

Разработка химического симплекса учета осадкообразования на стенках топливно-подающих каналов двигателей и энергоустановок

© К.В. Алтунин

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

Представлено теоретическое исследование, связанное с разработкой нового симплекса учета осадкообразования. Данный симплекс отличается от существующих критериев подобия и симплексов теплообмена тем, что является химическим, состоит из массовых долей некоторых компонентов топлива, металлической стенки и осадков. Подробно рассмотрена проблема образования углеродсодержащих осадков на нагретых стенках топливных каналов энергоустановок и двигателей. Показаны основные условия возникновения и свойства углеродсодержащего осадка, его зависимость от многих факторов, включая температуру, количество циклов, наличие присадок в топливе и др. Приведены реальные данные по некоторым теплофизическим свойствам осадков в разных двигателях, а также металлы-катализаторы и металлы-ингибиторы окисления и осадкообразования. Созданный химический симплекс может быть успешно применен при создании новых критериев уравнений теплообмена, которые будут более точными; они могут быть использованы при нахождении коэффициента теплоотдачи в топливно-подающих каналах двигателей и энергоустановок.

Ключевые слова: симплекс, осадкообразование, массовая доля, теплоотдача, углеводородное горючее

Список сокращений и основных обозначений

ВРД	— воздушно-реактивный двигатель
ДВС	— двигатель внутреннего сгорания
ЖРД	— жидкостный ракетный двигатель
ЛА	— летательный аппарат
УВГ	— углеводородное горючее
УВО	— углеводородный охладитель
ЭУМИ	— энергетическая установка многоразового использования
a	— температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$
C_p	— удельная изобарная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
F	— площадь, м^2
p	— давление, Па
Q	— тепловой поток, Вт
t	— температура, $^{\circ}\text{C}$
t_f	— температура флюида, $^{\circ}\text{C}$
t_w	— температура стенки, $^{\circ}\text{C}$
W	— скорость прокачки, м/с
$\delta_{\text{ос}}$	— осадкообразование, толщина слоя углеродсодержащего осадка, м
λ	— коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

λ_{oc}	— коэффициент теплопроводности слоя осадка, Вт/(м·К)
μ	— динамическая вязкость, Па·с
ν	— кинематическая вязкость, м ² /с
τ	— время, с
Nu	— критерий Нуссельта
Gr	— критерий Грасгофа
Pr	— критерий Прандтля
Ra	— критерий Рэлея
Re	— критерий Рейнольдса
De	— симплекс осадкообразования
De _{Ch}	— химический симплекс учета осадкообразования

Введение. Термин «осадкообразование» появился во второй половине XX в. в связи с интенсивным применением реактивных топлив, он встречается, например, в работе Я.Б. Черткова [1]. Процесс осадкообразования в жидких углеводородных горючих (УВГ) и охладителях (УВО) оказывает негативное влияние на работу различных двигателей и энергоустановок многократного использования (ЭУМИ) наземного, аэрокосмического и космического базирования. На борьбу с образованием углеродистых отложений в промышленности США ежегодно выделяется около 10 млрд долл. Только для обычного нефтеперерабатывающего завода ежегодные затраты составляют до 10 млн долл. [2]. Подобные проблемы отмечаются и в теплоэнергетике, ракетостроении, авиации [3]. Так, из 210 летных происшествий в течение одного года в военно-воздушных силах США около 30 % были связаны с неполадками двигателей из-за ненадежной работы топливно-регулирующей аппаратуры [4].

Цель исследования — разработка нового химического симплекса учета образования углеродсодержащих осадков на стенках топливно-подающих каналов двигателей и энергетических установок.

Анализ влияния термического процесса образования углеродсодержащих осадков на работу двигателей и энергоустановок. В общем, процесс осадкообразования в топливной системе воздушно-реактивного двигателя (ВРД) приводит [4, 5] к заседанию золотников в насосах-регуляторах, что ведет к «зависанию» оборотов двигателя при числе оборотов, составляющем 60...70 % максимальных; к повышению времени приемистости или помпажу двигателя; к самовыключению двигателя на земле или в воздухе; к частичному или полному закупориванию форсуночных фильтров и форсуночных каналов, что ведет к частичной или полной потере тяги, к неправильной организации распыла, например струйного (рис. 1), и горения, к изменению эпюры температурного поля газового потока, к короблению и прогару стенок жаровых труб и возгоранию двигателя, к аварии.

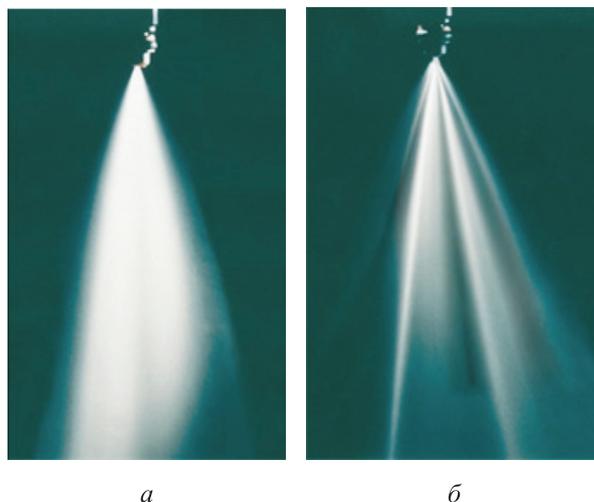


Рис. 1. Работа топливной форсунки: *а* — до процесса осадкообразования (расчетный струйный распыл); *б* — после частичного закоксовывания выходного отверстия канала распылителя форсунки (нерасчетный струйный распыл)

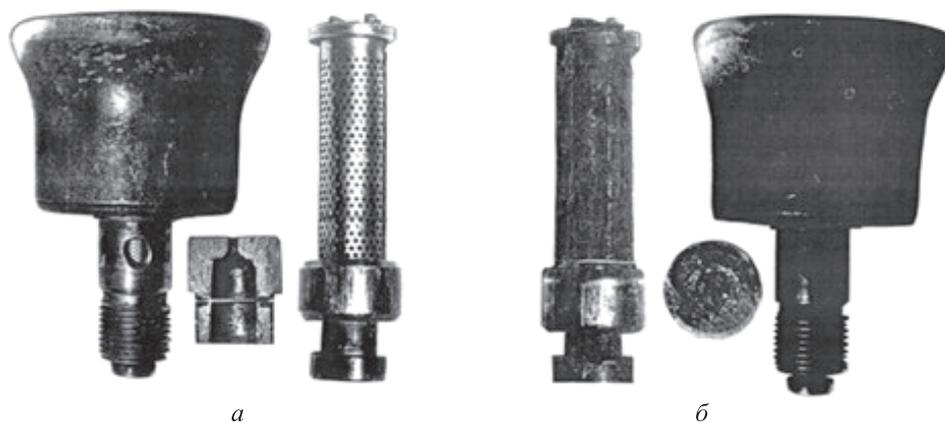


Рис. 2. Форсунка ВРД НК-8-2У самолета Ту-154 до эксплуатации (*а*) и после 900 циклов эксплуатации с осадком (*б*)

Известно, что примерно через 900 циклов работы ВРД НК-8-2У в самолете Ту-154 его форсунки полностью закоксовываются (рис. 2), а двигатель подлежит капитальному ремонту: снятию с самолета с дальнейшей отправкой на завод; промывке в заводских условиях специальными агрессивными жидкостями с дальнейшей утилизацией получаемых продуктов, что связано с большими экологическими трудностями; замене закоксованных фильтров и форсунок и т. д.

Осадкообразование может иметь место не только в ВРД, ЖРД, применяемых для летательных аппаратов (ЛА). Этот процесс также наблюдается и в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) [6, 7].

Интересно, что осадкообразование может приводить как к отрицательным, так и к положительным явлениям. Например, с увеличением толщины углеродистого слоя уменьшаются потери теплоты, а температура выпускного клапана ДВС снижается, при этом поверхности клапана подвержены меньшим тепловым нагрузкам [7]. В то же время возможны нежелательные явления, когда горючая смесь воспламеняется независимо от искры путем контакта с нагретыми участками в камере сгорания ДВС, в частности подобные явления может вызвать рост осадка, содержащего свинец, кальций, соли бария из масла [6]. В системах смазки ДВС также может наблюдаться образование углеродсодержащих осадков [8].

Условия возникновения и свойства углеродсодержащего осадка. Исследования в области процессов осадкообразования выявили основную закономерность: в жидких УВГ (УВО) образование осадков происходит вследствие повышения температуры их нагрева [1, 4, 9]. Кроме того, с повышением температуры интенсифицируется коррозия металлов [1]. Влияние температуры на размеры частиц осадка приведено в табл. 1. Для каждого топлива, горючего, охладителя существует температура максимального осадкообразования, например: для Т-2 — 135 °С; ТС-1 — 150 °С; Т-1 — 160 °С; для Т-5 — 180 °С. Температура 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 в ЭУМИ зависит от многих факторов [4, 10]:

$$\delta_{ос} = f(T_w, T_f, p, W, M, П, K_{ш}, K_{O_2}, K_{и.г}, X, N, G, E, \tau \text{ и др.}), \quad (1)$$

где T_w — температура стенки (канала со стороны УВГ, УВО), К; T_f — температура жидкого (газообразного) УВГ, УВО, К; p — давление в топливно-охлаждающей системе, Па; W — скорость прокачки УВГ (УВО), м/с; M — материал стенки; $П$ — присадки, %; $K_{ш}$ — степень шероховатости поверхности; K_{O_2} — насыщенность кислородом, %; $K_{и.г}$ — насыщенность инертными газами, %; X — вид УВГ (УВО), его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства; N — число циклов работы ЭУМИ; G — геометрические характеристики внутренних узлов топливно-охлаждающих систем (расстояния между деталями, габариты выемок (лунок) и т. д.), м; E — электростатические поля, В/м; τ — время наработки, с.

В работе [11] толщину отложений измеряли в разных областях камеры сгорания ДВС и нашли средние значения, равные 155...240 мкм. В [6] получены следующие значения осадка: $\rho = 1100...2000 \text{ кг/м}^3$; $C_p = 0,84...1,84 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\lambda = 0,17...0,8 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $a = 3,5\cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

**Влияние температуры на распределение осадка на фильтрах
в некоторых реактивных горючих**

Температура, °С	Общее количество осадка, м ² /100 мл	Распределение осадка, %, при частицах размером			
		1–2 мкм	30 мкм	60 мкм	120 мкм
<i>ГФ</i>					
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
<i>Т-7</i>					
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

Средняя плотность кокса от авиационного УВГ, определенная по его твердой части, составляет 0,08 г/см³. Коэффициент теплопроводности углеродистого осадка, образованного при кипении УВГ, для каждого топлива оказался слабо зависимым как от времени наработки (в пределах первых 10 часов), так и от температуры стенки. Для РТ и Т-6 этот коэффициент составил $\lambda_{oc} = 0,29$ Вт/(м·К), для парафиновых УВГ — $\lambda_{oc} = 0,36$ Вт/(м·К) [9].

Среди металлов есть как катализаторы, так и ингибиторы окисления и осадкообразования. Металлы-катализаторы окисления по активности образуют следующий ряд: Pb > Cu > Sn > Cr > Al > Fe, а металлы-ингибиторы окисления — ряд: Nb > Zn > Ni > W > Mg > Mo [9]. В случае применения эмалей на поверхности металлических сплавов также возможно снижение количества осадка, хотя осадкообразование все же имеет место [12].

Безусловно, необходимо вести борьбу с осадкообразованием уже на начальной стадии проектирования и создания ЭУМИ. Для этого нужно знать природу осадкообразования, проводить экспериментальные исследования, правильно и эффективно выбирать способы борьбы с этим явлением. Для более точного определения коэффициента теплоотдачи также необходимо создавать новые числа подобия и симплексы учета осадкообразования.

Симплекс осадкообразования. На основе анализа источников информации и проведенных экспериментальных исследований разработан безразмерный симплекс учета осадкообразования *De* (от англ. deposit — осадок) [13]:

$$De = \frac{T_w \lambda_f \delta_{oc} F_{oc}}{T_f \lambda_{oc} \delta_{oc. max} F_{oc. max}}, \quad (2)$$

где T_w — температура нагретой стенки канала, К; T_f — температура УВГ (УВО), К; λ_f — коэффициент теплопроводности УВГ (УВО), Вт/(м·К); λ_{oc} — коэффициент теплопроводности слоя осадка, Вт/(м·К); δ_{oc} — толщина текущего слоя осадка, мм; $\delta_{oc. max}$ — максимально возможная толщина слоя осадка, мм; F_{oc} — площадь детали (пластины, трубки), покрытая слоем осадка, мм²; $F_{oc. max}$ — максимально возможная площадь детали (пластины, трубки), которая может быть покрыта слоем осадка, мм².

Используя симплекс De , можно найти число Nu применительно к описанию теплообмена при естественной конвекции при осадкообразовании:

$$Nu = k Gr^a Pr^b De^{-c}, \quad (3)$$

где k, a, b, c — эмпирические константы; Gr — число Грасгофа; Pr — число Прандтля; De — симплекс учета осадкообразования.

Уравнение (3) можно переписать в виде

$$Nu = k Ra^n De^{-c}, \quad (4)$$

где k, n, c — эмпирические константы; Ra — число Рэлея.

Аналогично можно записать выражение для нахождения Nu при вынужденной конвекции:

$$Nu = m Re^x Pr^y De^{-c}, \quad (5)$$

где m, x, y, c — эмпирические константы; Re — число Рейнольдса.

В формулах (3)–(5) имеются эмпирические константы (k, a, b, c, n, m, x, y), которые определяются индивидуально на основе экспериментальных данных или при проведении экспериментальных исследований. Например, проведен расчет по экспериментальным данным при естественной конвекции и осадкообразовании на стальной пластинке в среде керосина марки ТС-1, в результате которого получена формула

$$Nu_{oc} = 0,12 Ra^{0,2} De^{-0,8}, \quad (6)$$

где Nu_{oc} — число Нуссельта при влиянии осадкообразования; $41 \cdot 10^3 < Ra < 75 \cdot 10^6$; $0,051 < De < 0,1$; $\delta_{oc} = 0,05 \dots 1,0$ мм; $p = 0,1 \dots 0,5$ МПа.

Разработка химического симплекса учета осадкообразования. Разработанный симплекс осадкообразования De может эффективно применяться для нахождения числа Нуссельта, а затем и коэффици-

ента теплоотдачи при образовании и росте углеродсодержащих осадков на нагретых стенках в среде жидкого УВГ. Однако в ходе эксплуатации двигателей и ЭУМИ возможны ситуации, когда применяются разные УВГ с присадками и без присадок; материал стенок и участков топливных каналов разный; осадки разной структуры и химического состава и т. д. В связи с этим необходимо разрабатывать новые симплексы и критерии подобия, учитывающие химический состав стенки, топлив и осадков.

Проведено теоретическое исследование по нахождению химического симплекса учета осадкообразования De_{Ch} , состоящего из симплекса учета состава жидкого УВГ De_{Ch_f} , симплекса учета состава стенки De_{Ch_w} и симплекса учета состава осадка $De_{Ch_{oc}}$:

$$De_{Ch} = De_{Ch_w} De_{Ch_f} De_{Ch_{oc}}, \quad (7)$$

где

$$De_{Ch_w} = \left(\frac{1 + 6M_{Pb} + 5M_{Cu} + 4M_{Sn} + 3M_{Cr} + 2M_{Al} + M_{Fe}}{1 + 5M_{Nb} + 4M_{Zn} + 3M_{Ni} + 2M_{W} + M_{Mg}} \right), \quad (8)$$

где M_{Pb} — массовая доля свинца; M_{Cu} — массовая доля меди; M_{Sn} — массовая доля олова; M_{Cr} — массовая доля хрома; M_{Al} — массовая доля алюминия; M_{Fe} — массовая доля железа; M_{Nb} — массовая доля ниобия; M_{Zn} — массовая доля цинка; M_{Ni} — массовая доля никеля; M_{W} — массовая доля вольфрама; M_{Mg} — массовая доля магния;

$$De_{Ch_f} = \left(\frac{1 + M_{O_2} + M_{аром. УВГ}}{1 + 100M_{прис}} \right), \quad (9)$$

где M_{O_2} — массовая доля кислорода; $M_{аром. УВГ}$ — массовая доля ароматических УВГ; $M_{прис}$ — массовая доля антиосадкообразующих присадок;

$$De_{Ch_{oc}} = \left(\frac{1 + M_S + M_C + M_{O_2}}{1 + M_{Cu} + M_{Fe}} \right), \quad (10)$$

где M_S — массовая доля серы; M_C — массовая доля углерода; M_{O_2} — массовая доля кислорода; M_{Cu} — массовая доля меди; M_{Fe} — массовая доля железа.

Таким образом, для нахождения значения химического симплекса учета осадкообразования De_{Ch} при применении определенного УВГ и материала стенки, а также приблизительно известном составе осадков, необходимо использовать массовые доли компонентов. В случае, если состав дан в процентах, значения переводятся в массовые доли делением на 100.

Для условий осадкообразования на нагретой пластинке из стали марки X18H10T в среде керосина ТС-1 проведен расчет числа De_{Ch} . Известно, что эта сталь содержит, %: 67 Fe, 1 Ti, 18 Cr и 10 Ni. Исходя из этих данных, по формуле (8) получим:

$$De_{Ch_w} = \left(\frac{1 + 3 \cdot 0,18 + 0,67}{1 + 3 \cdot 0,1} \right) = 1,7.$$

Кислород в керосине может содержаться в количестве 0,2...0,5 %, а ароматические УВГ — 22 %. Антиосадкообразующие присадки могут быть введены в топливо на уровне 0,1 %, но жидкое УВГ также может быть без аналогичных присадок. Нетрудно подсчитать симплекс De_{Ch_f} без присадок по (9):

$$De_{Ch_f} = \left(\frac{1 + 0,002 + 0,22}{1} \right) = 1,222.$$

В составе углеродсодержащего осадка может быть, %: 6,5 S; 50 C; 22,2 O₂; 11,2 Cu; 0,7 Fe. На основе этих данных получено: по формуле (10)

$$De_{Ch_{oc}} = \left(\frac{1 + 0,065 + 0,5 + 0,222}{1 + 0,112 + 0,007} \right) = 1,597;$$

по формуле (7)

$$De_{Ch} = 1,7 \cdot 1,222 \cdot 1,597 = 3,32.$$

Можно провести небольшое сравнение с осадкообразованием на медной пластинке. Если материал стенки — чистая медь, то по формуле (8):

$$De_{Ch_w} = \left(\frac{1 + 5 \cdot 1}{1} \right) = 6,$$

тогда $De_{Ch} = 6 \cdot 1,222 \cdot 1,597 = 11,71$.

Таким образом, значение химического симплекса De_{Ch} при использовании стенки из чистой меди при тех же условиях эксплуатации и одинаковом составе топлива возрастает в 3,53 раза по сравнению с тем, что имеет место в случае стальной стенки.

Результаты некоторых исследований по влиянию металлов материала стенки топливного канала на образование углеродсодержащего осадка [4] приведены на рис. 3.

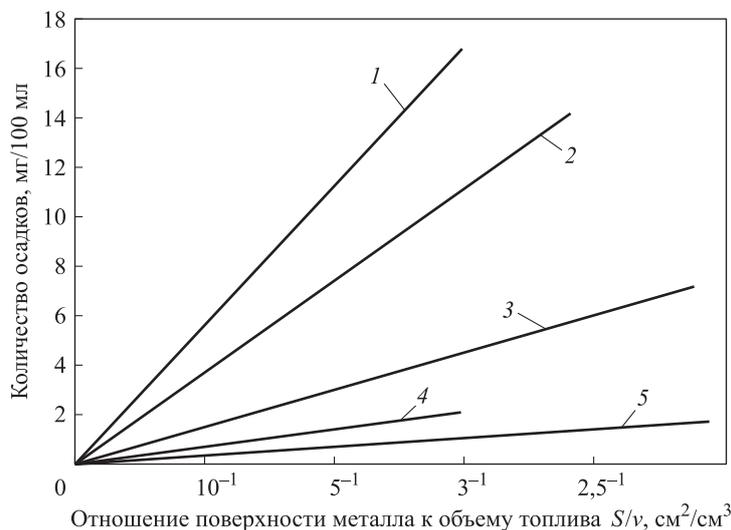


Рис. 3. Влияние металлов на образование осадков в топливе (керосин ТС-1 при температуре $t=150$ °С):

1 — медь; 2 — бронза; 3 — латунь Л62; 4 — дуралюмин; 5 — сталь марки 12ХНЗА

По данным на рис. 3 можно сделать вывод о том, что количество образующегося углеродсодержащего осадка при применении стенки из меди значительно больше, чем при использовании стенки из нержавеющей стали.

Если применить новый химический симплекс учета осадкообразования De_{Ch} , выражения для критериальных уравнений (4) и (5) можно представить в следующем виде:

$$Nu = k Ra^n De^{-c} De_{Ch}^{-v}, \quad (11)$$

где k, n, c, v — эмпирические константы;

$$Nu = m Re^x Pr^y De^{-c} De_{Ch}^{-r}, \quad (12)$$

где m, x, y, c, r — эмпирические константы.

Заключение. Таким образом, проведено теоретическое исследование по нахождению химического симплекса учета осадкообразования на стенке топливного канала теплового двигателя или ЭУМИ. Проведен анализ источников информации, исходя из которого можно сделать вывод, что химический состав стенки, топлива, а также самого слоя углеродсодержащего осадка не учитываются при выводе формул теплообмена.

Вполне возможно, что полученный химический симплекс учета осадкообразования будет эффективно применен при нахождении числа Нуссельта, а затем — и коэффициента теплоотдачи, что значительно повысит точность тепловых расчетов. В этом направлении 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.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 International Journal of Fuels and Lubricants*, 1995, vol. 104. DOI: 10.4271/952443
- [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] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Щиголов А.А., Платонов Е.Н. Разработка способов увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей внутреннего сгорания наземного транспорта. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 10 (667), с. 47–57.
- [9] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999, 284 с.
- [10] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Галимов Ф.М. и др. Проблема осадкообразования в энергетических установках многократного использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Вестник Казанского государственного технологического университета*, 2010, № 5, с. 96–102.
- [11] 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 Technical Papers*, 2001. DOI: 10.4271/2001-01-3583
- [12] Харин А.А. *Химотологическое обеспечение надежности авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, Европейский центр по качеству, 2002, 288 с.
- [13] Алтунин К.В. Разработка критериального уравнения влияния электростатических полей на теплообмен и осадкообразование в среде керосина при естественной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 1 (109). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-1-2049

Статья поступила в редакцию 07.07.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин К.В. Разработка химического симплекса учета осадкообразования на стенках топливно-подающих каналов двигателей и энергоустановок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2110>



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

Development of a chemical simplex of deposit formation on the walls of the fuel supply channels of engines and power plants

© K.V. Altunin

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

The article describes a theoretical research related to development of a new simplex of deposit formation. This simplex differs from the existing similarity criteria and heat transfer simplices in that it is chemical and consists of the mass fractions of some fuel components, a metal wall and deposits. The problem of the formation of carbon-containing deposits on the heated walls of the fuel supply channels of power plants and engines is considered in detail. The main conditions for the occurrence of carbon-containing deposit and its properties, as well as its dependence on many factors, including temperature, number of cycles, the presence of additives in fuel, etc., are shown. For some thermophysical properties of deposits in different engines real data are given, as well as data on metals-catalysts and metals-inhibitors of oxidation and sedimentation. The obtained chemical simplex can be successfully used when creating new heat transfer criterion equations that would be much more accurate and applied for the following determination of heat transfer coefficients in fuel supply channels of engines and power plants.

Keywords: simplex, deposit formation, mass fraction, heat transfer, hydrocarbon fuel

REFERENCES

- [1] Chertkov Ya.B. *Sovremennyye i perspektivnyye uglevodorodnyye reaktivnyye i dizelnyye topliva* [Current and promising hydrocarbon jet 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 protsessov v aviatsionnykh, aerokosmicheskikh i kosmicheskikh energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya [Problems of intrachamber thermal processes in aviation, aerospace and space power plants of reusable application]. In: *Sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar «Problemy modelirovaniya i dinamiki slozhnykh mezhdisciplinarnykh sistem»* [Collection of abstracts of the International Scientific Seminar “Problems of Modeling and Dynamics of Complex Interdisciplinary Systems”]. Kazan, Kazanskiy natsionalnyy issledovatel'skiy tekhnicheskii universitet im. A.N. Tupoleva Publ., 2010, p. 12.
- [4] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitel'yam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya. Kniga pervaya* [Research of the peculiarities of heat transfer to hydrocarbon fuels and refrigerants in reusable power plants. Book one]. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy universitet im. V.I. Ulyanova–Lenina Publ., 2005, 272 p.
- [5] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physicochemical basis of deposit formation in jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.

- [6] Kalghatgi G.T. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 1995, October, Paper no. 952443. DOI: 10.4271/952443
- [7] Karamangil M.I., Avci A., Bilal H. *Heat Mass Transfer*, 2008, vol. 44, pp. 587–598.
- [8] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Platonov E.N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 10 (667), pp. 47–57.
- [9] Yanovsky L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Saggir G.B. *Koksootlozheniya v aviacionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Coke deposits in aircraft and rocket engines]. Kazan, Abak Publ., 1999, 284 p.
- [10] Altunin V.A., Altunin K.V., Galimov F.M., Gortyshev Yu.F., Dresvyannikov F.N., Yanovsky L.S. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta — Herald of Kazan State Technological University*, 2010, no. 5, pp. 96–102.
- [11] Kelemen S.R., Siksin M., Avery N.L., Rose K.D., Solum M., Pugmire R.J. *SAE Technical Papers*, 2001, September, Paper no. 2001-01-3583. DOI: 10.4271/2001-01-3583
- [12] Kharin A.A. *Himnologicheskoe obespechenie nadezhnosti aviacionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Chemical assurance of reliability of aircraft gas turbine engines]. Moscow, Evropeyskiy centr po kachestvu Publ., 2002, 288 p.
- [13] Altunin K.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 1 (109). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-1-2049

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