

Разработка общего критериального уравнения расчета теплоотдачи к углеводородным и неуглеводородным средам при их естественной конвекции в условиях локального осадкообразования

© К.В. Алтунин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

Представлено новое общее критериальное уравнение, разработанное для расчета теплоотдачи в условиях естественной конвекции углеводородных и неуглеводородных сред при локальном образовании осадков на поверхности теплообмена. Проведен анализ источников информации по теме исследования. Приведены примеры образования осадков в некоторых энергоустановках и реактивных двигателях. Рассмотрены основные факторы, влияющие на образование углеродсодержащих осадков на нагретых стенках каналов подачи горючего и теплоносителей. Получено новое уравнение расчета теплоотдачи на основе созданного автором критерия подобия осадкообразования, учитывающего одновременно и тепловую, и электрохимическую природу этого процесса. Найдены значения новых электрохимических чисел, использовавшихся при расчете и входящих в критерий подобия осадкообразования, для углеродсодержащих осадков в среде керосина и для солевых осадков (NaCl). Обобщены результаты экспериментальных исследований в среде керосина марки ТС-1, солевого раствора и воздуха в условиях локального осадкообразования на поверхности теплообмена, отраженные на графиках.

Ключевые слова: естественная конвекция, критерий подобия, осадкообразование, керосин, вода, воздух

Введение. Известно, что термин осадкообразование появился во второй половине XX в. благодаря интенсивному применению реактивного топлива и, в частности, упоминается Я.Б. Чертковым в работе [1]. Процесс осадкообразования в жидком углеводородном горючем (УВГ), включая керосин разных марок, оказывает преимущественно негативное влияние на работу теплообменных аппаратов (ТА), тепловых двигателей и энергоустановок (ЭУ) наземного, аэрокосмического и космического базирования. Так, на борьбу с образованием углеродсодержащих осадков в промышленности США ежегодно выделялось примерно 10 млрд дол.; для обычного нефтеперерабатывающего завода ежегодные затраты на это могут составлять до 10 млн дол. [2]. Подобные проблемы есть и в теплоэнергетике, и в ракетостроении, и в авиации [3]: например, из 210 летных происшествий в течение одного года около 30 % связаны с неполадками двигателей в результате ненадежной работы топливно-регулирующей аппаратуры [4].

Известно, что примерно через 900 циклов работы воздушно-реактивного двигателя марки НК-8-2У самолета Ту-154 его форсунки

полностью закоксовываются (рис. 1) и двигателю требуется капитальный ремонт. В этом случае самолет отправляют на завод для промывки двигателя в заводских условиях специальными агрессивными жидкостями с дальнейшей утилизацией получаемых продуктов (что связано с большими экологическими трудностями) и для замены закоксованных фильтров и форсунок и т. д. [4].

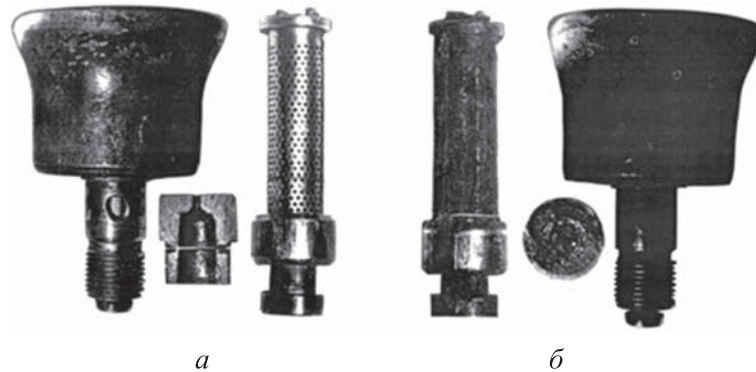


Рис. 1. Форсунка воздушно-реактивного двигателя марки НК-8-2У самолета Ту-154: *a* — с чистыми распылителем и форсуночным фильтром (до осадкообразования); *б* — после 900 циклов эксплуатации (форсуночный фильтр и распылитель полностью закоксованы)

Таблица 1

Влияние температуры на размеры частиц осадка в некоторых видах реактивного горючего

Марка топлива	Температура, °С	Общее количество осадков, м ² /100 мл	Распределение осадков на фильтрах, %, в зависимости от размера частиц			
			1–2 мк	30 мк	60 мк	120 мк
ГФ	140	1,2	79,6	1,8	1,0	0
	160	1,6	75,0	3,4	2,0	1,0
	180	1,7	66,9	2,8	1,0	0
	220	1,1	47,3	8,6	4,4	2,2
Т-7	150	1,0	80,0	1,0	0,5	0
	160	1,3	71,3	1,8	1,1	0
	200	1,1	61,0	4,0	2,0	0

Исследования в области осадкообразования выявили следующую основную закономерность: в жидком УВГ оно происходит вследствие повышения температуры его нагрева [4–6] (табл. 1).

Каждый вид топлива, горючего или охладителя характеризуется своей температурой максимального осадкообразования, °С: Т-2 — 135; ТС-1 — 150; Т-1 — 160; Т-5 — 180. Температура влияет не только на количество образовавшегося осадка, но и на его дисперсионный

состав. С повышением нагрева охладителей и горючего размеры частиц осадка в них увеличиваются от 30 до 120 мкм.

Исследовано реактивное горючее RP-3 при сверхкритических условиях. Начальная температура крекинга составила 471,8 °С. Зафиксировано три разновидности кокса, включая аморфные и волокнистые структуры (в твердых отложениях) [7].

Отметим, что осадкообразование в тепловых двигателях, ТА, ЭУ зависит от многих факторов [3, 4, 8]:

$$\delta_{oc} = f(T_w; T_f; p; W; M; Пр; K_{шер}, K_{O_2}; K_{ин}; X; N; G; П; E; \tau \text{ и др.}), \quad (1)$$

где δ_{oc} — толщина слоя осадка; T_w — температура стенки канала со стороны УВГ; T_f — температура жидкого (газообразного) УВГ; p — давление в топливно-охлаждающей системе; W — скорость прокачки УВГ; M — материал стенки канала; Пр — присадки; $K_{шер}$ — степень шероховатости поверхности; K_{O_2} — насыщенность кислородом; $K_{ин}$ — насыщенность инертными газами; X — вид УВГ, его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства; N — число циклов работы двигателя, ТА, ЭУ; G — геометрические характеристики внутренних узлов топливно-охлаждающих систем (расстояние между деталями, габариты выемок (лунок) и т. д.); $П$ — пористость; E — электростатические поля; τ — время наработки.

При использовании неуглеводородных теплоносителей, например воды, происходит аналогичная ситуация, в частности образуется накипь. На горячей поверхности выпадает карбонат кальция в форме кальцита (одна из полиморфных модификаций карбоната кальция). При этом вследствие намного более низкой теплопроводности накипи по сравнению с металлом время на нагрев воды существенно увеличивается и нагревательные элементы начинают работать в условиях перегрева. Экономический расчет, например, по России в тарифах начала XXI в., показал, что при средней скорости роста количества осадков 0,6 мм/год энергоблок электрической мощностью 1000 МВт теряет до 4 % КПД за год, что приводит к потерям невыработанной электроэнергии на сумму 175 млн руб. или 175 руб. на 1 кВт установленной мощности. В целом по энергетике РФ потери составляют около 30 млрд руб. в год [9].

Солевые отложения, образующиеся на теплообменных поверхностях внутри АЭС и ТЭЦ [9], представлены на рис. 2.

При использовании солевых растворов и морской воды также могут появляться осадки, которые покрывают нагретые поверхности теплообмена. Ухудшение теплоотдачи по причине осадкообразования возможно, когда теплообменные участки находятся не только в жидкой, но и в газообразной среде, например в воздухе, содержащем твердые частицы.

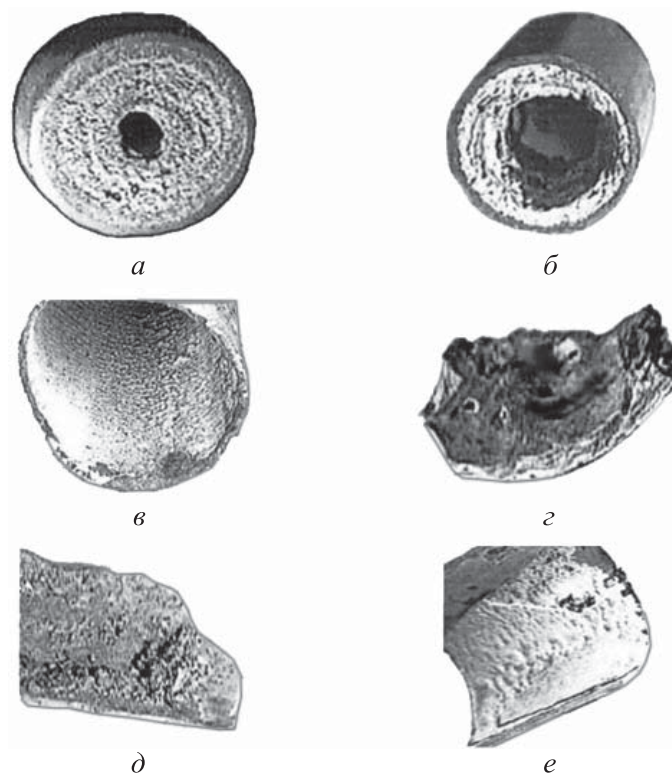


Рис. 2. Солевые отложения, образующиеся на теплообменных поверхностях: *a* — подогреватель сырой воды Ровенской АЭС; *б, д* — подогреватель сырой воды Волгодонской ТЭЦ-2; *в* — трубопроводы теплосети; *г, е* — конденсатор турбины Волгодонской ТЭЦ-2

К сожалению, влияние различных загрязнений на эффективность работы ТА и теплоотдачу мало изучено. Существует термин — так называемый фактор загрязнения (*fouling factor*) R_f , который служит мерой теплового сопротивления вследствие загрязнения поверхности теплообмена (табл. 2) [10].

Таблица 2

Показатели фактора загрязнения поверхности теплообмена

Среда	Фактор загрязнения R_f ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт
Дистиллированная вода, морская вода, речная вода: ниже 50 °С выше 50 °С	0,0001 0,0002
Топливное масло	0,0009
Водяной пар	0,0001
Пары алкоголя	0,0001
Воздух	0,0004

Большинство исследователей, как правило, рассчитывают теплообмен на основе толщины слоя осадка δ_{oc} , а затем по формулам теплопроводности вычисляют значения температуры и коэффициент теплоотдачи по существующим формулам теплообмена, что не является точным расчетом в случае локальных осадков с разной пористостью, толщиной, площадью покрытия нагретой металлической стенки. Отметим, что универсальной методики расчета коэффициента теплоотдачи при локальном осадкообразовании в различных углеводородных и неуглеводородных средах до сих пор не разработано. Представляет большой интерес создание единых уравнений для описания локального осадкообразования в неуглеводородных и углеводородных средах в условиях естественной, вынужденной конвекции.

Анализ литературных источников показал, что осадкообразование на поверхности металлических стенок зависит от многих факторов, главным из которых является температура (например, в среде жидкого УВГ углеродсодержащие осадки появляются на стенках нагретых топливных каналов при $T \approx 373\text{K}$ [3, 4], в водной среде образование накипи происходит при $T \approx 333\text{K}$ [9]).

Для более точного расчета теплоотдачи на всем участке теплообмена с локальным осадкообразованием разработаны критерии подобия осадкообразования, которые впервые учитывают и тепловую, и электрохимическую природу осадкообразования.

Цель работы — разработка общего критериального уравнения для расчета теплоотдачи в различных средах в условиях естественной конвекции теплоносителей и локального осадкообразования на поверхности теплообмена с применением критерия подобия осадкообразования.

Новый критерий подобия осадкообразования. С помощью метода анализа размерностей автор ранее получил критерий подобия осадкообразования [11]:

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

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

Число подобия Os (2) содержит силу электрического тока от слоя заряженных частиц по направлению к нагреваемому металлическому элементу (например, пластинке или трубке), которую достаточно трудно определить точно в условиях электрического ветра,

кипения, естественной и вынужденной конвекции жидкого или газообразного теплоносителя.

В процессе осадкообразования, например в керосине, активное участие принимают диполи. При температуре выше 313К керосин марки ТС-1 становится электропроводящей средой, а при температуре 373К начинается процесс осадкообразования и появляются диполи, согласно теории Шоттки и Френкеля притягивающиеся к противоположным зарядам, которые всегда появляются на остриях микронеровностей металлических поверхностей, в том числе даже полированных. Диполи активно участвуют в осадкообразовании на нагреваемых металлических поверхностях [12].

Автором настоящей статьи выдвинута гипотеза о подобии процессов теплоэлектрохимического осадкообразования и электролиза. Известно, что 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 происходит восстановление ионов металлов, а на аноде — окисление ионов неметаллов. Английским физиком М. Фарадеем в 1830-х годах были установлены законы электролиза, на основе которых можно записать выражение для расчета массы выделившегося на электроде вещества [13]:

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

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, $F = 96\,485,332$ Кл/моль.

Из выражения (3) можно выделить число Фарадея:

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

Если при электролизе необходим внешний электрический ток, то в случае осадкообразования, например в керосине, при повышенных значениях температуры появляются диполи, т. е. можно утверждать о существовании микрочарядов и микротоков. Ранее на электрическую природу осадкообразования указывал известный советский ученый Г.Ф. Большаков [14].

Таким образом, для нахождения нового значения числа F , например, при расчете осадкообразования в среде жидкого УВГ, важно знать пять факторов, входящих в формулу (4).

Известно, что молярная масса керосина марки ТС-1 составляет $\mu \approx 139$ г/моль (данные И.Г. Зенкевича). Валентность — число химических связей, которые образует атом или число атомов. В керосине

марки ТС-1 содержится примерно 73,8 % углерода и 10,2 % водорода (мас. доля) [15]. Это означает, что основным элементом данного теплоносителя является углерод. Во всех органических соединениях атом углерода находится в возбужденном состоянии, поэтому валентность углерода $z = 4$.

Наиболее интенсивная электризация УВГ наблюдается при их электрической проводимости $\kappa = 4 \dots 12$ пСм/м. Электрический заряд внутри объема УВГ при этом значении может составлять примерно $Q_3 \approx 0,1 \dots 0,7$ мкКл. Для расчетов был взят электрический заряд, равный 0,1 мкКл. Если это значение поделить на 1 с, то получим значение силы тока: $I = Q_3 / \tau = 0,1 \text{ мкКл} / 1 \text{ с} = 0,1 \text{ мкА} = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ А}$.

Скорость образования углеродсодержащих осадков v_{oc} на высоконагретых металлических участках может составлять [15]:

$$v_{oc} = (1-5) \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

На основе формулы (4) автором настоящей статьи введено обозначение F_{De} для расчета осадкообразования, где F_{De} — аналог электрохимического числа Фарадея (индекс «*De*» соответствует слову *deposit*, что в переводе с английского языка означает «осадок» — симплекс осадкообразования).

Принимая за основу следующие значения: $z = 4$, $m = 4 \cdot 10^{-6}$ кг, $\mu = 139$ г/моль, $I = 0,1 \cdot 10^{-6}$ А, $\tau = 1$ с, — по формуле (4) получаем, что для углеродсодержащего осадка $F_{De} = 8,69 \cdot 10^{-4}$ Кл/моль.

Из формулы (4) можно получить формулу для расчета силы тока с учетом осадкообразования в разных средах:

$$I = \frac{m_{oc} z F_{De}}{\mu \tau}. \quad (5)$$

Применяя формулы (2), (5) на базе электрохимического числа F_{De} , автор получил новый критерий подобия осадкообразования Os в жидких углеводородных и неуглеводородных средах в следующем виде [16]:

$$Os = \frac{\rho_{oc}}{T_w F_{oc} \lambda_{oc}} \left(\frac{m_{oc} z F_{De}}{\mu \tau} \right)^2, \quad (6)$$

где ρ_{oc} — удельное электрическое сопротивление слоя осадка, Ом·м; λ_{oc} — коэффициент теплопроводности; m_{oc} — масса осадка, кг; z — максимальная валентность атомов элементов осадка; F_{De} — электрохимическое число — аналог числа Фарадея, Кл/моль; μ — молярная масса вещества, кг/моль; $\tau = 1$ с.

При этом коэффициент теплопроводности λ_{oc} и удельное электрическое сопротивление слоя осадка ρ_{oc} следует рассчитывать с учетом пористости Π осадка по формулам:

$$\lambda_{oc} = \Pi\lambda_f + (1 - \Pi)\lambda_s, \quad (7)$$

$$\rho_{oc} = \Pi\rho_f + (1 - \Pi)\rho_s, \quad (8)$$

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

Подобным образом можно найти значение электрохимического числа F_{De} для других типов осадков. Если предположить, что на стенке канала осаждается соль NaCl, то при молярной массе NaCl $\mu = 58,44$ г/моль валентность составляет $z = 1$. Скорость образования солевых отложений при течении воды по трубам в умеренных тепловых потоках может достигать $v_g = 1,39 \cdot 10^{-3}$ г/(м²·с), плотность поверхностного заряда частиц размером более 360 мкм — $q_s = 7 \cdot 10^{-4}$ Кл/м² [17]. Принимая, что $z = 1$, $m = 1,39 \cdot 10^{-6}$ кг, $\mu = 058$ кг/моль, $I = 7 \cdot 10^{-4}$ А, $\tau = 1$ с, конкретно для соли NaCl получаем по формуле (4), что $F_{De} = 29,2$ Кл/моль.

Апробируем новый критерий подобия осадкообразования Os (6) в условиях естественной конвекции в различных средах.

Расчет теплоотдачи в условиях локального осадкообразования в различных средах. Проведены экспериментальные исследования теплоотдачи в условиях естественной конвекции при нагревании рабочего металлического участка при локальном осадкообразовании: в углеводородной среде (в керосине марки ТС-1), в 36 %-ном солевом растворе (NaCl + H₂O), в воздушной среде (солевой осадок размещался на сухой нагреваемой металлической поверхности). В керосине марки ТС-1 углеродсодержащие осадки образовывались естественным путем, а в экспериментах с соевым раствором и на воздухе — размещались искусственно на поверхности нагреваемого рабочего участка.

На основе критерия подобия Os (6) получено новое критериальное уравнение расчета теплоотдачи при естественной конвекции жидкого УВГ, солевых растворов и воздуха в условиях локального осадкообразования на поверхности теплообмена:

$$Nu_{oc} = cRa^{0,2}Os^{-0,2}, \quad (9)$$

где Nu_{oc} — критерий Нуссельта для осадка; c — коэффициент, имеющий разные значения в различных средах (табл. 3); Ra — критерий подобия Рэлея.

Значения коэффициента c в уравнении (9) при естественной конвекции и локальном осадкообразовании разной пористости Π в различных средах

Параметр	Среда		
	Керосин марки ТС-1	Воздух	36%-ный солевой раствор (NaCl + H ₂ O)
Коэффициент c	0,008...0,02	2,5	2,9
Число Рэлея Ra	$3,7 \cdot 10^5 \dots 3,32 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^5 \dots 13 \cdot 10^6$	$62 \cdot 10^6 \dots 12,2 \cdot 10^9$
Электрохимическое число F_{De} , Кл/моль	$8,69 \cdot 10^{-4}$	29,2	29,2
Критерий подобия осадкообразования Os	$4,25 \cdot 10^{-12} \dots 1,97 \cdot 10^{-11}$	6,72...38,57	2,01...11,46
Вид осадка	Углеводородный (углеродсодержащий)	Солевой (NaCl)	Солевой (NaCl)
Пористость Π	0,1...0,2	0,25...0,35	0,25...0,35
Давление p , МПа	0,1...1,2	0,1	0,1
Материал стенки	Сталь марки X18H10T	Коррозионно-стойкая сталь + эмаль	Алюминиевый сплав А5

Точность расчетов по уравнению (9) составила $\pm 2...20$ % (по сравнению с экспериментальными данными). Во всех экспериментах за определяющую температуру была выбрана средняя температура T_m как половина суммы температуры жидкого или газообразного теплоносителя и температуры нагреваемой стенки, не покрытой слоем осадка. Некоторые результаты исследований представлены на рис. 3–5.

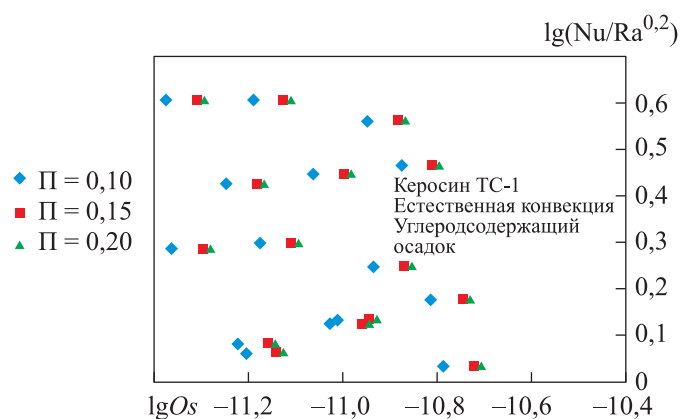


Рис. 3. Соотношение критериев подобия Nu , Ra и Os при обработке результатов экспериментов в среде керосина марки ТС-1 с углеводородсодержащими осадками разной пористости Π на поверхности пластины из стали марки X18H10T

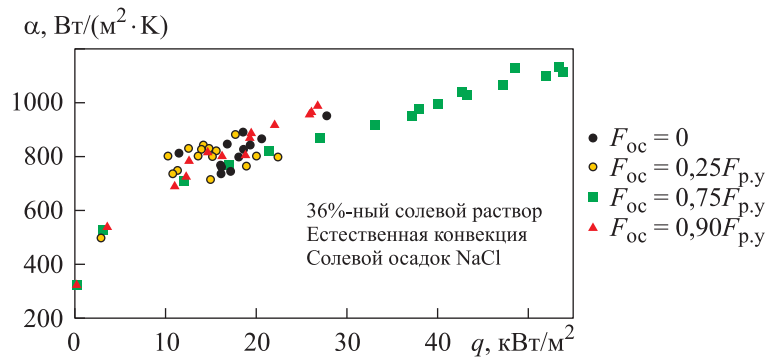


Рис. 4. Соотношение коэффициента теплоотдачи α и плотности теплового потока q при естественной конвекции 36%-ного солевого раствора (NaCl + H₂O) с локальным солевым осадком разной площади F_{oc} ($F_{p,y}$ — общая площадь нагреваемого рабочего участка из алюминиевого сплава марки А5)

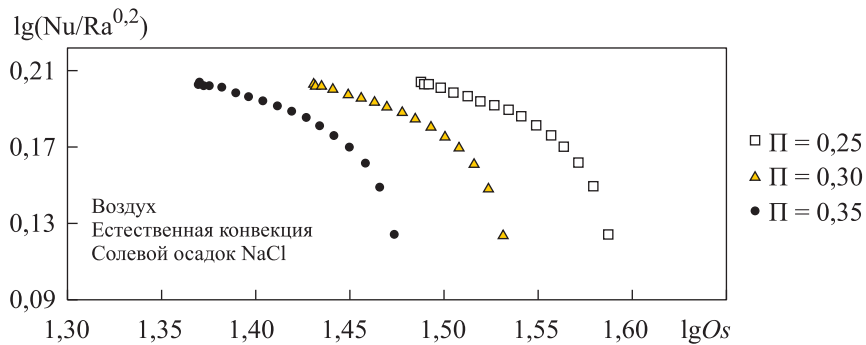


Рис. 5. Соотношение критериев подобия Nu , Ra , Os при естественной конвекции воздуха с нагреваемого участка с локальным солевым осадком площадью $F_{oc} = 0,9F_{p,y}$, где $F_{p,y}$ — общая площадь нагреваемого рабочего участка из коррозионностойкой стали, покрытой тонким слоем эмали (критерии подобия рассчитаны при средней температуре)

Закключение. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработано новое общее критериальное уравнение для расчета теплоотдачи в различных углеводородных и неуглеводородных средах в условиях естественной конвекции теплоносителей и локального осадкообразования на поверхности теплообмена с применением нового критерия подобия осадкообразования, учитывающего не только тепловую, но и электрохимическую природу данного процесса. Найдены значения нового электрохимического числа (аналога числа Фарадея), входящего в разработанный критерий подобия, для углеродсодержащего и солевого (NaCl) осадков.

На основе нового критерия подобия осадкообразования получено общее критериальное уравнение расчета теплоотдачи к углеводородным и неуглеводородным средам при их естественной конвекции

в условиях локального осадкообразования. Проведено сравнение экспериментальных данных (рабочие среды: керосин ТС-1, солевой раствор, воздух) и расчетов по новой формуле, в результате чего установлено, что новое критериальное уравнение описывает процесс теплоотдачи достаточно точно.

Применение представленных материалов позволит осуществить более точный расчет коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в случае локального осадкообразования разной природы на нагретых металлических стенках теплообменной аппаратуры, контуров охлаждения АЭС, топливных каналов и форсунок реактивных двигателей летательных аппаратов одно- и многократного использования различного назначения и базирования.

Намечены дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чертков Я.Б. *Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива*. Москва, Химия, 1968, 356 с.
- [2] Van Nostrand W.L.J., Leach S.H., Haluska J.L. Economic penalties associated with the fouling of refinery heat transfer equipment. In: E.F.C. Somerscales and J.G. Knudsen, eds. *Fouling of Heat Transfer Equipment, Troy, NY (USA), 13–17 August 1979*. Washington, Hemisphere, 1981, pp. 619–643.
- [3] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Дресвянников Ф.Н., Гортышов Ю.Ф., Яновская М.Л. Проблемы внутрикамерных тепловых процессов в авиационных, аэрокосмических и космических энергоустановках многократного использования. *XXVI Междунар. науч. сем. «Проблемы моделирования и динамики сложных междисциплинарных систем»*, Казань, ноябрь 2010 г. Казань, Изд-во КГТУ им. А.Н. Туполева, 2010, с. 12.
- [4] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многократного использования. Книга первая*. Казань, Изд-во Казанского государственного университета имени В.И. Ульянова-Ленина, 2005, 272 с.
- [5] Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М. Эмпирические модели ресурсной наработки и динамики жидкофазных коксоотложений при нагреве авиационного керосина. *Авиационные двигатели*, 2019, № 3 (4), с. 57–62.
- [6] Алтунин К.В. Исследование влияния температуры на процесс осадкообразования при эксплуатации энергетических установок на жидких углеводородных горючих. *Тр. 5-й Рос. нац. конф. по теплообмену «РНКТ-5»*. Москва, МЭИ, 2010, т. 8, с. 36–39.
- [7] Zhu Yuhong, Yu Caixiang, Li Zimu, Mi Zhentao and Zhang Xiangwen. Formation of coke in thermal cracking of jet fuel under supercritical conditions. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 17–21.
- [8] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 199, 284 с.
- [9] Бубликов И.А. *Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций. Дис. ... д-ра техн. наук*. Новочеркасск, Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2004, 360 с.

- [10] Cengel Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Second edition. Boston, Massachusetts, WBC McGraw-Hill, 2008, 874 p.
- [11] Алтунин К.В. Исследование влияния солевых отложений на теплоотдачу при естественной конвекции воздуха. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2022, т. 23, вып. 2. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.2.989>
- [12] Алтунин В.А. *Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охлаждаемым. Книга вторая*. Казань, Изд-во Казанского государственного университета имени В.И. Ульянова-Ленина, 2006, 230 с.
- [13] Нечаев А.В. *Основы электрохимии*. Екатеринбург, ИПЦ УрФУ, 2010, 107 с.
- [14] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.

Статья поступила в редакцию 12.09.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка общего критериального уравнения расчета теплоотдачи к углеводородным и неуглеводородным средам при их естественной конвекции в условиях локального осадкообразования. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-9-2305>

Алтунин Константин Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры теплотехники и энергетического машиностроения (ТиЭМ), КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. Область деятельности и научные интересы: теплообмен, теплоотдача в жидких и газообразных углеводородных горючих; энергоустановки многофазового использования; разработка новых изобретений (полезных моделей) в сфере теплообмена, транспорта, спорта. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Development of a general criterion equation for calculating heat transfer to the hydrocarbon and non-hydrocarbon media at their natural convection exposed to local deposit formation

© K.V. Altunin

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

The paper presents a new general criterion equation for calculating heat transfer under conditions of natural convection of the hydrocarbon and non-hydrocarbon media with local deposit formation on the heat exchange surface. Information sources on the research topic were analyzed. Examples of deposits in certain power plants and jet engines are provided. Main factors influencing the carbon-containing deposits on the heated walls of the fuel and coolant supply channels are considered. The new equation for calculating heat transfer was obtained based on a new deposit formation similarity criterion created by the author of this article, which simultaneously takes into account both the thermal and electrochemical nature of this process. Values of the new electrochemical numbers used in the calculation and included in the deposit formation similarity criterion were found for the carbon-containing deposits in the kerosene media and for the salt deposits (NaCl salt). Results of the experimental studies were generalized in the TS-1 kerosene media, salt solution and air with local deposit formation on the heat exchange surface. Some generalization results are presented in the corresponding graphs.

Keywords: *natural convection, similarity criterion, deposit formation, kerosene, water, air*

REFERENCES

- [1] Chertkov Ya.B. *Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizelnye topliva* [Modern and promising hydrocarbon jet and diesel fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1968, 356 p.
- [2] Van Nostrand W.L.J., Leach S.H., Haluska J.L. Economic penalties associated with the fouling of refinery heat transfer equipment. In: E.F.C. Somerscales and J.G. Knudsen, eds. *Fouling of Heat Transfer Equipment*, Troy, NY (USA), 13–17 August 1979. Washington, Hemisphere, 1981, pp. 619–643.
- [3] Altunin V.A., Altunin K.V., Dresvyannikov F.N., Gortyshov Yu.F., Yanovskaya M.L. Problemy vnutrikamernykh teplovykh protsessov v aviatsionnykh, aerokosmicheskikh i kosmicheskikh energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya [Problems of intra-chamber thermal processes in aviation, aerospace and space reusable power plants]. *XXVI Mezdunar. nauch. seminar “Problemy modelirovaniya i dinamiki slozhnykh mezhdistsiplinarnykh sistem”*, Kazan, Noyabr 2010 [XXVI International scientific seminar “Problems in simulating and dynamics of the complex interdisciplinary systems”. Kazan, November 2010]. Kazan, KSTU Publ., 2010, p. 12.
- [4] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitel'nyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya. Kniga pervaya* [Study of characteristics of heat transfer to the hydrocarbon fuels and coolants in the reusable power plants. Book one]. Kazan, Kazanskiy Gosudarstvennyi Universitet im. V.I. Ulyanov-Lenin Publ., 2005, 272 p.

- [5] Shlyakotin V.E., Shikhman Yu.M. Empiricheskie modeli resursnoy narabotki i dinamiki zhidkofaznykh koksootlozheniy pri nagreve aviatsionnogo kerosina [Empirical models of the resource operating time and the liquid-phase coke deposit formation dynamics under the aviation kerosene heating]. *Aviatsionnye dvigateli — Aviation engines*, 2019, no. 3 (4), pp. 57–62.
- [6] Altunin K.V. Issledovanie vliyaniya temperatury na protsess osadkoobrazovaniya pri ekspluatatsii energeticheskikh ustanovok na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh [Study of the influence of temperature on the process of sedimentation during operation of the power plants using the liquid hydrocarbon fuels]. *Tr. 5-y Ross. natsion. konf. po teploobmenu “RNKT-5”* [Works of the 5th Russian national conference on heat transfer “RNKT-5”]. Moscow, MEI Publ., 2010, vol. 8, pp. 36–39.
- [7] Zhu Yuhong, Yu Caixiang, Li Zimu, Mi Zhentao, Zhang Xiangwen. Formation of coke in thermal cracking of jet fuel under supercritical conditions. *Frontiers of Chemical Engineering in China*, 2008, vol. 2, no. 1, pp. 17–21.
- [8] Yanovsky L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Sapgir G.B. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Coke deposits in aircraft and rocket engines]. Kazan, Abak Publ., 199, 284 p.
- [9] Bublikov I.A. *Nauchnye printsipy diagnostirovaniya i razrabotka metodov snizheniya intensivnosti obrazovaniya otlozheniy v teploobmennom oborudovanii teplovykh i atomnykh elektrostantsiy. Dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Scientific principles of diagnostics and development of methods for reducing intensity of the deposit formation in the heat exchange equipment of thermal and nuclear power plants. Diss. ... Dr. Sci (Eng.)]. Novocherkassk, YuRGPU (NPI) Publ., 2004, 360 p.
- [10] Cengel Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Second edition. Boston, Massachusetts, WBC McGraw-Hill, 2008, 874 p.
- [11] Altunin K.V. Issledovanie vliyaniya solevykh otlozheniy na teplootdachu pri estestvennoy konveksii vozdukha [Research of the effect of salt deposits on heat transfer during natural air convection]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physico-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, issue. 2. <https://doi.org/10.33257/PhChGD.23.2.989>
- [12] Altunin V.A. *Issledovanie vliyaniya elektrosticheskikh i magnitnykh poley na osobennosti teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam. Kniga vtoraya* [Study of the influence of electrostatic and magnetic fields on characteristics of the heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants. Book two]. Kazan, Kazanskiy Gosudarstvennyi Universitet im. V.I. Ulyanova-Lenina Publ., 2006, 230 p.
- [13] Nechaev A.V. *Osnovy elektrokhemii* [Basics of electrochemistry]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2010, 107 p.
- [14] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physico-chemical basis of sediment formation in the jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.
- [15] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P., Fedorov E.P. *Fiziko-khimicheskie i ekspluatatsionnye svoystva reaktivnykh topliv. Spravochnik* [Physico-chemical and operational properties of the jet fuels: Handbook]. Moscow, Khimiya Publ., 1985, 240 p.
- [16] Altunin K.V. Razrabotka metodiki rascheta teplootdachi na osnove kriteriya podobiya osadkoobrazovaniya s elektrokhimicheskim chislom [Development of heat transfer calculation methods based on the similarity criterion of deposit formation with the electrochemical number]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh*

zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering, 2022, no. 12 (753), pp. 80–86.

- [17] Melnikov M.V., Korepanov M.A., Kalinin A.S. Elektromagnitnaya obrabotka vody dlya zashchity ot nakipi [Electromagnetic water treatment for the limescale protection]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya — Chemical Physics and Mesoscopy*, 2017, vol. 19, no. 3, pp. 389–395.

Altunin K.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Thermal Technology and Power Engineering, Tupolev Kazan National Research Technical University – KAI. Area of activity and scientific interests: heat exchange, heat transfer in liquid and gaseous hydrocarbon fuels; reusable power plants; development of new inventions (utility models) in heat exchange, transport and sports. e-mail: altkonst881@yandex.ru