodynamic stability of liquids subjected to unipolar injection: nonlinear phenomena. *J. Electrostatics*, 1978, no. 5, pp. 439–452.
- [13] 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.
- [14] 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 термостатирования. *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 3, с. 34–54.

- [15] 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 [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].
- [16] 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.
- [17] 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. *Тезисы докладов 41-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и др. выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 378–379.
- [18] 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.
- [19] 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., г. Калуга, ГМИК)*. Казань, Изд-во «Школа», 2023, с. 204–218.
- [20] 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.
- [21] 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
- [22] 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>
- [23] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Экспериментальные исследования тепловых процессов в моторных авиационных маслах в условиях их вынужденной конвекции. *Сб. материалов 2-го Всероссийского научно-технического форума по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (Самара, 10–11 октября 2024 г.)*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2024, с. 92–94.

- [24] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголев А.А., Юсупов А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Разработка методик расчета коэффициента теплоотдачи к моторному авиационному маслу в условиях его вынужденной конвекции при влиянии электростатических полей для авиационных и аэрокосмических двигателей одно- и многоразового использования. *Материалы 59-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники»*. Ч. 1. Калуга, Изд-во «Эйдос», 2024, с. 182–186.
- [25] 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. *Современные проблемы ракетной и космической техники. Сб. статей (Полные доклады на секции № 2 «Проблемы ракетной и космической техники» на 58-х Научных чтениях, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского)*. Казань, РИЦ «Школа», 2024, с. 134–147.
- [26] 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. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники»*. (19–20 сентября 2023 г., г. Калуга, ГМИК им. К.Э. Циолковского). Ч. 1. Калуга, Изд-во «Наша полиграфия», 2023, с. 206–208.
- [27] 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. 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, г. Москва). Москва, ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023, с. 51–52.
- [28] 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 1. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2317>
- [29] 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>
- [30] Алтунин В.А., Львов М.В., 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 9-й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» (АНТЭ-2024)*. (03–04 октября 2024 г., Казань). Секция № 5: «Тепловые процессы в технике, теплофизика». *Электронное издание*. Казань, Изд-во ИП Сагиев А.Р., 2024, с. 239–241.
- [31] Алтунин К.В. *Разработка научных основ создания эффективных систем подвода для жидких и газообразных горючих и теплоносителей в тепло-*

- вых двигателей и энергоустановках: Дис. ... д-ра техн. наук по специальностям: 1.3.14; 2.5.15. Казань, 2023. 707 с.
- [32] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголев 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>
- [33] Алтунин В.А., Львов М., Юсупов А.А., Щиголев А.А., Горгышов 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
- [34] Алтунин В.А. *Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охлаждаемым. Книга вторая*. Казань, Изд-во «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2006, 230 с.
- [35] Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. *Коллоидная химия*. Москва, Высшая школа, 2004, 445 с.
- [36] Измestьев И.В., Кожевникова О.А. Поляризация и электропроводность некоторых моторных масел как дисперсных систем. *Вестник Пермского университета. Физика*, 2017, № 1 (32), с. 43–50.
- [37] Кожевникова О.А. Корреляция электропроводности и вязкости двух моторных масел серии Castrol. *Физика для Пермского края: материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Пермь, 2015, вып. 8, с. 134–137.
- [38] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. Москва, Энергия, 1975, 488 с.

Статья поступила в редакцию 14.03.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Львов М.В., Алтунин В.А., Алтунин К.В. Разработка новых критериальных уравнений расчета влияния электростатических полей на интенсификацию теплоотдачи к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 9. EDN RMWPGX

Львов Михаил Валерьевич — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: miha.lev@mail.ru

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.

Алтунин Константин Витальевич — д-р техн. наук, доцент кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Development of the new criteria equations to compute the electrostatic field effect on intensification of heat transfer to the MS-20 motor aviation oil exposed to its forced convection

© M.V. Lvov, V.A. Altunin, K.V. Altunin

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

The paper presents results of an experimental study aimed at identifying the transverse electrostatic field effect on thermal processes in the MS-20 motor aviation oil exposed to its forced convection in the annular channel. The study includes various heat flux densities from a working heated metal tube, various pressures and oil pumping rates, various distances between the working coaxial needles and various supplied high electrostatic voltages. The study opens a possibility for the authors to create new experimental formulas for computing the heat transfer coefficient and to compare them with formulas by the other authors. Operability of the proposed new similarity criterion of the Al electric convection for the hydrocarbon fuels was tested in computing heat transfer to the MS-20 motor aviation oil. These formulas and methods application would facilitate a fast and high-quality computation, design and creation of new oil systems for the high-performance aircraft engines.

Keywords: motor aviation oil, forced convection, annular channel, heated metal tube, pumping speed, heat flux density, electrostatic fields, coaxial working needles, electrical convection, heat transfer

REFERENCES

- [1] Bologa M.K., Baboy N.F. Vliyaniye elektricheskogo polya na teploobmen pri kipenii organicheskikh zhidkostey [The influence of electric field on heat transfer during boiling of the organic liquids]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1967, no. 3, pp. 30–40.
- [2] Baboy R.F., Bologa M.K. Nekotorye osobennosti protsessy kipeniya v elektricheskoy pole [Certain features of the boiling process in the electric field]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1968, no. 2, pp. 57–70.
- [3] Fedonenko A.I., Zhakin A.I. Eksperimentalnye issledovaniya elektrokonvektivnogo dvizheniya v transformatornom masle [Experimental studies of electroconvective motion in the transformer oil]. *Magnitnaya gidrodinamika — Magnetohydrodynamics*, 1982, no. 3, pp. 74–78.
- [4] Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection and heat transfer]. Chisinau, Shtiintsa Publ., 1977, 320 pp.
- [5] Apfelbaum M.S., Yantovsky E.I. O sile, deystvuyushchey ot igolchatogo elektroda na slaboprovodyashchiy zhidkiy datchik, i vyzyvaemykh eyu techeniyakh [On the force acting from a needle electrode on a weakly conducting liquid dielectric and the flows caused by it]. *Magnitnaya gidrodinamika — Magnetohydrodynamics*, 1977, no. 4, pp. 73–80.
- [6] Mirolyubov N.N., Kostenko M.V., Levinshtein M.L., Tikhodeev N.N. *Metody rascheta elektrostatoicheskikh poley* [Methods for calculating electrostatic fields]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1963, 416 p.

- [7] Ostroumov G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 320 p.
- [8] Ostroumov G.A. Elektricheskaya konvektsiya [Electric convection]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1966, vol. 10, no. 5, pp. 683–695.
- [9] Petrichenko N.A. Nekotorye gidrodinamicheskoe osobennosti elektricheskogo vetra v elektroizoliruyushchikh zhidkostyakh [Certain hydrodynamic features of electric wind in the electrically insulating liquids]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1973, no. 4, pp. 28–29.
- [10] Semenov K.N., Bologa M.K., Vidrashko V.K. Vliyanie elektricheskogo polya na konvektivnyuyu teplootdachu v nepolyarnoy zhidkosti [Effect of electric field on convective heat transfer in the non-polar liquid]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic processing of materials*, 1966, no. 2, pp. 48–52.
- [11] Koulova-Nenova D., Slavtchev S. Electrohydrodynamic stability of two dielectric liquid layers at unipolar injection. *Electrostatics*, 1991, no. 118, pp. 317–322. Inst. Phys. Conf. Ser. Bristol, IOP Publishing Ltd.
- [12] Atten P., Lacroix J.C. Electrohydrodynamic stability of liquids subjected to unipolar injection: nonlinear phenomena. *J. Electrostatics*, 1978, no. 5, pp. 439–452.
- [13] 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.
- [14] Kozhevnikov I.V., Bologa M.K., Grosu F.P. Vliyanie 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.
- [15] 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. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896. [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].
- [16] 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.
- [17] 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 Akade-*

- micheskikh 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.
- [18] 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, 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.
- [19] 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: *“Sovremennye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki”: materialy polnykh dokladov na sekcii No. 2: “Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki” 57-kh nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo (21 sentyabrya 2022 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.
- [20] 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.
- [21] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya vliyaniya elektrosticheskikh poley na teploobmen i protsess osadkoobrazovaniya v motornom aviatsionnom masle pri ego vyzhdennoy 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>
- [22] 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 vyzhdennoy 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>
- [23] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnye issledovaniya teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh v usloviyakh ikh vyzhdennoy konveksii [Experimental studies of thermal processes in the aviation motor oils under conditions of their forced convection]. In: *Sbornik materialov 2-go Vserossiyskogo nauchnogo foruma*

- po dvigateleyam i energeticheskim ustanovkam imeni N.D. Kuznetsova (Samara, 10–11 oktyabrya 2024 g. [Collection of materials of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Forum on Engines and Power Plants named after N.D. Kuznetsov (Samara, October 10–11, 2024)]. Samara, Samara University Publ., 2024, pp. 92–94.
- [24] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Razrabotka metodik rascheta koeffitsienta teplootdachi k motornomu aviatsionnomu maslu v usloviyakh ego vyzhdennoy konveksii pri vliyaniy elektrostaticheskikh poley dlya aviatsionnykh i aerokosmicheskikh dvigateley odno- i mnogorazovogo ispolzovaniya [Development of methods for computing the heat transfer coefficient to aviation motor oil under conditions of its forced convection under the influence of electrostatic fields for the single- and multiple-use aircraft and aerospace engines]. In: *Materialy 59-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya No. 2: "Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki"* [Proceedings of the 59th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky. Section No. 2: "Problems of Rocket and Space Technology"]. Kaluga, "Eidos" Publ., 2024, Part 1, pp. 182–186.
- [25] 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]. *Sovremennyye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki. Sbornik statey, 2024. (Polnye doklady na sekcii No. 2: "Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki" na 58-ykh Nauchnykh chteniyakh, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo)* [Modern problems of rocket and space technology. Collection of articles, 2024. (Full reports on Section No. 2: "Problems of rocket and space technology" at the 58th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky)]. Kazan, RITs "Shkola", 2024, pp. 134–147.
- [26] 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.
- [27] 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 avi-*

- atsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva*”, *posvyashchenoy 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, Akademii imeni N.E. Zhukovskogo Publ., 2023, pp. 51–52.
- [28] 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 polej ne teplovyje protsessy v motornom avaiatsionnom masle marki MS-20 v usloviyakh ego vynuuzhdennoj 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>
- [29] 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 polej ne teplovyje protsessy v motornom avaiatsionnom masle marki MS-20 v usloviyakh ego vynuuzhdennoj 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>
- [30] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analiz metodik rascheta koeffitsienta teplootdachi k motornomu avaiatsionnomu maslu v slozhnykh termodinamicheskikh usloviyakh aviatsionnykh i aerokosmicheskikh dvigatelej [Analysis of methods for computing the heat transfer coefficient to the aviation motor oil under complex thermodynamic conditions of the aircraft and aerospace engines]. In: *Materialy 9-y Vserossiyskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii “Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki” (ANTE–2024). (03–04 oktyabrya 2024 g., Kazan). Sektsiya No. 5: “Teplovyje protsessy v tekhnike, teplofizika”*. *Elektronnoe izdanie* [Proceedings of the 9th All-Russian Scientific and Technical Conference “Problems and Prospects for the Development of Aviation, Land Transport and Energy” (ANTE–2024). (October 3–4, 2024, Kazan). Section No. 5: “Thermal Processes in Engineering, Thermal Physics”. Electronic resource]. Kazan, IP Sagiev A.R. Publ., 2024, pp. 239–241.
- [31] Altunin K. V. *Razrabotka nauchnykh osnov sozdaniya effektivnykh sistem podvoda dlya zhidkikh i gazoobraznykh goryuchikh i teplonositelej v teplovykh dvigatelyakh i energoustanovkakh. Dis. ... d-ra tekhn. nauk po spetsialnostyam: 1.3.14; 2.5.15* [Development of scientific foundations for creating the efficient supply systems for liquid and gaseous combustibles and coolants in the heat engines and power plants. Diss. ... Dr. Sc. (Eng.) in the specialties: 1.3.14; 2.5.15]. Kazan, 2023, 707 p.
- [32] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Analiz metodik rascheta teplootdachi k motornomu avaiatsionnomu maslu marki MS-20 v usloviyakh vynuuzhdennoj 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>
- [33] Altunin V.A., Lvov M., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koriev E.P., Yanovskaya M.L. Metodiki rascheta vliyaniya elektrostatičeskikh polej na teplootdachu k motornomu aviatsionnomu maslu marki MS-20 v usloviyakh ego vynuždennoj konveksii [Methods for computing the electrostatic fields influence on heat transfer to the MS-20 motor aviation oil under conditions of its forced convection]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, iss. 7. EDN KVVODU.
- [34] Altunin V.A. *Issledovanie vliyaniya elektrostatičeskikh i magnitnykh polej na osobennosti teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam. Kn. 2* [Investigation of the influence of electrostatic and magnetic fields on the characteristics of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants. Book 2]. Kazan, Kazan University Publ., 2006, 230 p.
- [35] Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid Chemistry]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2004, 445 p.
- [36] Izmistiev I.V., Kozhevnikova O.A. Poljarizatsiya i elektroprovodnost nekotorykh motornykh masel kak dispersnykh sistem [Polarization and electrical conductivity of some motor oils as dispersed systems]. *Vestnik Permskogo universiteta. Fizika — Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 1 (32), pp. 43–50.
- [37] Kozhevnikova O.A. Korrelyatsiya elektroprovodnosti i vyazkosti dvukh motornykh masel serii Castrol [Correlation of electrical conductivity and viscosity of two motor oils of the Castrol series]. In: *Fizika dlya Permskogo kraya: materialy regionalnoy nauchno-praktičeskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Physics for the Perm Territory: materials of the regional scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists]. Perm, 2015, iss. 8, pp. 134–137.
- [38] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat Transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975, 488 p.

Lvov M.V., Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.
e-mail: miha.lev@mail.ru

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

Altunin K.V., Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: altkonst881@yandex.ru