

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 429–435
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 429–435

Научная статья
УДК 536.242:536.252:537.29
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=177134>

Апробация нового критерия подобия осадкообразования с электрохимическим числом в условиях электрической конвекции

К.В. Алтунин¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
✉ altkonst881@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена применению нового критерия подобия осадкообразования, содержащего электрохимическое число – аналог числа Фарадея. Проведено обобщение результатов экспериментального исследования влияния электростатических полей и осадкообразования в среде жидкого углеводородного теплоносителя – керосина на теплоотдачу. Выведено новое критериальное уравнение, учитывающее образование углеродсодержащих осадков и электроконвекцию в авиационном керосине, на основе которого разработана обновленная методика расчета коэффициента теплоотдачи.

Ключевые слова: электрическая конвекция, число подобия, керосин, осадкообразование

Для цитирования. Алтунин К.В. Апробация нового критерия подобия осадкообразования с электрохимическим числом при обобщении результатов экспериментального исследования в среде керосина в условиях электрической конвекции // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 9. С. 429–435.

Original article

Approbation of a new deposit formation similarity criterion containing an electrochemical number at conditions of electric convection

K.V. Altunin¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI
✉ altkonst881@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the application of a new similarity criterion of deposit formation containing an electrochemical number – an analogue of the Faraday number. The results of an experimental study of the effect of electrostatic fields and deposit formation in the medium of a liquid hydrocarbon coolant such as kerosene on heat transfer are summarized in the paper. A new criterion equation has been derived that takes into account the formation of carbon-containing deposit formation and electroconvection in aviation kerosene, on the basis of which an updated method for calculating the heat transfer coefficient has been developed.

Keywords: electric convection, similarity number, kerosene, deposit formation

© Алтунин К.В., 2023

For citation. Altunin K.V. Approbation of a new deposit formation similarity criterion containing an electrochemical number at conditions of electric convection. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 9, pp. 429–435.

Введение

Электрической конвекцией принято называть макроскопическое движение жидкостей и газов под воздействием внешнего электрического поля [1].

Экспериментально обнаружено, что электрические поля позволяют значительно (более 10 раз) интенсифицировать теплоотдачу и массоотдачу в жидкостях и газах [2–5]. В условиях естественной и вынужденной конвекции жидких углеводородных теплоносителей, включая горючие, электрический ветер не только интенсифицирует теплоотдачу, но и эффективно предотвращает осадкообразование на металлических нагреваемых поверхностях топливно-подающих и топливно-охлаждающих систем двигателей летательных аппаратов [6]. В ходе анализа источников информации не выявлен критерий подобия осадкообразования, который учитывает и тепловую, и электрохимическую природу данного процесса. Полученный ранее критерий подобия осадкообразования имеет ограниченное применение в связи с заданием какого-то определенного значения силы электрического тока.

Таким образом, в настоящее время необходима разработка нового критерия подобия осадкообразования, учитывающего тепловую и электрохимическую природу данного процесса, а также создание общей и точной методики расчета теплоотдачи к жидким углеводородным теплоносителям в условиях естественной конвекции при одновременном влиянии локального осадка и электростатических полей.

Целью работы является разработка новой методики расчета теплоотдачи с критерием подобия, учитывающим тепловую и электрохимическую природу осадкообразования, в среде керосина в условиях электрической конвекции.

Проведение экспериментов при совместном влиянии естественной и электрической конвекции

Существует так называемая зона насыщения электростатическими полями, в которой при дальнейшем повышении напряжения тока коэффи-

циент теплоотдачи не возрастает. Осадкообразование на нагретом металлическом участке можно предотвратить за счет силовых линий электростатического поля. Все эти результаты совпали с результатами, представленными в работе [5].

Проведены эксперименты в условиях естественной конвекции керосина марки ТС-1 (рабочим элементом являлась пластинка из стали Х18Н10Т с размерами $(60 \times 2 \times 0,2) \times 10^{-3}$ м, которая размещалась между иглами-электродами и нагревалась Джоулевым теплом. Значения внешней напряженности электростатического поля были найдены из выражения

$$E = \frac{U_E}{h}, \quad (1)$$

где U_E – напряжение тока, подаваемое на электроды, кВ; h – расстояние между электродами, мм.

Экспериментальная установка и рабочий участок с электростатическими полями были показаны в научной статье [7]. Некоторые результаты экспериментальных исследований показаны на рис. 1.

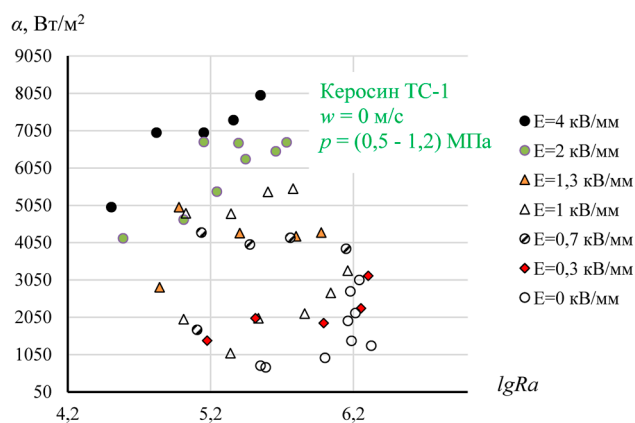


Рис. 1. Влияние напряженности электростатического поля E на повышение коэффициента теплоотдачи α при естественной конвекции (без осадкообразования на пластине)

Модернизация нового числа подобия осадкообразования

На основе анализа размерностей было разработано новое число подобия осадкообразования [7]:

$$Os = \frac{\rho_{oc} I^2}{T_w F_{oc} \lambda_{oc}}, \quad (2)$$

где ρ_{oc} – удельное электросопротивление слоя осадка, Ом·м; I – сила электрического тока, А; T_w – температура стенки, К; λ_{oc} – коэффициент теплопроводности слоя осадка, Вт/(м·К); F_{oc} – площадь детали (пластины, трубки), покрытая слоем осадка, м².

Число подобия (2) содержит силу электрического тока от слоя заряженных частиц по направлению к нагреваемому металлическому элементу (например, пластинке или трубке), которую достаточно трудно точно определить в условиях электрического ветра, кипения, естественной и вынужденной конвекции жидкого ТН.

Известно, что в процессе осадкообразования активное участие принимают диполи. При температуре выше 313 К керосин ТС-1 становится слабопроводящей средой, а при 373 К – появляются диполи, притягивающиеся к металлической поверхности [5].

Если осадкообразование в среде жидкого углеводородного теплоносителя имеет тепловой и электрический характер, то можно предположить, что данный процесс сходен с электролизом. Электролизом называют окислительно-восстановительные процессы, протекающие на электродах при прохождении постоянного электрического тока через раствор или расплав электролита. На электродах в процессе электролиза могут протекать различные реакции окисления и восстановления: на катоде – восстановление ионов металлов, а на аноде – окисление ионов неметаллов. Основываясь на законах электролиза, установленных английским физиком М. Фарадеем в 30-х гг. XIX в., можно записать выражение для расчета массы выделившегося на электроде вещества [8]:

$$m = \frac{\mu I \tau}{z F}, \quad (3)$$

где m – масса вещества, кг; μ – молярная масса вещества, г/моль; I – сила тока, А; τ – время прохождения тока, с; z – валентность атома вещества; F – число Фарадея, $F = 96485,332$ Кл/моль.

Выражение (3) можно переписать в следующем виде:

$$F = \frac{\mu I \tau}{z m}. \quad (4)$$

Известно, что молярная масса керосина ТС-1 равна $\mu \approx 139$ г/моль (данные И.Г. Зенкевича). Валентность – число химических связей, которые образует атом или число атомов. В керосине ТС-1 содержится 73,8 % углерода С и 10,2 % водорода Н (по массе) [9]. Это означает, что основным элементом данного теплоносителя является углерод. Во всех органических соединениях атом углерода находится в возбужденном состоянии, поэтому валентность С равна 4. Наиболее интенсивная электризация углеводородных горючих наблюдается при электрической проводимости, равной (4–12) пСм/м [9], для расчетов можно взять среднее значение – 0,1 мкКл. Скорость образования углеродсодержащих осадков на высоконагретых металлических участках может составлять $(1-5) \times 10^{-6}$ кг/(м²·с) [10].

Принимая за основу значения $z = 4$, $m = 4 \times 10^{-6}$ кг, $\mu = 139$ г/моль, $I = 0,1 \times 10^{-6}$ А, $\tau = 1$ с по формуле (5) получается, что $F_{De} = 8,69 \times 10^{-4}$ Кл/моль. В данном случае F_{De} – аналог числа Фарадея для осадков в среде жидкого углеводородного теплоносителя.

На базе электрохимического числа F_{De} критерий подобия осадкообразования можно переписать в следующем виде [11]:

$$Os = \frac{\rho_{oc}}{T_w F_{oc} \lambda_{oc}} \left(\frac{m_{oc} z F_{De}}{\mu_f \tau} \right)^2, \quad (5)$$

где m_{oc} – масса осадка, кг; μ_f – молярная масса вещества, кг/моль; $F_{De} = 8,69 \times 10^{-4}$ Кл/моль (для углеродсодержащих осадков, среда – керосин); $\tau = 1$ с.

Методика расчета теплоотдачи при совместном влиянии электростатических полей и осадкообразования

Ранее при помощи числа подобия (2) было получено критериальное уравнение, позволяющее определить коэффициент теплоотдачи при одновременных процессах, включая естественную, электрическую конвекцию углеводородного теплоносителя и осадкообразование [7]:

$$Nu_{Eoc} = k \Pi^{-0,5} Ra^{0,2} Al^{0,8} Os^{-0,63}, \quad (6)$$

где Nu_{Eoc} – число Нуссельта при одновременном влиянии осадкообразования и электростатических полей; Al – число подобия электри-

ческой конвекции [7]; $k = f(U_E, h, \Pi)$; $\lambda_{oc} = (0,25-0,45) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $43 \times 10^3 < Ra < 74,5 \times 10^6$; $1,18 \times 10^{-6} < Al < 3,41 \times 10^{-4}$; $7,83 \times 10^{-9} < Os < 9,3 \times 10^{-5}$, при $p = (0,1-1,2) \text{ МПа}$; коэффициенты k сведены в специальные таблицы.

Как видно, в уравнение (6) входит критерий подобия электрической конвекции Al , который также был получен при помощи метода анализа размерностей [7]:

$$Al = \frac{U_E^2}{h \rho_f \alpha_0 \Delta t}, \quad (7)$$

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.

Необходимо отметить, что в уравнение (7) входит α_0 , который может быть подсчитан по известным формулам конвективной теплоотдачи [12, 13, 14]. Данный критерий подобия не содержит плотность теплового потока q , в отличие от ранее полученных чисел [15].

Подстановка постоянного значения силы тока в числе (2), например, 0,1 мкА, с одной стороны, может облегчить расчеты, но, с другой стороны, не является точной для осадков разного вида. В связи с этим более целесообразно применять критерий подобия (5).

С целью лучшего обобщения экспериментальных данных на основе числа подобия осадкообразования (5) с учетом постоянного значения электрохимического числа $F_{De} = 8,69 \times 10^{-4} \text{ Кл/моль}$ получено критериальное уравнение:

$$Nu_{Eoc} = c Ra^{0,2} Al^{0,5} Os^{-0,4}, \quad (8)$$

где $c = \frac{1,2k\Pi q m_{oc}}{E}$ (в данном случае напряженность электростатического поля имеет размерность [кВ/мм]); Π – пористость осадка, q – плотность теплового потока, Вт/м²; m_{oc} – масса осадка, кг; E – напряженность электростатического поля, кВ/мм; коэффициенты k сведены в таблицу 1.

Выражение (8) получено при следующих диапазонах: $\lambda_{oc} = (0,35-0,42) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $10^4 < Ra < 19,13 \times 10^6$; $9,49 \times 10^{-7} < Al < 3,2 \times 10^{-3}$; $6,58 \times 10^{-12} < Os < 2,81 \times 10^{-11}$, $E = (0,3-4) \text{ кВ/мм}$. Точность расчетов по уравнению (8) составила $\pm(10-20) \%$.

Таблица 1. Значения коэффициента k при $p = (0,1-1,2) \text{ МПа}$, $U = (5-20) \text{ кВ}$, $h = (5-15) \text{ мм}$, $w = 0 \text{ м/с}$, $\Pi = (0,1-0,2)$

q , кВт/м ²	$U_E = 5 \text{ кВ}$	$U_E = 10 \text{ кВ}$	$U_E = 20 \text{ кВ}$	h , мм
50–60	3,96	10,92	14,16	5
140–160	3,23	7,73	8,36	
260–290	2,24	4,55	5,93	
430–460	1,75	3,84	4,90	
640–680	1,95	3,14	4,31	
q , кВт/м ²	$U_E = 5 \text{ кВ}$	$U_E = 10 \text{ кВ}$	$U_E = 20 \text{ кВ}$	
50–60	3,99	3,82	7,61	10
140–160	2,23	3,93	3,96	
260–290	1,68	2,42	3,21	
430–460	1,13	2,09	2,45	
640–680	0,83	1,30	1,80	
q , кВт/м ²	$U_E = 5 \text{ кВ}$	$U_E = 10 \text{ кВ}$	$U_E = 20 \text{ кВ}$	
50–60	2,39	3,02	3,97	15
140–160	1,70	2,61	3,52	
260–290	1,06	1,91	1,93	
430–460	0,81	1,34	1,52	
640–680	0,65	0,83	0,85	

Некоторые результаты вычислений представлены на рис. 2, 3.

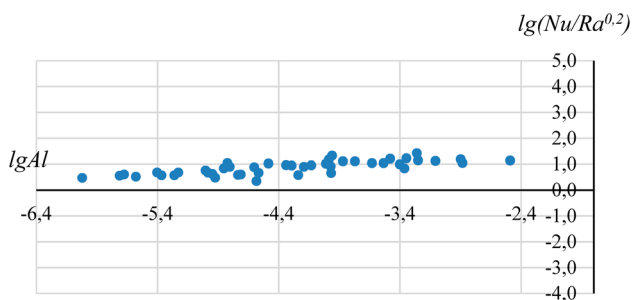


Рис. 2. Соотношение чисел подобия Nu , Ra , Al при совместном влиянии осадкообразования и электроконвекции на стальной пластинке (естественная конвекция) в среде керосина ТС-1

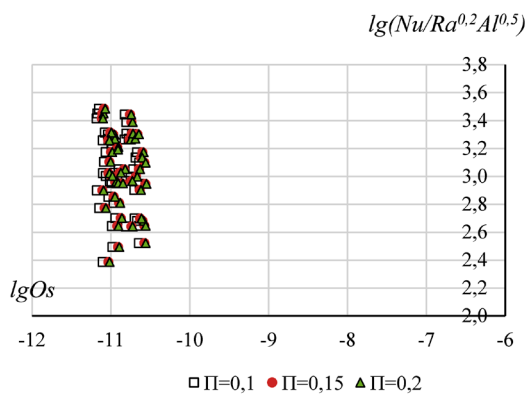


Рис. 3. Соотношение чисел подобия Nu , Ra , Al , Os при совместном влиянии осадкообразования и электроконвекции на стальной пластинке (естественная конвекция) в среде керосина ТС-1

Таким образом, методика расчета теплоотдачи с критерием подобия, учитывающим тепловую и электрохимическую природу осадкообразования, в среде керосина в условиях электрической конвекции включает:

- 1) проведение экспериментов с жидким теплоносителем в виде керосина при разных значениях плотностей теплового потока q и разных температурах поверхности стенки рабочего элемента (например, стальной пластинки);
- 2) фиксирование полученных результатов экспериментальных исследований при помощи соответствующего оборудования;
- 3) задание пористости осадка Π или нахождение этого параметра из справочных данных;
- 4) проведение расчета необходимых чисел подобия, включая число электроконвекции Al , число Рэлея Ra , число осадкообразования Os с учетом аналога числа Фарадея для осадков F_{De} (по формуле (5)). При этом m_{oc} может быть

взята из готовых экспериментальных графиков для определенного углеводородного теплоносителя по скорости осадкообразования [10]. Если m_{oc} определить проблематично, то можно воспользоваться следующим выражением:

$$m_{oc} = \delta_{oc} F_{oc} \rho_{oc}, \quad (9)$$

где δ_{oc} – толщина слоя осадка, м; F_{oc} – площадь участка, покрытая слоем осадка, м²; ρ_{oc} – плотность осадка, кг/м³.

Плотность осадка легко находится из выражения (10):

$$\rho_{oc} = 1000(1 - 1,82 \Pi), \quad (10)$$

где $\Pi < 0,5$.

Толщину углеродсодержащего осадка можно подсчитать по формуле:

$$\sum_{i=1}^n \delta_{oc_i} = \sum_{i=1}^n K_{oc_i} \ln \left(\frac{\rho_{oc_{max}}}{\rho_{oc_{i-1}}} \right) \tau_i T_{wi}, \quad (11)$$

где δ_{oc_i} – толщина i -го слоя осадка, м; K_{oc_i} – коэффициент i -го режима, м/(с·К); $\rho_{oc_{max}}$ – максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка, Ом·м; $\rho_{oc_{i-1}}$ – значение удельного электрического сопротивления на поверхности предыдущего слоя осадка, Ом·м; τ_i – время наработки i -го режима, с; T_{wi} – температура стенки при i -м режиме, К;

5) извлечение коэффициента теплоотдачи α из значения числа Нуссельта Nu_{Eoc} критериального уравнения типа (8) при определенной пористости осадка Π .

Заключение

Таким образом, проведена успешная апробация модернизированного критерия подобия осадкообразования Os , содержащего электрохимическое число, на базе результатов экспериментов в условиях образования углеродсодержащего осадка на нагретой стальной пластинке при естественной и электрической конвекции к керосину ТС-1. Применение электрохимического числа в числе Os в виде аналога числа Фарадея при образовании осадков позволит точнее рассчитывать коэффициент теплоотдачи при локальном осадкообразовании.

На базе модернизированного числа подобия осадкообразования разработана методика расчета теплоотдачи при совместном влиянии осадкообразования и электрической конвекции.

ции. Данная методика позволит учитывать возникновение осадкообразования на нагреваемых металлических стенках систем топливоподачи и охлаждение перспективных двигателей летательных аппаратов, энергоустановок, техносистем уже на ранней стадии их проектирования, более точно рассчитать коэффициент теплоотдачи к жидким углеводородным горючим и охладителям при их естественной конвекции в условиях возникновения углеродсодержащего осадка и применения электростатических полей, повысит эффективность и надежность техники.

Список источников

1. **Остроумов Г.А.** Электрическая конвекция (обзор) // Инженерно-физический журнал. 1996. № 5. С. 683–695.
2. **Болога М.К., Берков А.Б.** Электроконвективный теплообмен дисперсных систем. Кишинев: Штиинца, 1989. 275 с.
3. **Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А.** Электроконвекция и теплообмен / под. ред. Г.А. Остроумова. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
4. **Савиных Б.В., Гумеров Ф.М.** Свойства переноса диэлектрических жидкостей и тепло-массообмен в электрических полях. Казань: Издательство «Фэн», 2002. 384 с.
5. **Алтунин В.А.** Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям. Книга вторая. Казань: Издательство Казанского государственного университета им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006. 230 с.
6. **Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Галимов Ф.М., Дресвянников Ф.Н., Алтунин В.А.** Способы борьбы с осадкообразованием в энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях // Энергетика Татарстана. 2010. № 3. С. 43–51.
7. **Алтунин К.В.** Разработка методики расчета теплоотдачи при влиянии осадкообразования и электрической конвекции в среде керосина // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 7. С. 325–334.
8. **Нечаев А.В.** Основы электрохимии. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, 2010. 107 с.
9. **Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П.** Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: справочник. Москва: Химия, 1985. 240 с.
10. **Яновский, Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б.** Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. Казань: Абак, 1999. 284 с.
11. **Алтунин К.В.** Разработка методики расчета теплоотдачи на основе критерия подобия осадкообразования с электрохимическим числом // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 12 (753). С. 80–86.
12. **Бухмиров В.В.** Расчет коэффициента теплоотдачи: справочник. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2007. 37 с.
13. **Болгарский А.В., Мухачёв Г.А., Щукин В.К.** Термодинамика и теплопередача. Москва: Высшая школа, 1964. 458 с.
14. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. Москва: Энергия, 1965. 424 с.
15. **Алтунин К.В.** Разработка критериев подобия электроконвекции в углеводородных средах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. № 1–2. С. 168–171.

References

1. **Ostromov G.A.** Elektricheskaya konvektsiya (obzor) [Electric Convection (review)]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 1966, no. 5, pp. 683–695. (In Russ.).
2. **Bologa M.K., Berkov A.B.** Elektrokonvektivnyi teploobmen dispersnykh si-stem [Electric Convective Heat Transfer of Dispersed Systems]. Kishinev: Shtiintsa, 1989, 275 p. (In Russ.).
3. **Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhuhar' I.A.** Elektrokonvektsiya i teploobmen [Electric Convection and Heat Transfer]. Kishinev: Shtiintsa, 1977, 320 p. (In Russ.).
4. **Savinyh B.V., Gumerov F.M.** Svoistva perenosa dielektricheskikh zhidkosti i teplo-massoobmen v elektricheskikh polyakh [Properties of Dielectric Liquids Transfer and Heat Transfer in Electric Fields]. Kazan, Izdatel'stvo "Fen", 2002, 384 p. (In Russ.).
5. **Altunin V.A.** Issledovanie vliyaniya elektrostati-cheskikh i magnitnykh polei na osobennosti teplootdachi k uglevodородnym goryuchim i okhladitel'ям. Kniga vtoraya [Research of Electrostatic and Magnet Fields Influence on Particularities of Heat Transfer to Hydrocarbon Fuels and Coolants, Book 1]. Kazan: Kazan State University named after V.I. Ul'janov-Lenin, 2006, 230 p. (In Russ.).
6. **Altunin K.V., Gortyshov Ju.F., Galimov F.M., Dresvyanikov F.N., Altunin V.A.** Sposoby bor'by s osadkoobrazovaniem v jenergoustanovkah na zhidkih uglevodo-rodnyh gorjuchih i okhladitel'jah [Ways of Fight Deposit Formation in Power Plants on Liquid Hydrocarbon Fuels and Coolants]. *Tatarstan Energetics*, 2010, no. 3, pp. 43–51. (In Russ.).
7. **Altunin K.V.** Development of Calculation Methods of Heat Transfer under Influence of Deposit Formation and Electric Convection in a Medium of Kerosene. *Thermal processes in Engineering*, 2022, vol. 14, no. 7, pp. 325–334. (In Russ.).
8. **Nechaev A.V.** Osnovy elektrokhimii. Uchebnoe elektronnoe tekstovoe izdanie [Basics of Electric Chemistry: Educational Electronic Text Publication]. Ekaterinburg, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2010, 107 p. (In Russ.).
9. **Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Ju.P., Fedorov E.P.** Fiziko-khimicheskie i ekspluatatsionnye svoistva reaktivnykh topliv: spravochnik [Physic-chemical and Working Properties of Jet Fuels: Guidebook]. Moscow, Izdatel'stvo Khimiya, 1985, 240 p. (In Russ.).
10. **Janovskij L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Sapgir G.B.** Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatellyakh [Coke Formation in Aircraft and Rocket Jet Engines]. Kazan, Abak, 1999, 284 p. (In Russ.).
11. **Altunin K.V.** Development of heat transfer calculation methods based upon a deposit formation similarity criterion with the electrochemical number. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 12 (753), pp. 80–86. (In Russ.).
12. **Buhmirov V.V.** Raschet koeffitsienta teplootdachi: spravochnik [Calculation of Heat Transfer Coefficient (Guidebook)]. Ivanovo, Ivanovo Power Engineering Institute named after V.I. Lenin, 2007, 37 p. (In Russ.).

13. **Bolgarskij A.V., Muhachjov G.A., Shhukin V.K.** Termodinamika i teploperedacha [Thermodynamics and Heat Transfer]. Moskva, Vysshaya shkola, 1964, 458 p. (In Russ.).
14. **Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S.** Teploperedacha [Heat Transfer]. Moscow, Energiya, 1965, 424 p. (In Russ.).
15. **Altunin K.V.** Razrabotka kriteriev podobiya elektrokonveksii v uglevodorodnykh sredakh [Elaboration of Similarity Criteria of Electric Convection in Hydrocarbon Media]. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 2012, no. 1–2, pp. 168–171. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 10.09.2023; принята к опубликованию 12.09.2023.

The article was submitted on 01.08.2023; approved after reviewing on 10.09.2023; accepted for publication on 12.09.2023.