

# Research of the Effect of Salt Deposits on Heat Transfer during Natural Air Convection

Konstantin Altunin

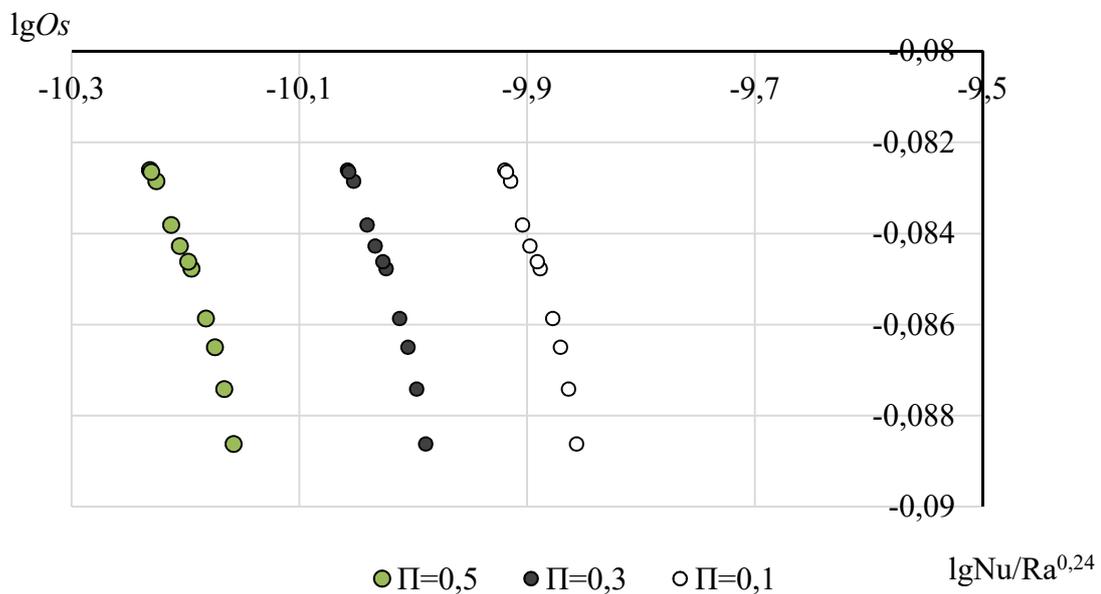
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI,  
Kazan, 420111, Russia

[altkonst881@yandex.ru](mailto:altkonst881@yandex.ru)

## Abstract

The article is devoted to an actual problem of heat transfer decrease due to deposit formation on heat transfer equipment walls. A new heat transfer similarity number of deposit formation that can describe its thermal and electric nature is presented here. New methods of experimental studies under free air convection with deposit on the heat transfer surface are given and discussed. The deposit was as a dense wet mass of NaCl salt. A new criterion equation for natural convection conditions of air has been obtained and shown in the article. It is possible to state that new methods of heat transfer calculation while appearing deposits based upon the created heat transfer similarity number of deposit formation have been successfully developed.

Keywords: similarity number, heat transfer, deposit formation



Relation of heat transfer numbers such as Nu, Ra and  $O_s$  under free air convection from the heat transfer surface with an area  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , on which salt deposit was situated with its area  $F_{oc} = 4.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$  ( $\Pi$  is porosity of salt deposits)

$$O_s = \frac{\rho_{os} I^2}{T_w F_{os} \lambda_{os}}$$

УДК 536.242:536.253

# Исследование влияния солевых отложений на теплоотдачу при естественной конвекции воздуха

К. В. Алтунин

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

[altkonst881@yandex.ru](mailto:altkonst881@yandex.ru)

## Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме снижения теплоотдачи по причине появления осадков на стенках теплообменного оборудования. Приведен, разработанный автором, новый критерий подобия осадкообразования, учитывающий его тепловую и электрическую природу. Представлена методика проведения экспериментов при естественной конвекции воздуха с учетом осадка на поверхности теплообмена. Осадком являлась густая влажная масса соли NaCl. Получено новое критериальное уравнение для условий естественной конвекции воздуха при образовании осадков. Разработана методика расчета теплоотдачи при образовании отложений на основе нового критерия подобия осадкообразования.

Ключевые слова: критерий подобия, теплоотдача, осадкообразование

## 1. Введение

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

Осадкообразование может иметь место в разных горючих и теплоносителях. Например, в среде жидких углеводородных горючих и охладителей образование углеродсодержащих осадков, в основном, начинается при температурах от 373 К. В общем, такие отложения могут привести к закоксовыванию топливно-подающих каналов, топливных фильтров, форсунок, нерасчётному струйному распылу и даже к выходу из строя всего теплового двигателя [1]. Необходимо отметить, что при росте температуры жидкие углеводородные теплоносители (керосины, масла) теряют свои диэлектрические свойства, в них могут образовываться диполи, активно участвующие в осадкообразовании на металлических поверхностях.

При использовании воды также 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. дол. 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 [2].

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

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

## 2. Экспериментальное исследование влияния солевых осадков на теплоотдачу

Проведены эксперименты с солевыми осадками при естественной конвекции воздуха. В данном случае осадком на теплообменной поверхности являлась густая масса, состоящая из соли NaCl и соляной воды. Основное оборудование для проведения экспериментов: цифровой термометр Mastech серии MS56500 с точностью измерений  $1^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$  с термопарой типа К (хромель-алюмель) (рис. 1, а)); два электронных термометра Rexant с точностью измерений  $2^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $120^{\circ}\text{C}$  (рис. 1, б)); жидкостный термометр универсальный Rexant 70-0612 с точностью измерений  $2^{\circ}\text{C}$  в диапазоне от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$  (рис. 1, в)).

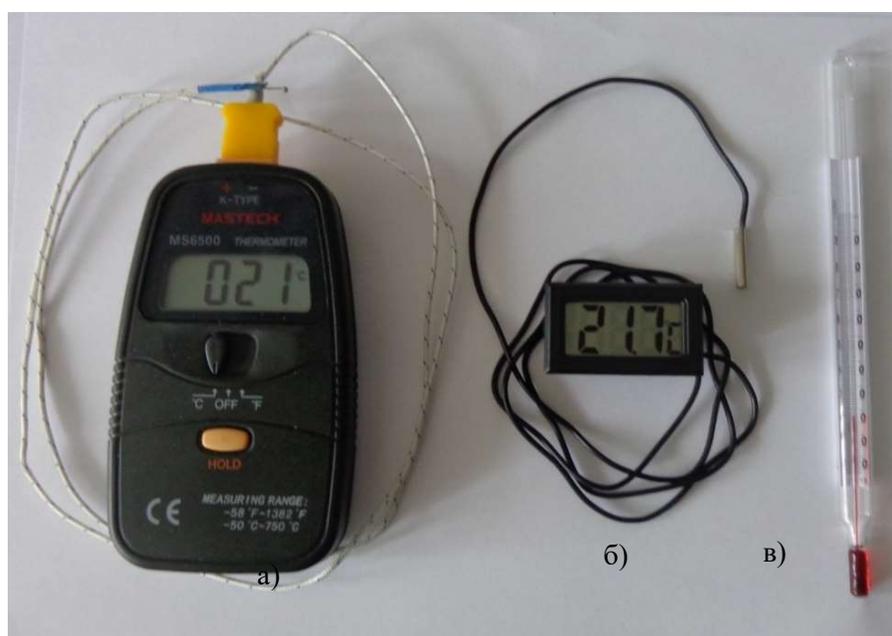


Рис. 1. Термометры, используемые в экспериментах при естественной конвекции солевых растворов: а) цифровой термометр Mastech; б) электронный термометр Rexant; в) жидкостный термометр универсальный Rexant

На основе анализа основных значений и источников погрешностей измерений проведена оценка максимальной погрешности при определении коэффициента теплоотдачи в среде соляного раствора и воздуха в условиях естественной конвекции. Все характеристики датчиков приборов, используемых в экспериментах, проверены с учётом допустимых погрешностей (табл. 1).

Учитывая характеристику точности применяемого оборудования, разработаны методика, планирование и порядок обработки экспериментальных исследований. Был выбран классический план проведения экспериментов.

Схема рабочего участка для проведения экспериментальных исследований показана на рис. 2, где 1 – металлическая крышка, 2 – термопара, 3 – слой густого осадка, 4 – термопара, 5 – трубка вывода пара, 6 – корпус ёмкости, 7 – подставка, 8 – пламя, 9 – газовая горелка, 10 – подставка, 11 – пресная вода, 12 – термопара, 13 – пар, 14 – термопара.

Таблица 1

## Характеристики датчиков и приборов

№ п/п	Измеряемые параметры	Обозначение	Измерительные и регистрирующие приборы	Единицы измерения	Класс точности	Диапазон измерений	Цена деления/ разрешение
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Диаметр рабочего участка	$d$	Штангенциркуль ШЦ-1	мм	1	0 ÷ 150	0.1
			Линейка	мм	1	0 ÷ 150	1
2	Объем природного газа	$V$	Газовый счетчик	м <sup>3</sup>	1.5	0 ÷ 99999.999	0.001
3	Температура воздуха	$t$	Жидкостный термометр универсальный Rexant 70-0612	°C	1	(0 ÷ + 100)°C	1
4	Температура стенки	$t$	Цифровой термометр Mastech серии MS56500	°C/°F	1	0°C ÷ 500°C	1
5	Температура слоя осадка, воды, поверхности теплообмена	$t$	Электронный термометр Rexant	°C	1	(- 50 ÷ 120)°C	0.1
6	Время эксперимента	$\tau$	Секундомер часов смартфона Samsung Galaxy A8	с	0.002	0 ÷ 5940	0.01
7	Масса осадка	$M$	Электронные весы	г	1	0 ÷ 5000	1

Эксперименты заключались в следующем: слой осадка (густой раствор NaCl с пористостью  $\Pi = 0.3$ ) размещался на металлической крышке 1 ёмкости, корпус 6 которой нагревался за счет тепла, поступающего от газовой горелки 9. Внутри ёмкости находился объем пресной воды 11. При помощи термопары 2 измерялась температура на поверхности металлической крышки 1 (без солевого осадка), а при помощи термопары 14 замерялась температура металлической крышки с внутренней стороны. Термопара 4 размещалась на поверхности солевого осадка, который занимал площадь  $F_{oc}$ . Внутри корпуса 6 размещался объем пресной воды 11, температура которой замерялась термопарой 12. Вся ёмкость находилась на подставках 7, 10 над газовой горелкой 9 (рис. 2).

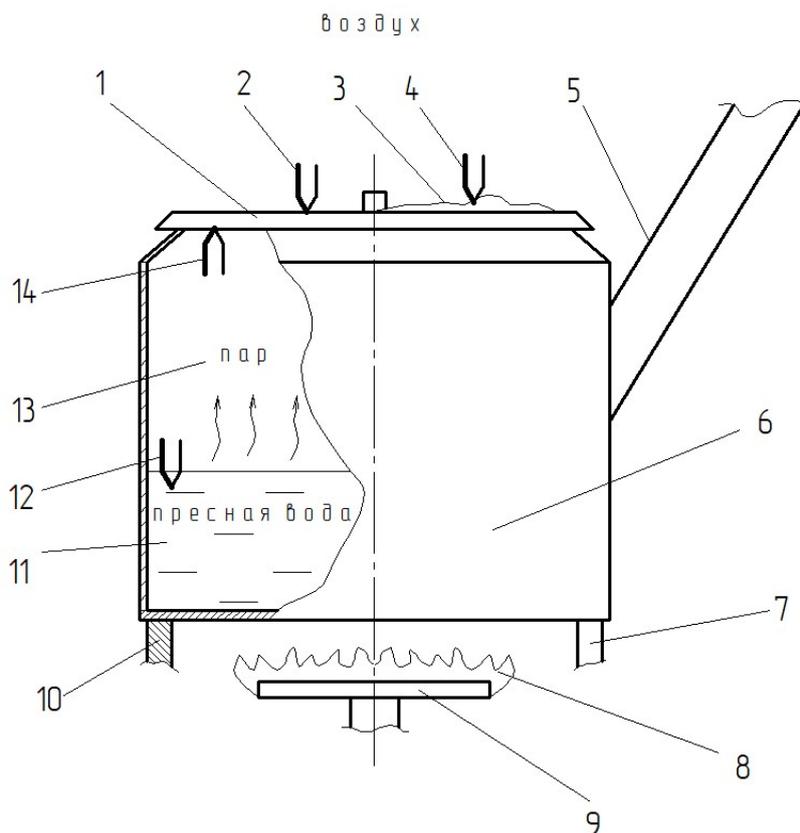


Рис. 2. Схема рабочего участка для проведения экспериментальных исследований влияния солевых отложений на теплоотдачу при естественной конвекции воздуха

Известно, что при 290 К максимальная растворимость соли NaCl в пресной воде составляет 35.9 г, причем с ростом температуры раствора растворимость увеличивается незначительно [3]. Солевые осадки размещались на разной площади поверхности теплообмена при разных опытах.

В начале каждого эксперимента замерялась начальная температура осадка и температура окружающей среды, а также показания газового счетчика. Далее производился розжиг природного газа на участке газовой горелки 9, запускался секундомер часов смартфона. Таким образом, осуществлялся нагрев поверхности теплообмена на газовой плите за счет тепла, поступающего от пламени 8 газовой горелки 9, т.е. металлическая крышка 1 постепенно нагревалась за счет пара 13 и посредством теплопроводности из-за соприкосновения с металлическими стенками корпуса 6. В ходе нагрева пар выходил из трубки 5.

До экспериментов с солевым осадком были проведены опыты по нахождению данных по температуре нагрева пресной воды и температурам с двух сторон крышки (термопары термометров Rexant размещались соответственно на поверхности воды и на поверхности

крышки, термопара термометра Mastech – на внутренней поверхности крышки). Как только вода закипала (373 К) подача газа прекращалась, секундомер останавливался, снимались последние показания газового счетчика. Далее данные обрабатывались, строился тарировочный график температур.

В ходе экспериментов с солевым осадком измерялись температуры: на внутренней поверхности крышки (термопара термометра Mastech), на внешней поверхности крышки и на поверхности солевого осадка (термопары термометров Rexant) до наступления температуры кипения пресной воды, при этом использовался тарировочный график (при температуре воды, равной 100<sup>0</sup> С, подача природного газа прекращалась, секундомер часов останавливался). Таким образом, были проведены эксперименты по замеру температур с двух сторон крышки и расчету плотности теплового потока  $q$ , идущего через крышку из нержавеющей стали, покрытой слоем белой эмали с двух сторон. Параметры крышки: верхний диаметр  $d = 0.115$  м, коэффициент теплопроводности стального сплава  $\lambda_w = 17$  Вт/(м·К), толщина стальной поверхности  $\delta_w = 1$  мм, коэффициент теплопроводности слоя эмали  $\lambda_{эм} = 1.84$  Вт/(м·К), толщина одного слоя эмали  $\delta_{эм} = 0.4$  мм.

Все опыты проводились при естественной конвекции. Гидравлическим диаметром являлся диаметр поверхности теплообмена (металлической крышки 1, рис. 2), равный  $d_T = 0.115$  м. Температура окружающего воздуха замерялась при помощи жидкостного термометра Rexant. Все данные записывались в рабочую тетрадь. При исследовании сделано допущение, что лучистым теплообменом можно пренебречь.

На рис. 3 показан график соотношения между плотностью теплового потока  $q$  и разницей температур  $\Delta t$  при естественной конвекции воздуха с поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, на которой размещался солевой осадок площадью  $F_{ос}$  ( $\Delta t = t_w - t_f$ , где  $t_w$  – температура стенки, <sup>0</sup>С;  $t_f$  – температура воздуха, <sup>0</sup>С).

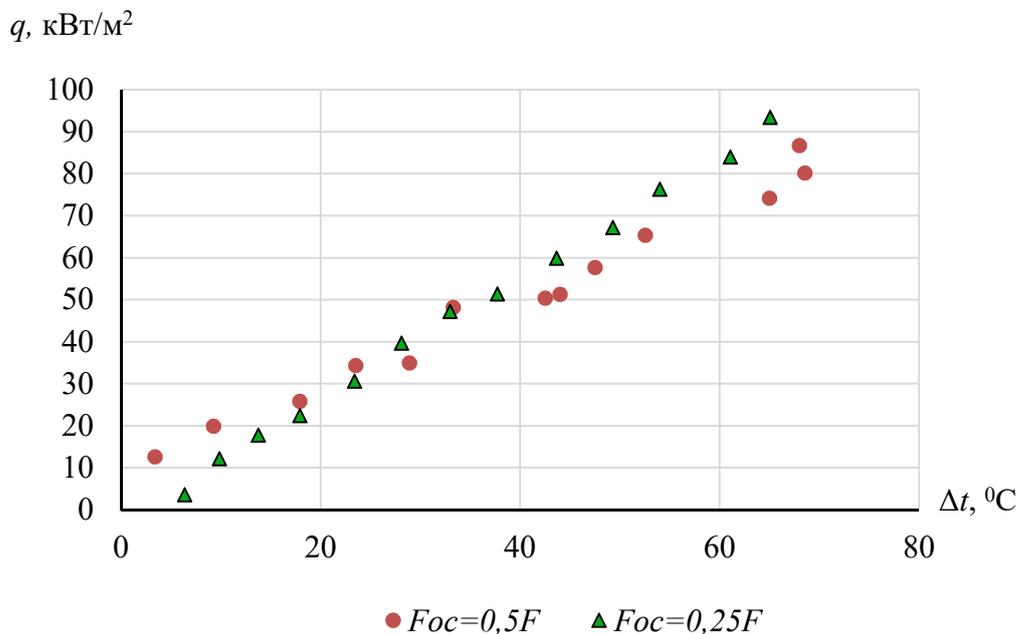


Рис. 3. Соотношение между  $q$  и  $\Delta t$  при естественной конвекции воздуха с поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>, на которой размещался солевой осадок площадью  $F_{ос}$  и пористостью  $\Pi = 0.3$

### 3. Критерий подобия осадкообразования

Необходимо отметить, что в 1972 г. отечественным учёным Г. Ф. Большаковым впервые была выдвинута идея электрической природы осадкообразования, а также объяснены многие физико-химические основы этого процесса. Однако до сих пор не существует единой теории осадкообразования термоэлектрической природы. Процесс осадкообразования в среде жидких углеводородных теплоносителей, согласно гипотезы Г. Ф. Большакова [4], носит электрический характер: при температуре 313 К в жидких углеводородных теплоносителях появляются заряженные частички (жидкость становится электропроводящей средой), а при дальнейшем нагреве до 373 К и более – появляются диполи, которые притягиваются к противоположным зарядам на микронеровностях любой (даже полированной) поверхности (согласно теории Шоттки и Френкеля) и способствуют началу осадкообразования [5].

На основе анализа источников информации автором данной статьи выдвинута гипотеза о влиянии удельного электрического сопротивления на образование осадков разного химического состава (органического и неорганического). В начале теоретического исследования была поставлена задача – разработать универсальный критерий подобия осадкообразования, для нахождения которого был выбран метод анализа размерностей [6, 7, 8].

В случае рассмотрения конвективных процессов наибольший интерес представляет нахождение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  при влиянии осадкообразования, который может зависеть от многих факторов. В ходе анализа были выбраны основные фундаментальные величины

$$\alpha_{oc} = f(\rho_{oc}, \lambda_{oc}, \delta_{oc}, F_{oc}, T_w, \tau), \quad (1)$$

где  $\alpha_{oc}$  – коэффициент теплоотдачи при осадкообразовании Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\rho_{oc}$  – удельное электрическое сопротивление осадка, Ом·м;  $\lambda_{oc}$  – коэффициент теплопроводности осадка, Вт/(м·К);  $\delta_{oc}$  – толщина слоя осадка, м;  $F_{oc}$  – площадь, покрытая слоем осадка, м<sup>2</sup>;  $T_w$  – температура поверхности теплообмена (не покрытая слоем осадка), К;  $\tau$  – время, с.

Известно, что в системе СИ за первичные величины выбраны: длина  $L$ , масса  $M$ , время  $T$ , температура  $\Theta$ , сила тока  $I$ , сила света  $J$ .

В данном теоретическом исследовании за величины с независимой размерностью были выбраны следующие:

$$[\lambda_{oc}] = \frac{ML}{T^3\Theta}, \quad [\delta_{oc}] = L, \quad [F_{oc}] = L^2, \quad [T_w] = \Theta, \quad [\tau] = T$$

Размерность остальных величин были выражены через  $[\lambda_{oc}]$ ,  $[\delta_{oc}]$ ,  $[F_{oc}]$ ,  $[T_w]$ ,  $[\tau]$ :

$$[\alpha_{oc}] = \frac{M}{T^3\Theta} = \frac{[\lambda_{oc}]}{[\delta_{oc}]}; \quad [\rho_{oc}] = \frac{ML^3}{T^3I^2} = \frac{[\lambda_{oc}]\Theta L^2}{I^2} = \frac{[\lambda_{oc}][T_w][F_{oc}]}{I^2}$$

Новые числовые значения физических величин  $\rho'_{oc}$ ,  $\lambda'_{oc}$  и т.д. получают путём сравнения с новым стандартом. Физический процесс не зависит от выбора единиц, поэтому уравнение (1) должно сохранить свою структуру при различных значениях масштабов пересчёта. В новых числовых значениях переменных уравнение (1) может быть записано

$$\frac{\alpha_{oc}}{[\alpha_{oc}]} = f\left(\frac{\rho_{oc}I^2}{[\lambda_{oc}][T_w][F_{oc}]}, \frac{\lambda_{oc}}{[\lambda_{oc}]}, \frac{\delta_{oc}}{[\delta_{oc}]}, \frac{F_{oc}}{[F_{oc}]}, \frac{T_w}{[T_w]}, \frac{\tau}{[\tau]}\right), \quad (2)$$

где все величины-комплексы являются безразмерными. Очевидно, что величины  $\lambda_{oc}/[\lambda_{oc}]$ ,  $\delta_{oc}/[\delta_{oc}]$ ,  $F_{oc}/[F_{oc}]$ ,  $T_w/[T_w]$ ,  $\tau/[\tau]$  равны единице. Поэтому (2) можно представить следующим образом:

$$\frac{\alpha_{oc} [\delta_{oc}]}{[\lambda_{oc}]} = f \left( \frac{\rho_{oc} I^2}{[\lambda_{oc}] [T_w] [F_{oc}]} \right) \quad (3)$$

Как видно, осталось два безразмерных комплекса (согласно  $\pi$ -теореме [7], т.к. физическое уравнение (1) содержит семь размерных величин, а величин с независимой размерностью всего пять), которые тождественны.

Таким образом, на основе метода анализа размерностей автором данного исследования получен критерий подобия осадкообразования [9]

$$Os = \frac{\rho_{oc} I^2}{T_w F_{oc} \lambda_{oc}}, \quad (4)$$

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

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

$$\lambda_{oc} = \Pi \lambda_f + (1 - \Pi) \lambda_s, \quad (5)$$

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

$$\rho_{oc} = \Pi \rho_f + (1 - \Pi) \rho_s, \quad (6)$$

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

#### 4. Обобщение экспериментальных результатов

В результате проведенных экспериментов в условиях естественной конвекции воздуха (схема рабочего участка – на рис. 2) получено новое критериальное уравнение с учетом слоя солевых отложений (осадок с максимальным содержанием NaCl):

$$Nu = 0.1 Ra^{0.24} Os^{-0.09}, \quad (7)$$

где  $Ra = (1.2 \times 10^5 \div 12.9 \times 10^6)$ ;  $Os = (4.95 \div 21.6) \times 10^{-11}$  при  $\Pi = 0.3$ ;  $F_{oc} = (0.25 \div 0.9) F$  ( $F$  – общая площадь поверхности теплообмена).

В формуле (7) в числах подобия Нуссельта  $Nu$  и Рэлея  $Ra$  был использован гидравлический диаметр участка (верхний диаметр крышки 1 на рис. 2), равный  $d_r = 0.115$  м. Сила тока была выбрана постоянной во всех опытах и равной  $I = 0.1$  мА.

Точность расчетов по (7) составила  $\pm(3 \div 18)\%$  (по сравнению с экспериментальными данными). За определяющую температуру выбрана средняя температура  $t_m$ .

На рис. 4 показан график зависимости  $Nu$ ,  $Ra$  и  $Os$ . В данном случае  $Nu$ ,  $Ra$  рассчитаны при средней температуре

$$t_m = \frac{t_w + t_{sur} + t_f}{3},$$

где  $t_w$  – температура внешней поверхности металла крышки, °С;  $t_{sur}$  – температура на поверхности слоя солевого осадка, °С;  $t_f$  – температура воздуха, °С).

По формуле (7) проведен расчет числа  $Nu$  при естественной конвекции к воздуху от металлической поверхности со слоем солевого осадка, а также расчет коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  с учетом и без учета температуры поверхности осадка (рис. 5).

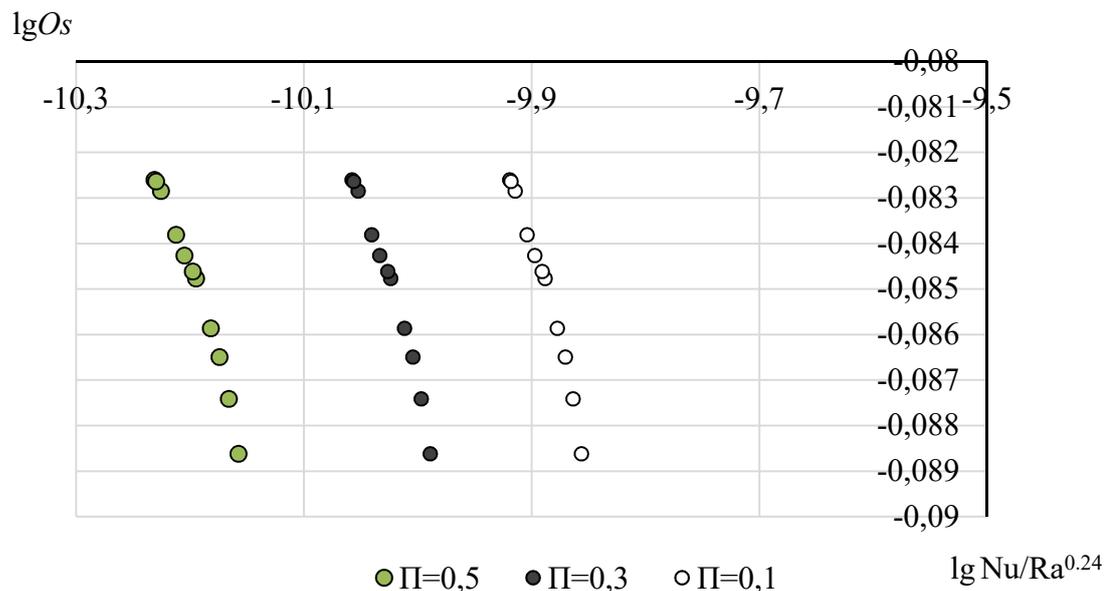


Рис. 4. График зависимости  $Nu$ ,  $Ra$  и  $Os$  при естественной конвекции воздуха от теплообменной поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ , на которой размещался солевой осадок площадью  $F_{oc} = 4.4 \times 10^{-3} \text{ м}^2$  и пористостью  $\Pi = 0.3$

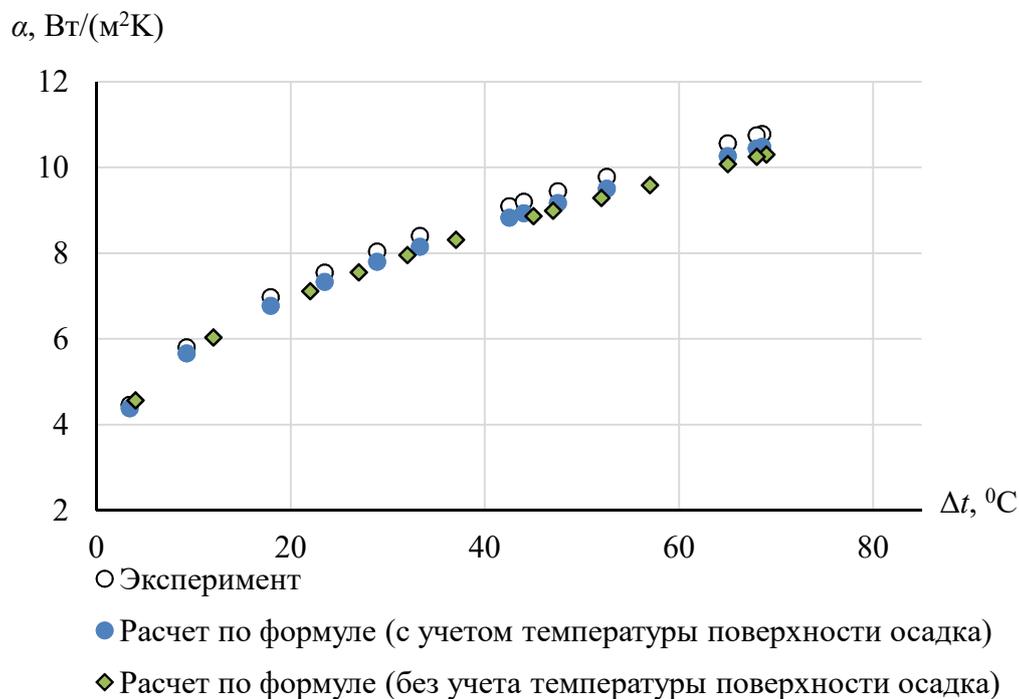


Рис. 5. Расчет коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции воздуха от теплообменной поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ , на которой размещался солевой осадок площадью  $F_{oc} = 4.4 \times 10^{-3} \text{ м}^2$  и пористостью  $\Pi = 0.3$

Из рис. 5 видно, что формула (7) может эффективно применяться, даже если неизвестна температура на поверхности осадка, т.е. для расчета числа Нуссельта и коэффициента теплоотдачи достаточно знать температуры металлической стенки и воздушной среды.

На рис. 6 приведен график соотношения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и плотности теплового потока  $q$ , полученный в ходе экспериментов с солевым осадком при естественной конвекции воздуха.

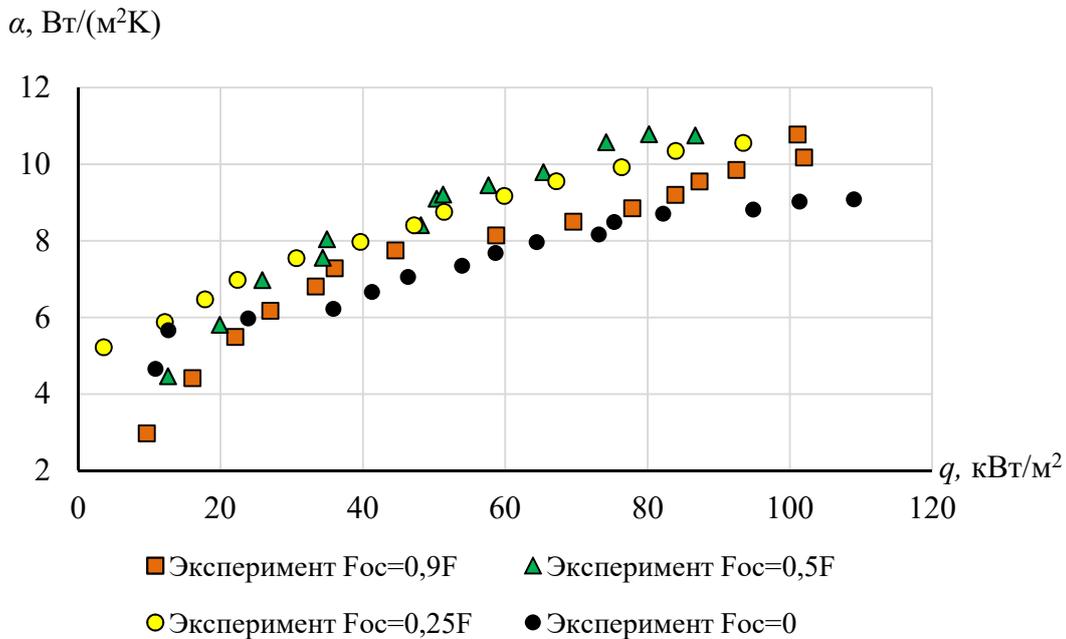


Рис. 6. Соотношение  $\alpha$  и  $q$  при естественной конвекции воздуха от теплообменной поверхности площадью  $F = 8.65 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ , на которой размещался солевой осадок разной площади  $F_{oc}$  с пористостью  $\Pi = 0.3$

Отсюда можно сделать вывод о том, что солевые осадки могут не только снижать теплоотдачу, но и интенсифицировать теплообмен при определенных  $q$  в зависимости от соотношения  $F_{oc}, T_w$ , что подтверждает правильность вывода критерия подобия осадкообразования  $Os$  (4).

Таким образом, методика расчета теплоотдачи при осадкообразовании 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 значений числа осадкообразования  $Os$  (4) на основе удельного электросопротивления осадка  $\rho_{oc}$ , коэффициента теплопроводности слоя осадка  $\lambda_{oc}$  в зависимости от средней температуры  $t_m = (t_w + t_f)/2$  при известной площади поверхности  $F_{oc}$ , покрытой слоем осадка; при этом рассчитывается или задается сила электрического тока  $I$ ;
- 4) выбор подходящего критериального уравнения, например, (7) для расчета Nu;

- 5) расчет коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  на основе известной формулы:  $\alpha = (\text{Nu} \cdot \lambda_f) / L_c$ , где  $\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя (например, солевого раствора или воздуха), Вт/(м·К);  $L_c$  – определяющий размер (например, ширина пластинки, гидравлический диаметр канала и т.д.), м.

## 5. 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, увеличивая материальные затраты и ухудшая теплоотдачу; осадки могут быть как органического, так и неорганического состава.

На основе метода анализа размерностей получен универсальный безразмерный критерий подобия осадкообразования, который впервые учитывает тепловую и электрическую природу образования осадков на поверхности теплообмена. Проведены эксперименты с солевыми отложениями. Выведено новое критериальное уравнение, позволяющее найти число Nu в условиях образования солевых осадков при естественной конвекции воздуха. Результаты экспериментальных исследований позволяют утверждать, что осадкообразование может не только ухудшать теплообмен, но и повышать теплоотдачу при определенных соотношениях температур, плотности теплового потока и площади, покрытой осадком.

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

## Литература

1. Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Галимов Ф.М., Дресвянников Ф.Н., Алтунин В.А. Проблемы осадкообразования в энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях // Энергетика Татарстана, № 2, 2010. – С. 10–17.
2. Бубликов, И.А. Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / И.А. Бубликов. – Новочеркасск, 2004. – 36 с.
3. Cengel Yunus A. Heat Transfer: A Practical Approach. Second edition. 2008. - 874 p.
4. Большаков Г.Ф. Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах. – Л.: Изд-во «Химия», 1972. – 232 с.
5. Алтунин, В.А. Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многоразового использования. Книга первая/В.А. Алтунин. – Казань: Изд-во «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2005. – 272 с.
6. Болгарский А.В., Мухачев Г.А, Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. Изд-е 2-е. Москва, Высшая школа, 1975. – 495 с.
7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Изд-е 3-е, перераб. и доп. Москва, Энергия, 1975. – 488 с.
8. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. - Под. ред. чл.-корр. АН СССР Н.П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. – 381 с.
9. Алтунин К.В. Разработка новых критериев подобия теплообмена // Инновационные научные исследования, 2022. – № 5–2(19) – С. 27–34.

## References

1. Altunin, K. V., Gortyshov, Yu. F., Galimov, F. M., Dresvyannikov, F. N., Altunin, V. A., “Problems of Deposit Formation in Power Plants on Liquid Hydrocarbon Fuels and Coolers,” *Tatarstan Power Engineering J.*, No. 2, 2010, pp. 10–17.
2. 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: abstract of the dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 05.14.14, Novocherkassk, 2004, 36 p.*
3. Cengel Yunus, A., *Heat Transfer: A Practical Approach*. Second edition. 2008, 874 p.
4. Bolshakov, G. F., *Physic and Chemical Foundations of Deposits Formation in Jet Fuels*, Leningrad, Publ. “Khimiya”, 1972, 232 p.
5. Altunin, V. A., *Research of Heat Transfer Particularities to Hydrocarbon Fuels and Coolants in Re-usable Power Plants*, Book one, Publ. at Kazan State University named after V.I. Ulyanov-Lenin, 2005, 272 p.
6. Bolgarsky, A. V., Mukhachev, G. A., Shchukin, V. K., *Thermodynamics and Heat Transfer*, 2nd Ed. Moscow, Higher School, 1975, 495 p.
7. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., Sukomel, A. S., *Heat Transfer*, 3rd Ed., reprint. and add. Moscow, Publ. Energiya, 1975, 488 p.
8. Schenck Hilbert, *Theories of Engineering Experimentation*, Second edition, New York, Toronto, London. Publ. McGraw-Hill Book Company, US, 1961, 239 p.
9. Altunin, K. V., “Creation of New Similarity Numbers of Heat Transfer,” *Innovative scientific investigations J.*, No. 5–2(19), 2022, pp. 27–34.

Статья поступила в редакцию 11 мая 2022 г.