

## Разработка новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливных каналах тепловых двигателей и энергоустановок

© К.В. Алтунин

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

*Статья посвящена теоретическому исследованию, связанному с разработкой новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков. Рассмотрены проблема осадкообразования в тепловых двигателях и энергоустановках, а также основные факторы, от которых оно зависит, включая материал стенки, температуру, время и число циклов эксплуатации и др. Приведены некоторые теплофизические свойства осадков в топливных системах разных тепловых двигателей. В процессе обзора и анализа научно-технической литературы не найдено методик расчета толщины углеродсодержащих осадков на нагретых металлических стенках, учитывающих электрические свойства стенки и осадка. Разработаны новые формулы расчета толщины, скорости осадкообразования, учитывающие тепловую и электрическую природу этого процесса. На базе данных формул создана новая методика расчета толщины слоя углеродсодержащего осадка на металлической стенке любого топливного канала теплового двигателя или энергоустановки на жидком углеводородном горючем или охладителе. Выполнена успешная апробация новой методики путем проведения экспериментальных исследований кипения авиационного керосина в объеме, в ходе которой проявился ряд особенностей, связанных с применением новых формул. Универсальность предложенной методики заключается в том, что она подходит для подсчета осадкообразования практически во всех тепловых двигателях и энергоустановках при различных условиях эксплуатации топливной системы и составах металлических стенок, а также при разных значениях скоростей прокачки, давления, температурных режимов внутри топливно-подающих и охлаждающих каналов.*

**Ключевые слова:** осадкообразование, удельное электрическое сопротивление, температура, пористость, жидкие углеводородные горючие и охладители, углеродсодержащий осадок

**Введение.** Известно, что термин «осадкообразование» появился во второй половине XX в. в связи с интенсивным применением реактивных топлив. Впервые он встречается, например, в книге Я.Б. Черткова [1]. Процесс осадкообразования в жидких углеводородных горючих (УВГ) и охладителях (УВО) в большинстве случаев оказывает негативное влияние на работу двигателей и энергоустановок (ЭУ) наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования. Так, в США только для обычного нефтеперерабатывающего завода ежегодные затраты составляют до 10 млн долл. [2]. Аналогичные проблемы отмечаются в теплоэнергетике, ракетостроении и в авиации [3].

Следует отметить, что процесс осадкообразования в топливной системе ВРД вызывает заседание золотников в насосах-регуляторах. Это приводит к «зависанию» оборотов двигателя при частоте вращения 60...70 % от максимальной, к неуправляемости, повышению времени приемистости или его помпажу, к самовыключению двигателя на земле или в воздухе, а также к частичному или полному закупориванию форсуночных фильтров и форсуночных каналов, что становится причиной частичной или полной потери тяги [4, 5].

Процесс осадкообразования в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД) вызывает такие негативные явления, как повышение температуры стенки и ухудшение теплоотдачи в рубашках охлаждения и их прогар, закоксовывание форсунок и неправильная организация горения из-за струйного распыла и нерасчетности смешения компонентов, а также частичная или полная потеря тяги, пожар и взрыв двигателя в земных и космических условиях [4]. Осадкообразование возникает не только в реактивных (ЖРД, ВРД и т. п.), но и в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС) [6–8].

Процесс образования углеродсодержащих отложений наблюдается также в случае применения различных мазутов в наземных установках. Так, загрязнение поверхности нагрева мазутных подогревателей приводит к резкому, в 5–10 раз, увеличению гидравлического сопротивления, а также к уменьшению коэффициента теплопередачи. Вместе с этим, значительно снижается тепловая мощность подогревателей, что приводит к сокращению их рабочей кампании. При появлении углеродсодержащих отложений на стенках распылителей мазутных форсунок ухудшается распыливание горючего и снижается полнота сгорания топлива [9].

Существующие методы и формулы расчета толщины слоя углеродсодержащего осадка не подходят для многих режимов эксплуатации топливно-подающих и охлаждающих каналов на жидких УВГ (УВО), так как не всегда бывают точными и не учитывают влияния электрических свойств топлив, стенок и осадков [4, 10, 11].

Цель работы — разработка новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливно-подающих и охлаждающих каналах тепловых двигателей и энергоустановок с учетом тепловой и электрической природы осадкообразования.

**Условия возникновения и свойства углеродсодержащего осадка.** Исследования в области процессов осадкообразования выявили такую основную закономерность: в жидких УВГ (УВО) образование осадков происходит вследствие повышения температуры их нагрева [4, 10]. С возрастанием температуры также интенсифицируется коррозия металлов [1, 12]. Влияние температуры на размеры частиц осадка приведено в табл. 1. Для каждого жидкого УВГ и УВО

существует температура максимального осадкообразования: для Т-2 — 135 °С, ТС-1 — 150 °С, Т-1 — 160 °С, для Т-5 — 180 °С. Она влияет не только на количество образовавшегося осадка, но и на его дисперсионный состав. С повышением нагрева охладителей и горючих размеры частиц осадка в них увеличиваются от 30 до 120 мкм. Следует отметить, что осадкообразование зависит от многих факторов [4, 13]:

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

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

Таблица 1

**Влияние температуры на размеры частиц осадка  
в некоторых реактивных горючих**

Марка УВГ	Температура, °С	Общее количество осадка, м <sup>2</sup> /100 мл	Распределение осадка на фильтрах, %, при толщине слоя			
			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

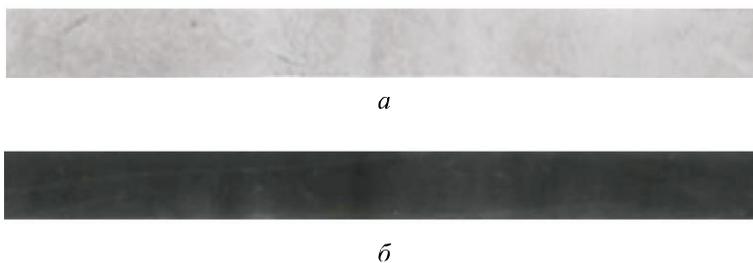
Некоторые зарубежные авторы [8] измеряли толщину углеродсодержащих отложений в разных областях камеры сгорания ДВС и нашли средние значения, равные 155...240 мкм. Автор работы [6] получил следующие теплофизические величины осадка:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1100 \dots 2000 \text{ кг/м}^3; C_p = 0,84 \dots 1,84 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ \lambda &= 0,17 \dots 0,8 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}; a = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

Плотность сплошных отложений ( $\gamma$ ), образующихся вследствие окисления топлив при течении на каталитически неактивных поверхностях, практически постоянна ( $\gamma = 1010 \pm 50 \text{ кг/м}^3$ ) [10]. Некоторые авторы для проведения расчетов используют плотность сухого кокса  $\gamma_{\text{сух}} = 1000 \text{ кг/м}^3$  [13].

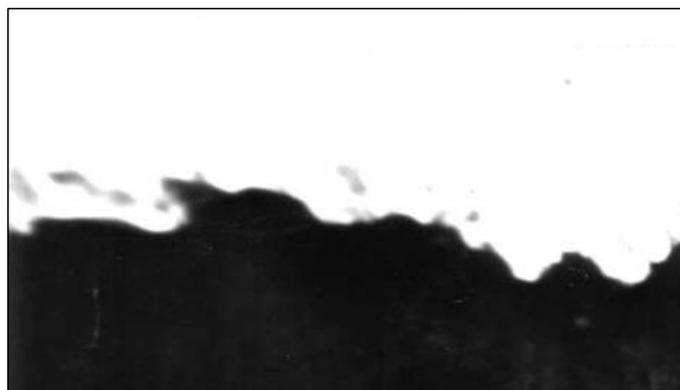
Установлено, что коэффициент теплопроводности углеродсодержащего осадка ( $\lambda_{\text{ос}}$ ), образованного при кипении УВГ (УВО), для каждого топлива слабо зависит как от времени наработки (в пределах первых 10 ч), так и от температуры стенки. Для РТ и Т-6 коэффициент  $\lambda_{\text{ос}}$  равен  $0,29 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , для парафиновых УВГ —  $0,36 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [10].

Автором настоящей статьи проведены экспериментальные исследования в жидком УВГ марки ТС-1, результаты которых показаны на рис. 1, 2. Рабочая пластина без осадка представлена на рис. 1, а, эта же пластина после эксперимента, но уже с осадком — на рис. 1, б.



**Рис. 1.** Общий вид рабочей пластины из стали марки Х18Н10Т:  
а — до эксперимента (без осадка); б — после эксперимента (с осадком)

Характерная поверхность осадка обнаружена при исследовании микрошлифа под микроскопом (см. рис. 2). Экспериментально установлено, что  $\delta_{\text{ос}}$  перекрывает все микронеровности любой металлической поверхности, а также заполняет углубления искусственных шероховатости и интенсификаторов теплоотдачи.



**Рис. 2.** Характерный вид шероховатой поверхности твердого углеродсодержащего осадка на поверхности рабочей трубки

В ходе обзора и анализа научно-технической литературы не были найдены методики расчета толщины углеродсодержащих осадков на нагретых металлических стенках, учитывающие электрические свойства стенки и осадка, а также не обнаружены таблицы и графики с данными зависимостей удельного электрического сопротивления осадков от температуры, давления и других факторов.

**Разработка новой методики расчета толщины углеродсодержащих отложений.** Следует напомнить, что в 1972 г. отечественный ученый Г.Ф. Большаков впервые выдвинул предположение об электрической природе осадкообразования, а также объяснил многие физико-химические основы этого процесса. Однако до сих пор не предложено единой теории осадкообразования термоэлектрической природы. Согласно гипотезе Г.Ф. Большакова [5], процесс осадкообразования имеет электрический характер, в связи с чем при температуре 313 К в жидких УВГ и УВО появляются заряженные частицы (жидкость становится электропроводящей средой), а при дальнейшем нагреве до 373 К и более в них возникают диполи, которые притягиваются к противоположным зарядам на микронеровностях любой (даже полированной) поверхности, согласно теории Шоттки и Френкеля, и способствуют осадкообразованию [4].

Автором статьи предложено теоретическое обоснование расчета увеличения толщины осадка. В основу этой теории положен метод математической гипотезы, при этом впервые было принято такое понятие, как идеальное осадкообразование, в топливно-подающих и охлаждающих каналах двигателей, ЭУ [14–16]. Несмотря на то что существуют и другие факторы, например, давление, скорость прокачки жидкого УВГ и УВО, материал стенки, шероховатость поверхности и пр. (см. формулу (1)), за идеальное осадкообразование был принят процесс, при котором главными факторами являются температура стенки канала и время эксплуатации двигателя или ЭУ. Наличие фактора времени необходимо, так как способствует нахождению скорости осадкообразования. Таким образом, формула идеального осадкообразования приобретает вид

$$\delta_{oc} = k\tau T_w, \quad (2)$$

где  $\delta_{oc}$  — толщина слоя осадка, м;  $k$  — коэффициент осадкообразования, м/(с·К);  $\tau$  — время, с;  $T_w$  — температура нагреваемой стенки, К.

Зная толщину слоя осадка, который образуется через определенное время на поверхности нагреваемой металлической стенки, можно рассчитать скорость этого процесса  $W_{oc}$ :

$$W_{oc} = \frac{\partial \delta_{oc}}{\partial \tau}, \quad (3)$$

$$W_{oc} = kT_w. \quad (4)$$

Ранее автором статьи была выдвинута гипотеза [14] о прямой зависимости скорости роста осадка от электрических свойств материала стенки: чем меньше удельное электрическое сопротивление материала стенки, тем интенсивнее происходит осадкообразование. В частности, эта гипотеза подтверждается фактом существования так называемых металлов-катализаторов (Cu, Fe и др.) осадкообразования, которые характеризуются низкими значениями удельных электрических сопротивлений и способствуют повышению скорости осадкообразования [4, 5, 10]. В ходе экспериментов было также установлено, что некоторые неметаллические материалы (керамические материалы, пластмассы и т. п.) с большими удельными электрическими сопротивлениями практически не влияют на осадкообразование на стенках топливно-охлаждающих и подающих каналов.

Поясняя формулу (2), необходимо отметить, что на основании вышеупомянутой гипотезы была разработана формула коэффициента  $k$  и раскрыта его природа:

$$k = K_{oc} \left( \ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{тек}} \right), \quad (5)$$

где  $K_{oc}$  — эмпирическая константа, которая характеризует условия одного режима,  $(\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{К})^{-1}$ ;  $\rho_{oc_{max}}$  — максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка, Ом·м;  $\rho_{oc_{тек}}$  — текущее значение удельного электрического сопротивления слоя осадка, Ом·м.

Была также разработана методика расчета  $K_{oc}$ , состоящая в первоначальной подстановке в формулы (2) и (5) значений  $\delta_{oc}$ ,  $\rho_{oc_{max}}$ ,  $\tau$ ,  $T_w$ , полученных в ходе эксперимента, причем вместо  $\rho_{oc_{тек}}$  берут значение  $\rho_w$ , равное удельному электрическому сопротивлению материала стенки без осадка (т. е. при первоначальном появлении слоя осадка, который может составлять всего несколько микрометров в самом начале эксплуатации топливного канала, в (5) учитываются значения  $\rho_{oc_{max}}$  и  $\rho_w$ ):

$$K_{oc_i} = \left( \frac{\delta_{oc1}}{\left( \ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_w \right) \tau_1 T_{w1}} \right)_i, \quad (6)$$

где  $K_{oc_i}$  — эмпирическая константа, которая характеризует условия  $i$ -го режима,  $(\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{К})^{-1}$ ;  $\delta_{oc1}$  — первоначальная толщина слоя осадка на металлической стенке топливно-охлаждающего канала, м;  $\tau_1$  — время образования первоначального слоя осадка, с;  $T_{w1}$  — температура

стенки топливно-охлаждающего канала, при которой образовался первоначальный слой осадка,  $K$ .

Автором статьи разработана обобщенная формула осадкообразования для  $n$  режимов эксплуатации тепловых двигателей, ЭУ одно- и многократного использования на жидких УВГ и УВО. В данном случае режимом ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) следует считать новое состояние, отличное от предыдущего по одному из физических факторов, за исключением времени и температуры [14–16]:

$$\sum_{i=1}^n \delta_{oc_i} = \sum_{i=1}^n K_{oc_i} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{i-1}}) \tau_i T_{wi}, \quad (7)$$

где  $\delta_{oc_i}$  — толщина  $i$ -го слоя осадка, м;  $K_{oc_i}$  — эмпирическая константа, которая характеризует условия  $i$ -го режима  $(\text{Ом} \cdot \text{с} \cdot \text{К})^{-1}$  в случае применения  $\ln \rho_{oc_{max}}$  и  $\ln \rho_{oc_{i-1}}$  м/(с · К);  $\rho_{oc_{i-1}}$  — значение удельного электрического сопротивления на поверхности предыдущего слоя осадка, Ом · м;  $\tau_i$  — время наработки  $i$ -го режима, с;  $T_{wi}$  — температура стенки при  $i$ -м режиме, К.

Формула (6) позволяет рассчитать скорость осадкообразования  $W_{oc}$  через несколько циклов эксплуатации двигателя или ЭУ на УВГ (УВО), которые включают в себя  $n$  режимов:

$$W_{oc} = \sum_{i=1}^n K_{oc_i} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{i-1}}) T_{wi}. \quad (8)$$

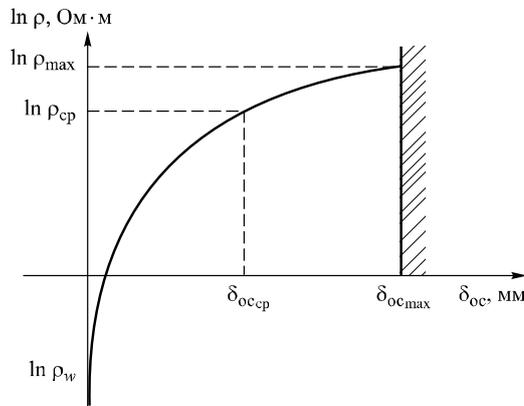
Таким образом, скорость осадкообразования на металлической поверхности топливного канала с УВГ (УВО) напрямую зависит от температуры, числа режимов (циклов) и времени эксплуатации теплового двигателя, ЭУ.

Однако формулы (7) и (8) содержат разности удельных электрических сопротивлений, нахождение которых для каждого режима является довольно трудной задачей. На рис. 3 показан один из вариантов изменения значений  $\rho$  при увеличении слоя твердого осадка. Поскольку возможен большой разброс значений  $\rho$ , предлагается использовать натуральный логарифм  $\ln \rho$  (см. рис. 3). Для облегчения расчетов предложено выбирать средние значения удельных электрических сопротивлений, которые можно вынести за знак суммы в формуле (7):

$$\sum_{i=1}^n \delta_{oc_i} = \ln \rho_{cp} \sum_{i=1}^n K_{oc_i} \tau_i T_{wi}. \quad (9)$$

Подобным образом можно получить среднюю скорость осадкообразования  $W_{ос\text{ср}}$  :

$$W_{ос\text{ср}} = \ln \rho_{ср} \sum_{i=1}^n K_{ос_i} T_{wi} \quad (10)$$



**Рис. 3.** Зависимость толщины углеродсодержащих отложений от удельного электрического сопротивления при определенной температуре нагретой стенки

Для эффективного прогнозирования осадкообразования необходимо экспериментально определить эмпирические константы  $K_{ос}$ , характеризующие условия каждого режима и зависящие от многих факторов, которые приведены в формуле (1):

$$K_{ос} = f(T_w, T_f, p, W, M, \Pi, K_{шер}, K_{O_2}, K_{ин}, X, N, \tau \text{ и др.}) \quad (11)$$

Применение разработанной методики нахождения  $K_{ос}$  является доступным, так как в формуле (6) отсутствуют значения  $p, W, X, M$  и др. Эти физические параметры уже заложены в  $K_{ос}$ , оказывая влияние на толщину слоя осадка через определенное время и при соответствующей температуре. В результате открывается возможность создания баз данных (таблиц, графиков, программ) всех рабочих режимов топливной системы теплового двигателя или ЭУ, содержащих множество эмпирических коэффициентов режима  $K_{ос}$ .

Таким образом, используя полученные формулы (6)–(10), можно спрогнозировать рост углеродистых отложений, а также найти скорость этого процесса.

Согласно приведенной на рис. 3 зависимости толщины слоя осадка от удельного электрического сопротивления при одной определенной температуре нагретой стенки  $T_w$ , процесс осадкообразования термоэлектрической природы прекратится по достижении максимального удельного электрического сопротивления слоя осадка, соответствующего диэлектрическим материалам. Для удобства инженерных расчетов можно построить подобные графики для разных

температур стенки, начиная с 373 К. При этом значении температуры в жидких УВГ и УВО образуются диполи и начинается процесс активного осадкообразования. Удельное электрическое сопротивление большинства проводников возрастает с повышением температуры, например, для стали марки 12Х18Н9Т  $\rho = 72,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 20 °С,  $\rho = 79,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 100 °С,  $\rho = 109,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м при 700 °С [17].

Таким образом, можно спрогнозировать рост углеродсодержащих отложений в топливно-подающих и охлаждающих каналах тепловых двигателей, ЭУ одно- и многоразового использования на жидких УВГ и УВО. На базе предложенной методики расчета толщины слоя осадка разработано изобретение [15]. Формула (7) позволяет теоретически рассчитать толщину слоя осадка при разных режимах, температурах стенки и времени эксплуатации. Рост осадка прекратится, когда удельное электрическое сопротивление последнего слоя осадка станет равным максимальному  $\rho_{oc_{max}}$  :

$$\sum_{i=1}^n \delta_{oc_i} = \sum_{i=1}^n K_{oc_i} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{i-1}}) \tau_i T_{wi} = K_{oc1} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_w) \tau_1 T_{w1} + K_{oc2} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc1}) \tau_2 T_{w2} + K_{oc3} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc2}) \tau_3 T_{w3} + \dots + K_{oc_n} (\ln \rho_{oc_{max}} - \ln \rho_{oc_{n-1}}) \tau_n T_{wn}, \quad (12)$$

где  $\rho_{oc_{n-1}} = \rho_{oc_{max}}$  .

Удельное электрическое сопротивление слоя углеродсодержащего осадка можно определить не только экспериментально, но и теоретически, например, зная пористость осадка  $\Pi$  :

$$\rho_{oc} = \Pi \rho_{T,w} + (1 - \Pi) \rho_{сух}, \quad (13)$$

где  $\rho_{T,w}$  — удельное электрическое сопротивление жидкого УВГ при средней температуре кокса, Ом·м;  $\rho_{сух}$  — удельное электрическое сопротивление сухого кокса, Ом·м.

Проведен расчет  $\rho_{oc}$  по формуле (13) при средней температуре слоя осадка  $T_{m_{oc}}$ , значение  $\rho_{сух}$  заимствовано из [18, 19],  $\rho_{T,w}$  рассчитано на основе данных, взятых из разных источников при начальном значении  $\rho_{T,w} = 0,58 \cdot 10^{10}$  Ом·м,  $\Pi = (0,1-0,5)$  (табл. 2).

По данным, приведенным в табл. 2, построен график зависимости удельного электрического сопротивления слоя углеродсодержащего осадка из ТС-1 от средней температуры при разной пористости (рис. 4).

Влияние температуры и пористости на удельное электрическое сопротивление углеродсодержащего осадка из керосина ТС-1

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{ос}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$					$T, \text{К}$
	$\Pi = 0,1$	$\Pi = 0,2$	$\Pi = 0,3$	$\Pi = 0,4$	$\Pi = 0,5$	
20	$0,067 \cdot 10^{10}$	$0,125 \cdot 10^{10}$	$0,182 \cdot 10^{10}$	$0,24 \cdot 10^{10}$	$0,297 \cdot 10^{10}$	293
100	$0,053 \cdot 10^{10}$	$0,095 \cdot 10^{10}$	$0,138 \cdot 10^{10}$	$0,181 \cdot 10^{10}$	$0,224 \cdot 10^{10}$	373
200	$0,039 \cdot 10^{10}$	$0,069 \cdot 10^{10}$	$0,098 \cdot 10^{10}$	$0,128 \cdot 10^{10}$	$0,157 \cdot 10^{10}$	473
300	$0,03 \cdot 10^{10}$	$0,05 \cdot 10^{10}$	$0,071 \cdot 10^{10}$	$0,091 \cdot 10^{10}$	$0,111 \cdot 10^{10}$	573
400	$0,016 \cdot 10^{10}$	$0,03 \cdot 10^{10}$	$0,045 \cdot 10^{10}$	$0,06 \cdot 10^{10}$	$0,074 \cdot 10^{10}$	673
500	$0,01 \cdot 10^{10}$	$0,021 \cdot 10^{10}$	$0,031 \cdot 10^{10}$	$0,041 \cdot 10^{10}$	$0,051 \cdot 10^{10}$	773
600	$0,007 \cdot 10^{10}$	$0,014 \cdot 10^{10}$	$0,021 \cdot 10^{10}$	$0,029 \cdot 10^{10}$	$0,036 \cdot 10^{10}$	873
700	$0,005 \cdot 10^{10}$	$0,01 \cdot 10^{10}$	$0,015 \cdot 10^{10}$	$0,02 \cdot 10^{10}$	$0,025 \cdot 10^{10}$	973

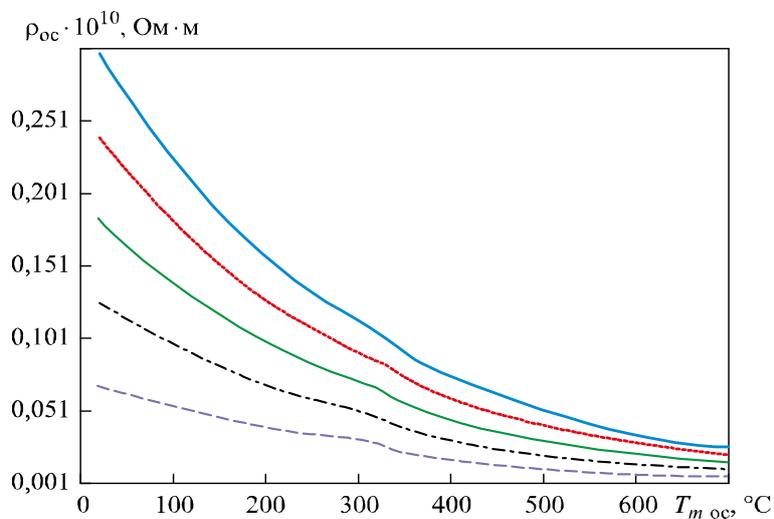


Рис. 4. Зависимость удельного электрического сопротивления слоя углеродсодержащего осадка из ТС-1 от средней температуры при разной пористости:

— — —  $\Pi = 0,1$ ; - - -  $\Pi = 0,2$ ; — — —  $\Pi = 0,3$ ; ·····  $\Pi = 0,4$ ; — — —  $\Pi = 0,5$

Алгоритм разработанной методики расчета толщины слоя осадка заключается в следующем:

1) строится график зависимости  $\rho_{\text{ос}}$  от средней температуры слоя осадка  $T_{m \text{ ос}}$  при определенном давлении, с заданной пористостью, для заданного вида жидкого УВГ (УВО). По графику (например, см. рис. 4) выбирается значение  $\rho_{\text{осmax}}$ , которое сохраняется постоянным в ходе расчета; значение  $\rho_{\text{осmax}}$  также может быть выбрано как самое максимальное из возможных;

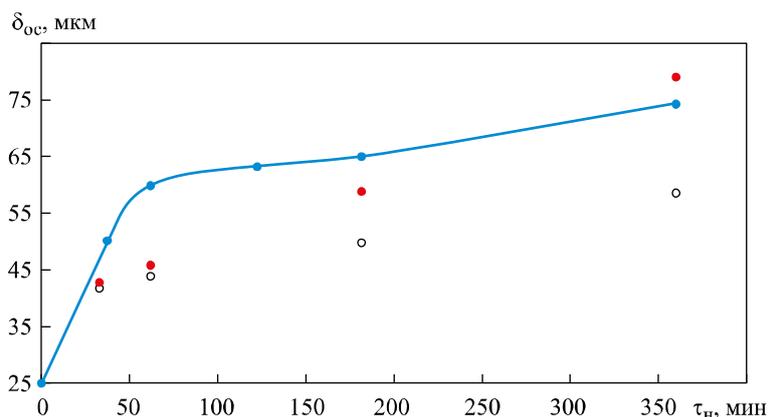
2) определяются режимы, их время, температуры стенки. Выполняются расчеты. Используя формулу (6), устанавливают коэффициенты всех режимов  $K_{oc_i}$ ;

3) по формуле (7) рассчитывают общую толщину слоя осадка. При расчете первого слоя (за минимальное время) учитывается удельное электрическое сопротивление металлической стенки  $\rho_w$ , а в других случаях —  $\rho_{oc}$  в зависимости от  $T_{oc}$ , значение которой берется на поверхности предыдущего слоя осадка (см. рис. 4), или  $\rho_{oc}$  в зависимости от толщины предыдущего слоя осадка  $\delta_{oc}$  (см. рис. 3).

**Апробация разработанной методики расчета осадкообразования.** При выполнении теоретического расчета толщины слоя осадка по новой методике за основу были взяты экспериментальные данные зависимости толщины углеродсодержащих отложений от наработки (рис. 5) [10]. Параметры эксперимента приведены ниже:

Пористость  $\Pi$ .....0,1  
 Давление  $p$ , МПа.....0,1  
 УВГ .....Керосин марки Т-6  
 Нагреватель .....Трубка  
 Материал стенки.....Сталь марки 12Х18Н10Т  
 Режим теплообмена при  $q = 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> .....Кипение в объеме

Теплопроводность осадка была  $\lambda_{oc} = 0,29$  Вт/(м·К) (на основе статистических данных при кипении в объеме в течение 10 ч) [10].



**Рис. 5.** Зависимость толщины углеродсодержащих отложений при кипении топлива Т-6 в объеме от наработки при  $p = 0,1$  МПа (нагреватель — трубка  $\varnothing 7 \times 0,5$ ; материал — сталь 12Х18Н10Т):  
 — экспериментальные данные [10];  $\circ$  — расчет по новой методике ( $\Pi = 0,1$ ;  $\rho_{oc_{max}} = 0,07 \cdot 10^{10}$  Ом·м;  $K_{oc_i} = 1,52 \cdot 10^{-12}$  (Ом·с·К)<sup>-1</sup>);  $\bullet$  — расчет по новой методике ( $\Pi = 0,1$ ,  $\rho_{oc_{max}} = 0,3 \cdot 10^{10}$  Ом·м,  $K_{oc_i} = 1,48 \cdot 10^{-12}$  (Ом·с·К)<sup>-1</sup>)

По свойствам топливо Т-6 близко к ТС-1, поэтому принято допущение о сходстве осадков в этих УВГ. Поскольку задан режим кипения керосина, то при  $p = 0,1$  МПа температура кипения данного УВГ выбрана  $T_k = 450$  К, при которой для стали марки 12Х18Н10Т  $\rho_w = 85,2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м [17]. Кипение происходило в объеме, температура на поверхности слоя осадка поддерживалась на уровне  $T_k = 450$  К, а металлическая стенка перегревалась, т.е.  $T_w > T_k$  из-за увеличения слоя осадка.

Результаты теоретического расчета также показаны на рис. 5.

Согласно рис. 5, за время  $\tau = 360$  мин и при постоянной пористости осадка  $P = 0,1$ , если в формулах (6), (7) использовать значение  $\rho_{oc_{max}} = 0,07 \cdot 10^{10}$  [Ом·м], неопределенность, по сравнению с экспериментальными данными [10], составит 21,7 %, тогда как при  $\rho_{oc_{max}} = 0,3 \cdot 10^{10}$  [Ом·м] она будет равна 5,8 %. Это свидетельствует о том, что за максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка в (6) и (7) необходимо брать бóльшие значения.

**Заключение.** В ходе научного исследования создана новая методика расчета толщины слоя углеродсодержащего осадка на металлической стенке любого топливно-подающего или охлаждающего канала теплового двигателя и ЭУ на жидком УВГ (УВО). Впервые методика учитывает не только тепловую природу осадкообразования, но и электрическую при применении удельных электрических сопротивлений металлической стенки и слоя осадка. Разработанная методика основана на ранее выведенной формуле, которая достаточно универсальна и проста для инженерных расчетов, где главными факторами являются время, температура стенки, а также удельные электрические сопротивления стенки и углеродсодержащего осадка.

Проведена апробация этой методики на базе данных эксперимента по замеру толщины углеродсодержащих осадков на металлической стенке при кипении керосина в течение более 6 ч. Сделано два теоретических расчета при одинаковой пористости осадка, но разных максимально возможных электрических сопротивлениях осадков, также найдены коэффициенты режима  $K_{oc_i}$ . Установлено, что в случае применения бóльшего значения максимально возможного удельного электрического сопротивления осадка повышается точность расчета. Наилучшая неопределенность составила всего 5,8 % по сравнению с результатами эксперимента, проводимого в течение 360 мин.

Универсальность предложенной методики заключается и в том, что ее можно применять для расчета осадкообразования в разных тепловых двигателях и ЭУ на жидких УВГ (УВО). Коэффициенты

режима  $K_{oc_i}$  могут быть найдены на основе экспериментов для разных УВГ (УВО), стенок из различных металлических сплавов, при разных скоростях прокатки, давлении, температурных режимах внутри топливно-подающих и охлаждающих каналов. На основе предложенной методики можно проводить точные расчеты роста осадков, более тщательно прогнозировать время выхода из строя того или иного элемента топливной или охлаждающей системы (в том числе и в теплообменных аппаратах), разрабатывать новые датчики и системы контроля за осадкообразованием, например, на борту летательного аппарата, создавать специальные справочники с указанием коэффициентов режимов  $K_{oc_i}$ .

Материалы статьи будут полезны для ученых, конструкторов и разработчиков двигателей и энергоустановок одно- и многократного использования на жидких углеводородных горючих и охладителях наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования.

Намечены пути дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чертков Я.Б. *Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива*. Москва, Химия, 1968, 356 с.
- [2] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. *Economic Penalty Associated with the Fouling of Refinery Heat Transfer Equipment*. Washington, 1981, pp. 619–643.
- [3] 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. Междунар. научного семинара «Проблемы моделирования и динамики сложных междисциплинарных систем»*. Казань, Изд-во Каз. гос. техн. ун-та 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 «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2005, 272 с.
- [5] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.
- [6] Kalghatgi G.T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: a literature review. *SAE*, 1995, Paper No. 952443.
- [7] Karamangil M.I., Avci A., Bilal H. Investigation of the effect of different carbon film thickness on the exhaust valve. *Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 44, pp. 587–598.
- [8] Kelemen S.R., Siksin M., Avery N.L., Rose K.D., Solum M., Pugmire R.J. Gasoline type and engine effects on equilibrium combustion chamber deposits (CCD). *SAE*, 2001, Paper No. 2001-01-3583.

- [9] Алтунин К.В. *Разработка горелок повышенной эффективности для тепловых электростанций: монография*. Казань, Изд-во КНИТУ–КАИ, 2016, 136 с.
- [10] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999, 284 с.
- [11] Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М. Эмпирические модели ресурснойработки и динамики жидкофазных коксоотложений при нагреве авиационного керосина. *Авиационные двигатели*, 2019, № 3 (4), с. 57–62.
- [12] Алтунин В.А., Монда В.А., Аблясова А.Г., Алтунин К.В. и др. Влияние углеводородных горючих на коррозию деталей энергоустановок и техносистем многоразового использования в наземных и космических условиях. *Матер. докл. 22-й Всерос. межвуз. научно-техн. конф. «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»*. Казань, Изд-во «Отечество», 2010, ч. 2, с. 87–88.
- [13] 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.
- [14] Алтунин К.В. Определение скорости осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на углеводородных горючих. *Матер. докл. 6 Всерос. науч.-техн. студенч. конф. «Интенсификация тепло- и массообменных процессов в химической технологии», посвящённая 90-летию со дня рождения А.Г. Усманова*. Казань, Инновационно-издательский дом «Бутлеровское наследие», 2010, с. 41–45.
- [15] Алтунин К.В. *Способ прогнозирования осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях*. Патент РФ на изобретение № 2467195, кл. F02K 9/00, B64F 5/00, G01N 25/72, G01K 7/02. Бюл. № 32 от 20.11.2012.
- [16] Алтунин К.В. Модель идеального осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Матер. докл. 18-й Междунар. молодеж. науч. конф. «Туполевские чтения»*. Казань, Изд-во Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2010, т. 2, с. 66–68.
- [17] *Удельное электрическое сопротивление от температуры для различных марок сталей и сплавов*. URL: <https://extxe.com/21002/udelnoe-jelektricheskoe-soprotivlenie-ot-temperatury-dlja-razlichnyh-marok-stalej-i-splavov/> (дата обращения 11.07.2021).
- [18] Саранчук В.И., Ошовский В.В., Лавренко А.Т., Кошкарев Я.М. Метод определения величины электрического сопротивления угля в зависимости от температуры. *Наукові праці донецького національного технічного університету. Серія: «Хімія і хімічна технологія»*, 2008, № 134 (10), с. 138–143.
- [19] Агроскин А.А., Петренко И.Г. Электросопротивление сланцев и углей при нагревании. *Изв. АН СССР. ОТН*, 1950, № 1, с. 89–100.

Статья поступила в редакцию 21.07.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливных каналах тепловых двигателей и энергоустановок.

*Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2119>



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

## **Elaboration of a new calculation procedure of hydrocarbon deposit layer thickness in fuel channels of heat engines and power plants**

© K.V. Altunin

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

*The article is devoted to theoretical research connected with elaboration of a new calculation procedure for hydrocarbon deposit layer thickness. A common problem of deposit formation in heat engines and power plants is thoroughly investigated. In addition, the wall composition, temperature, time and a number of life cycles, etc. are mentioned as key factors that have direct influence on this heat phenomenon. The paper describes thermophysical properties of deposits in fuel feed systems of different engines. The literature search and analysis did not reveal any similar procedures of calculation of hydrocarbon deposit layer thickness that could be connected with electrical properties of a wall or a deposit. The paper presents new equations for calculating the deposit formation thickness and rate based upon thermal and electrical nature of this process. These new equations led to elaboration of the new calculation procedure of hydrocarbon deposit layer thickness on a metal wall for any fuel channel of a heat engine or a power plant based on liquid hydrocarbon fuel or coolant. The new calculation technique was verified by experiments in aviation kerosene boiling in volume, which clarified special features in the application of new equations. Owing to the universal character of the proposed technique, it can be used for calculating the deposit formation virtually in all the known heat engines and power plants, for various operating conditions, for different metal wall compositions, at various fuel flow rates and pressures, temperature regimes inside fuel-feed and cooling channels.*

**Keywords:** deposit formation, electrical resistivity, temperature, porosity, liquid hydrocarbons, hydrocarbon deposit

### REFERENCES

- [1] Chertkov Ya.B. *Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizelnye topliva* [Modern and perspective hydrocarbon and diesel fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1968, 356 p.
- [2] Van Nostrand W.Z., Leach S.H., Haluske J. *Economic Penalty Associated with the Fouling of Refinery Heat Transfer Equipment*. Washington, 1981, pp. 619–643.
- [3] Altunin V.A., Altunin K.V., Dresvyannikov F.N., et.al. Problemy vnutrikamernykh teplovykh processov v aviacionnykh, aerokosmicheskikh i kosmicheskikh energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya [Problems of intrachamber thermal processes in aviation, aerospace and space reusable power plants]. *Sb. tez. dokl. Mezhdunar. nauchnogo seminar «Problemy modelirovaniya i dinamiki slozhnykh mezhdisciplinarnykh sistem»* [Proc. of Intern. Scient. Seminar “Problems of modeling and dynamics of complex interdisciplinary systems”]. Kazan, KNITU—KAI Publ., 2010, p. 12.

- [4] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostej teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i ohladitelyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispol'zovaniya. Kniga pervaya*. [Study of the peculiarities of heat transfer to hydrocarbon fuels and refrigerants in reusable power plants. Book one]. Kazan, KSU Publ., 2005, 272 p.
- [5] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivah* [Physical and chemical basis of sediment formation in jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.
- [6] Kalghatgi G.T. Combustion chamber deposits in spark-ignition engines: a literature review. *SAE*, 1995, paper no. 952443.
- [7] Karamangil M.I., Avci A., Bilal H. *Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 44, pp. 587–598.
- [8] Kelemen S.R., Siksin M., Avery N.L., Rose K.D., Solum M., Pugmire R.J. Gasoline type and engine effects on equilibrium combustion chamber deposits (CCD). *SAE*, 2001, paper no. 2001-01-3583.
- [9] Altunin K.V. *Razrabotka gorelok povyshennoj effektivnosti dlya teplovykh elektrostancij: monografiya* [Development of high efficiency burners for thermal power plants: monograph]. Kazan: KNITU—KAI Publ., 2016, 136 p.
- [10] Yanovskij L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Sapgir G.B. *Koksootlozheniya v aviacionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Carbon deposits in aircraft and rocket engines]. Kazan, Abak Publ., 1999, 284 p.
- [11] Shlyakotin V.E., Shihman Yu.M. *Aviatsionnye dvigateli — Aviation Engines*, 2019, no. 3 (4), pp. 57–62.
- [12] Altunin V.A., Monda V.A., Ablyasova A.G., Altunin K.V., et.al. Vliyanie uglevodorodnykh goryuchih na korroziyu detalej energoustanovok i tekhnosistem mnogorazovogo ispol'zovaniya v nazemnykh i kosmicheskikh usloviyakh [Influence of hydrocarbon fuels on the corrosion of parts of power plants and technological systems of reusable use in ground and space conditions]. *Mater. dokl. 22 Vseross. mezhvuz. nauchno-tekhn. konf. «Elektromekhanicheskie i vnutrikamernye processy v energeticheskikh ustanovkakh, strujnaya akustika i diagnostika, pribory i metody kontrolya prirodnoj sredy, veshchestv, materialov i izdelij»* [Proc. of 22<sup>nd</sup> All-Russ. Ac. Scient. Conf. “Electromechanical and intra-chamber processes in power plants, jet acoustics and diagnostics, devices and methods for monitoring the environment, substances, materials and products”]. Kazan, Otechestvo Publ., 2010, Part 2, pp. 87–88.
- [13] Altunin K.V., Gortyshov Yu.F., Galimov F.M., et.al. *Energetika Tatarstana – Power Engineering of Tatarstan*, no. 2, 2010, pp. 10–17.
- [14] Altunin K.V. Opredelenie skorosti osadkoobrazovaniya v energoustanovkakh mnogorazovogo ispol'zovaniya na uglevodorodnykh goryuchih [Determination of deposition rate in reusable power plants based on hydrocarbon fuels]. *Mater. dokl. 6 Vseross. nauchno-tekhn. studench. konf. «Intensifikaciya teplo- i massoobmennykh processov v khimicheskoi tekhnologii»* [Proc. of 6<sup>th</sup> All-Russ. Scient. Techn. Stud. Conf. “Intensification of heat and mass transfer processes in chemical technology”]. Kazan, Butlerovskoe nasledie Publ., 2010, pp. 41–45.
- [15] Altunin K.V. *Sposob prognozirovaniya osadkoobrazovaniya v energoustanovkakh mnogorazovogo ispol'zovaniya na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i ohladitelyakh* [Method for predicting sediment formation in reusable power plants on liquid hydrocarbon fuels and refrigerants]. Patent RF, no. 2467195, 2012.

- [16] Altunin K.V. Model idealnogo osadkoobrazovaniya v energoustanovkah mnogorazovogo ispolzovaniya na zhidkih uglevodorodnyh goryuchih i ohladitelyah [Model of ideal sedimentation in reusable power plants on liquid hydrocarbon fuels and refrigerants]. *Mater. dokl. 18 Mezhdunar. molodyozh. nauchnoj konf. «Tupolevskie chteniya»* [Proc. 18<sup>th</sup> Int. Conf. “Tupolev’s Readings”]. Kazan, KNITU—KAI Publ, 2010, vol. 2, pp. 66–68.
- [17] *Udelnoe elektricheskoe soprotivlenie ot temperatury dlya razlichnyh marok staley i splavov* [Resistivity as a function of temperature for various grades of steels and alloys]. Available at: <https://extxe.com/21002/udelnoe-jelektricheskoe-soprotivlenie-ot-temperatury-dlja-razlichnyh-marok-stalej-i-splavov/> (accessed July 11, 2021).
- [18] Saranchuk V.I., Oshovskiy V.V., Lavrenko A.T., Koshkarev Ya.M. *Naukovi praci Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: "Khimiya i khimichna tekhnologiya"* (Research works of the Donetsk national technical university. Series: “Chemistry and chemical technology”), 2008, no. 134 (10), pp. 138–143.
- [19] Agroskin A.A., Petrenko I.G. *Elektrosoprotivlenie slantsev i ugley pri nagrevanii* [Electrical resistance of shale and coal when heated]. AN SSSR. OTN Publ., 1950, no. 1, pp. 89–100.

**Altunin K.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. Specializes in heat transfer, heat transfer in liquid and gaseous hydrocarbon fuels; author of inventions (utility models) in the field of heat exchange, transport, sports. e-mail: altkonst881@yandex.ru