

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 536.242; 536.252

doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-42-48

Разработка методики расчета теплоотдачи при осадкообразовании

К.В. Алтунин

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

Development of the Techniques for Calculating Heat Transfer during Sedimentation

K.V. Altunin

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI

Рассмотрена проблема снижения теплоотдачи вследствие появления осадков на стенках теплообменного оборудования. Предложен новый критерий подобия осадкообразования, учитывающий его тепловую и электрическую природу. Приведена методика проведения экспериментов с раствором и осадком. Получено новое критериальное уравнение для условий естественной конвекции соляного раствора с учетом солевого осадка на поверхности теплообмена. Разработана методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на основе нового критерия подобия осадкообразования.

Ключевые слова: критерий подобия, осадкообразование, методика расчета теплоотдачи, солевой осадок

The article considers the problem of reducing heat transfer due to the sediment appearance on the walls of heat exchange equipment. A new sedimentation similarity criterion is proposed, taking into account its thermal and electrical nature. A technique for performing experiments with a solution and sediment is given. A new criterion equation was obtained for the conditions of natural convection of a salt solution, taking into account the salt sediment on the heat exchange surface. A technique has been developed for calculating heat transfer during the sediment formation based on a new sedimentation similarity criterion.

Keywords: sedimentation similarity criterion, heat transfer calculating technique, salt sediment

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

Процесс осадкообразования в жидких углеводородных горючих и охладителях оказывает негативное влияние на работу тепловых двига-

телей и энергоустановок наземного, аэрокосмического и космического базирования. На борьбу с образованием углеродосодержащих отложений в промышленности США ежегодно выделяется около 10 млрд долл. Только для обычного нефтеперерабатывающего завода ежегодные затраты составляют до 10 млн долл. США [1].

Аналогичные проблемы наблюдаются в теплоэнергетике, ракетостроении и авиации [2]. Так, из 210 летних происшествий в военно-воздушных силах США в течение одного года около 30 % связаны с неполадками двигателей из-за ненадежной работы топливно-регулирующей аппаратуры [3].

В жидких углеводородных средах образование углеродсодержащих осадков начинается, как правило, при температуре 373 К. Такие отложения могут привести к закоксовыванию топливно-подающих каналов, топливных фильтров, форсунок, нерасчетному струйному распылу, коррозии деталей топливно-охлаждающей аппаратуры и даже к выходу из строя всего реактивного двигателя [4–9].

Следует отметить, что при росте температуры жидкие углеводородные теплоносители (керосины, масла) теряют диэлектрические свойства, в них могут образовываться диполи, активно участвующие в осадкообразовании на металлических поверхностях.

Аналогичный процесс происходит с осадками при использовании воды (например, образование накипи). Выпадающий на горячей поверхности карбонат кальция образуется в форме кальцита (одной из полиморфных модификаций карбоната кальция). Вследствие того, что теплопроводность накипи намного ниже, 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 [10]. Потери энергии зависят от свойств накипи — минерального состава, пористости и адгезии к поверхности.

По принципу действия методы противонакипных мероприятий можно подразделить на три группы: химические, физические и механические [11]. Накипь — это твердые отложения, образующиеся на внутренних стенках труб паровых котлов, водяных экономайзеров, пароперегревателей, испарителей и элементов тепловых сетей. Образование осадка в виде накипи происходит при наличии высокой концентрации солей.

По мере нарастания слоя накипи изменяются все параметры работы системы: ее эффективность падает, а расходы на топливо растут. Накипь создает большое термическое сопро-

тивление тепловому потоку, что ведет к снижению температуры теплоносителя и теплопроводности отопительных приборов.

Также уменьшаются теплоотдача и пропускная способность элементов системы отопления, т. е. расход падает, а значит, скорость движения воды в системе отопления и режим ее течения в приборе изменяются. Таким образом, все перечисленные параметры влияют на коэффициент теплопередачи приборов [12, 13].

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.

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 [14].

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

Цель статьи — разработка методики расчета теплоотдачи при образовании отложений на металлических стенках на основе нового критерия подобия осадкообразования.

Экспериментальные исследования влияния солевых осадков на теплоотдачу. Проведены эксперименты с соляными растворами при нормальном атмосферном давлении и естественной конвекции в металлических емкостях диаметром 0,105 и 0,160 м. Осадком на теплообменной поверхности являлась густая масса, состоящая из соли NaCl и воды.

При экспериментальных исследованиях использованы три термометра:

- цифровой Mastech серии MS56500 с хромель-алюмелевой термопарой типа К, обеспечивающий точность измерений 1 °C в диапазоне 0...500 °C (рис. 1, а);
- электронный Rexant с точностью измерений 2 °C в диапазоне –50...120 °C (рис. 1, б);

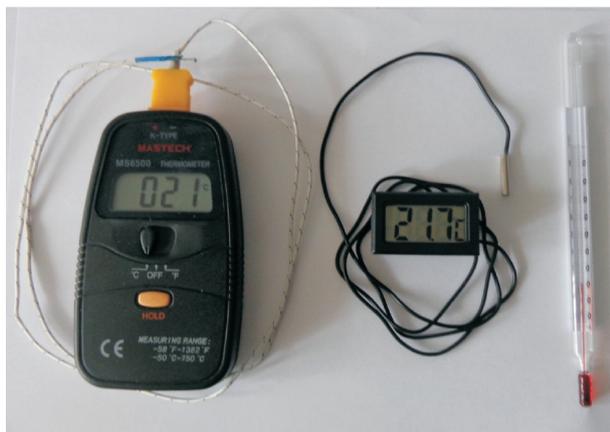


Рис. 1. Внешний вид основного оборудования, использованного в экспериментальных исследованиях при естественной конвекции соляных растворов:

а — цифровой термометр Mastech серии MS56500;
б — электронный термометр Rexant; в — универсальный жидкостный термометр Rexant 70-0612

• универсальный жидкостный Rexant 70-0612 с точностью измерений 2°C в интервале $0\dots 100^\circ\text{C}$ (рис. 1, в).

Экспериментальные исследования заключались в следующем. В металлическую емкость заливали пресную воду массой $300\dots 400$ г и добавляли $150\dots 200$ г пищевой соли NaCl марки «Экстра». Известно, что при температуре 290 К максимальная растворимость соли NaCl в пресной воде составляет $35,9$ г, причем с ростом температуры раствора этот параметр увеличивается незначительно [15]. В связи с этим 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. Раствор нагревали на газовой плите с помощью конфорки.

Датчик измерения температуры электронного термометра Rexant устанавливали на поверхности осадка, термопару цифрового термометра Mastech — непосредственно на металлической стенке дна емкости. Температуру соляного раствора измеряли жидкостным термометром. Опыты проводили при естественной конвекции, т. е. до начала кипения. Все данные записывали в рабочую тетрадь.

Экспериментальные зависимости плотности теплового потока q от разности температур $\Delta t = t_w - t_f$ (t_w и t_f — температуры металлической стенки и жидкой среды, $^\circ\text{C}$) при естественной

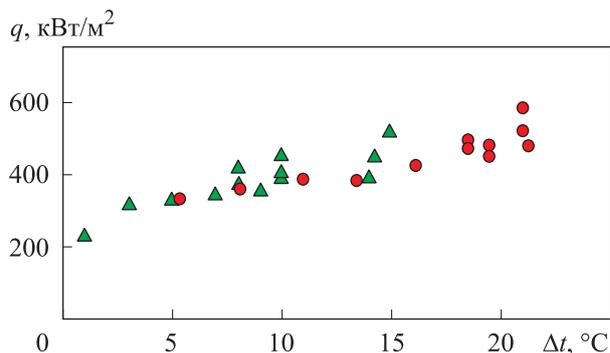


Рис. 2. Экспериментальные зависимости плотности теплового потока q от разности температур Δt при естественной конвекции 25%-ного раствора NaCl без солевого осадка (\blacktriangle) и 36%-ного раствора NaCl с солевым осадком (\bullet)

конвекции 25%-ного раствора NaCl без солевого осадка и 36%-ного раствора NaCl с солевым осадком показаны на рис. 2. Использована емкость из нержавеющей стали, покрытая слоем эмали с двух сторон.

Критерий подобия осадкообразования. На основе метода анализа размерностей получен критерий подобия осадкообразования [16]

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

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, м^2 .

При контакте жидкого углеводородного горючего или охладителя с металлическими стенками могут появиться токи (например, ток с фильтра при прокачке топлива) [17]. Выдвинута гипотеза о существовании микротоков в жидких средах около металлических поверхностей и их участии в осадкообразовании.

Значения удельного электросопротивления и коэффициента теплопроводности слоя осадка должны быть рассчитаны с учетом пористости осадка:

$$\begin{aligned} \lambda_{oc} &= \Pi \lambda_f + (1 - \Pi) \lambda_s; \\ \rho_{oc} &= \Pi \rho_f + (1 - \Pi) \rho_s, \end{aligned}$$

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.

Обобщение экспериментальных результатов.

Путем экспериментов получена формула с учетом слоя солевых отложений на поверхности теплообмена в растворе с максимальным содержанием соли NaCl

$$Nu = k\Pi^{-0,08}Ra^{0,26}Os^{-0,4}, \quad (2)$$

где Nu — критерий Нуссельта; k — эмпирический коэффициент, зависящий от пористости отложений Π (см. таблицу); Ra — критерий Рэлея, $Ra = 19,10 \cdot 10^6 \dots 18,71 \cdot 10^9$; $Os = (2,8 \dots 4,93) \cdot 10^{-11}$ при пористости осадка $\Pi = 0,30$.

Площадь детали, покрытая слоем осадка $F_{oc} = (0,3 \dots 0,8)F$, где F — общая площадь поверхности теплообмена. Гидравлический диаметр $d_r = 0,105 \dots 0,160$ м. Сила электрического тока I выбрана равной 0,1 мкА и являлась постоянной величиной.

Точность расчетов по выражению (2) составила $\pm(4 \dots 20)$ %.

На рис. 3 показана взаимосвязь критериев подобия осадкообразования Os , Нуссельта Nu и Рэлея Ra, полученная путем расчета при естественной конвекции 36%-ного соляного раствора, средней температуре $t_m = (t_w + t_{sur} + t_f)/3$ (t_{sur} — температура на поверхности слоя солевого осадка, °C) и различных значениях пористости Π солевого осадка.

По формуле (2) проведен расчет критерия Нуссельта Nu при естественной конвекции 36%-ного соляного раствора с учетом и без учета температуры на поверхности солевого осад-

Значения коэффициента k при различных значениях пористости Π солевых отложений

Π	$k \cdot 10^5$	Π	$k \cdot 10^5$
0,01	2,97	0,10	3,39
0,02	3,12	0,20	3,38
0,03	3,21	0,30	3,26
0,04	3,26	0,40	3,10
0,05	3,30	0,50	2,90
0,06	3,33	0,60	2,66
0,07	3,36	0,70	2,37
0,08	3,37	0,80	2,02
0,09	2,10	0,90	1,53

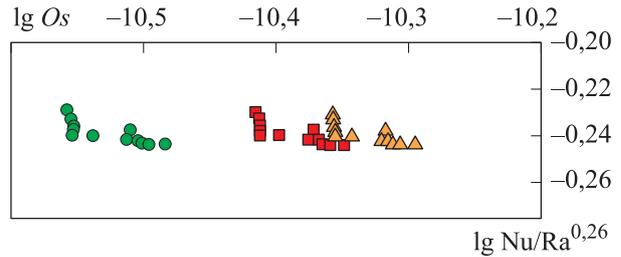


Рис. 3. Взаимосвязь критериев подобия осадкообразования Os , Нуссельта Nu и Рэлея Ra, полученная путем расчета при естественной конвекции 36%-ного соляного раствора, средней температуре t_m и различных значениях пористости солевого осадка:
 \triangle — $\Pi = 0,01$; \square — $\Pi = 0,10$; \circ — $\Pi = 0,30$

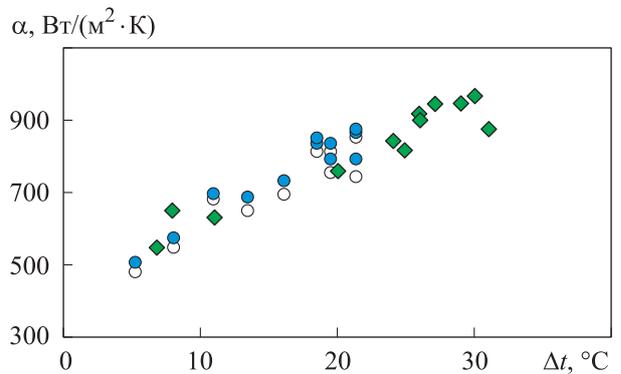


Рис. 4. Зависимости коэффициента теплоотдачи α от разности температур Δt при естественной конвекции 36%-ного соляного раствора:
 \bullet и \blacklozenge — результаты расчета с учетом и без учета температуры на поверхности солевого осадка;
 \circ — данные эксперимента

ка. Коэффициент теплоотдачи α (рис. 4) определен с помощью известного выражения

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_f}{L_c}, \quad (3)$$

где L_c — определяющий размер (ширина пластинки, гидравлический диаметр канала и т. д.), м.

Как видно из рис. 4, формулу (2) можно использовать, даже если неизвестна температура на поверхности осадка, т. е. для расчета критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи достаточно знать только температуру металлической стенки (не покрытой осадками) и жидкой среды.

Таким образом, методика расчета теплоотдачи при осадкообразовании включает в себя следующие этапы:

- выбор теплоносителя, создание таблиц его теплофизических свойств и свойств возможного осадка исходя из его состава;

- построение на основе зафиксированных температур таблиц для вычисления критериев подобия (например, критериев Грасгофа Gr, Прандтля Pr, Нуссельта Nu, Рэлея Ra при естественной конвекции и критерия Рейнольдса Re при вынужденной конвекции);

- определение по формуле (1) числа осадкообразования на основе удельного электросопротивления осадка, коэффициента теплопроводности слоя осадка в зависимости от средней температуры при известной площади поверхности, покрытой слоем осадка и заданной (или рассчитанной) силе электрического тока;

- выбор подходящего критериального уравнения, например, (2) для расчета числа Nu;

- определение коэффициента теплоотдачи α на основе формулы (3).

Выводы

1. Выполнен анализ информационных источников по теме исследования, в результате которого установлено, что на стенках топлив-

но-подающих каналов тепловых двигателей и теплообменного 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.

2. Получен универсальный безразмерный критерий подобия осадкообразования, зависящий от тепловой и электрической природы этого явления.

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

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

5. Разработана методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на металлических стенках на основе нового критерия подобия осадкообразования.

Литература

- [1] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. Economic penalties associated with the fouling of refinery heat transfer equipment. In: *Fouling of heat transfer equipment*. Hemisphere, 1981, pp. 619–643.
- [2] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Дресвянников Ф.Н. и др. Проблемы внутрикамерных тепловых процессов в авиационных, аэрокосмических и космических энергоустановках многократного использования. *Сб. тез. докл. Межд. науч. сем. Проблемы моделирования и динамики сложных междисциплинарных систем*. Казань, Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010. 12 с.
- [3] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многократного использования*. Казань, Изд-во КГТУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2005. 272 с.
- [4] Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Галимов Ф.М. и др. Проблемы осадкообразования в энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Энергетика Татарстана*, 2010, № 2, с. 10–17.
- [5] Алтунин К.В. *Функционально-стоимостной анализ горелочных устройств и форсунок*. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 156 с.
- [6] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М. и др. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999. 284 с.
- [7] Чертков Я.Б. *Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива*. Москва, Химия, 1968. 356 с.
- [8] Алтунин К.В. *Форсунка*. Патент РФ 2388966. Заявл. 02.12.2008, опубл. 10.05.2010.
- [9] Алтунин К.В. *Форсунка*. Патент РФ 2447362. Заявл. 26.07.2010, опубл. 10.04.2012.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] Колца Л.Н., Елистратова Ю.В., Семиненко А.С. Влияние отложений солей жесткости на теплоотдачу отопительных приборов. *Современные наукоемкие технологии*, 2014, № 7, с. 58–59.
- [13] 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>
- [14] Бубликов И.А. *Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций*. Автореф. канд. ... техн. наук. Новочеркасск, ЮРГПУ (НПИ), 2004. 36 с.
- [15] Cengel Y.A. *Heat transfer*. McGraw-Hill, 2003. 932 p.
- [16] Алтунин К.В. Разработка новых критериев подобия теплообмена. *Инновационные научные исследования*, 2022, № 5–2(19), с. 27–34.
- [17] Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П. и др. *Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив*. Москва, Химия, 1985. 240 с.

References

- [1] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. Economic penalties associated with the fouling of refinery heat transfer equipment. In: *Fouling of heat transfer equipment*. Hemisphere, 1981, pp. 619–643.
- [2] Altunin V.A., Altunin K.V., Dresvyannikov F.N. et al. [Problems of intrachamber thermal processes in aviation, aerospace and space reusable power plants]. *Sb. tez. dokl. Mezhd. nauch. sem. Problemy modelirovaniya i dinamiki slozhnykh mezhdistsiplinarnykh system* [Proc. Int. Sci. Tech. Sem. Problems of Modelling and Dynamics of Complex Interdisciplinary Systems]. Kazan', Izd-vo KGTU im. A.N. Tupoleva, 2010. 12 p. (In Russ.).
- [3] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispol'zovaniya* [Study on special aspects of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolers in power plants]. Kazan', Izd-vo KGTU im. V.I. Ul'yanova-Lenina Publ., 2005. 272 p. (In Russ.).
- [4] Altunin K.V., Gortyshov Yu.F., Galimov F.M. et al. A problem of sediment formation in power units on liquid hydrocarbonic combustible and coolers. *Energetika Tatarstana*, 2010, no. 2, pp. 10–17. (In Russ.).
- [5] Altunin K.V. *Funktsional'no-stoimostnoy analiz gorelochnykh ustroystv i forsunok* [functional and cost analysis of burner devices and nozzles]. Kazan', Izd-vo KNITU-KAI Publ., 2020. 156 p. (In Russ.).
- [6] Yanovskiy L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M. et al. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Carbon deposits in aviation and rocket engines]. Kazan', Abak Publ., 1999. 284 p. (In Russ.).
- [7] Chertkov Ya.B. *Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizel'nye topliva* [Modern and prospective hydrocarbon jet and diesel fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1968. 356 p. (In Russ.).
- [8] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RF 2388966. Appl. 02.12.2008, publ. 10.05.2010. (In Russ.).
- [9] Altunin K.V. *Forsunka* [Injector]. Patent RF 2447362. Appl. 26.07.2010, publ. 10.04.2012. (In Russ.).
- [10] Mel'nikov M.V., Korepanov M.A., Kalinin A.S. Electromagnetic water treatment for the limescale protection. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 3, pp. 389–395. (In Russ.).
- [11] Minko V.A., Feoktistov A.Yu., Gun'ko I.V. et al. Classification and effectiveness of methods of control of scale formation in heating systems. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU Named After V.G. Shukhov], 2015, no. 2, pp. 16–19. (In Russ.).
- [12] Koltsa L.N., Elistratova Yu.V., Seminenko A.S. Vliyanie otlozheniy soley zhestkosti na teplootdachu otopitel'nykh priborov. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2014, no. 7, pp. 58–59. (In Russ.).

- [13] 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.).
- [14] Bublikov I.A. *Nauchnye printsipy diagnostirovaniya i razrabotka metodov snizheniya intensivnosti obrazovaniya otlozheniy v teploobmennom oborudovanii teplovykh i atomnykh elektrostantsiy*. Avtoref. kand. tekh. nauk [scientific principles of diagnostics and development of methods for lowering intensity of limescale formation in heat transfer equipment in thermal and nuclear station. Kand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, YuRGPU (NPI) Publ., 2004. 36 p. (In Russ.).
- [15] Cengel Y.A. *Heat transfer*. McGraw-Hill, 2003. 932 p.
- [16] Altunin K.V. Development of new heat transfer similarity numbers. *Innovative scientific investigations*, 2022. № 5–2(19), pp. 27–34.
- [17] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P. et al. *Fiziko-khimicheskie i ekspluatatsionnye svoystva reaktivnykh topliv* [Physical chemical and exploitation properties of jet fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.05.2022

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 (420011, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altkonst881@yandex.ru).

Information about the author

ALTUNIN Konstantin Vitalyevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420011, 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 при осадкообразовании. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 7, с. 42–48, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-42-48

Please cite this article in English as:

Altunin K.V. Development of the Techniques for Calculating Heat Transfer during Sedimentation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 7, pp. 42–48, doi: 10.18698/0536-1044-2022-7-42-48



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие «Элементы квантовой механики»

Авторы: Д.К. Веретимус, Н.К. Веретимус

Предназначено для самостоятельного изучения студентами специалитета пятого модуля дисциплины «Физика». Рассмотрены квантовые свойства излучения и волновые свойства микрочастиц. С помощью уравнения Шредингера решены стационарные задачи квантовой механики. Приведены ядерная модель атома Резерфорда, постулаты Бора.

В конце каждого раздела даны решения тематических задач и задания для самоконтроля.

Для студентов специалитета, изучающих дисциплину «Физика».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>