

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 536.242, 536.252

doi: 10.18698/0536-1044-2022-12-80-86

Разработка методики расчета теплоотдачи на основе критерия подобия осадкообразования с электрохимическим числом

К.В. Алтунин

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

Development of Heat Transfer Calculation Methods Based on the Similarity Criterion of Deposit Formation with the Electrochemical Number

K.V. Altunin

Tupolev Kazan National Research Technical University — KAI

Разработан критерий подобия осадкообразования с электрохимическим числом. Проведено обобщение экспериментальных исследований влияния солевых осадков на теплоотдачу с получением нового критериального уравнения для условий естественной конвекции соляного раствора. На основе модернизированного критерия подобия осадкообразования разработана методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на металлических стенках топливоподающего, теплообменного и энергетического оборудования.

Ключевые слова: критерий подобия осадкообразования, солевой осадок, электрохимическое число, методика расчета теплоотдачи

A similarity criterion of deposit formation with the electrochemical number was developed. Experimental studies of the saline deposits effect on heat transfer were generalized, and a new criterion equation was obtained for conditions of the saline solution natural convection. The modernized criterion of sedimentation similarity served as the basis for heat transfer calculation during the deposits formation.

Keywords: sedimentation similarity criterion, saline deposit, electrochemical number, heat transfer calculation method

Известно, что осадки, образующиеся на стенках теплообменного оборудования и топливоподающих каналов, могут ухудшать теплообмен и создавать дополнительное термосопротивление.

Основным компонентом низкотемпературных отложений, образующихся на поверхностях нагрева водогрейного оборудования, является карбонат кальция. В подогревателях систем горячего водоснабжения (с нагревом воды до

70 °С) вследствие использования природной воды без предварительной обработки, которое ограничено соответствующими нормами [1], накипные отложения могут быть весьма значительными.

Наряду с карбонатными отложениями в теплообменной аппаратуре, в зависимости от химического состава исходной воды и конкретных условий ее работы в отложениях могут присутствовать оксиды железа, сульфат кальция, силикаты, фосфаты и др. [2, 3].

Так как теплопроводность накипи намного меньше, чем у металла, время на нагрев воды значительно увеличивается, а нагревательные элементы начинают работать в условиях перегрева. Все это приводит к ускоренному износу оборудования и значительным потерям энергии, которые, как правило, составляют 3...8 % на каждый миллиметр накипи [4]. Потери энергии зависят от свойств накипи — минерального состава, пористости и адгезии к поверхности.

По мере нарастания слоя накипи изменяются все параметры работы системы: ее эффективность падает, а расходы на топливо растут. Накипь создает большое термическое сопротивление тепловому потоку, что ведет к снижению температуры теплоносителя и теплопроводности отопительных приборов. Также уменьшаются теплоотдача и пропускная способность элементов системы отопления, т. е. падает расход, а значит, изменяются скорость движения воды в системе отопления и режим ее течения в приборе.

Таким образом, все перечисленные параметры влияют на коэффициент теплопередачи приборов [5, 6]. По принципу действия методы противонакипных мероприятий можно подразделить на три группы: химические, физические и механические [7].

При скорости роста отложений из воды природного качества с 0,5 до 3,0 мм/год образование отложений на теплообменных поверхностях конденсаторов турбин приводит к уменьшению коэффициента полезного действия (КПД), вследствие чего в энергетике США имеет место недовыработка электроэнергии на сумму 1,36 млрд долл. в год [8].

Экономический расчет по России в тарифах начала XXI века показывает, что при средней скорости роста отложений 0,6 мм/год энергоблок электрической мощностью 1000 МВт теряет до 4 % КПД за год, что приводит к потерям в виде недовыработанной электроэнергии на

сумму 175 млн руб. или 175 руб. на 1 кВт установленной мощности. В целом же по энергетике РФ потери составляют около 30 млрд руб. в год [8].

Осадкообразование происходит и в других сферах. Например, очистка насосно-компрессорных труб от твердых солевых отложений, осаждающихся в процессе эксплуатации нефтяных скважин, представляет собой серьезную проблему. Используемые в настоящее время методы очистки обеспечивают удаление лишь ограниченного количества разновидностей солевых отложений [9].

Таким образом, образование осадков в топливном, теплообменном и энергетическом оборудовании является глобальной проблемой, которую необходимо решать.

Цель статьи — разработка методики расчета теплоотдачи при образовании отложений на стенках металлической емкости на основе критерия подобия осадкообразования, учитывающего тепловую и электрохимическую природу этого процесса.

Экспериментальные исследования влияния солевых осадков на теплоотдачу. Проведены эксперименты с соляными растворами при естественной конвекции в емкости из алюминиевого сплава с рабочим участком диаметром 0,12 м при нормальном атмосферном давлении. Осадком на теплообменной поверхности являлась густая масса, состоящая из соли NaCl и соляной воды. При экспериментальных исследованиях использовали четыре термометра:

- цифровой Mastech серии MS56500 с хромель-алюмелевой термопарой типа К, обеспечивающий точность измерения 1 °С в диапазоне 0...500 °С (рис. 1, а);
- электронный Rexant с точностью измерения 2 °С в диапазоне -50...120 °С (рис. 1, б);
- универсальный жидкостный Rexant 70-0612 с точностью измерения 2 °С в диапазоне 0...100 °С (рис. 1, в);
- жидкостный ТТЖ-М (с термометрической жидкостью — метилкарбитолом, керосином), обеспечивающий точность измерения 2 °С в диапазоне измерения 0...200 °С (рис. 1, г).

Экспериментальные исследования заключались в следующем. В металлическую емкость заливали пресную воду массой 300...400 г, куда добавляли 150...200 г пищевой соли NaCl марки «Экстра». Известно, что при температуре

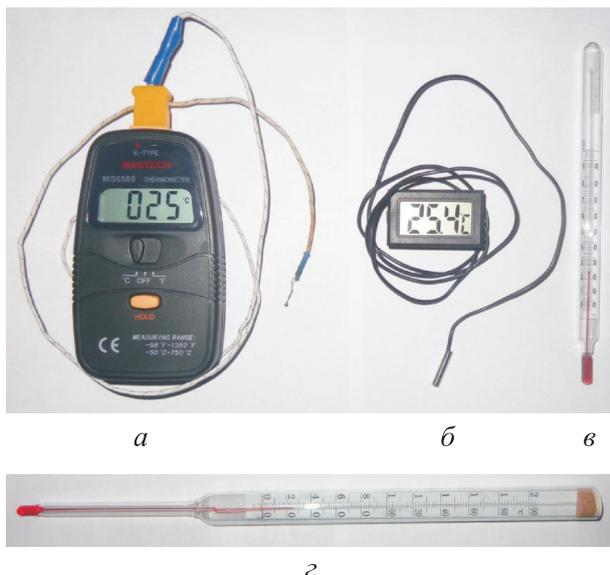


Рис. 1. Внешний вид термометров, использованных в экспериментальных исследованиях при естественной конвекции соляных растворов: а — цифрового Mastech; б — электронного Rexant; в — универсального жидкостного Rexant; г — жидкостного ТТЖ-М

290 К максимальная растворимость соли NaCl в пресной воде составляет 35,9 г, причем с ростом температуры раствора этот параметр увеличивается незначительно [10]. В связи с чем нерастворенная соль образовывала густой нерастворимый осадок с пористостью $\Pi = 0,3$ на дне емкости.

При разных опытах солевые осадки размещали на различной площади. Измеряли начальную температуру раствора и температуру внешней среды, а также текущие показания газового счетчика. Далее проводили автоматический розжиг свежей порции горючего (ручку газовой плиты устанавливали на малую, среднюю или максимальную подачу), включали секундомер часов смартфона.

Датчик измерения температуры электронного термометра Rexant размещали на поверхности осадка, термопару цифрового термометра Mastech — непосредственно на стенке дна металлической емкости. Жидкостным термометром ТТЖ-М измеряли температуру соляного раствора, универсальным жидкостным термометром Rexant — температуру внешней среды.

Все опыты проводили в металлических емкостях без крышки при естественной конвекции, т. е. до начала кипения. При достижении температуры кипения воды подачу природного газа прекращали, электронный секундомер

останавливали, после чего снимали последние показания счетчика и вычисляли затраченный объем природного газа. Все данные записывали в рабочую тетрадь.

Критерий подобия осадкообразования с электрохимическим числом. На основе метода анализа размерностей получен критерий подобия осадкообразования [11–13]

$$Os = \frac{\rho_{oc} I^2}{T_w F_{oc} \lambda_{oc}}, \quad (1)$$

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

Коэффициент теплопроводности и удельное электрическое сопротивление слоя осадка должны быть рассчитаны с учетом пористости осадка:

$$\lambda_{oc} = \Pi \lambda_f + (1 - \Pi) \lambda_s;$$

$$\rho_{oc} = \Pi \rho_f + (1 - \Pi) \rho_s,$$

где λ_f — коэффициент теплопроводности теплоносителя при средней температуре, Вт/(м·К); λ_s — коэффициент теплопроводности сухого твердого осадка, Вт/(м·К); ρ_f — удельное электрическое сопротивление теплоносителя при средней температуре, Ом·м; ρ_s — удельное электрическое сопротивление сухого твердого осадка, Ом·м.

Выдвинута гипотеза о схожести процессов образования осадков (углеродсодержащих — из углеводородных теплоносителей, солевых — из различных растворов) с электролизом. Известно, что на электродах в процессе электролиза могут протекать реакции окисления и восстановления: на катоде происходит восстановление ионов металлов, на аноде — окисление ионов неметаллов.

Законы электролиза были установлены английским физиком М. Фарадеем в 30-х годах XIX века. На их основе можно записать следующее выражение для расчета массы выделившегося на электроде вещества [14–16]:

$$m = \frac{\mu I \tau}{z F}, \quad (2)$$

где m — масса вещества, кг; μ — молярная масса вещества, г/моль; τ — время прохождения электрического тока, с; z — валентность атома

вещества; F — электрохимическое число Фарадея, $F = 96485,332$ Кл/моль (для электролиза).

Из выражения (2) получаем

$$F = \frac{\mu I \tau}{zm} \tag{3}$$

Известно, что молярная масса соли NaCl $\mu = 58,44$ г/моль. Для данного вещества валентность $z = 1$. Скорость количества солевых отложений при течении воды по трубам в умеренных тепловых потоках может достигать $v_g = 1,39 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·с), а плотность поверхностного заряда частиц размерами более 360 мкм — $q_s = 7 \cdot 10^{-4}$ Кл/м² [8].

Принимая, что $z = 1$, $m = 1,39 \cdot 10^{-6}$ кг, $\mu = 0,058$ кг/моль, $I = 7 \cdot 10^{-4}$ А, $\tau = 1$ с, получаем по формуле (3) $F_{De} = 29,2$ Кл/моль, где F_{De} — аналог электрохимического числа Фарадея для осадков в среде соляного раствора (индекс «De» соответствует слову *deposit*, что в переводе с латинского языка означает осадок).

Используя электрохимическое число F_{De} , выражение (1) можно записать как

$$Os = \frac{\rho_{oc}}{T_w F_{oc} \lambda_{oc}} \left(\frac{m_{oc} z F_{De}}{\mu_f \tau} \right)^2 \tag{4}$$

где m_{oc} — масса осадка, кг; μ_f — молярная масса теплоносителя, кг/моль; $\tau = 1$ с.

Обобщение экспериментальных результатов.

Путем экспериментов с учетом слоя солевых отложений на поверхности теплообмена в растворе с максимальным содержанием соли NaCl получена следующая формула (без учета лучистого теплообмена):

$$Nu_{oc} = 0,68 \Pi^{0,16} Ra^{0,26} Os^{-0,25} \tag{5}$$

где Nu_{oc} — критерий Нуссельта при осадкообразовании; Ra — критерий Рэлея, $Ra = 62 \cdot 10^6 \dots 12,2 \cdot 10^9$; $Os = 2,01 \dots 11,46$ при пористости осадка $\Pi = 0,25 \dots 0,35$.

Площадь детали, покрытая слоем осадка, $F_{oc} = (0,25 \dots 0,90)F$, где F — общая площадь поверхности теплообмена. Гидравлический диаметр $d_r = 0,12$ м. Параметры в числе подобия Os подсчитаны по температуре стенки.

Точность расчетов по выражению (5) составила $\pm(10 \dots 20)$ %.

На рис. 2 показана взаимосвязь критериев подобия осадкообразования Os , Нуссельта Nu и Рэлея Ra , полученная путем расчета при естественной конвекции 36%-ного соляного раствора, средней температуре $t_m = (t_w + t_f)/2$

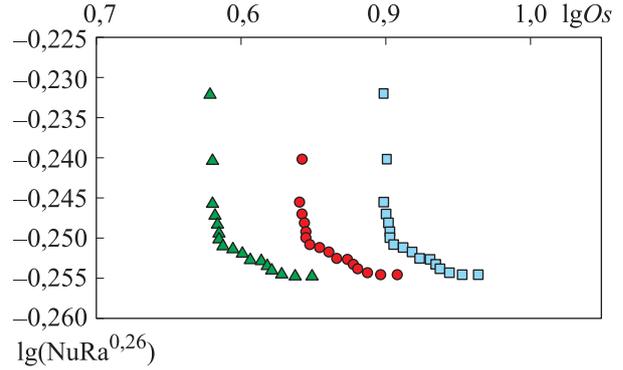


Рис. 2. Взаимосвязь критериев подобия осадкообразования Os , Нуссельта Nu и Рэлея Ra , полученная путем расчета при естественной конвекции 36%-ного соляного раствора, средней температуре t_m и различных значениях пористости соляного осадка площадью $F_{oc} = 0,75F$:
 □ — $\Pi = 0,25$; ● — $\Pi = 0,30$; ▲ — $\Pi = 0,35$

(t_w — температура металлической поверхности, не покрытой солевым осадком, °С; t_f — температура соляного раствора, °С) при различных значениях пористости соляного осадка площадью $F_{oc} = 0,75F$.

Результаты экспериментальных исследований — зависимости коэффициента теплоотдачи α от плотности теплового потока q и разности температур $\Delta t = (t_w - t_f)$ при различных значениях площади соляного осадка в емкости из алюминиевого сплава приведены на рис. 3 и 4.

Как видно из рис. 3, для $F_{oc} = 0,9F$ коэффициент теплоотдачи α можно снизить при определенных значениях плотности теплового потока q .

Таким образом, методика расчета теплоотдачи при осадкообразовании в условиях есте-

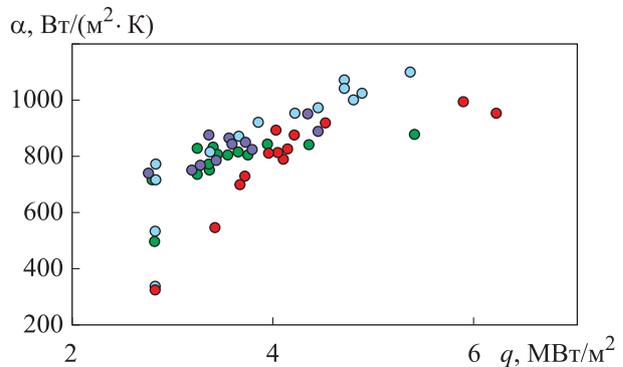


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от плотности теплового потока q при различных значениях площади соляного осадка в емкости из алюминиевого сплава:
 ● — $F_{oc} = 0$; ● — $F_{oc} = 0,25F$; ○ — $F_{oc} = 0,75F$; ● — $F_{oc} = 0,9F$

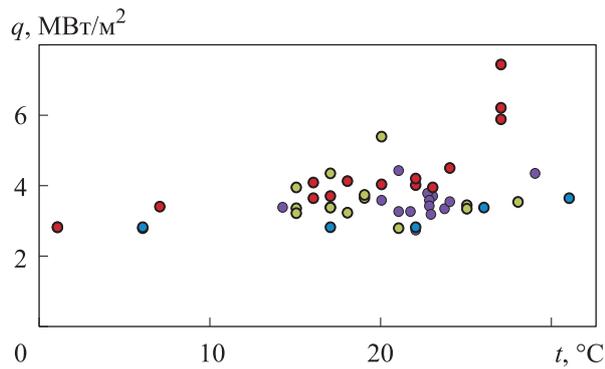


Рис. 4. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от разности температур Δt при различных значениях площади солевого осадка в емкости из алюминиевого сплава:

● — $F_{oc} = 0$; ● — $F_{oc} = 0,25F$; ● — $F_{oc} = 0,75F$; ● — $F_{oc} = 0,9F$

ственной конвекции включает в себя следующие этапы:

- получение результатов экспериментальных исследований с помощью соответствующего оборудования (термометров);
- задание пористости осадка Π или нахождение этого параметра из справочных данных;
- расчет критериев подобия в необходимом интервале, включая числа Рэлея Ra и осадкообразования Os с учетом аналога электрохимического числа Фарадея для осадков F_{De} по формулам (3), (4); при этом массу осадка m_{oc} можно взять из готовых экспериментальных графиков для скорости осадкообразования [8];
- извлечение коэффициента теплоотдачи α из значения числа Нуссельта Nu_{oc} , входящего в состав критериального уравнения теплообмена типа (5), при определенной пористости осадка Π .

Выводы

1. Выполнен анализ информационных источников по теме исследования, в результате которого установлено, что на стенках топливоподающего, теплообменного и энергетического

оборудования могут появляться осадки разной природы. Состав осадков может быть разным, но их влияние на теплоотдачу одинаковое. Осадкообразование в большинстве случаев ухудшает теплообмен, снижая коэффициент теплоотдачи к теплоносителю. В итоге осадкообразование может привести к большим экономическим затратам.

2. Получен универсальный безразмерный критерий подобия осадкообразования, зависящий от тепловой и электрической природы этого явления. В целях расширения применения критерия подобия осадкообразования выполнена его модификация с учетом электрохимических процессов.

3. Предложена методика проведения экспериментов с раствором и соевыми отложениями.

4. Выведено новое критериальное уравнение, позволяющее найти число Нуссельта в условиях образования солевых осадков при естественной конвекции жидкого теплоносителя.

5. Разработана методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на стенках металлической емкости на основе нового критерия подобия осадкообразования, учитывающего электрохимическую природу осадков. Эта методика будет способствовать:

- более точному расчету коэффициента теплоотдачи в различных топливах и теплоносителях при их естественной конвекции в условиях возникновения осадков разного рода;
- учету возникновения осадкообразования на нагреваемых металлических стенках систем топливоподдачи и охлаждения перспективных двигателей летательных аппаратов, энергоустановок, техносистем на ранней стадии их проектирования;
- повышению ресурса, надежности, эффективности и экономичности отечественной техники XXI века.

6. Намечены пути дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Литература

- [1] Балабан-Ирменин Ю.В., Богловский А.В., Васина Л.Г. и др. Закономерности накипеобразования в водогрейном оборудовании систем теплоснабжения (обзор). *Энергосбережение и водоподготовка*, 2004, т. 30, № 3, с. 10–16.
- [2] Chauhan K., Sharma P., Chauhan Gh.S. Removal/dissolution of mineral scale deposits. In: *Mineral scales and deposits*. Elsevier, 2015, pp. 701–720.
- [3] Васильева Л.В. *Формирование элементного и фазового состава отложений в теплоэнергетическом оборудовании в условиях различных схем водоподготовки и способы их удаления*. Дисс. ... канд. хим. наук. Краснодар, КГУ, 2017. 136 с.

- [4] Мельников М.В., Корепанов М.А., Калинин А.С. Электромагнитная обработка воды для защиты от накипи. *Химическая физика и мезоскопия*, 2017, т. 19, № 3, с. 389–395.
- [5] Колца Л.Н., Елистратова Ю.В., Семиненко А.С. Влияние отложений солей жесткости на теплоотдачу отопительных приборов. *Современные наукоемкие технологии*, 2014, № 7–2, с. 58–59.
- [6] Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности. *Науковедение*, 2017, т. 9, № 2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf>
- [7] Минко В.А., Феоктистов А.Ю., Гунько И.В. и др. Методы проведения и эффективность мероприятий по борьбе с накипеобразованием в системах теплоснабжения. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2015, № 2, с. 16–19.
- [8] Бубликов И.А. *Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций*. Дисс. ... док. тех. наук. Новочеркасск, ЮРГПУ (НПИ), 2004. 360 с.
- [9] Глушников В.А., Карпунин В.Ф., Юсупов Р.Ю. и др. Технология и оборудование для очистки труб от солевых отложений. *Записки Горного института*, 2005, т. 166, с. 172–174.
- [10] Cengel Y.A. *Heat transfer*. McGraw-Hill, 2003. 932 p.
- [11] Алтунин К.В. Разработка новых критериев подобия теплообмена. *Инновационные научные исследования*, 2022, № 5–2, с. 27–34.
- [12] Алтунин К.В. Разработка методики расчета теплоотдачи при осадкообразовании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 42–48, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-42-48>
- [13] 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, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-7-325-334>
- [14] Нечаев А.В. *Основы электрохимии*. Екатеринбург, УрФУ, 2010. 107 с.
- [15] Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирли Г.А. *Электрохимия*. Москва, Химия, Колосс. 2006. 672 с.
- [16] Булидорова Г.В., Галяметдинов Ю.Г., Ярошевская Х.М. и др. *Физическая химия*. Москва, КДУ. Университетская книга. 2016. 456 с.

References

- [1] Balaban-Irmenin Yu.V., Boglovskiy A.V., Vasina L.G. et al. Regularities of scale formation in water heating equipment of heat supply systems (review). *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2004, vol. 30, no. 3, pp. 10–16. (In Russ.).
- [2] Chauhan K., Sharma P., Chauhan Gh.S. Removal/dissolution of mineral scale deposits. In: *Mineral scales and deposits*. Elsevier, 2015, pp. 701–720.
- [3] Vasilyeva L.V. *Formirovanie elementnogo i fazovogo sostava otlozheniy v teploenergeticheskoy oborudovaniy v usloviyakh razlichnykh skhem vodopodgotovki i sposoby ikh udaleniya*. Diss. kand. khim. nauk [Formation of elemental and phase composition of deposits in thermal power equipment at different water treatment schemes and methods of their removal. Kand. chem. sci. diss.]. Krasnodar, KGU Publ., 2017. 136 p. (In Russ.).
- [4] Melnikov M.V., Korepanov M.A., Kalinin A.S. Electromagnetic water treatment for the lime-scale protection. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 3, pp. 389–395. (In Russ.).
- [5] Koltza L.N., Elistratova Yu.V., Seminenko A.S. Effect of hardness salt deposits on heat output of radiators. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2014, no. 7–2, pp. 58–59. (In Russ.).
- [6] Galkovskiy V.A., Chupova M.V. Analysis of the reduction in the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface contamination. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (in Russ.).
- [7] Minko V.A., Feoktistov A.Yu., Gunko I.V. et al. Methods and effectiveness of measures to combat scale formation in heating systems. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2015, no. 2, pp. 16–19. (In Russ.).

- [8] Bublikov I.A. *Nauchnye printsipy diagnostirovaniya i razrabotka metodov snizheniya intensivnosti obrazovaniya otlozheniy v teploobmennom oborudovanii teplovykh i atomnykh elektrostantsiy*. Diss. ... dok. tekhn. nauk [Scientific principles of diagnosis and development of methods to reduce the intensity of deposit formation in heat exchange equipment of thermal and nuclear power plants. Doc. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, YuRGPU (NPI) Publ. 2004. 360 p. (In Russ.).
- [9] Glushchenkov V.A., Karpukhin V.F., Yusupov R.Yu. et al. Technology and equipment for removal of salt depositions from tubes. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2005, vol. 166, pp. 172–174. (In Russ.).
- [10] Cengel Y.A. Heat transfer. McGraw-Hill. 2003. 932 p.
- [11] Altunin K.V. Creation of new similarity numbers of heat transfer. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya* [Innovative Scientific Research], 2022, no. 5–2(19), pp. 27–34. (In Russ.).
- [12] Altunin K.V. Development of the techniques for calculating heat transfer during sedimentation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 7, pp. 42–48, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2022-7-42-48> (in Russ.).
- [13] Altunin K.V. Development of calculation methods of heat transfer under influence of deposit formation and electric convection in a medium of kerosene. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2022, vol. 14, no. 7, pp. 325–334, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-7-325-334> (in Russ.).
- [14] Nechaev A.V. *Osnovy elektrokhemii* [Fundamentals of electrochemistry]. Ekaterinburg, UrFU Publ. 2010. 107 p. (In Russ.).
- [15] Damaskin B.B., Petriy O.A., Tsirli G.A. *Elektrokhemiya* [Electrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., Kolosc. 2006. 672 p. (In Russ.).
- [16] Bulidorova G.V., Galyametdinov Yu.G., Yaroshevskaya Kh.M. et al. *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry]. Moscow, KDU Publ., Universitetskaya kniga Publ. 2016. 456 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.10.2022

Информация об авторе

АЛТУНИН Константин Витальевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altkonst881@yandex.ru).

Information about the author

ALTUNIN Konstantin Vitalievich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Thermal Engineering and Power Engineering. Tupolev Kazan National Research Technical University — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: altkonst881@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка методики расчета теплоотдачи на основе критерия подобия осадкообразования с электрохимическим числом. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 12, с. 80–86, doi: [10.18698/0536-1044-2022-12-80-86](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-80-86)

Please cite this article in English as:

Altunin K.V. Development of Heat Transfer Calculation Methods Based on the Similarity Criterion of Deposit Formation with the Electrochemical Number. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 12, pp. 80–86, doi: [10.18698/0536-1044-2022-12-80-86](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-12-80-86)