

# Development of the Deposit Formation Similarity Criterion with the Electrochemical Number

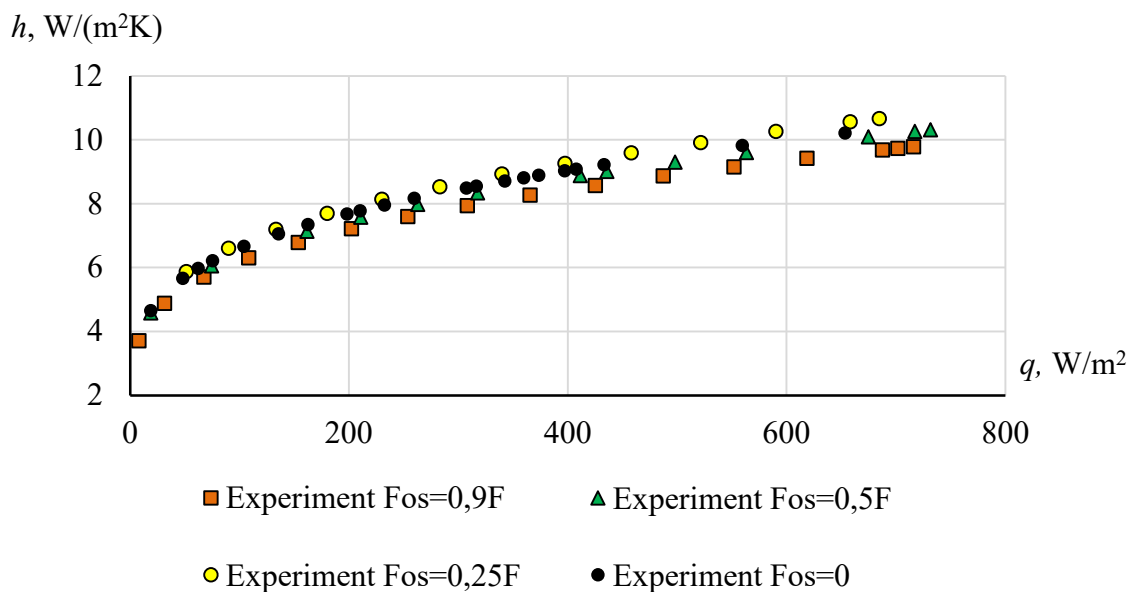
Konstantin Altunin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, 420111, Russia  
altkonst881@yandex.ru

## Abstract

The article is devoted to an actual problem of appearance of deposit on walls of heat-exchange devices. An improved deposit formation number is presented and describes heat and electrochemical nature of any deposit. A new criterion equation for free convection of air when appearing salt deposit on a heated-up surface is successfully obtained and shown in the article. New methods of heat transfer calculation while appearing deposit based upon the improved heat transfer similarity criterion of deposit formation have been developed.

Keywords: similarity number, heat transfer, deposit formation, salt deposit



Relation of heat transfer coefficient  $h$  and heat flux  $q$  at free convection of air from a heat-transfer surface with its total area  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , on which salt deposit was situated with different area  $F_{os}$  and porosity such as  $\Pi = 0,3$ .

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

УДК 536.242:536.253

# Разработка критерия подобия осадкообразования с электрохимическим числом

К. В. Алтунин

*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева –  
КАИ, Россия, 420111, ул. К. Маркса, 10*

altkonst881@yandex.ru

## Аннотация

В статье затронута проблема образования осадков на стенках теплообменного оборудования. Представлено модифицированное число осадкообразования, учитывающее тепловую и электрохимическую природу этого явления. Получено новое критериальное уравнение для условий естественной конвекции воздуха при образовании солевых осадков на нагреваемой поверхности. Разработана методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на основе модифицированного критерия подобия осадкообразования.

Ключевые слова: критерий подобия, теплоотдача, осадкообразование, солевой осадок

## 1. Введение

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

При использовании воды наблюдается образование отложений, к примеру, в виде накипи. При скорости роста отложений из воды природного качества от 0.5 до 3.0 мм/год, образование отложений на теплообменных поверхностях конденсаторов турбин влечет за собой снижение КПД, в результате чего в энергетике США, например, имеет место недовыработка электроэнергии на сумму 1.36 млрд. долл. в год. Экономический расчет по России в тарифах начала XXI-го века показывает, что при средней скорости роста отложений 0.6 мм/год энергоблок электрической мощностью 1000 МВт за счет отложений теряет до 4 % КПД за год, что составляет потери 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 [1].

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 [2].

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

Цель работы: разработка критерия подобия осадкообразования с учетом тепловой и электрохимической природы осадков.

Данный критерий позволит заранее (уже на стадии проектирования, расчета и создания двигателей, теплообменных аппаратов, энергоустановок и техносистем) определить возможное изменение теплоотдачи. Также будет открываться возможность:

- выбора и применения существующих или перспективных способов борьбы и предотвращения осадкообразования в среде газообразного или жидкого теплоносителя [3];

– более точного расчета времени (ресурса) безопасной работы установки.

## 2. Критерий подобия осадкообразования с электрохимическим числом

В предыдущей статье автора [4] было приведено основное экспериментальное оборудование для проведения экспериментов с соевым осадком, состоящим из соли NaCl и соляного раствора, также показан алгоритм получения критерия подобия осадкообразования с учетом его тепловой и электрической природы (на основе метода анализа размерностей)

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

где  $\rho_{oc}$  – удельное электрическое сопротивление слоя осадка, Ом·м;  $I$  – сила электрического тока, А;  $T_w$  – температура металлической стенки, не покрытой слоем осадка, К;  $\lambda_{oc}$  – коэффициент теплопроводности слоя осадка, Вт/(м·К);  $F_{oc}$  – площадь детали (пластины, трубки), покрытая слоем осадка, м<sup>2</sup>.

При этом значения  $\rho_{oc}$  и  $\lambda_{oc}$  должны быть подсчитаны с учетом пористости осадка  $\Pi$

$$\lambda_{oc} = \Pi \lambda_f + (1 - \Pi) \lambda_s, \quad (2)$$

где  $\lambda_f$  – теплопроводность теплоносителя при средней температуре, Вт/(м·К);  $\lambda_s$  – теплопроводность сухого твердого осадка, Вт/(м·К);

$$\rho_{oc} = \Pi \rho_f + (1 - \Pi) \rho_s, \quad (3)$$

где  $\rho_f$  – удельное электрическое сопротивление теплоносителя при средней температуре, Ом·м;  $\rho_s$  – удельное электрическое сопротивление сухого твердого осадка, Ом·м.

При использовании выражения (1) для создания критериального уравнения теплообмена необходимо знать диапазоны параметров всех величин, включая силу тока, что может быть весьма проблематичным. С течением времени количество заряженных частиц или диполей,двигающихся к нагретой стенке, может меняться, также как и масса осадков. Поэтому применение только постоянного значения  $I$ , к примеру, 0.1 мкА – не совсем корректно. С целью усовершенствования числа подобия (1) были проведены дополнительные теоретические исследования.

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, а на аноде – окисление ионов неметаллов. Законы электролиза были установлены знаменитым английским физиком М. Фарадеем в 30-х гг. XIX в., на основе которых можно записать выражение для расчета массы выделившегося на электроде вещества [5, 6]

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

где  $m$  – масса вещества, кг;  $\mu$  – молярная масса вещества, г/моль;  $I$  – сила тока, А;  $\tau$  – время прохождения тока, с;  $z$  – валентность атома вещества;  $F$  – электрохимическое число Фарадея,  $F = 96485.332$  Кл/моль (для электролиза).

Выражение (4) можно переписать в следующем виде:

$$F = \frac{\mu I \tau}{m z} \quad (5)$$

Известно, что молярная масса NaCl равна  $\mu = 58.44$  г/моль. Для данного вещества валентность равна 1. Скорость количества солевых отложений при течении воды в трубах при

умеренных тепловых потоках может достигать значения  $v_g = 1.39 \times 10^{-3}$  г/(м<sup>2</sup>с), а плотность поверхностного заряда частиц размерами более 360 мкм –  $q_s = 7 \times 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> [1].

Принимая за основу значения  $z=1$ ,  $m=1.39 \times 10^{-6}$  кг,  $\mu=0.058$  кг/моль,  $I=7 \times 10^{-4}$  А,  $\tau=1$  с по формуле (5) получается, что  $F_{De} = 29.2$  Кл/моль. В данном случае  $F_{De}$  – аналог электрохимического числа Фарадея для осадков в среде соляного раствора (индекс  $De$  – от лат. слова *deposit*, т.е. осадок).

На базе  $F_{De}$  критерий подобия осадкообразования (1) можно переписать в следующем виде:

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

где  $m_{oc}$  – масса осадка, кг;  $\mu$  – молярная масса соли в растворе, кг/моль;  $F_{De} = 29.2$  Кл/моль;  $\tau = 1$  с.

### 3. Апробация модифицированного критерия подобия осадкообразования

Проведены эксперименты в условиях естественной конвекции воздуха (схема рабочего участка показана в предыдущей статье [4]). Сделана апробация модифицированного числа подобия  $Os$  (6) и получено новое критериальное уравнение с учетом слоя солевых отложений (осадок с максимальным содержанием NaCl)

$$Nu_{oc} = Ra^{0.24} Os^{-0.08}, \quad (7)$$

где  $Nu_{oc}$  – критерий Нуссельта при осадкообразовании;  $Ra$  – критерий Рэлея,  $Ra = (3.6 \times 10^5 \div 13 \times 10^6)$ ;  $Os = (6.72 \div 38.57)$  при  $\Pi = (0.25 \div 0.35)$ ,  $F_{oc} = (0.25 \div 0.9)F$  ( $F$  – общая площадь поверхности теплообмена), определяющий размер –  $d_c = 0.115$  м.

Точность расчетов по (7) составила  $\pm(1-10)\%$  (по сравнению с экспериментальными данными). За определяющую температуру выбрана средняя температура  $T_m$ .

На рис. 1 показан график зависимости  $Nu_{oc}$ ,  $Ra$  и  $Os$ , в данном случае  $Nu$ ,  $Ra$  рассчитаны при средней температуре  $T_m = (T_w + T_f)/2$  ( $T_w$  – температура внешней поверхности металла крышки, °С;  $T_f$  – температура воздуха, °С). Параметры в числе подобия  $Os$  подсчитаны по температуре стенки  $T_w$ .

На рис. 2 приведен график зависимости коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от плотности теплового потока  $q$  (от поверхности теплообмена, на которой размещался солевой осадок), полученный в ходе экспериментов с солевым осадком при естественной конвекции воздуха.

При получении выражения (7) лучистый теплообмен не учитывался.

Из рис. 2 видно, что в случае, когда осадок покрывал  $1/4$  часть всей поверхности теплообмена, коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  практически не изменялся, однако при  $F_{oc} = 0.9F$  видно снижение  $\alpha$ .

Таким образом, методика расчета теплоотдачи при образовании солевых отложений состоит из следующих этапов:

- 1) выбор теплоносителя, создание таблиц теплофизических свойств теплоносителя и свойств возможного осадка исходя из его состава;
- 2) создание таблиц для вычисления критериев подобия на основе зафиксированных температур (например, чисел Грасгофа  $Gr$ , Прандтля  $Pr$ , Нуссельта  $Nu$ , Рэлея  $Ra$  – при естественной конвекции; в случае вынужденной конвекции необходимо рассчитать значения числа Рейнольдса  $Re$ );
- 3) расчет силы тока  $I$  на основе данных по валентности и молярной массе соли в растворе, массе осадка, плотности поверхностного заряда частиц, электрохимическому числу (аналогу числа Фарадея), времени  $\tau = 1$  с;

- 4) расчет значений числа осадкообразования  $Os$  (6) на основе удельного электросопротивления осадка  $\rho_{oc}$ , силе тока  $I$ , коэффициента теплопроводности слоя осадка  $\lambda_{oc}$  в зависимости от температуры нагретой стенки  $T_w$  при известной площади поверхности  $F_{oc}$ , покрытой слоем осадка;
- 5) выбор подходящего критериального уравнения, например, (7) для расчета  $Nu_{oc}$ ;
- 6) расчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  на основе известной формулы:  $\alpha = (Nu \cdot \lambda_f) / L_c$ , где  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя (например, солевого раствора или воздуха), Вт/(м·К),  $L_c$  – определяющий размер (например, ширина пластинки, гидравлический диаметр канала, диаметр крышки и т.д.).

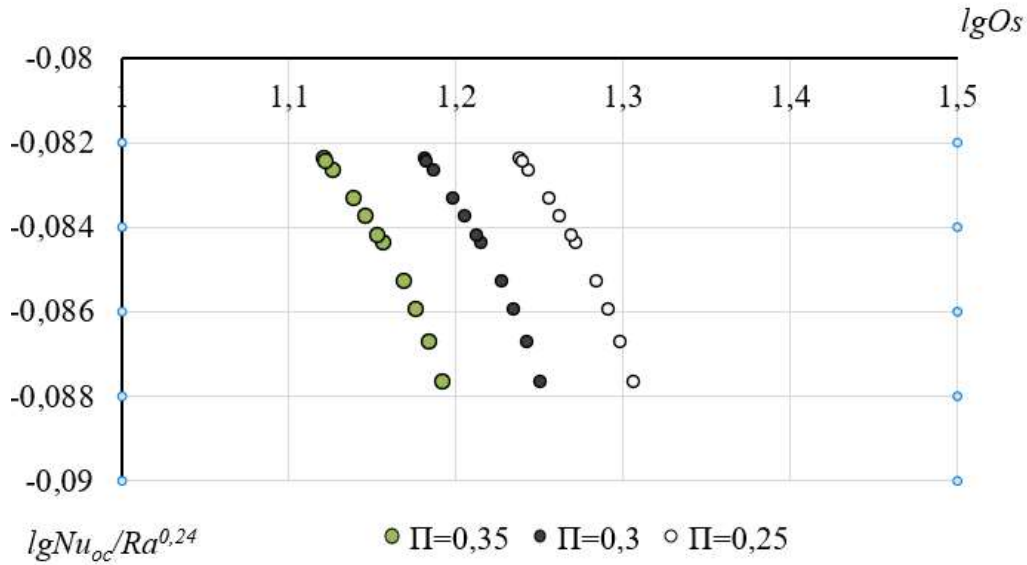


Рис. 1. График зависимости  $Nu$ ,  $Ra$  и  $Os$  при естественной конвекции воздуха от теплообменной поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ , на которой размещался солевой осадок площадью  $F_{oc} = 4.4 \times 10^{-3} \text{ м}^2$

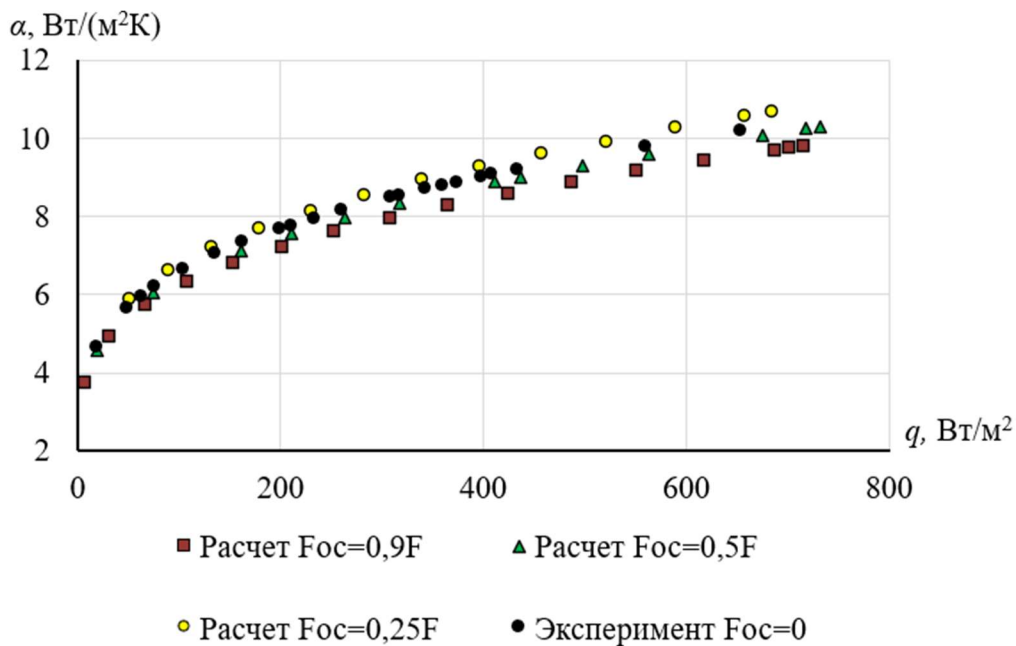


Рис. 2. Соотношение  $\alpha$  и  $q$  при естественной конвекции воздуха от теплообменной поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ , на которой размещался солевой осадок разной площади  $F_{oc}$  с пористостью  $\Pi = 0.3$

## 4. Заключение

Проведен анализ источников информации по теме исследования, в ходе которого установлено, что осадки могут появляться на стенках топливно-подающих каналов тепловых двигателей и теплообменного оборудования, снижая их ресурс и увеличивая материальные затраты.

Разработан критерий подобия осадкообразования с учетом его тепловой и электрохимической природы. Подсчитано электрохимическое число – аналог числа Фарадея для солевых осадков NaCl.

Проведена успешная апробация модифицированного числа подобия осадкообразования в ходе обработки результатов экспериментов при естественной конвекции воздуха и получения нового критериального уравнения теплообмена для нахождения числа Нуссельта. В ходе экспериментов также установлено, что коэффициент теплоотдачи может снижаться только при определенных соотношениях площадей всей поверхности теплообмена и поверхности, покрытой слоем осадка.

Разработана универсальная методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на металлических стенках на основе полученного критерия подобия осадкообразования, которая может быть применена с другими жидкими или газообразными теплоносителями.

Применение материалов данной статьи будет способствовать повышению ресурса, надежности, эффективности, безопасности новой и современной техники на жидких и газообразных теплоносителях.

## Литература

1. Бубликов И.А. Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций: диссертация ... докт. техн. наук : 05.14.14 / И.А. Бубликов. – Новочеркасск, 2004. – 360 с.
2. Глушечков В.А., Карпухин В.Ф., Юсупов Р.Ю., Овчинников Ю.М., Чернов А.В. Технология и оборудование для очистки труб от солевых отложений. Записки Горного института. – Т.166 – С. 172–174.
3. Алтунин В.А., Алтунин К.В., Галимов Ф.М., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Яновская М.Л. Анализ способов борьбы с осадкообразованием при эксплуатации энергоустановок на жидких углеводородных горючих // Вестник Казанского государственного технологического университета. 2010. №8. С. 96–103.
4. 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://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/989/>
5. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирли Г.А. Электрохимия / 2-е изд., испр. и перераб. — М.: Химия, КолосС, 2006. — 672 с.
6. Нечаев А.В. Основы электрохимии. Учебное электронное текстовое издание. УрФУ, 2010. 107 с.

## References

1. Bublikov I. A., Scientific principles of diagnostics and development of methods for reducing the intensity of sediment formation in heat exchange equipment of thermal and nuclear power plants: thesis of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences: 05.14.14 / I.A. Bublikov. – Novocherkassk, 2004, 360 p. [in Russian].
2. Gluschenkov V. A., Karpukhin V. F., Yusupov R. Yu., Ovchinnikov Yu. M., Chernov A. V., Technology and equipment for cleaning pipes from salt deposits, *Zapiski Gornogo instituta*, vol. 166, pp. 172–174. [in Russian].

3. Altunin V. A., Altunin K. V., Galimov F. M., Gortyshov Yu. F., Dresvyannikov F. N., Yanovskaya M.L., Analysis of ways of fight deposit formation when using power plants on liquid hydrocarbon fuels, *Vestnik of Kazan State Technological University*, 2010, vol. 8, pp. 96–103. [in Russian].
4. Altunin K. V., Research of the Effect of Salt Deposits on Heat Transfer during Natural Air Convection, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 2. [in Russian].  
DOI: <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.2.989>
5. Damaskin B. B. Petriy O. A., Tsirlie G. A., *Electrochemistry*, the 2<sup>nd</sup> edition, improved, M.: KolosS, 2006, 672 p. [in Russian].
6. Nechaev A. V., *Basics of electrochemistry*, Educational electronic text publ., UrFU, 2010. 107 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 13 августа 2022 г.